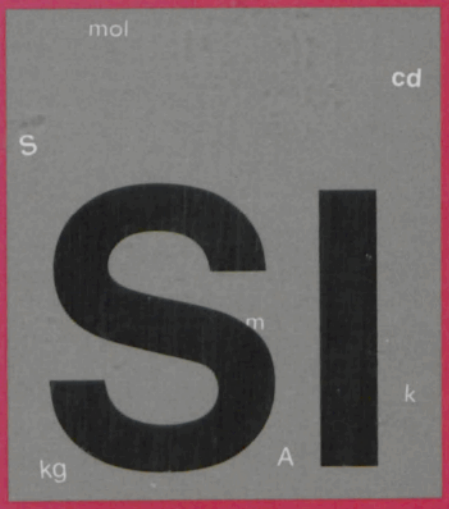
Eenhedenstelsels en groothedenvergelijkingen:

overgang naar het



veirne

Eenhedenstelsels en groothedenvergelijkingen

Eenhedenstelsels en groothedenvergelijkingen: overgang naar het SI

W. Taveirne

Pudoc Wageningen 1990

CIP-gegevens, Koninklijke Bibliotheek, Den Haag

Taveirne, W.

Eenhedenstelsels en groothedenvergelijkingen: overgang naar het SI / W. Taveirne. – Wageningen: Pudoc. – Ill. Met reg.
ISBN 90-220-1031-7
SISO 631.6
UDC 53.081: 631/632
NUGI 812
Trefw.: SI in de landbouw.

ISBN 90-220-1031-7
NUGI 812

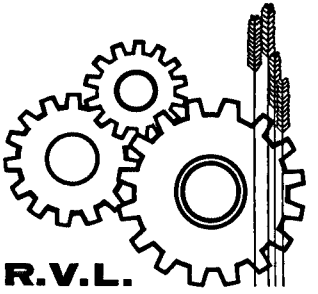
© Centrum voor Landbouwpublikaties en Landbouwdocumentatie (Pudoc), Wageningen, 1990

Niets uit deze uitgave, met uitzondering van titelbeschrijving en korte citaten ten behoeve van een boekbespreking, mag worden gereproduceerd, opnieuw vastgelegd, vermenigvuldigd of uitgegeven door middel van druk, fotokopie, microfilm, langs elektronische of elektromagnetische weg of op welke andere wijze ook, zonder schriftelijke toestemming van de uitgever, Pudoc, Postbus 4, 6700 AA Wageningen. Voor alle kwesties inzake het kopiëren uit deze uitgave: Stichting Reprorecht, Amsterdam.

Gedrukt in Nederland.

Wilfried Taveirne is in 1954 afgestudeerd als landbouwkundig ingenieur aan de Katholieke Universiteit van Leuven. Sinds 1956 is hij werkzaam als wetenschappelijk onderzoeker aan het Rijksstation voor Landbouwtechniek, Van Gansberghelaan 115, B-9220 MERELBEKE. Het Rijksstation voor Landbouwtechniek maakt deel uit van het Centrum voor Landbouwkundig Onderzoek Gent van het Ministerie van Landbouw. De auteur beschouwt zijn boek gedeeltelijk als een vervolg op en een aanvulling van het boek 'Grootheden en eenheden in de landbouw en de biologie' (Schurer & Rigg 1980).

Ministerie van Landbouw, België
Centrum voor Landbouwkundig Onderzoek, Gent
Rijksstation voor Landbouwtechniek, Merelbeke



Dankwoord

Dit werk is tot stand gekomen met de zeer gewaardeerde medewerking van:
mevrouw *Diane De Coninck*, die de met de hand geschreven tekst in een voorlopige getypte tekst (die achteraf nog grondig omgewerkt en aangevuld werd) heeft omgezet;
mevrouw *Martine De Nijs*, die op een zeer verzorgde wijze het definitief daktylografisch werk heeft uitgevoerd;
mijn medewerker de heer *Roland Tavernier*, die met grote nauwgezetheid de getypte teksten heeft nagelezen en ook het tekenwerk heeft verricht.
Ik dank hen oprecht om de inzet en de toewijding waarmede zij hun taak hebben volbracht.

Wilfried Taveirne

Ten geleide

Bij de studie van een koherent eenhedenstelsel kan men de leer van de groothedenvergelijkingen niet buiten beschouwing laten: uitgezonderd de grondeenheden, worden immers alle overige koherente eenheden in het betrokken eenhedenstelsel afgeleid uit groothedenvergelijkingen. Dit verklaart het eerste gedeelte van de titel van dit boek: 'Eenhedenstelsels en groothedenvergelijkingen'.

Hoofdstuk I handelt over overeenkomsten, normalisatie en wetgeving inzake eenheden. De leer betreffende de groothedenvergelijkingen en de begrippen koherentie en dimensie worden uiteengezet in hoofdstuk II. De zeven grondeenheden van het SI (m, kg, s, A, K, mol, cd), de twee aanvullende SI-eenheden (rad, sr), de eenheden uit de geluidsleer en vele andere, al dan niet tot het SI behorende eenheden worden uitvoerig beschreven in de hoofdstukken III tot en met IX. Hierbij komen de volgende eenhedenstelsels uitvoerig aan bod: het metriek stelsel, het CGS-stelsel, het MKS-stelsel, het MTS-stelsel, het kwadrantstelsel en het MKSA- of Giorgi-stelsel. Van een aantal eenheden wordt ook de herkomst en de geschiedenis weergegeven, zodat kan worden nagegaan hoe het allemaal ontstaan en verder geëvolueerd is. Hoofdstuk X behandelt de SI-eenheden (grondeenheden en afgeleide eenheden) en andere blijvend erkende eenheden die samen de wettelijke eenheden uitmaken. Het technisch eenhedenstelsel (TS), dat vroeger in de techniek algemeen gebruikelijk was, is uitvoerig behandeld in hoofdstuk XI. In hoofdstuk XII worden een aantal eenheden opgesomd die thans vervallen zijn of niet meer universeel worden erkend.

Hoofdstuk XIII handelt over de grootheden massa en (norm)gewicht, als inleiding tot het uitgebreide hoofdstuk XIV, waarin aan de hand van talrijke voorbeelden uitvoerig wordt aangetoond hoe men overgaat van TS-groothedenvergelijkingen (vergelijkingen waarin de grootheid normgewicht voorkomt) naar SI-groothedenvergelijkingen (waarin dan de grootheid massa voorkomt als tegenhanger van de grootheid normgewicht in het TS). Dit verklaart het tweede gedeelte van de titel van dit boek: 'Overgang naar het SI'.

Hoofdstuk XV tenslotte is gewijd aan de Angelsaksische eenheden en eenhedenstelsels.

Wie uitsluitend belangstelling heeft voor de wettelijke eenheden (SI-eenheden en andere erkende eenheden) en voor de overgang van het TS naar het SI (zowel wat betreft eenheden als groothedenvergelijkingen) kan zich beperken tot de hoofdstukken I, II, X, XI, XII, XIII en XIV.

Hoewel de chaotische toestand inzake eenheden historisch te verklaren is, zal de nieuwe generatie die van meet af aan enkel de SI-eenheden en de groothedenvergelijkingen in SI-notatie heeft aangeleerd, onbegrijpend neerkijken op de ongelooflijke poespas waarin men vroeger is verzeild geraakt. Toch zal ook zij in staat moeten zijn, oudere handboeken en wetenschappelijke en technische literatuur waarin verouderde eenheden en verouderde groothedenvergelijkingen voorkomen, te raadplegen en te begrijpen. De oudere generatie daarentegen, opgegroeid en vertrouwd met TS-eenheden en andere thans vervallen eenheden en met groothedenvergelijkingen in TS-notatie en met getalwaardenvergelijkingen, zal wellicht met tegenzin het SI aanvaarden. Toch zal ook zij de stap dienen te zetten naar het SI, dat thans, samen met enkele andere erkende eenheden, het enig wettelijk eenhedenstelsel is. Moge daarom dit boek een leidraad zijn voor allen, jongeren en ouderen, die in het onderwijs, de wetenschap en de techniek te maken hebben met eenheden en groothedenvergelijkingen, en aldus een bijdrage leveren in ons taalgebied tot de verwezenlijking van een op wereldschaal sinds lang nagestreefd doel, namelijk te komen tot meer 'eenheid in eenheden'!

De grote (r)evolutie inzake eenheden en eenhedenstelsels, waartoe de aanzet werd gegeven in 1948 door de 9e Algemene Konferentie voor Maten en Gewichten, kan als beëindigd beschouwd worden met het verstrijken op 31 december 1985 van de derde en laatste overgangsperiode waarin bepaalde oude eenheden nog mochten gebruikt worden. Op de 18e Algemene Konferentie voor Maten en Gewichten, die plaats had van 12 tot 18 oktober 1987, werden trouwens, voor het eerst sinds 1948, geen nieuwigheden meer ingevoerd op het gebied van eenheden. Eventuele aanpassingen, wijzigingen of aanvullingen in de toekomst zullen dan ook eerder van beperkte omvang zijn. Daarom komt de uitgave van dit boek net op tijd.

Bij de omzettingen tussen eenheden en bij de rekenvoorbeelden werden meestal de tien signifikante cijfers behouden die bekomen worden bij het uitvoeren van rekenkundige bewerkingen met behulp van elektronische rekenmachines. Dit werd gedaan om de nauwkeurigheid niet te verminderen bij aanwending van de bekomen getalwaarden bij verdere omzettingen tussen eenheden, en om, bij de uitwerking van rekenvoorbeelden langs verschillende wegen, toch volledig identieke getalwaarden te bekomen. Het zou uiteraard absurd zijn, in de praktijk steeds al deze cijfers te behouden; derhalve dienen de betrokken getalwaarden volgens behoefte op een zinvolle manier afgerond te worden.

Hoewel zeer veel aandacht werd besteed aan nauwkeurigheid en exactheid, is het nooit uitgesloten dat er onnauwkeurigheden of zelfs fouten (van welke aard ook) in dit boek geslopen zijn. Wie iets dergelijks aantreft, wordt vriendelijk verzocht dit te willen mededelen. Opbouwende kritiek is uiteraard ook welkom.

Inhoud

Hoofdstuk I

Overeenkomsten, normalisatie en wetgeving inzake meeteenheden en meetwerktuigen 1

1 Overeenkomsten en normalisatie op internationaal vlak 1
1.1 De Meterkonventie 1
1.2 De Internationale Organisatie voor Wettelijke Metrologie 8
1.3 Normalisatie 9
1.3.1 Internationale Organisatie voor Normalisatie (ISO) 9
1.3.2 Internationaal Elektrotechnisch Komitee (IEC; CEI) 11
1.3.3 Comité Européen de Normalisation (CEN) 13
1.4 Verdrag van Rome tot oprichting van de Europese Ekonomische Gemeenschap (EEG) 14
2 Huidige wetgeving en voornaamste normen inzake eenheden in België en Nederland 15
2.1 België 15
2.1.1 Wetgeving 15
2.1.2 Normen 16
2.1.3 Gebruik van de wettelijke eenheden 16
2.2 Nederland 17
2.2.1 Wetgeving 17
2.2.2 Normen 18
2.2.3 Gebruik van de wettelijke eenheden 18

Hoofdstuk II

Grootheden, eenheden, algemene groothedenvergelijkingen, getalwaardenvergelijkingen, koherentie, dimensie, schrijf- en zetwijzen 20

1 Groothedensoorten, grootheden, getalwaarde en eenheid 20
2 Basisgroothedensoorten en afgeleide groothedensoorten 22
3 Algemene groothedenvergelijkingen (fysische groothedenvergelijkingen) 24
4 Definitie van een afgeleide groothedensoort (definitievergelijking) 27
5 Koherente eenheden in het algemeen 27
6 Definitievergelijkingen en afgeleide vergelijkingen; de getalfaktor f en de grootte van koherente afgeleide eenheden 29

7	Getalwaardenvergelijkingen	36
7.1	Definitie	36
7.2	Algemene groothedenvergelijking beschouwd als een speciaal geval van een getalwaardenvergelijking	43
8	Nut van het gebruik van algemene groothedenvergelijkingen en een koherent eenhedenstelsel	43
9	Opbouw van het SI	46
10	Dimensies	49
11	Dimensiekontrole, eenhedenkontrole	53
12	Dimensieloze kengrootheden (dimensieloze parameters)	55
13	Betrekkingen tussen eenheden	57
14	Onjuiste definities van (afgeleide) grootheden bestaande uit kotiënten van grootheden; onjuiste benamingen van afgeleide grootheden	63
15	Onjuiste voorstellingen van symbolen van eenheden	68
16	Namen van grootheden, voluit geschreven	70
17	Namen van eenheden, voluit geschreven	70
18	Schrijf- en zetwijzen van symbolen van grootheden en eenheden	72
18.1	Schrijfwijze in een gedrukte tekst van symbolen van grootheden	72
18.2	Schrijfwijze in een gedrukte tekst van symbolen van eenheden	74
18.3	Enkele voorbeelden van symbolen die, kursief geschreven, een grootheid beduiden, en rechtop geschreven, een eenheid, een voorvoegsel van een eenheid of een gronddimensie	75
19	Voorstelling van produkten en kotiënten van grootheden	77
20	Voorstelling van samengestelde eenheden	79
20.1	Produkt van eenheden	79
20.2	Kotiënt van eenheden (of van twee produkten van eenheden)	81
21	Weergave in gedrukte tekst van dimensiesymbolen	82
22	Weergave in gedrukte tekst van wiskundesymbolen	82
23	Weergave van getallen in cijferschrift	83
24	Decimaal teken bij de weergave van decimale getallen in engelstalige teksten	84
25	Weergave van getalwaarden en eenheden	86
26	Weergave van scheikundesymbolen	87
27	Handschrift, schrijfmachineschrift, computertekst, telextekst	87

Hoofdstuk III

Geschiedenis van de eenheden meter, kilogram en sekonde; ontstaan en beschrijving van het metriek stelsel, het CGS-stelsel, het MKS-stelsel en het MTS-stelsel 89

1	Voorgeschiedenis	89
2	De eenheden meter en kilogram	95
2.1	Oorsprong van de meter en het kilogram en hun verdere ontwikkeling en verspreiding	95
2.2	Het 'metriek stelsel'	104
2.2.1	Eenheden van het metriek stelsel	104
2.2.2	De eenheid 'liter'	105
2.2.3	Voorbeeld van oude landmaten	106
3	Eenheid van tijdsduur (sekonde); tijdmeting; kalenderjaar	108
3.1	De middelbare zonnedag en een eerste definitie van de sekonde	108
3.2	Het siderische jaar, het tropische jaar, het anomalistische jaar	109
3.3	Het juliaanse jaar en het gregoriaanse of burgerlijke jaar	111
3.4	Wereldtijd	112
3.5	Juliaanse dagen	113
3.6	Een tweede definitie van de sekonde; efemeridentijd	114
3.7	Een derde definitie van de sekonde; atoomtijd en internationale atoomtijd	114
4	Ontstaan van het CGS-stelsel, het MKS-stelsel en het MTS-stelsel	119
5	Beschrijving van het CGS-stelsel	120
5.1	Basisgrootheden en grondeenheden van het CGS-stelsel; toepassingsgebied van de CGS-eenheden	120
5.2	Mechanische CGS-eenheden	121
5.3	Elektrostatische CGS-eenheden en elektromagnetische CGS-eenheden	123
5.4	Het elektrostatische CGS-stelsel	127
5.5	Het elektromagnetische CGS-stelsel	128
5.6	Overzicht van de voornaamste elektrostatische en elektromagnetische CGS-eenheden	130
5.7	Verband tussen het es-CGS-stelsel en het em-CGS-stelsel	130
5.8	Verband tussen enerzijds de gebruikelijke es- en em-eenheden en anderzijds de overeenkomstige SI-eenheden	137
5.9	Waarde van de permittiviteit van vacuüm ϵ_0 en de permeabiliteit van vacuüm μ_0 in de CGS-stelsels, het niet-gerationaliseerd MKSA-stelsel en het gerationaliseerd MKSA-stelsel (dat overeenstemt met het SI); waarde van de elektrische susceptibiliteit X_e en de magnetische susceptibiliteit X_m in de niet-gerationaliseerde eenhedenstelsels en in de gerationaliseerde eenhedenstelsels	139
5.10	Neo-CGS-stelsels	139

5.11 Bezwaren tegen het CGS-stelsel 141
6. Beschrijving van het MKS-stelsel 143
6.1 MKS-eenheden 143
6.2 Verband tussen MKS-eenheden (die ook SI-eenheden zijn) en CGS-eenheden 146
7 Beschrijving van het MTS-stelsel 147

Hoofdstuk IV

De weg vanaf de 'absolute praktische elektrische eenheden' van 1881 (kwadrantstelsel) over de 'internationale elektrische eenheden' van 1908 naar de 'absolute elektrische eenheden' van 1948 (MKSA-eenheden); geschiedenis van de ampère 148

1 'Absolute praktische elektrische eenheden' (1881), kwadrantstelsel (KS) 148
1.1 Ontstaan en opbouw van het kwadrantstelsel 148
1.2 Eenheden van arbeid en van vermogen in het kwadrantstelsel (KS) en in het MKS-stelsel 151
2 'Internationale' elektrische eenheden (1908) 153
3 'Absolute' elektrische eenheden (1948); Giorgi-stelsel of MKSA-stelsel 154
3.1 Grondeenheden en afgeleide eenheden van het Giorgi- of MKSA-stelsel 154
3.2 Verband tussen de 'internationale' elektrische eenheden van 1908 en de elektrische eenheden van het MKSA-stelsel van 1948 158
3.3 Het gerationaliseerde en het niet-gerationaliseerde Giorgi-stelsel (MKSA-stelsel) 159
3.4 De permeabiliteit van vacuüm in het gerationaliseerd MKSA-stelsel 162
3.5 De permittiviteit van vacuüm in het gerationaliseerd MKSA-stelsel 163
3.6 Overzicht van de behandelde algemene groothedenvergelijkingen in verband met elektrische en elektromagnetische eenheden 165
4 Geschiedenis van de ampère 170

Hoofdstuk V

Eenheden van temperatuur en warmte 172

1 Temperatuur 172
1.1 Inleiding 172
1.2 Termisch evenwicht, temperatuur 172
1.3 Termometers en empirische temperaturen 173
1.4 Empirische temperatuur, gemeten met behulp van een gastermometer 176

1.5	Termodynamische temperatuur	177
1.6	Termodynamische celsiustemperatuur, termodynamische fahrenheittemperatuur	179
1.7	Internationale temperatuurschaal	181
1.8	Temperatuurverschil, temperatuurtolerantie, samengestelde eenheden waarin de eenheid van temperatuur voorkomt	183
1.9	Weergave van een temperatuur volgens de verschillende temperatuurschalen	184
1.10	Verband tussen de temperatuur en de kinetische translatie-energie van de molekulen van een ideaal gas	189
1.10.1	Enkele gegevens uit de kinetische gasteorie	189
1.10.2	Temperatuur als afgeleide grootheid	192
1.10.3	De natuurkonstanten $\mathfrak{R}$ (molaire of algemene of universele gaskonstante) en k (konstante van Boltmann)	194
2	Eenheden van energie in de warmteleer	195
2.1	Inleiding	195
2.2	Eenheden van warmte, waarvan de definitie berust op de soortelijke warmtekapaciteit van water	196
2.2.1	Eenheden die gebruikelijk waren op het Europese vasteland	196
2.2.2	Eenheden die gebruikelijk waren in de Angelsaksische landen	199
2.3	Eenheden van warmte die rechtstreeks per definitie werden gelijkgesteld aan een welbepaalde getalwaarde maal een reeds bekende energie-eenheid (J_{int} of J)	201
2.3.1	Inleiding	201
2.3.2	De Rossini-calorie of termochemische calorie	201
2.3.3	De internationale tafel(kilo)calorie van 1929 en 1956, de Steam Table British thermal unit van 1929 en de International table British thermal unit van 1956	202
2.4	Verband tussen kilowatt uur en kilocalorie	206
2.5	Verband tussen kilogram(kracht) meter en kilocalorie	207
2.6	Verband tussen Btu_{ST} en foot pound-force (ft . lbf) op basis van 1 pound = 0,453 592 3 kg, en Btu_{IT} en foot pound-force (ft . lbf) met thans als basis 1 pound = 0,453 592 37 kg	208
2.7	Verband tussen paardekracht uur (pk . h) en kilocalorie	208
2.8	De energie-eenheid liter atmosfeer (L . atm, l . atm)	208
2.9	Eenheden van druk, vroeger soms gebruikt in de warmteleer	209
2.10	Samenvatting van enkele van de voornaamste behandelde betrekkingen tussen warmte-eenheden	210

Hoofdstuk VI

De eenheid mol vroeger en nu 213

1 Enkele gegevens uit de scheikunde 213
2 De vroegere atoomgewichtsschalen 213
3 De huidige schaal van de relatieve atoommassa's 215
4 Vroegere definities van de eenheid mol 216
4.1 De eenheid mol als een chemische massagrootheid en als een fysische massagrootheid 216
4.2 De eenheid dalton en de massa-eenheid ME 219
4.3 De mol als eenheid van hoeveelheid stof (definitie van 1957) 220
5 Huidige definitie van de eenheid mol 221
6 Molaire massa M 223
7 Relatieve atoommassa A_r, relatieve molekuulmassa M_r 224
8 Geünificeerde atoommassa-eenheid u (atomaire massa-eenheid u) 224
9 Koncentratie 225
9.1 Definitie van enkele koncentratieparameters 225
9.2 Onderling verband tussen enkele koncentratieparameters 235
10 Molaire geleiding Λ_{mB} van een elektrolyt in een elektrolyt-oplossing 239
11 Molaire grootheden 243
12 Samenvatting van de geschiedenis van de mol 244

Hoofdstuk VII

Grootheden en eenheden in verband met straling en licht 245

1 Inleiding 245
1.1 Spektrum van de elektromagnetische golven 245
1.2 Zonnestraling 245
1.3 Zichtbare straling 246
1.4 Onderscheid tussen fysische stralingsgrootheden en fotometrische grootheden 247
2 Enkele grootheden en eenheden uit de stralingsleer en de lichtleer 248
2.1 Straling als fysisch verschijnsel 248
2.1.1 Fysische grootheden en eenheden 248
2.1.2 Spektrale fysische stralingsgrootheden (spektrale dichtheid van fysische stralingsgrootheden) 253
2.2 Straling als een door het menselijk oog waargenomen verschijnsel 254
2.2.1 Lichtwaarneming door het menselijk oog 254
2.2.2 Konventies waarop het invoeren van de fotometrische grootheden is gesteund 254

2.2.3 Fotometrische grootheden en eenheden 260
2.2.4 Spektrale fotometrische grootheden 264
2.2.5 Definitie van enkele koherente fotometrische SI-eenheden 265
2.2.6 Onderlinge samenhang der behandelde fysische SI-stralingseenheden en fotometrische SI-eenheden 267
2.2.7 Rendementen 267
2.2.8 Andere fotometrische eenheden dan de hierboven opgegeven koherente SI-eenheden 271
2.2.9 Geschiedenis van de candela 273
2.3 Straling en fotosynthese 276

Hoofdstuk VIII

Eenheden van vlakke hoek en van ruimtehoek 279

1 Inleiding 279
2 Eenheden van vlakke hoek 279
2.1 SI-eenheid van vlakke hoek: de radiaal (rad) 279
2.2 Niet-koherente eenheden van vlakke hoek 280
2.2.1 Volle hoek 280
2.2.2 De graad, de minuut en de sekonde 281
2.2.3 De decimale graad of gon, de decimale minuut en de decimale sekonde 283
3 Eenheden van ruimtehoek 285
3.1 SI-eenheid van ruimtehoek: de steradiaal (sr) 285
3.2 Niet-koherente eenheden van ruimtehoek 286
3.2.1 De kwadraatgraad □° 286
3.2.2 De kwadraatgon □g 287
4. De grootheden toerental of rotatiefrekwentie n, hoeksnelheid ω, frekwentie f en pulsatie of hoekfrekwentie of cirkelfrekwentie ω, en hun respektieve SI-eenheden 287
4.1 De cirkelbeweging 287
4.2 De harmonische beweging (trillende beweging, slingerbeweging) 292
4.3 Wisselstroom: wisselspanning en stroomsterkte 295
4.4 Samenvatting 298
5 De eenheid radiaal en het uitwerken van algemene groothedenvergelijkingen 299
5.1 Cirkelbeweging en hoeksnelheid 299
5.2 Middelpuntvliedende kracht en hoeksnelheid 301
5.3 In beweging brengen van een roterend systeem (bijvoorbeeld een vliegwiel) 301
5.4 Besluit 302
6 De eenheid sr in samengestelde eenheden 302

Hoofdstuk IX

Grootheden en eenheden in de geluidsleer 304

1 Niveau of peil van een energiegrootheid of van een veldgrootheid 304
1.1 Energiegrootheden en veldgrootheden, en hun onderling verband 304
1.2 Logaritme van een getal 304
1.3 Logaritme van de verhouding van twee energiegrootheden of van twee veldgrootheden (telkens van dezelfde aard) 306
1.4 Verband tussen het aantal decibel en het aantal neper in verband met energiegrootheden enerzijds, en de er mee gepaard gaande veldgrootheden anderzijds 307
1.5 Niveau of peil van een energiegrootheid of van een veldgrootheid 309
2 Enkele grootheden en eenheden uit de geluidsleer 311
2.1 Inleiding 311
2.2 Het geluid als fysisch verschijnsel 311
2.2.1 Energiegrootheden 311
2.2.2 Veldgrootheden 313
2.2.3 Voortplantingssnelheid van het geluid in lucht 313
2.2.4 Enkele wetten uit de geluidsleer 314
2.2.5 Specifieke akoestische impedantie 315
2.2.6 Niveau (of peil) van een geluidsdruk p, van een snelheid v van een trillend deeltje van de middenstof, van een geluidsintensiteit I en van een vermogen P van een geluidsbron 318
2.2.7 Verband tussen p, v, I, P, L_p, L_v, L_I, L_P 319
2.2.8 Geluid voortkomend van verschillende geluidsbronnen 325
2.3 Het geluid als een door het menselijk gehoor waargenomen verschijnsel (geluidsindruk) 327
2.3.1 Inleiding 327
2.3.2 De (subjektieve) grootheid luidheidsniveau of luidheidspeil L_S (uitgedrukt in foon) 328
2.3.3 De subjektieve grootheid luidheid S (uitgedrukt in soon) 332
3 Geluidsmeting in de praktijk met behulp van geluidspeilmeters (geluidsniveaumeters) 333

Hoofdstuk X

Wettelijke eenheden: SI-eenheden en andere blijvend erkende eenheden 340

1 Inleiding 340
2 SI-eenheden en hun decimale veelvouden en delen 341
2.1 SI-grondeenheden en aanvullende eenheden, definities 341

2.2	Afgeleide SI-eenheden	346
2.2.1	Wijze waarop afgeleide SI-eenheden worden bekomen	346
2.2.2	Afgeleide SI-eenheden met een eigen benaming	346
2.3	Overzicht van enkele (niet-elektrische) grootheden en hun respektieve SI-eenheden	348
2.4	Overzicht van de voornaamste elektrische en (elektro)magnetische grootheden en hun respektieve SI-eenheden	351
2.5	Waarde in het SI van de permeabiliteit μ_0 en de permittiviteit ϵ_0 van vacuüm	353
2.6	Voorvoegsels voor het aanduiden van decimale veelvouden en delen van eenheden	353
2.6.1	Voorvoegsels en de overeenstemmende vermenigvuldigingsfaktor	353
2.6.2	Algemene richtlijnen betreffende het gebruik van voorvoegsels voor het aanduiden van decimale veelvouden en delen van eenheden	356
3	Blijvend erkende eenheden die niet tot het SI behoren	358
3.1	Opsomming van de betrokken eenheden	358
3.2	Indeling van de betrokken eenheden in bepaalde groepen	359
3.2.1	Toegelaten eigen namen en eigen symbolen van decimale veelvouden en delen van SI-eenheden	359
3.2.1.1	Eigen namen en symbolen van decimale veelvouden en delen van SI-eenheden die zonder beperking kunnen gebruikt worden	359
3.2.1.2	Eigen namen en symbolen van decimale veelvouden en delen van SI-eenheden waarvan het gebruik is voorbehouden voor bijzondere toepassingsgebieden	361
3.2.2	Eenheid (metriekkaraat) en eigen benaming (dioptrie) van een SI-eenheid (m^{-1}) die slechts zijn toegelaten voor bijzondere toepassingen en waaraan internationaal nog geen symbool is toegekend	362
3.2.3	Eenheden die geen decimale veelvouden of delen van SI-eenheden zijn doch wel op basis van SI-eenheden gedefinieerd worden	362
3.2.4	Onafhankelijk van de zeven SI-grondeenheden gedefinieerde eenheden	364
3.2.4.1	Eenheden die uitsluitend worden gebruikt in de atoom- en kernfysika en waarvan de waarde experimenteel dient bepaald te worden	364
3.2.4.2	Eenheid die uitsluitend mag worden gebruikt voor het weergeven van de bloeddruk en de druk van andere lichaamsvloeistoffen	364
3.3	Indeling van de betrokken 19 eenheden volgens de grootheid waartoe ze behoren	365
3.4	Het gebruik van voorvoegsels voor het aanduiden van decimale veelvouden en delen van de hierboven behandelde blijvend erkende eenheden (die niet tot het SI behoren)	366

3.5 Eenheden samengesteld uit een SI-eenheid en een erkende eenheid die niet tot het SI behoort 368
4 De benamingen neper (Np) en decibel (dB) 370
5 Natuurkonstanten in het SI 371

Hoofdstuk XI

Het technisch (eenheden)stelsel (TS) 374

1 Basisgrootheden en grondeenheden 374
2 Definitie van de eenheid 'kilogramkracht' 374
3 Normgewicht G_n en werkelijk gewicht G 376
3.1 Normgewicht G_n 376
3.2 Werkelijk gewicht G 378
3.3 Het gebruik in de praktijk van de symbolen G_n, G, g_n en g, en de weerslag hiervan op de schrijfwijze van groothedenvergelijkingen in het TS 379
4 De koherente afgeleide eenheid van massa en voorstelling van de grootheid massa in het TS 381
4.1 Definitie van de afgeleide eenheid van massa in het TS 381
4.2 Voorstelling van de grootheid massa in het TS 382
4.3 De normversnelling g_n en de grootte van de afgeleide eenheid van massa in het TS 385
5 Overige eenheden in het TS 386
5.1 Koherente afgeleide TS-eenheden 386
5.2 Niet-koherente TS-eenheden 388
5.3 Elektrische eenheden 389
6 Weergave in het TS van een druk door de hoogte van een vloeistofkolom 389
6.1 Hydrostatische druk 389
6.2 Meter en millimeter waterkolom (mWk; mmWK) 390
6.2.1 Inleiding 390
6.2.2 Eerste definitie van mmWK (mmH_2O) 391
6.2.3 Tweede definitie van mmWK (mmH_2O) 392
6.2.4 Verband tussen de werkelijke hoogte h_w in meter van een kolom water, en de hydrostatische druk weergegeven enerzijds in mWK (h_1) volgens de eerste definitie en anderzijds in mWK (h_2) volgens de tweede definitie 392
6.3 Millimeter kwik (mmHg) en de eenheid torr (Torr) 394
6.3.1 Millimeter kwik (mmHg) 394
6.3.2 De eenheid torr (Torr) 395

6.3.3 Verband tussen de werkelijke hoogte h_w in mm van een kolom kwik en de hydrostatische druk h weergegeven in mmHg 396
6.3.4 Verband tussen de werkelijke hoogte h_w in mm van een kolom kwik en de hydrostatische druk h in Torr 397
7 Omzettingen tussen sommige eenheden uit het TS (en het Angelsaksische TS) enerzijds en eenheden uit het CGS-stelsel en SI-eenheden anderzijds, of tussen TS-eenheden onderling 398
8 Eenheden van energie (arbeid of warmte) en van vermogen in de mechanika, de elektriciteitsleer en de verwarmingstechniek, vroeger en nu 407

Hoofdstuk XII

Vervallen eenheden en eenhedenstelsels, in bepaalde landen tijdelijk erkende Angelsaksische eenheden, internationaal verspreide doch niet door de EEG erkende eenheden 409

1 Vervallen eenheden en eenhedenstelsels 409
1.1 Eenheden en symbolen die vervallen zijn uiterlijk op 31 december 1977 409
1.2 Eenheden en symbolen die vervallen zijn uiterlijk op 31 december 1979 410
1.3 Eenheden en symbolen die vervallen zijn uiterlijk op 31 december 1985 410
1.3.1 Symbool dat vervallen is uiterlijk op 31 december 1985 410
1.3.2 Eenheden en symbolen die vervallen zijn uiterlijk op 31 december 1985 410
1.4 Einde van het TS en van het CGS-stelsel 414
1.4.1 Einde van het TS 414
1.4.2 Einde van het CGS-stelsel 414
2 Angelsaksische eenheden, in bepaalde landen tijdelijk erkend 415
3 Internationaal verspreide doch niet door de EEG erkende eenheden 416
3.1 Opsomming van de betrokken eenheden 416
3.2 Indeling van de betrokken 5 eenheden in bepaalde groepen 417
3.2.1 Eenheden die geen decimale veelvouden of delen van SI-eenheden zijn doch wel op basis van SI-eenheden gedefinieerd worden 417
3.2.2 Angelsaksische eenheid van inhoud, uitsluitend ter aanduiding van de inhoud van schepen 417
3.2.3 Onafhankelijk van de zeven SI-grondeenheden gedefinieerde eenheden 418
3.3 Indeling van de betrokken 5 eenheden volgens de grootheid waartoe ze behoren 419

3.4 Voorvoegsels voor het aanduiden van veelvouden en delen van eenheden 419
3.5 Afgeleide eenheden 419

Hoofdstuk XIII

Massa en gewicht 420

1 Inleiding 420
2 De zwaarteveldsterkte g (versnelling van de zwaartekracht, versnelling van de vrije val in het luchtledige, valversnelling) 420
2.1 De wetten van Newton (1642-1727) 420
2.2 Het aardse zwaarteveld 423
3 Beschouwingen in verband met de grootheid massa 429
3.1 Onderscheid tussen trage massa (traagheid) en zware massa (zwaarte) 429
3.2 Massa als afgeleide grootheid 431
3.3 Relatieve betekenis van de gravitatiekonstante 433
4 Aanduiden van een hoeveelheid 434
5 Wegen 435
5.1 Wegen met een weegschaal (balans) 435
5.2 Wegen met een unster 440
6 Gewicht als de kracht die tengevolge van het zwaarteveld, door een lichaam in rust wordt uitgeoefend op zijn ondersteuning of op zijn ophangingspunt 443
7 Dubbelzinnigheid van het woord 'gewicht' 445
8 Lading, laadvermogen (toelaatbare lading), belasting, draagvermogen (toelaatbare belasting) 451
9 Soortelijk (norm)gewicht γ_n en soortelijke (of volumieke) massa ϱ 452
9.1 Soortelijk (norm)gewicht γ_n 452
9.2 Soortelijke (of volumieke) massa ϱ (ook genoemd massadichtheid of absolute dichtheid) 453

Hoofdstuk XIV

Van normgewicht in het TS naar massa in het SI 454

1 De grootheden normgewicht G_n (TS) en massa m (SI), en de soortelijke grootheden gedefinieerd in het TS met behulp van de grootheid normgewicht en in het SI met behulp van de grootheid massa 454

1.1	De grootheid massa in het SI als tegenhanger van de grootheid normgewicht in het TS voor het aanduiden van een hoeveelheid	454
1.1.1	Inleiding	454
1.1.2	De normversnelling g_n (normzwaarteveldsterkte)	454
1.1.3	Gebruikelijke en niet-gebruikelijke grootheden en symbolen inzake normgewicht en massa in het TS en in het SI, en hun respektieve eenheden	456
1.1.4	Verband tussen massa en normgewicht	456
1.2	Grootheden gedefinieerd in het TS met behulp van de grootheid normgewicht en in het SI met behulp van de grootheid massa	459
1.2.1	Aangewende symbolen	459
1.2.2	De grootheden soortelijk (norm)gewicht, soortelijke massa (of volumieke massa of absolute dichtheid of massadichtheid) en soortelijk volume	460
1.2.2.1	Gebruikelijke en niet-gebruikelijke grootheden en symbolen inzake soortelijk (norm)gewicht, soortelijke massa en soortelijke volume, enerzijds bij het gebruik van het TS en anderzijds bij het gebruik van het SI, en hun respektieve eenheden	460
1.2.2.2	Verband tussen de grootheden soortelijk (norm)gewicht en soortelijke massa, en verband tussen de grootheden soortelijk volume in de zin van normgewicht gedeeld door volume en soortelijk volume in de zin van massa gedeeld door volume, gebruik makend van de verschillende al dan niet gebruikelijke grootheden en symbolen	462
1.2.3	Andere soortelijke grootheden	471
1.2.3.1	Definitievergelijking van de betrokken grootheden	471
1.2.3.2	Verband tussen soortelijke grootheden met een verschillende dimensie, veroorzaakt door het gebruik van de grootheid normgewicht in het TS en van de grootheid massa in het SI	472
1.2.3.3	Toepassingen	473
1.2.3.3.1	Soortelijke grootheden van de vorm $x^* = \frac{G_n}{X}$ in het TS en $x = \frac{m}{X}$ in het SI	473
1.2.3.3.2	Soortelijke grootheden van de vorm $y^* = \frac{Y}{G_n}$ in het TS en $y = \frac{Y}{m}$ in het SI	475
1.3	Slotbeschouwingen	479
2	Het herschrijven in SI-notatie van algemene groothedenvergelijkingen die geschreven zijn in TS-notatie	481
2.1	Inleiding	481
2.2	Richtlijnen in verband met het herschrijven in SI-notatie van algemene groothedenvergelijkingen geschreven in TS-notatie	483
2.3	Toepassingen	486

2.3.1	Toestandsvergelijking van een ideaal gas (algemene gaswet)	486
2.3.2	Voortplantingssnelheid van het geluid	489
2.3.3	Arbeidsvermogen van plaats	491
2.3.4	Arbeidsvermogen van beweging (kinetische energie)	493
2.3.5	Valsnelheid (in het luchtledige) en valhoogte	494
2.3.6	Hydrostatische druk	495
2.3.7	Uitstroomsnelheid van een vloeistof uit een open vat (met uitstroomopening in de bodem), snelheidshoogte, uitstromende hoeveelheden	497
2.3.8	Meten van doorstromende hoeveelheden	500
2.3.9	Wet van Bernoulli	504
2.3.10	Stromingsverliezen (verliezen aan stromingsenergie)	519
2.3.10.1	Algemene verliezen en plaatselijke verliezen	519
2.3.10.2	Centrale verwarming: drukverval R en verlieshoogte per lengte $\frac{h_{v,a}}{l}$; plaatselijke verliezen; opvoerhoogte van de circulatiepomp	524
2.3.11	Pompvermogen	535
2.3.12	Vermogen van ventilatoren	553
2.3.13	Luchtsnelheid in een trekschouw	557
2.3.14	Dynamische viskositeit en kinematische viskositeit	561
2.3.15	Laminaire stroming van een vloeistof over een hellend vlak	564
2.3.16	Weerstandswaarde van regelkleppen	568
2.3.17	Debiet van de circulatiepomp van een verwarmingskringloop	577
2.3.18	Warmteverliezen door luchtverversing (ventilatieverliezen)	581
2.3.19	Vliegwiel en massatraagheidsmoment	583
2.3.20	Eerste hoofdwet van de termodynamika (wet van het behoud van energie), toegepast op een stationair stromend fluïdum door een open systeem	588
2.3.21	Temperatuurvereffeningskoëfficiënt	600
2.3.22	Warmte-indringingskoëfficiënt	602
2.3.23	Dimensieloze kengrootheden	603

Hoofdstuk XV

Angelsaksische eenheden en eenhedenstelsels		620
1	De eenheden yard, pound, gallon en bushel	620
1.1	De eenheden yard en pound	620
1.1.1	De eenheden yard en pound in Groot-Brittannië (UK)	620
1.1.2	De eenheden yard en pound in de Verenigde Staten van Noord-Amerika (USA)	622
1.1.3	Streven naar eenheid inzake de eenheden yard en pound	623

1.1.4	Enkele oppervlakte- en ruimtematen, afgeleid uit de verschillende definities van de eenheden inch, foot en yard	624
1.2	De inhoudsmaat gallon in Groot-Brittannië (UK) en de Verenigde Staten van Noord-Amerika (USA)	625
1.2.1	Onderscheid inzake het toepassingsgebied	625
1.2.2	Imperial gallon (of UK gallon)	625
1.2.3	US gallon	626
1.3	De inhoudsmaat bushel in Groot-Brittannië (UK) en de Verenigde Staten van Noord-Amerika (USA)	627
1.3.1	Onderscheid inzake het toepassingsgebied	627
1.3.2	Imperial bushel (of UK bushel)	627
1.3.3	US bushel	627
2	Veelvouden en delen van de eenheden pound, yard, square yard, cubic yard, gallon en US (dry) bushel	628
2.1	Veelvouden en delen van de eenheid pound	628
2.2	Veelvouden en delen van de eenheid yard	631
2.3	Veelvouden en delen van de eenheid square yard	633
2.4	Veelvouden en delen van de eenheid cubic yard	634
2.5	Veelvouden en delen van de inhoudsmaten UK gallon en US gallon	635
2.6	Veelvouden en delen van de inhoudsmaat US (dry) bushel	637
2.7	Verband tussen sommige Britse (UK) en Amerikaanse (US) inhoudsmaten	638
3	Angelsaksische (Britse) eenheden die in bepaalde landen van de Europese Ekonomische Gemeenschap (EEG) tijdelijk erkend blijven	639
4	Angelsaksische eenhedenstelsels	639
4.1	Inleiding	639
4.2	English absolute system of ft-lb-s-stelsel	639
4.3	English gravitational of ft-lbf-s-stelsel	640
4.4	Opmerkingen betreffende de benaming en het symbool van de eenheid van massa in het English absolute system (ft-lb-s-stelsel) en van de eenheid van kracht in het English gravitational system (ft-lbf-s-stelsel)	642
5	Omzettingen van Angelsaksische eenheden	644
5.1	Lengte (E : length)	644
5.2	Oppervlakte (E : area)	644
5.3	Volume (E : volume), inhoud (E : capacity)	645
5.4	Massa (E : mass)	645
5.5	Soortelijke massa (E : density) en soortelijk (norm)gewicht	645
5.6	Soortelijk volume (E : specific volume)	647
5.7	Koncentratie (E : concentration, in the sense of the mass of a substance per unit volume of a solution, or the like)	648

5.8	Tijd (E : time)	649
5.9	Snelheid (E : linear velocity, speed)	649
5.10	Versnelling (E : acceleration)	650
5.11	Kracht (E : force)	650
5.12	Druk (E : pressure); spanning (E : stress)	652
5.13	Moment van een kracht (E : moment of force, torque)	660
5.14	Energie (arbeid, warmte) (E : energy; work; heat)	661
5.15	Vermogen (E : power)	663
5.16	Verbrandingswarmte (E : calorific value); warmte-inhoud (E : heat content); soortelijke entalpie (E : specific enthalpy)	664
5.17	Temperatuur, temperatuurverschil (E : temperature, temperature difference or interval)	665
5.18	Soortelijke warmtekapaciteit (soortelijke warmte) (E : specific heat capacity)	665
5.19	Warmtegeleidingskoëfficiënt (E : thermal conductivity)	666
5.20	Warmtedoorgangskoëfficiënt (E : thermal conductance; heat transfer coefficient)	666
5.21	Warmtedoorgang per oppervlakte en tijd (E : heat flux density)	667
5.22	Dynamische viskositeit (E : dynamic viscosity)	667
5.23	Kinematische viskositeit (E : kinematic viscosity)	668
5.24	Massastroom (E : mass rate of flow), (norm)gewichtsstroom	669
5.25	Volumestroom (E : volume rate of flow)	670
5.26	Weerstandswaarde van regelkleppen (E : capacity index of valves, flow coefficient of valves)	672
5.27	Hoeveelheid stof (E : amount of substance)	672
5.28	Molair volume (E : molar volume)	674
5.29	Molaire (of algemene of universele) gaskonstante; specifieke gaskonstante (E: molar gas constant; specific gas constant)	675
5.29.1	Toestandsvergelijking van een ideaal gas en berekening van de molaire gaskonstante en de specifieke gaskonstante	675
5.29.1.1	Eenhedenstelsels met massa als basisgrootheid	675
5.29.1.2	Eenhedenstelsels met kracht als basisgrootheid	678
5.29.1.3	Samenvatting	681
5.29.1.4	Voorbeeld van berekening van een specifieke gaskonstante	682
5.29.2	Angelsaksische eenheden waarin de molaire gaskonstante wordt uitgedrukt	683
5.29.3	Angelsaksische eenheden waarin de specifieke gaskonstante wordt uitgedrukt	684
6	De getalwaarden 'million', 'billion', 'trillion', en 'quadrillion' enerzijds in Groot-Brittannië (UK) en de overige Europese landen en anderzijds in de Verenigde Staten van Noord-Amerika (USA)	684
7	Overgang naar het SI in Groot-Brittannië (UK) en de Verenigde Staten van Noord-Amerika (USA)	685

Geraadpleegde literatuur 688

Eenhedenregister 696

Algemeen register 706

HOOFDSTUK I

OVEREENKOMSTEN, NORMALISATIE EN WETGEVING INZAKE MEETEENHEDEN EN MEETWERKTUIGEN

1. Overeenkomsten en normalisatie op internationaal vlak

1.1. De Meterkonventie

De Meterkonventie is een internationale overeenkomst, in 1875 gesloten tussen 17 staten, met het doel de algemene invoering en vervolmaking van het metriek stelsel te bewerkstelligen. In 1921 werden de bepalingen van de Meterkonventie gewijzigd en aangevuld.

Einde 1985 waren 47 landen lid van deze konventie : Argentinië, Australië, België, Brazilië, Bulgarije, Canada, Chili, China, Denemarken, Dominikaanse Republiek, Egypte, Finland, Frankrijk, Hongarije, Ierland, Indië, Indonesië, Iran, Israël, Italië, Japan, Joegoslavië, Kameroen, Mexico, Nederland, Noord-Korea, Noorwegen, Oost-Duitsland, Oostenrijk, Pakistan, Polen, Portugal, Roemenië, Spanje, Thailand, Tsjechoslowakije, Turkije, Uruguay, USA, USSR, Venezuela, Verenigd Koninkrijk, West-Duitsland, Zuid-Afrika, Zuid-Korea, Zweden, Zwitserland.

De Meterkonventie bestaat uit de drie volgende organen :

- de CGPM (Conférence Générale des Poids et Mesures, Algemene Konferentie voor Maten en Gewichten) : is de algemene vergadering van de gevolmachtigde vertegenwoordigers van de staten aangesloten bij de Meterkonventie, met één stemgerechtigd lid per staat, met als taak het goedkeuren van aanbevelingen inzake eenheden, met het doel een uniforme wetgeving in de verschillende lidstaten mogelijk te maken en aan te moedigen; de CGPM is de hoogste instantie inzake eenheden en komt minstens om de 6 jaar samen (thans vergadert men meestal om de 4 jaar);
- het CIPM (Comité International des Poids et Mesures, Internationaal Komitee voor Maten en Gewichten) : is het orgaan dat binnen de Meterkonventie de technische en wetenschappelijke arbeid leidt en de werkzaam-

heden van de CGPM voorbereidt; het CIPM bestaat uit 18 wetenschapsmensen van verschillende landen, en komt minstens om de 2 jaar samen in het BIPM (thans komt men ieder jaar samen);

- het BIPM (Bureau International des Poids et Mesures, Internationaal Bureau voor Maten en Gewichten) : is het wetenschappelijk instituut van de Meterkonventie, dat uitgerust is met aangepaste laboratoria en gefinancierd wordt door de lidstaten; het BIPM (waarvan de zetel gevestigd is in Sèvres bij Parijs) werkt uitsluitend onder de leiding en het toezicht van het CIPM en heeft tot opdracht de studie, de fabrikage, de bewaring en de verbetering van de internationale standaarden.

In de eerste vijftien jaren van haar bestaan (1875-1890) bestonden de werkzaamheden van de Meterkonventie vooral in de studie, de fabrikage en de onderlinge vergelijking van nieuwe standaarden voor de meter en het kilogram. Door de snelle vooruitgang van wetenschap en techniek ontstond ook behoefte aan nieuwe bijkomende eenheden, en werd de Meterkonventie belast met de oplossing van alle nieuwe metrologische problemen naarmate ze zich voordeden.

Het CIPM wordt in zijn taak bijgestaan door volgende acht advieskommissies (opgericht door het CIPM) :

- het "Comité Consultatif d'Electricité (CCE)", opgericht in 1927
- het "Comité Consultatif de Photométrie (CCP)", opgericht in 1933; in 1971 werd de benaming gewijzigd in "Comité Consultatif de Photométrie et de Radiométrie (CCPR)"
- het "Comité Consultatif de Thermométrie (CCT)",opgericht in 1937; de benaming was een tijdlang "Comité Consultatif de Thermométrie et de Calorimétrie (CCTC)"
- het "Comité Consultatif pour la Définition du Mètre (CCDM)", opgericht in 1952
- het "Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (CCDS)",opgericht in 1956
- het "Comité Consultatif pour les Etalons de Mesure des Rayonnements Ionisants (CCEMRI)",opgericht in 1958
- het "Comité Consultatif des Unités (CCU)", opgericht in 1964
- het "Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées (CCM)", opgericht in 1980.

De leden van deze technische advieskommissies bestaan meestal uit wetenschapsmensen uit de grote fysiko-technische staatslaboratoria en wetenschappelijke instituten van verschillende landen.

Enkele van de voornaamste meewerkende staatslaboratoria zijn (alfabetisch gerangschikt) :

BNM : Bureau National de Métrologie, Paris (Frankrijk)
IMM : Institut de Métrologie D.I. Mendéléev, Leningrad (USSR)
NBS : National Bureau of Standards, Washington (USA)
NPL : National Physical Laboratory, Teddington (Groot-Brittannië)
NRC : National Research Council, Ottawa (Canada)
NRLM: National Research Laboratory of Metrology, Tsukuba (Japan)
PTB : Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin (West-Duitsland)
PTR : Physikalisch-Technische Reichsanstalt, Berlin (in Duitsland vóór 1945).

Sommige internationale wetenschappelijke verenigingen hebben ook een belangrijke bijdrage geleverd bij het tot stand komen van bepaalde eenheden; enkele van de voornaamste van deze verenigingen zijn : (alfabetisch gerangschikt) :

CIE : Commission Internationale d'Eclairage
IAU : International Astronomical Union
ICR : International Congress of Radiology
ICRP : International Commission on Radiological Protection
ICRU : International Commission on Radiation Units and Measurements
IEC : International Electrotechnical Commission
IUGG : International Union of Geodesy and Geophysics
IUPAC : International Union of Pure and Applied Chemistry
IUPAP : International Union of Pure and Applied Physics
SUN : IUPAP-Commission on Symbols, Units and Nomenclature

Hierna volgt een beknopt overzicht van enkele belangrijke besluiten, resoluties en voorstellen, die het ontstaan en de verdere ontwikkeling van de SI-eenheden bewerkstelligd hebben.

1881 1ste Internationaal Elektriciteitskongres

De absolute praktische eenheden (kwadrant-eenheden) van weerstand,

spanning, stroom, lading en kapaciteit krijgen als speciale benaming respektievelijk : ohm, volt, ampère, coulomb en farad (de benamingen volt en farad komen reeds in 1873 voor in een rapport van de British Association for the Advancement of Science - BAAS)

1889 2de Internationaal Elektriciteitskongres

De absolute praktische eenheden (kwadrant-eenheden) van energie, vermogen en elektrische induktantie krijgen als speciale benaming respektievelijk : joule, watt en henry

1889 1ste CGPM

- De lengte van een welbepaalde meterstaaf (uit platina-iridium) bij de temperatuur van smeltend ijs, wordt aangenomen als eenheid van lengte
- De massa van een welbepaalde kilogram-cilinder wordt aangenomen als eenheid van massa

1901 3de CGPM

- Het kilogram wordt bevestigd als eenheid van massa en is gelijk aan de massa van het internationale prototype van het kilogram
- Onder gewicht wordt verstaan een grootheid van dezelfde aard als een kracht
- Als waarde voor de normversnelling g_n wordt aangenomen : $g_n = 9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2}$
- Definitie van de liter : de liter is het volume ingenomen door een massa zuiver water van 1 kg bij zijn grootste dichtheid en onder normale atmosferische druk

1901 Giovanni Giorgi stelt een eenhedenstelsel voor met 4 grondeenheden : meter, kilogram, sekonde, ampère

De IEC gaf in 1935 aan dit eenhedenstelsel de benaming Giorgi-stelsel, en bevestigde deze benaming in 1950; in 1954 werd daarnaast ook de reeds verspreide benaming MKSA-stelsel door de IEC erkend

1908 Internationale Konferentie voor elektrische eenheden (Londen)

Definitie van een materiële standaard respektievelijk voor de eenheid van weerstand (Ω_{int}) en de eenheid van stroom (A_{int}); het vastleggen van deze materiële standaarden had tot gevolg dat een stelsel ontstond van "internationale" elektrische eenheden (in gebruik van 1908 tot 1948); de invoering van deze "internationale" elektrische eenheden was reeds in 1893 voorgesteld geworden op een Internationaal Elektriciteitskongres dat plaats had in Chicago

1913 5de CGPM

De waarde g_n = 9,806 65 $\frac{m}{s^2}$ wordt opnieuw bevestigd

1927 7de CGPM

Als sekundaire standaard voor de meter wordt volgende definitie aangenomen : een meter is gelijk aan 1 553 164,13 golflengten van de rode cadmium-lijn

1935 De IEC neemt volgende benamingen aan :

MKSA-eenheid van elektrische geleiding = siemens (S)

MKSA-eenheid van magnetische flux = weber (Wb)

In 1954 wordt door de IEC hieraan toegevoegd :

MKSA-eenheid van magnetische induktie = tesla (T)

1946 Het CIPM geeft volgende definitie van de (absolute) ampère : de ampère is de konstante stroom die, indien hij wordt onderhouden in twee evenwijdige, rechtlijnige en oneindig lange geleiders van te verwaarlozen cirkelvormige doorsnede, welke geplaatst zijn in het luchtledige op een onderlinge afstand van 1 meter, tussen deze twee geleiders een kracht veroorzaakt gelijk aan 2 . 10^{-7} newton voor iedere meter lengte

1948 9de CGPM

- Aanvaarding van het MKSA-stelsel (met naast m, kg en s, de "absolute" ampère als vierde grondeenheid) waardoor aan het stelsel van de "internationale" elektrische eenheden van 1908 een einde wordt gesteld
- De benaming candela (symbool : cd) wordt aangenomen als benaming van de eenheid van lichtsterkte ter vervanging van de benaming "bougie nouvelle"
- De definitie van de ampère, zoals vastgelegd in 1946 door het CIPM, wordt door de CGPM goedgekeurd
- De MKS-eenheid van kracht krijgt de benaming newton
- De joule wordt ook als eenheid van warmte erkend
- Er wordt voorgesteld over te gaan tot de opstelling van een praktisch eenhedenstelsel; de originele tekst van de betrokken resolutie (resolutie 6) luidt als volgt :

Résolution 6

La Conférence Générale,

considérant

que le Comité International des Poids et Mesures a été saisi d'une demande de l'Union Internationale de Physique le sollicitant d'adopter pour les relations internationales un système pratique international d'unités, recommandant le système MKS et une unité électrique du système pratique absolu, tout en ne recommandant pas que le système CGS soit abandonné par les physiciens;

qu'elle-même a reçu du Gouvernement français une demande analogue, accompagnée d'un projet destiné à servir de base de discussion pour l'établissement d'une réglementation complète des unités de mesure;

charge le Comité International :

d'ouvrir à cet effet une enquête officielle sur l'opinion des milieux scientifiques, techniques et pédagogiques de tous les pays (en offrant effectivement comme base le document français) et de la pousser activement;

de centraliser les réponses;

et d'émettre des recommandations concernant l'établissement d'un même système pratique d'unités de mesure, susceptible d'être adopté dans tous les pays signataires de la Convention du Mètre.

Het betrokken eenhedenstelsel zal in 1960 de benaming "Internationaal Eenhedenstelsel" krijgen, met als internationaal aanvaard symbool : SI

1954 10de CGPM

- De termodynamische temperatuurschaal wordt vastgelegd door het per definitie gelijkstellen van de temperatuur van het tripelpunt van water aan 273,16 °K (vanaf 1967 niet meer °K doch K); hierdoor is de eenheid van termodynamische temperatuur nauwkeurig vastgelegd
- Volgende eenheden worden aangenomen als grondeenheden van het nieuw te ontwerpen eenhedenstelsel : meter, kilogram, sekonde, ampère, graad Kelvin (vanaf 1967 niet meer "graad Kelvin" doch "kelvin"), en candela
- De normale atmosferische druk wordt per definitie gelijkgesteld aan $101\ 325\ \frac{N}{m^2}$

1956 Het CIPM legt een nieuwe definitie vast van de sekonde (efemeriden - sekonde) : de sekonde is de fraktie $\frac{1}{31\ 556\ 925,9747}$ van het tropisch

jaar voor 0 januari 1900, 12 uur efemeridentijd. Het CIPM stelt ook voor, het nieuwe eenhedenstelsel te noemen "Internationaal Eenhedenstelsel" (Système International d'Unités) met als symbool SI ("SI-eenheden", "Unités SI", "SI Units", "SI-Einheiten")

1960 11de CGPM

- Nieuwe definitie van de meter, in funktie van een bepaalde golflengte van het atoom krypton 86
- De definitie van de sekonde, zoals vastgelegd in 1956 door het CIPM, wordt bekrachtigd
- De benaming "Internationaal Eenhedenstelsel" met als symbool SI, wordt aangenomen; het SI bestaat (in 1960) uit 6 grondeenheden, twee aanvullende eenheden en een aantal op koherente wijze afgeleide eenheden (er wordt een lijst gegeven met 27 afgeleide eenheden)

1964 12de CGPM

De vroegere definitie van de liter (zie jaar 1901) wordt opgeheven; liter betekent in het vervolg niets anders dan een speciale benaming voor dm^3; het gebruik van de benaming liter wordt afgeraden bij zeer nauwkeurige volume-metingen

1967 13de CGPM

- Nieuwe definitie van de sekonde, in funktie van bepaalde stralingseigenschappen van het atoom cesium 133
- De vroegere benaming van de eenheid van termodynamische temperatuur, namelijk graad Kelvin (symbool : °K), wordt gewijzigd in kelvin (symbool K); er wordt bepaald dat een temperatuurinterval eveneens uitgedrukt wordt in kelvin (K) doch ook nog mag uitgedrukt worden in graden Celsius (°C)
- De definitie van de candela wordt verbeterd
- De vroeger gebruikte benaming mikron (symbool µ) voor 10^{-6} m is niet meer toegelaten; in de plaats ervan dient men de eenheid mikrometer (symbool µm) te gebruiken
- De lijst met afgeleide SI-eenheden wordt verder aangevuld

1969 Het CIPM stelt voor, de voorvoegsels ter aanduiding van decimale delen en veelvouden van SI-eenheden, SI-voorvoegsels te noemen. Als SI-eenheden worden bestempeld : de grondeenheden, de aanvullende eenheden en de op een koherente wijze afgeleide eenheden

1971 14de CGPM

- De mol (eenheid van hoeveelheid stof) wordt aangenomen als grondeenheid in het SI, en wordt in de rij van de grondeenheden gerangschikt op de zesde plaats, waardoor de candela de zevende plaats inneemt
- De eenheid van druk newton per vierkante meter $\left(\frac{N}{m^2}\right)$, krijgt de benaming pascal (Pa)
- De eenheid van elektrische geleiding $\left(\Omega^{-1} = \frac{A}{V} = \frac{A^2 \cdot s^3}{kg \cdot m^2}\right)$ krijgt de benaming siemens (S) (reeds in 1935 aangenomen door de IEC)

1975 15de CGPM

- De SI-eenheid van (radio)aktiviteit die gelijk is aan $\frac{1}{s} = s^{-1}$, krijgt de benaming becquerel (Bq)
- De SI-eenheid van geabsorbeerde dosis, die gelijk is aan $\frac{J}{kg} = \frac{m^2}{s^2}$, krijgt de benaming gray (Gy)

1979 16de CGPM

- De SI-eenheid van dosisekwivalent die gelijk is aan $\frac{J}{kg} = \frac{m^2}{s^2}$, krijgt de benaming sievert (Sv)
- De definitie van de eenheid van lichtsterkte, namelijk de candela (cd) wordt nogmaals verbeterd
- Voor het aanduiden van de eenheid "liter" mogen twee symbolen, namelijk "l" of "L", worden gebruikt (zie ook Hoofdstuk X, onder 3.2.1.1.)

1983 17de CGPM

- Nieuwe definitie van de meter : de meter is de lengte van de weg die het licht in vacuüm aflegt in een duur van $\frac{1}{299\ 792\ 458}$ sekonde
- De definitie van de meter in funktie van een bepaalde golflengte van het atoom krypton 86 (11de CGPM, 1960) wordt opgeheven.

1.2. De Internationale Organisatie voor Wettelijke Metrologie

In de industriële landen worden niet alleen de meeteenheden gereglementeerd, maar ook de meetwerktuigen en meetinstrumenten. Het doel van de Internationale Organisatie voor Wettelijke Metrologie, opgericht in 1955 (Organisation Internationale de Métrologie Légale, OIML) bestaat er in, de technische reglementeringen terzake te harmoniseren en internationaal gelijkvormig te maken. Richtlijnen werden opgesteld inzake koortstermometers,

gewone gewichten en nauwkeurigheidsgewichten, weegwerktuigen (foutgrenzen), manometers, meters voor bloeddruk, pyrometers, sacharimeters, meters van vochtigheid in granen, enz. De richtlijnen van de Internationale Organisatie voor Wettelijke Metrologie zijn niet bindend voor de lidstaten.

1.3. Normalisatie

1.3.1. Internationale Organisatie voor Normalisatie (International Organization for Standardization, met als internationaal aanvaarde afkorting : ISO)

De ISO (waarbij in 1985 90 landen waren aangesloten langs hun nationaal instituut voor normalisatie om) heeft tot taak internationale normen op te stellen op alle gebieden van industriële en technologische aktiviteiten om aldus tot een eenvormigheid te komen inzake allerhande technische voorschriften en reglementeringen.

De behoefte aan dergelijke voorschriften liet zich het eerst gelden op nationaal vlak ongeveer na de eerste wereldoorlog en zo zijn nationale normen en nationale technische reglementeringen tot stand gekomen in de verschillende industriële landen.

Een nadeel was echter dat zowel de vrije als de verplichte voorschriften inzake eenzelfde materie nog verschilden van land tot land, hetgeen een technische belemmering vormde voor het internationale goederenverkeer of aanleiding gaf tot verhoogde produktiekosten. Om hieraan te verhelpen werd in 19[illegible] e ISO opgericht, met als werkterrein het ganse gebied van de technologie, met uitzondering van de elektrotechnische nijverheid waarvoor reeds vroeger het Internationaal Elektrotechnisch Komitee (International Electrotechnical Commission IEC; Commission Electrotechnique Internationale CEI) werd opgericht.

De ISO vaardigt internationale normen uit op verschillende uiteenlopende domeinen; in deze normen treft men aan :

- voorschriften en definities in verband met de terminologie, teneinde deze eenvormig te maken;

- mechanische en elektrotechnische specifikaties, met het doel de omwisselbaarheid van onderdelen te waarborgen en de kostprijs te verminderen door seriefabrikage;
- technische voorschriften in verband met het waarborgen van de veiligheid en de gezondheid;
- kwaliteitsvoorschriften waaraan de industriële produkten moeten voldoen, teneinde oneerlijke konkurrentie te voorkomen en de niet-gespecialiseerde verbruiker te beschermen;
- technische voorschriften inzake de kontrole van industriële produkten, teneinde na te gaan of ze voldoen aan de opgelegde technische voorschriften.

Dergelijke voorschriften kunnen ofwel eenvoudig aanbevelingen zijn die op vrijwillige basis worden toegepast, ofwel kunnen ze, door tussenkomst van de wetgevende macht, wettelijk verplicht worden.

Aldus werden ook inzake metrologie (wetenschap gewijd aan meeteenheden, meetstandaarden en meetwerktuigen) een reeks normen opgesteld. Deze normen zijn uiteraard niet tegenstrijdig met de aanbevelingen gedaan door de CGPM (die eveneens niet wettelijk verplicht zijn).

Enkele ISO-normen op het gebied van grootheden en eenheden zijn :

ISO 31/0 - 1981 : General introduction to ISO 31; General principles concerning quantities, units and symbols
ISO 31/1 - 1978 : Quantities and units of space and time
ISO 31/2 - 1978 : Quantities and units of periodic and related phenomena
ISO 31/3 - 1978 : Quantities and units of mechanics
ISO 31/4 - 1978 : Quantities and units of heat
ISO 31/5 - 1979 : Quantities and units of electricity and magnetism
ISO 31/6 - 1980 : Quantities and units of light and related electromagnetic radiations
ISO 31/7 - 1978 : Quantities and units of acoustics
ISO 31/8 - 1980 : Quantities and units of physical chemistry and molecular physics
ISO 31/9 - 1980 : Quantities and units of atomic and nuclear physics
ISO 31/10 - 1980 : Quantities and units of nuclear reactions and ionizing radiations

ISO 31/11 - 1978 : Mathematical signs and symbols used in physical sciences and technology
ISO 31/12 - 1981 : Dimensionless parameters
ISO 31/13 - 1981 : Quantities and units of solid state physics
ISO 1000 - 1981 : SI units and recommendations for the use of their multiples and of certain other units

1.3.2. Internationaal Elektrotechnisch Komitee (International Electrotechnical Commission IEC; Commission Electrotechnique Internationale CEI)

Op het gebied van de elektrotechnische nijverheid heeft de IEC-CEI talrijke voorschriften opgesteld, waarvan er enkele handelen over elektrische en elektromagnetische grootheden en eenheden, en hun symbolen.

Enkele IEC-CEI-normen op het gebied van grootheden, eenheden en hun symbolen zijn (de betrokken normen verschijnen enkel in het Frans en in het Engels) :

27 : Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique.
27-1 (1971) Première partie : Généralités.
Cinquième édition 1971 comprenant les Modifications N° 1 (1974) en N° 2 (1977)
79 p.
Modification N° 4 (1983)
5 p.
(Incorporant la Modification N° 3 (1981).)
Contient une liste de symboles littéraux utilisés en électrotechnique et précise comment ceux-ci peuvent être employés et combinés. Spécifie les alphabets, les indices, les fonctions singulières, distributions et les caractères à utiliser pour les grandeurs et unités.

27-1A (1976) Premier complément : Article 4a : Grandeurs fonctions du temps.
21 p.
Contient quelques commentaires généraux, une liste de symboles et des exemples.

27-2 (1972) Deuxième partie : Télécommunications et électronique.
42 p. (Première édition)
Définit les règles pour l'utilisation et l'écriture des symboles des grandeurs générales, des symboles des grandeurs se rapportant aux réseaux à deux accès, des symboles pour la transmission de signaux par lignes (câbles compris), des symboles de propagation des ondes radioélectriques, des symboles des grandeurs concernant la propagation dans les guides d'ondes, des symboles pour antennes, des symboles pour électroacoustique et circuits électriques équivalents des cristaux piézoélectriques.

27-2A (1975) Premier complément.
27 p.
Contient quatre chapitres traitant de : Chapitre V : Grandeurs concernant la propagation dans les guides d'ondes; Chapitre IX : Symboles littéraux pour la matrice de répartition et pour la matrice de transfert; Chapitre X : Symboles pour l'usage dans le domaine des convertisseurs statiques à tubes ou à semi-conducteurs; Chapitre XI : Automatique.

27-2B (1980) Deuxième complément.
8 p.
Chapitre XII : Grandeurs se rapportant aux réseaux linéaires à n accès.

27-3 (1974) Troisième partie : Grandeurs et unités logarithmiques.
21 p. (Première édition)
Précise les concepts des grandeurs et des unités logarithmiques et en donne des exemples. Analyse en détail les relations entre valeurs numériques et valeurs de grandeurs, de même que les concepts de niveau absolu, de niveau relatif et de référence à un niveau.

50 : Vocabulaire Electrotechnique International.
50 (111-03) (1977) Physique et chimie. Section 111-03 - Notions relatives aux grandeurs et aux unités.
12 22 p.

164 (1964) : Recommandations dans le domaine des grandeurs et unités utilisées en électricité.
63 p. (Première édition)
Comprend un exposé complet du travail de la CEI dans le domaine des grandeurs et unités électriques et magnétiques. Divisé en trois sections : historique des grandeurs et unités électriques et magnétiques; liste exhaustive des normes de la CEI dans ce domaine; bibliographie.

206 (1966) : Dénomination des grandeurs caractérisant les propriétés magnétiques et électriques du vide et d'une substance.
5 p. (Première édition)
Donne les dénominations des deux grandeurs caractérisant les propriétés magnétiques et électriques du vide, les grandeurs caractérisant les propriétés magnétiques et électriques d'une substance et les grandeurs relatives caractérisant les propriétés magnétiques et électriques d'une substance.

1.3.3. Comité Européen de Normalisation, European Committee for Standardization, Europäisches Komitee für Normung, met als internationaal aanvaarde afkorting : CEN

Het CEN werd in 1975 opgericht door de normalisatie-instituten van 15 Europese landen (België, Denemarken, Duitse Bondsrepubliek, Finland, Frankrijk, Groot-Brittannië, Ierland, Italië, Nederland, Noorwegen, Oostenrijk, Portugal, Spanje, Zweden, Zwitserland), met het doel op het gebied van normalisatie een samenwerking tot stand te brengen op Europees vlak. Enkel de normalisatie-instituten van de landen die deel uitmaken van de Europese Ekonomische Gemeenschap (EEG) of de Europese Vrijhandelszone (of die in aanmerking komen om er deel van uit te maken) kunnen lid worden van het CEN.

Naast het Comité Européen de Normalisation (CEN), bestaat er ook een Comité Européen de Normalisation Electrique (CENELEC) dat op Europees vlak de normalisatie op het gebied van de elektrotechniek behartigt.

1.4. Verdrag van Rome tot oprichting van de Europese Ekonomische Gemeenschap (EEG)

De Europese Ekonomische Gemeenschap (EEG) is een overeenkomst die in 1957 werd gesloten tussen West-Duitsland, Frankrijk, Italië, België, Nederland en Luxemburg (in 1973 zijn ook Groot-Brittannië, Ierland en Denemarken toegetreden, in 1981 Griekenland en in 1986 Spanje en Portugal), met het doel geleidelijk een doeane-unie en een gemeenschappelijke markt te verwezenlijken. Door verordeningen en wetsbepalingen poogt de EEG de hindernissen op te ruimen die de éénmaking op ekonomisch gebied in de weg staan.

Eén van deze hindernissen zijn de uiteenlopende technische reglementeringen en daarom voorziet dit verdrag in artikel 100 dat in de betrokken lidstaten de technische reglementeringen die het goederenverkeer hinderen, door harmonisatie van de wettelijke en bestuursrechtelijke bepalingen van de lidstaten moeten opgeheven worden.
De richtlijnen die door de Raad van de Europese Gemeenschappen worden goedgekeurd, moeten in de nationale wetgeving van de lidstaten worden opgenomen.

Inzake metrologie, heeft de Raad richtlijnen uitgevaardigd zowel op het gebied van meetwerktuigen (bijvoorbeeld in verband met weegwerktuigen, meters voor elektrische energie, koortstermometers, enz.) als op het gebied van de eenheden.

In verband met eenheden werden door de Raad van de Europese Gemeenschappen volgende richtlijnen uitgevaardigd :

- Richtlijn 71/354/EEG van 18 oktober 1971, inzake de onderlinge aanpassing van de wetgevingen der lidstaten op het gebied van de meeteenheden
- Richtlijn 76/770/EEG van 27 juli 1976 tot wijziging van richtlijn 71/354/EEG inzake de onderlinge aanpassing van de wetgevingen der lidstaten op het gebied van de meeteenheden
- Richtlijn 80/181/EEG van 20 december 1979 inzake de onderlinge aanpassing der lidstaten op het gebied van de meeteenheden, en tot intrekking van richtlijn 71/354/EEG

- Richtlijn 85/1/EEG van 18 december 1984 tot wijziging van richtlijn 80/181/EEG inzake de onderlinge aanpassing van de wetgevingen der lidstaten op het gebied van de meeteenheden.

Bij het opstellen van richtlijnen inzake eenheden, wordt door de Raad uiteraard rekening gehouden respektievelijk met :

- de resoluties inzake eenheden die door de opeenvolgende Algemene Conferenties voor Maten en Gewichten (CGPM) werden aangenomen;
- de normen inzake eenheden die door de Internationale Organisatie voor Normalisatie (ISO) werden goedgekeurd.

2. Huidige wetgeving en voornaamste normen inzake eenheden in België en Nederland

2.1. België

2.1.1. Wetgeving

- Wet van 16 juni 1970 betreffende de meeteenheden, de meetstandaarden en de meetwerktuigen (Belgisch Staatsblad van 2 september 1970)
- Koninklijk Besluit van 14 september 1970 houdende gedeeltelijke inwerkingtreding van de wet van 16 juni 1970 betreffende de meeteenheden, meetstandaarden en meetwerktuigen en tot vaststelling van de wettelijke meeteenheden en van de standaarden en regels ter reproduktie van deze eenheden (Belgisch Staatsblad van 27 november 1970)
- Koninklijk Besluit van 10 mei 1973 waarbij een nieuwe grondeenheid van het Internationaal Eenhedenstelsel wordt gedefinieerd (Belgisch Staatsblad van 2. juni 1973)
- Koninklijk Besluit van 4 oktober 1977 tot wijziging van het Koninklijk Besluit van 14 september 1970 houdende gedeeltelijke inwerkingtreding van de wet van 16 juni 1970 betreffende de meeteenheden, meetstandaarden en meetwerktuigen en tot vaststelling van de wettelijke meeteenheden en van de standaarden en regels ter reproduktie van deze eenheden (Belgisch Staatsblad van 20 oktober 1977)
- Koninklijk Besluit van 23 januari 1981 tot wijziging van de definitie van een grondeenheid van het internationaal eenhedenstelsel (Belgisch Staatsblad van 6 februari 1981)

- Koninklijk Besluit van 23 januari 1981 tot wijziging van het Koninklijk Besluit van 14 september 1970, houdende gedeeltelijke inwerkingtreding van de wet van 16 juni 1970 betreffende de meeteenheden, meetstandaarden en meetwerktuigen en tot vaststelling van de wettelijke meeteenheden en van de standaarden en regels ter reproduktie van deze eenheden (Belgisch Staatsblad van 6 februari 1981)
- Koninklijk Besluit van 4 februari 1986 tot wijziging van artikel 3 van de wet van 16 juni 1970 betreffende de meeteenheden, de meetstandaarden en de meetwerktuigen (Belgisch Staatsblad van 20 februari 1986)
- Koninklijk Besluit van 4 februari 1986 tot wijziging van het Koninklijk Besluit van 14 september 1970 houdende gedeeltelijke inwerkingtreding van de wet van 16 juni 1970 betreffende de meeteenheden, de meetstandaarden en de meetwerktuigen en tot vaststelling van de wettelijke meeteenheden en van de standaarden en regels ter reproduktie van deze eenheden (Belgisch Staatsblad van 20 februari 1986)
- Wet van 21 februari 1986 tot wijziging van artikel 30 van de wet van 16 juni 1970 betreffende de meeteenheden, de meetstandaarden en de meetwerktuigen (Belgisch Staatsblad van 19 maart 1986).

2.1.2. Normen

- NBN X 02-001 : SI-eenheden en aanbevelingen voor het gebruik van hun veelvouden en van sommige andere eenheden
  3de uitgave, januari 1986 (8 blz.)
- NBN X 02-002 : Grootheden en symbolen
  1ste uitgave, oktober 1975 (4 blz.)
- NBN X 02-003 : Grootheden, eenheden en getallen
  Schrijf- en zetwijzen
  2de uitgave, januari 1979 (8 blz.)
- NBN X 02-004 : Het afronden van getallen
  1ste uitgave, april 1979 (2 blz.)

2.1.3. Gebruik van de wettelijke eenheden

Wettelijke eenheden zijn de SI-eenheden en andere uitdrukkelijk erkende eenheden (zie Hoofdstuk X), en hun veelvouden en delen.

De Belgische wetgeving vermeldt onder andere het volgende aangaande het gebruik van de wettelijke eenheden :

De wettelijke meeteenheden moeten gebruikt worden in de autentieke akten, in de akten uitgaande van de openbare machten, in de onderhandse akten, alsmede in de geschriften opgemaakt in de uitoefening van een beroep, een bedrijf of een handel.

Het is verboden andere dan de wettelijke meeteenheden te gebruiken voor het uitdrukken van de hoeveelheid van goederen of van de hoegrootheid van diensten :

- *bij de handelsverrichtingen of bij het leveren van goederen zoals deze leveringen gewoonlijk gebeuren;*
- *bij de bepaling van de vergoeding of van de prijs van diensten;*
- *in fakturen, aanplakbiljetten, aankondigingen en reklames;*
- *op goederen die te koop worden aangeboden of worden verkocht, op de verpakking van deze goederen of op de recipiënt die ze bevat.*

Meetwerktuigen die aan ijk onderworpen zijn, moeten het meetresultaat in wettelijke meeteenheden weergeven.

2.2. Nederland

2.2.1. Wetgeving

- IJkwet 1937 (Staatsblad 627 - 1937)
  Wet van 22 april 1937, tot nieuwe regeling betreffende de maten, gewichten, meet- en weegwerktuigen
- Wet van 5 juni 1968 (Staatsblad 316 - 1968) tot wijziging van de IJkwet 1937 (Staatsblad 627 - 1937)
- "Standaardenbesluit 1968" (Staatsblad 674 - 1968)
  Besluit van 11 december 1968, houdende uitvoering van artikel 2 van de IJkwet 1937 (Staatsblad 627 - 1937)
- "Eenhedenbesluit 1981" (Staatsblad 605 - 1981)
  Besluit van 21 september 1981, houdende uitvoering van de artikelen 1, eerste lid, onder b, en vierde lid, 4, derde en vierde lid en 4a van de IJkwet 1937 (Staatsblad 627 - 1937)

- Besluit van 25 oktober 1985 (Staatsblad 577 - 1985) tot wijziging van het Eenhedenbesluit 1981 (Staatsblad 605 - 1981)
  Het "Eenhedenbesluit 1981" zoals het is gewijzigd door het Besluit van 25 oktober 1985, is in overeenstemming met de EEG-richtlijn 80/181/EEG van 20 december 1979 zoals deze is gewijzigd door de EEG-richtlijn 85/1/EEG van 18 december 1984.
- Wet van 27 november 1985 (Staatsblad 646 - 1985) tot wijziging van de IJkwet 1937 (Staatsblad 627 - 1937).

2.2.2. Normen

- NEN 999 : Het Internationale Stelsel van Eenheden (SI)
  1ste druk, november 1977 (35 blz.)
- NEN 1000 : Regels voor het hanteren van het Internationale Stelsel van Eenheden (SI)
  2de druk, oktober 1976 (6 blz.)
- NEN 1226 : Grootheden, SI-eenheden en hun symbolen
  Atomaire en moleculaire verschijnselen
  1ste druk, februari 1981 (8 blz.)
- NEN 3049 : Herleiding van eenheden tot SI-eenheden
  1ste druk, maart 1978 (31 blz.)
- NEN 3066 : Grootheden, eenheden en getallen. Schrijf- en zetwijzen
  2de druk, september 1974 (22 blz.)
  (met korrektieblad mei 1976)
- Ontwerp NEN 2955 : Gegevensverwerking - Aanduidingen van SI- en andere eenheden voor toepassing in apparatuur met een beperkt aantal tekens
  1ste druk, juni 1976 (6 blz.)

2.2.3. Gebruik van de wettelijke eenheden

Wettelijke eenheden zijn de SI-eenheden en andere uitdrukkelijk erkende eenheden (zie Hoofdstuk X), en hun veelvouden en delen.

De Nederlandse wetgeving vermeldt onder andere het volgende aangaande het gebruik van de wettelijke eenheden :

Het is verboden in de uitoefening van een beroep of bedrijf bij het vragen, het aanbieden of het leveren van goederen of diensten :

- *een grootheid uit te drukken in een andere dan een erkende meeteenheid, indien voor die grootheid een erkende meeteenheid geldt;*
- *voor een grootheid een benaming te bezigen in strijd met de regelen, genomen bij algemene maatregel van bestuur met betrekking tot het bezigen van benamingen voor grootheden.*

HOOFDSTUK II

GROOTHEDEN, EENHEDEN, ALGEMENE GROOTHEDENVERGELIJKINGEN, GETALWAARDENVERGELIJKINGEN, KOHERENTIE, DIMENSIE, SCHRIJF- EN ZETWIJZEN

1. Groothedensoorten, grootheden, getalwaarde en eenheid

Begrippen uit de meetkunde, de natuurwetenschappen en de techniek, zoals "lengte", "oppervlakte", "volume", "tijd", "snelheid", "versnelling", "massa", "kracht", "energie", "vermogen", "elektrische stroom", "elektrische spanning", "elektrische weerstand", "termodynamische temperatuur", "hoeveelheid stof", "lichtsterkte", "verlichtingssterkte", enz. worden groothedensoorten genoemd. Hierbij gaat het steeds om iets dat "meetbaar" is.

Fysische grootheden(soorten) zijn begrippen die gebruikt worden voor de kwalitatieve en kwantitatieve beschrijving van fysische verschijnselen.

Een (bepaalde) lengte, een (bepaalde) oppervlakte, een (bepaald) volume, een (bepaalde) tijd enz. zijn grootheden behorend respektievelijk tot de groothedensoort lengte, oppervlakte, volume, tijd, enz.

Grootheden van dezelfde soort verschillen van elkaar door hun grootte; ze zijn met elkaar vergelijkbaar in die zin dat men door meting (eventueel gevolgd door berekening) hun onderlinge verhouding kan bepalen.

Een grootheid kan dus gemeten worden door de grootte ervan te vergelijken met een grootheid van dezelfde soort met een welbepaalde grootte die als eenheid is aangenomen. Een eenheid is een grootheid met een afgesproken welbepaalde grootte.

Voorbeelden :

- de hoogte van de muur is drie en een halve meter : $h = 3{,}5$ m
- de grootste veldsterkte tussen de polen van deze magneet is vierduizend ampère per meter : $H_{max} = 4000 \frac{A}{m}$
- de frekwentie van dit verschijnsel is vijftig hertz : $f = 50$ Hz

Het getal dat de verhouding tussen grootheid en eenheid aangeeft, wordt getalwaarde genoemd, zodat geldt :

$$\frac{\text{grootheid}}{\text{eenheid}} = \text{getalwaarde}$$

$$\text{grootheid} = \text{getalwaarde} \times \text{eenheid}$$

De getalwaarde geeft aan, hoeveel maal de eenheid begrepen is in de te meten grootheid. Hoe groter de gekozen eenheid is, des te kleiner zal de getalwaarde zijn, en omgekeerd, hoe kleiner de gekozen eenheid is, des te groter zal de getalwaarde zijn. De grootheid zelf is uiteraard onafhankelijk van de gekozen eenheid (die slechts dient om de betrokken grootheid te meten).

Wanneer de grootheid voorgesteld wordt door X, de eenheid door $[X]$ en de overeenkomstige getalwaarde door $\{X\}$, bekomt men als symbolische schrijfwijze :

$$\frac{X}{[X]} = \{X\}$$

$$X = \{X\} \cdot [X]$$

Hierin stelt X dus een grootheid voor, en $\{X\}$ de getalwaarde van X, uitgedrukt in de eenheid $[X]$.

Met behulp van deze symbolische voorstellingen kunnen getalwaarden en eenheden worden weergegeven zonder ze met name te noemen. Zo betekent $[l]$ een niet nader bepaalde eenheid van lengte, $[A]$ een niet nader bepaalde eenheid van oppervlakte.

Een symbool van een eenheid als index bij een akkoladevorm duidt er op, dat het gaat om de getalwaarde die behoort bij de betrokken eenheid. Voorbeeld : oppervlakte A van een rechthoek, met lengte l en breedte b

$$A = l \cdot b$$

$$\{A\} \cdot [A] = \{l\} \cdot [l] \cdot \{b\} \cdot [b]$$

Met $[l]$ en $[b]$ = m bekomt men :

$$\{A\} \cdot [A] = \{l\}_m \cdot \{b\}_m \cdot m^2$$

Wanneer voor $[A]$ de voor de hand liggende eenheid m^2 gekozen wordt, bekomt men :

$$\{A\}_{m^2} \cdot m^2 = \{l\}_m \cdot \{b\}_m \cdot m^2$$

$$\{A\}_{m^2} = \{l\}_m \cdot \{b\}_m$$

Grootheden die fysisch zinvol bij elkaar kunnen worden opgeteld of van elkaar worden afgetrokken, worden gelijksoortige grootheden (grootheden van dezelfde soort) genoemd. In vele gevallen laat de formele bewerking van het optellen of het aftrekken een eenvoudige fysische interpretatie toe, zoals blijkt uit volgende voorbeelden in verband met optellen :

- het achter elkaar plaatsen, de serieschakeling;
  voorbeelden : optellen van lengten, van elektrische spanningen, van elektrische weerstanden
- het naast elkaar plaatsen, de parallelschakeling;
  voorbeelden : optellen van stromen, van kapaciteiten, van elektrische geleidingen
- het samenvoegen :
  voorbeelden : optellen van oppervlakten, van volumes, van massa's, van elektrische ladingen.

In andere gevallen is er geen direkt voor de hand liggende fysische interpretatie;
voorbeelden : optellen van temperaturen, van viskositeiten.

2. Basisgroothedensoorten en afgeleide groothedensoorten

Een bepaald afgebakend gebied van de wetenschappen kan worden beschreven met behulp van n groothedensoorten, waarvan de onderlinge samenhang door vergelijkingen wordt weergegeven. Van deze vergelijkingen kunnen er slechts m (met $m < n$) onafhankelijk worden gekozen. Slechts m groothedensoorten worden afgeleid en gedefinieerd door deze m vergelijkingen. De overige groothedensoorten (waarvan het aantal voorgesteld wordt door g met $g = n - m$) moeten als basisgroothedensoorten gekozen worden.

Men noemt g de graad of de orde van de beschouwde groep groothedensoorten. Het getal g geeft het aantal te kiezen basisgroothedensoorten aan; de overige groothedensoorten worden afgeleide groothedensoorten genoemd.

Basisgrootheden worden gemeten in grondeenheden. Grondeenheden zijn door een definitie gebonden aan een natuurlijke of kunstmatige standaard of aan een model.

Afgeleide grootheden worden gemeten in afgeleide eenheden; dit zijn eenheden die van de grondeenheden zijn afgeleid, gebruik makend van de definitie van de afgeleide grootheid.

Voorbeelden :

- In de geometrie (meetkunde) treft men 3 groothedensoorten aan, namelijk lengte, oppervlakte en volume. Onder al de mogelijke vergelijkingen tussen deze 3 groothedensoorten ($n = 3$) kunnen er slechts 2 ($m = 2$) onafhankelijk gekozen worden, bijvoorbeeld de vergelijking voor de berekening van de oppervlakte en de vergelijking voor de berekening van het volume. De graad is hier gelijk aan 3 - 2 = 1, en als basisgroothedensoort werd lengte gekozen. Oppervlakte en volume zijn dan afgeleide groothedensoorten.
- In de kinematika (bewegingsleer) treft men 4 groothedensoorten aan, namelijk lengte, tijd, snelheid en versnelling. Onder al de mogelijke vergelijkingen tussen deze 4 groothedensoorten ($n = 4$) kunnen er slechts 2 ($m = 2$) onafhankelijk gekozen worden, bijvoorbeeld de vergelijking voor de berekening van de snelheid ($v = \frac{l}{t}$) en de vergelijking voor de berekening van de versnelling ($a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$). De graad is hier gelijk aan 4 - 2 = 2. Naast de basisgroothedensoort lengte (reeds in de geometrie als basisgroothedensoort aangenomen) werd ook tijd als basisgroothedensoort aangenomen. Snelheid en versnelling zijn dan afgeleide groothedensoorten.
- In de mechanika treft men onder andere volgende groothedensoorten aan : lengte, tijd, massa, kracht, arbeid, vermogen. Onder al de mogelijke vergelijkingen tussen deze 6 groothedensoorten ($n = 6$) kunnen er slechts 3 ($m = 3$) onafhankelijk gekozen worden, bijvoorbeeld de vergelijking voor de berekening van de kracht, de vergelijking voor de berekening van de arbeid en de vergelijking voor de berekening van het vermogen.

De graad is hier gelijk aan 6 - 3 = 3. Naast de basisgroothedensoorten lengte en tijd werd in het SI massa als basisgroothedensoort aangenomen. Kracht, arbeid en vermogen zijn dan afgeleide groothedensoorten.

De benaming "grootheid" wordt kortheidshalve vaak gebruikt waar de benaming "groothedensoort" korrekter zou zijn. Zo spreekt men doorgaans van "basisgrootheid" en "afgeleide grootheid" wanneer "basisgroothedensoort" en "afgeleide groothedensoort" bedoeld wordt.

Het aantal basisgroothedeen kan worden verhoogd indien men een grootheid die normaal kon afgeleid worden, toch verheft tot basisgrootheid. Voorbeelden in het SI hiervan zijn massa, temperatuur en elektrische stroom. Daardoor voert men dan echter automatisch een nieuwe afgeleide grootheid in, onder de vorm van een natuurkonstante. De dimensie van een natuurkonstante is zodanig, dat de dimensionele gelijkheid tussen de twee leden van de betrokken groothedenvergelijking bewerkstelligd wordt. De getalwaarde van een dergelijke natuurkonstante is afhankelijk van de grootte van de gekozen eenheid voor de nieuwe basisgrootheid. Voorbeelden van dergelijke natuurkonstanten in het SI zijn :

- de permeabiliteit μ_0 en de permittiviteit ϵ_0. In het elektromagnetische CGS-stelsel was $\mu_0 = 1$ en in het elektrostatische CGS-stelsel was $\epsilon_0 = 1$. Door echter (in het SI) elektrische stroom als basisgrootheid te aanvaarden, ontstaan in het SI de natuurkonstanten μ_0 en ϵ_0 (zie Hoofdstuk IV, onder 3.4. en 3.5.);
- de molaire (of algemene of universele) gaskonstante R en de konstante van Boltzmann k (zie Hoofdstuk V, onder 1.10.3.);
- de gravitatiekonstante k (zie Hoofdstuk XIII, onder 2.1., 3.1., 3.2. en 3.3.).

In het SI kent men 7 basisgroothedeen : lengte, massa, tijd, elektrische stroom, termodynamische temperatuur, hoeveelheid stof, lichtsterkte. De eenheden van basisgroothedeen zijn grondeenheden, die in een definitie zijn vastgelegd.

3. Algemene groothedenvergelijkingen (fysische groothedenvergelijkingen)

Een algemene groothedenvergelijking geeft een betrekking uit de meetkunde of een fysische wetmatigheid weer als een produkt van positieve of

negatieve machten van grootheden (eventueel voorafgegaan door een getalfaktor), derwijze dat de keuze van de aan te wenden eenheden (of het aan te wenden eenhedenstelsel) volledig vrij blijft. Een algemene grootheden-vergelijking brengt tot uiting dat een meetkundige betrekking en een natuurwet niet afhankelijk zijn van de keuze van de eenheden. Een meetkundige betrekking of een fysische wetmatigheid zijn immers niet afhankelijk van de eenheden die men zal kiezen om de verschillende grootheden te meten die er aan te pas komen. Er worden geen bepaalde eenheden opgedrongen, waaruit volgt dat een algemene groothedenvergelijking geen omrekeningsfaktor(en) tussen eenheden bevat. De aan te wenden eenheden hoeven zelfs niet koherent te zijn; nochtans biedt het gebruik van koherente eenheden zeer grote voordelen (zie onderhavig hoofdstuk onder 8.).

Zolang geen konkreet geval beschouwd wordt, gaat het in een algemene groothedenvergelijking eigenlijk om een betrekking tussen groothedensoorten; wanneer echter een konkreet geval wordt beschouwd met welbepaalde grootheden, gaat het om een betrekking tussen grootheden.
Voorbeelden van algemene groothedenvergelijkingen :

- de oppervlakte A_r van een rechthoek met lengte l en breedte b wordt gegeven door :

$$A_r = l \cdot b \quad \text{(getalfaktor = 1)}$$

- de oppervlakte A_d van een driehoek met basis b en hoogte h wordt gegeven door :

$$A_d = \frac{b \cdot h}{2} \quad \text{(getalfaktor = } \frac{1}{2}\text{)}$$

- de oppervlakte A_c van een cirkel met straal r wordt gegeven door :

$$A_c = \pi r^2 \quad \text{(getalfaktor = } \pi = 3{,}141\ 592\ \ldots\text{)}$$

- de valsnelheid v (in het luchtledige) met g = versnelling van de zwaartekracht (zwaarteveldsterkte) en h = valhoogte wordt gegeven door :

$$v = \sqrt{2\,g \cdot h} = \sqrt{2} \cdot g^{1/2} \cdot h^{1/2} \quad \text{(getalfaktor = } \sqrt{2} = 1{,}414\ 213\ \ldots\text{)}$$

De gedaante van een algemene groothedenvergelijking kan verschillend zijn naargelang van het toegepast eenhedenstelsel. Bijvoorbeeld wordt arbeidsvermogen van plaats (potentiële energie) E_p en arbeidsvermogen van beweging (kinetische energie) E_k in het TS (technisch stelsel) en in het SI weergegeven respektievelijk door volgende algemene groothedenvergelijkingen, met G = (norm)gewicht, m = massa, h = hoogte, v = snelheid,

g = (norm)versnelling van de zwaartekracht (zwaarteveldsterkte) :

- TS : $E_p = G \cdot h$ (getalfaktor = 1)

  $E_k = \frac{G \cdot v^2}{2g}$ (getalfaktor = $\frac{1}{2}$)

- SI : $E_p = m \cdot g \cdot h$ (getalfaktor = 1)

  $E_k = \frac{m \cdot v^2}{2}$ (getalfaktor = $\frac{1}{2}$)

De reden voor deze onderlinge verschillen is gelegen in het feit, dat in het TS de grootheid massa en in het SI de grootheid (norm)gewicht niet gebruikelijk is.

Een exponent van een getal of van een grootheid dient steeds een getal (positief of negatief, geheel of gebroken) te zijn, ofwel een geheel van grootheden waarvan de dimensie (zie onderhavig hoofdstuk onder 10.) gelijk is aan 1.

Aldus is een uitdrukking als $e^{-\frac{t}{R.C}}$ toelaatbaar, want de dimensie van de exponent $\frac{t}{R.C}$ (met t = tijd, R = weerstand, C = kapaciteit) is gelijk aan 1 :

$$\dim\left(\frac{t}{R.C}\right) = \frac{T}{L^2\ M\ T^{-3}\ I^{-2} \cdot L^{-2}\ M^{-1}\ T^4\ I^2} = 1$$

Uiteraard dient ook de eenhedenkontrole 1 als resultaat op te leveren :

$$\frac{[t]_{SI}}{[R]_{SI} \cdot [C]_{SI}} = \frac{s}{\Omega \cdot C} = \frac{s}{\frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^3} \cdot \frac{A^2 \cdot s^4}{kg \cdot m^2}} = 1$$

De uitdrukking $\lg x$ of $\ln x$ is alleen zinvol wanneer x een getal is, ofwel een verhouding van twee gelijksoortige grootheden zodat de dimensie van de betrokken verhouding gelijk is aan 1.

Voorbeeld :

Niveau L_p van een geluidsdruk p :

$$L_p = 20 \lg \frac{p}{p_o} \text{ dB}$$

$$\dim\left(\frac{p}{p_o}\right) = \frac{L^{-1}\ M\ T^{-2}}{L^{-1}\ M\ T^{-2}} = 1$$

$$\frac{[p]_{SI}}{[p_o]_{SI}} = \frac{kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}}{kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}} = \frac{Pa}{Pa} = 1$$

Uitdrukkingen als

$$\sin x = \frac{x}{1\,!} - \frac{x^3}{3\,!} + \frac{x^5}{5\,!} - \frac{x^7}{7\,!} \quad \ldots$$

$$\cos x = 1 - \frac{x^2}{2\,!} + \frac{x^4}{4\,!} - \frac{x^6}{6\,!} \quad \ldots$$

zijn alleen zinvol als x een getal is. Derhalve dient de hoek x beschouwd te worden als zijnde uitgedrukt in radialen (met rad = 1).
Uitdrukkingen als sin t en cos t zijn niet zinvol; zijn echter wel zinvol uitdrukkingen als sin $(\omega.t)$ en cos $(\omega.t)$, met t = tijd en ω = pulsatie (hoekfrekwentie, cirkelfrekwentie) met als respektievelijke eenheden :

$$[t]_{SI} = s \quad \text{en} \quad [\omega]_{SI} = s^{-1}$$

4. Definitie van een afgeleide groothedensoort (definitievergelijking)

Veel experimentele wetmatigheden komen tot uiting in evenredigheden, die in een algemene groothedenvergelijking kunnen weergegeven worden.

Voor het invoeren van een nieuwe groothedensoort X (afgeleide groothedensoort) die afhankelijk is van reeds bekende groothedensoorten (basisgroothedensoorten of afgeleide groothedensoorten) A, B, enz. wordt gebruik gemaakt van een algemene groothedenvergelijking in volgende matematische vorm :

$$X = f \,.\, A^a \,.\, B^b \,.\, \ldots$$

Hierin zijn de exponenten a, b, ... meestal (doch niet noodzakelijk) gehele getallen, die zowel positief als negatief kunnen zijn. Verder is f een getalfaktor die niet gelijk aan 1 hoeft te zijn (hoewel dit dikwijls het geval is).

5. Koherente eenheden in het algemeen

De algemene groothedenvergelijking $X = f \,.\, A^a \,.\, B^b \,.\, \ldots$ waarmede een nieuwe groothedensoort X wordt gedefinieerd, kan als volgt worden geschreven :

$$\{X\} \,.\, [X] = f \,.\, \{A\}^a \,.\, [A]^a \,.\, \{B\}^b \,.\, [B]^b \,.\, \ldots$$

Deze vergelijking kan vervolgens worden gesplitst in een getalwaardenvergelijking :

$$\{X\} = f_1 \cdot \{A\}^a \cdot \{B\}^b \cdot \ldots$$

en een eenhedenvergelijking :

$$[X] = f_2 \cdot [A]^a \cdot [B]^b \cdot \ldots$$

Hierbij geldt : $f_1 \cdot f_2 = f$. Door f_2 steeds gelijk aan 1 te stellen, zal f_1 steeds gelijk zijn aan f, zodat men bekomt :

- als getalwaardenvergelijking (die, als men de akkolades zou weglaten, opnieuw overgaat in de algemene groothedenvergelijking zelf) :

$$\{X\} = f \cdot \{A\}^a \cdot \{B\}^b \cdot \ldots$$

- als eenhedenvergelijking :

$$[X] = [A]^a \cdot [B]^b \cdot \ldots$$

De eenheden die aan deze laatste uitdrukking voldoen (met $f_2 = 1$), worden koherent genoemd met betrekking tot de groothedenvergelijking $X = f \cdot A^a \cdot B^b \cdot \ldots$

De fysische betekenis van de eenheid $[X]$ volgt uit de overweging dat $X = [X]$ als $\{X\} = 1$, dus als $f \cdot \{A\}^a \cdot \{B\}^b \cdot \ldots = 1$. Als voorstelling van deze eenheid kan dus iedere situatie dienen waarvoor geldt : $f \cdot \{A\}^a \cdot \{B\}^b \cdot \ldots = 1$.

De eenheden $[A]$, $[B]$, ... zijn ofwel grondeenheden (eenheden van basisgrootheden), ofwel eenheden die reeds voorheen op een koherente wijze werden afgeleid. De afgeleide eenheid $[X]$ wordt dus direkt uit de grondeenheden of voorheen reeds afgeleide koherente eenheden bepaald. Uit de definitie van koherentie volgt, dat in vergelijkingen tussen koherente eenheden geen getalfaktor kan voorkomen.

Uit het feit dat men op grootheden de bewerkingen van optellen, aftrekken, vermenigvuldigen en delen kan toepassen, volgt dat men op grootheden ook de operaties differentiëren en integreren kan toepassen. Eenheden die koherent zijn met betrekking tot een groothedenvergelijking zijn daarom ook koherent met betrekking tot alle groothedenvergelijkingen die door integratie uit de eerste kunnen worden afgeleid.

6. Definitievergelijkingen en afgeleide vergelijkingen; de getalfaktor f en de grootte van koherente afgeleide eenheden

Nemen we aan, dat uitsluitend de basisgrootheden en de overeenkomstige grondeenheden van het SI gekend zijn, en dat de groothedensoort "oppervlakte" dient afgeleid te worden. Hiertoe dient vooreerst een definitievergelijking van de afgeleide groothedensoort "oppervlakte" (waaraan het symbool A wordt toegekend) opgesteld te worden, waaruit verder op een koherente wijze de eenheid van oppervlakte zal afgeleid worden. Er zijn echter vele verschillende definitievergelijkingen mogelijk zoals hierna zal worden aangetoond. Er dient dus een keuze gemaakt te worden.

Voor het vastleggen van de definitievergelijking van de grootheid oppervlakte beperken we ons tot de figuren rechthoek, driehoek en cirkel.
Zij A_r de oppervlakte van een rechthoek met lengte l en breedte b
A_d de oppervlakte van een driehoek met basis b en hoogte h
A_c de oppervlakte van een cirkel met straal r

Hierna zullen de groothedenvergelijkingen worden opgesteld die respektievelijk A_r, A_d en A_c weergeven. De betrokken groothedenvergelijkingen zijn van de vorm $X = f \cdot A^a \cdot B^b \cdot \ldots$ (zie onderhavig hoofdstuk onder 4.).

Voor een rechthoek geldt, dat de oppervlakte bij gelijkblijvende breedte evenredig is met de lengte en bij gelijkblijvende lengte evenredig met de breedte :

$$A_r = f_r \cdot l \cdot b$$

Voor een driehoek geldt dat de oppervlakte bij gelijkblijvende hoogte evenredig is met de basis bij gelijkblijvende basis evenredig met de hoogte :

$$A_d = f_d \cdot b \cdot h$$

Voor een cirkel geldt, dat de oppervlakte evenredig is met het kwadraat van de straal :

$$A_c = f_c \cdot r^2$$

Eén der getalfaktoren f_r, f_d en f_c is vrij te kiezen. De voor de hand liggende rationele keuze is, f_r gelijk te stellen aan 1, waarna kan bewezen worden dat f_d dan dient gelijk te zijn aan $\frac{1}{2}$ en f_c gelijk aan π.

Als definitievergelijking van de afgeleide grootheid "oppervlakte" werd gekozen :

$$A_r = l \cdot b \text{ (getalfaktor } f_r = 1)$$

De twee overige vergelijkingen zijn dan afgeleide vergelijkingen (afgeleid van de definitievergelijking) :

$$A_d = \frac{b \cdot h}{2} \text{ (getalfaktor } f_d = \frac{1}{2})$$

$$A_c = \pi r^2 \text{ (getalfaktor } f_c = \pi = 3{,}141\ 592\ \ldots)$$

De koherente afgeleide eenheid van oppervlakte is :

$$[l] \cdot [b] = \text{m} \cdot \text{m} = \text{m}^2$$

Deze eenheid kan worden voorgesteld door de oppervlakte van een vierkant waarvan de zijde gelijk is aan 1 m.

Nemen we nu eens aan, dat men zou gekozen hebben : $f_c = 1$. De definitievergelijking van de afgeleide grootheid "oppervlakte" zou dan geweest zijn :

$$A_c = r^2$$

De twee overige vergelijkingen (afgeleide vergelijkingen) zouden er dan uitgezien hebben als volgt :

$$A_r = \frac{l \cdot b}{\pi}$$

$$A_d = \frac{b \cdot h}{2\ \pi}$$

De koherente afgeleide eenheid van oppervlakte zou geweest zijn : $[r]^2 = \text{m} \cdot \text{m} = \text{m}^2$. Deze eenheid kan voorgesteld worden door de oppervlakte van een cirkel waarvan de straal gelijk is aan 1 m.

Hoewel beide eenheden van oppervlakte, bekomen respektievelijk door f_r en f_c gelijk te stellen aan 1, voorgesteld worden door m^2, gaat het toch om eenheden die onderling in grootte verschillen.

Zolang de keuze van de definitievergelijking niet is gedaan, en de waarde van de getalfaktor f in de vergelijking die gekozen werd als definitievergelijking, niet is vastgelegd, kan de betrokken koherente afgeleide eenheid wel worden uitgedrukt in de grondeenheden, doch de grootte ervan ligt maar vast wanneer, nadat een bepaalde definitievergelijking werd gekozen, ook de waarde van de getalfaktor f is vastgelegd.

Een kenmerk van een algemene groothedenvergelijking is, dat zij een meetkundige betrekking of een fysische wetmatigheid weergeeft, zonder enige verplichting op te leggen inzake de te gebruiken eenheden. Ook de getalfaktor f maakt deel uit van de algemene groothedenvergelijking :

$$X = f \cdot A^a \cdot B^b \cdot \ldots$$

Dit betekent dat ook de waarde van de getalfaktor f volledig onafhankelijk is van eenheden.

In het SI is er naar gestreefd, de getalfaktor f, waar mogelijk, gelijk te stellen aan 1. De eis echter dat de koherentie van het stelsel als geheel dient gehandhaafd te blijven, brengt mee dat enerzijds de afgeleide vergelijkingen (bijvoorbeeld $A_d = \frac{b \cdot h}{2}$ en $A_c = \pi r^2$) afhankelijk zijn van de definitievergelijking van de betrokken groothedensoort ($A_r = b \cdot h$), en dat anderzijds ook sommige afgeleide vergelijkingen afhankelijk zijn van meerdere reeds vastgelegde definitievergelijkingen, zodat er geen vrije keuze meer kan gemaakt worden wat betreft de getalfaktor f. Een voorbeeld zal dit duidelijk maken.

De kinetische energie E_k van een lichaam is evenredig met zijn massa m en met de tweede macht van zijn snelheid v :

$$E_k = f \cdot m \cdot v^2$$

Zoals uit de hierna volgende afleiding zal blijken, dient f gelijkgesteld te worden aan $\frac{1}{2}$, zodat men bekomt :

$$E_k = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

Deze vergelijking is afgeleid uit de definitievergelijkingen van snelheid, versnelling, kracht en verrichte arbeid :

- de snelheid v van een beweging is evenredig met de afgelegde weg s en omgekeerd evenredig met de tijd t; men bekomt als definitievergelijking :

$$v = \frac{s}{t} \text{ , of als differentiaalkotiënt : } v = \frac{ds}{dt}$$

De SI-eenheid van snelheid is $\frac{m}{s}$

- de versnelling a van een beweging is evenredig met de snelheidsverandering Δv en omgekeerd evenredig met de tijdsduur Δt waarin de snelheidsverandering plaats greep; men bekomt als definitievergelijking :

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \text{ , of als differentiaalkotiënt : } a = \frac{dv}{dt}$$

De SI-eenheid van versnelling is $\frac{m}{s^2}$

- de resultante F van de uitwendige krachten die aan een massa m een versnelling a geven is evenredig met de massa m en met de versnelling a; men bekomt als definitievergelijking (tweede wet van Newton) :

$$F = m \cdot a$$

De SI-eenheid van kracht is $\frac{kg \cdot m}{s^2} = N$

- de bij een beweging verrichte arbeid W is evenredig met de kracht F (in de bewegingsrichting) en met de afgelegde weg s; men bekomt als definitievergelijking :

$$W = F \cdot s$$

De SI-eenheid van energie (arbeid of warmte) is $\frac{kg \cdot m^2}{s^2} = N \cdot m = J$

Wordt de verrichte arbeid omgezet in kinetische energie, dan wordt het symbool E_K gebruikt in plaats van W.

Bij een oneindig kleine verandering van de afgelegde weg geldt :

$$dE_K = dW = F \cdot ds = m \cdot a \cdot ds = m \cdot \frac{dv}{dt} \cdot ds$$
$$= m \cdot \frac{ds}{dt} \cdot dv$$
$$= m \cdot v \cdot dv$$

Integratie van de differentiaalvergelijking $dE_K = m \cdot v \cdot dv$ van $v_o = 0$ tot v levert volgende afgeleide vergelijking op :

$$E_K = \int_{v_o=0}^{v} m \cdot v \cdot dv = m \cdot \frac{v^2}{2} = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

Bij aanwending van de SI-eenheden kg voor massa en m/s voor snelheid, bekomt men als eenheid van kinetische energie de SI-eenheid joule (J) :

$$[m] \cdot [v]^2 = \text{kg} \cdot \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = \text{kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = \text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m} = \text{N} \cdot \text{m} = \text{J}$$

Een algemene groothedenvergelijking kan soms om praktische redenen een enigszins andere vorm aannemen dan normaal zou worden verwacht. Een voorbeeld hiervan is de algemene groothedenvergelijking die de warmteoverdracht door straling tussen twee evenwijdige even grote vlakken weergeeft.

Als algemene logisch afgeleide groothedenvergelijking (die echter tot op heden niet gebruikelijk is) in verband met de warmteoverdracht door straling tussen twee evenwijdige even grote vlakken, geldt :

$$q_{1,2} = K_{1,2} \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

met

$$K_{1,2} = \frac{1}{\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} - \frac{1}{K_S}}$$

hetzij

$$\frac{1}{K_{1,2}} = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} - \frac{1}{K_S}$$

Betekenis der symbolen :

$q_{1,2}$ = warmteoverdracht door straling per oppervlakte en tijd

T_1, T_2 = termodynamische (of absolute) temperatuur van de respektievelijke oppervlakken

$K_{1,2}$ = stralingsfaktor

K_1, K_2 = stralingskonstante van de respektievelijke oppervlakken

K_S = stralingskonstante van een absoluut zwart lichaam

$$= 4{,}88 \cdot 10^{-8} \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot {}^\circ\text{K}^4} \qquad \text{(TS)}$$

$$= 5{,}77 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} \qquad \text{(SI)}$$

Daar K_1 en K_2 steeds kleiner zijn dan K_S, is $K_{1,2}$ eveneens steeds kleiner dan K_S.

Bij het gebruik in het TS (technisch stelsel) van de eenheden kcal, h, m^2 en °K, en in het SI van de SI-eenheden W, m^2 en K, is de getalwaarde van $K_{1,2}$ zeer klein en is de vierde macht van de getalwaarde van de termodynamische (of absolute) temperatuur een zeer groot getal.

Voorbeeld : Bereken $q_{1,2}$ wanneer t_1, t_2 en $K_{1,2}$ gegeven zijn.

Zij t_1 = 1350 °C, hetzij T_1 = 1623,15 °K (TS)

= 1623,15 K (SI)

t_2 = 475 °C, hetzij T_2 = 748,15 °K (TS)

= 748,15 K (SI)

$$K_{1,2} = 0{,}000\ 000\ 042\ \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot {}^\circ\text{K}^4} = 4{,}2 \cdot 10^{-8}\ \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot {}^\circ\text{K}^4} \quad \text{(TS)}$$

$$= 0{,}000\ 000\ 048\ 846\ \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} = 4{,}8846 \cdot 10^{-8}\ \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} \quad \text{(SI)}$$

Men bekomt :

$$q_{1,2} = K_{1,2} \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

$$= 4{,}2 \cdot 10^{-8}\ \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot {}^\circ\text{K}^4} \cdot \left[(1623{,}15)^4\ {}^\circ\text{K}^4 - (748{,}15)^4\ {}^\circ\text{K}^4\right]$$

$$= 4{,}2 \cdot 10^{-8}\ \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot {}^\circ\text{K}^4} \cdot (6{,}941\ 201\ 059 \cdot 10^{12}\ {}^\circ\text{K}^4 - 0{,}313\ 295\ 907 \cdot 10^{12}\ {}^\circ\text{K}^4)$$

$$= 278\ 372\ \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \quad \text{(TS)}$$

$$q_{1,2} = K_{1,2} \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

$$= 4{,}8846 \cdot 10^{-8}\ \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} \cdot \left[(1623{,}15)^4\ \text{K}^4 - (748{,}15)^4\ \text{K}^4\right]$$

$$= 4{,}8846 \cdot 10^{-8}\ \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} \cdot (6{,}941\ 201\ 059 \cdot 10^{12}\ \text{K}^4 - 0{,}313\ 295\ 907 \cdot 10^{12}\ \text{K}^4)$$

$$= 323\ 747\ \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad \text{(SI)}$$

Teneinde bij de uitwerking zowel zeer kleine als zeer grote getallen te vermijden, werd door middel van een kunstgreep de algemene groothedenvergelijking $q_{1,2} = K_{1,2} \cdot (T_1^4 - T_2^4)$ omgevormd tot een andere (eveneens) algemene groothedenvergelijking, op volgende wijze :

$$q_{1,2} = K_{1,2} \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

$$= 10^8 \cdot K_{1,2} \cdot \frac{(T_1^4 - T_2^4)}{10^8} = 10^8 \cdot K_{1,2} \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]$$

$$= C_{1,2} \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]$$

met $$C_{1,2} = 10^8 \cdot K_{1,2}$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{10^8 \cdot K_1} + \frac{1}{10^8 \cdot K_2} - \frac{1}{10^8 \cdot K_S}}$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_S}}$$

In het behandelde voorbeeld bekomt men als waarde voor $C_{1,2}$:

$$C_{1,2} = 10^8 \cdot K_{1,2} = 10^8 \cdot 4{,}2 \cdot 10^{-8} \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot {}^\circ\text{K}^4} = 4{,}2 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot {}^\circ\text{K}^4} \quad \text{(TS)}$$

$$C_{1,2} = 10^8 \cdot K_{1,2} = 10^8 \cdot 4{,}8846 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} = 4{,}8846 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} \quad \text{(SI)}$$

De berekening van $q_{1,2}$ gebeurt thans als volgt :

$$q_{1,2} = C_{1,2} \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]$$

$$= 4{,}2 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot {}^\circ\text{K}^4} \cdot \left[\left(\frac{1623{,}15\ {}^\circ\text{K}}{100}\right)^4 - \left(\frac{748{,}15\ {}^\circ\text{K}}{100}\right)^4\right]$$

$$= 4{,}2 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot {}^\circ\text{K}^4} \cdot (69\ 412{,}010\ 59\ {}^\circ\text{K}^4 - 3132{,}959\ 070\ {}^\circ\text{K}^4) = 278\ 372 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \quad \text{(TS)}$$

$$q_{1,2} = C_{1,2} \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right]$$

$$= 4{,}8846 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} \cdot \left[\left(\frac{1623{,}15\ \text{K}}{100}\right)^4 - \left(\frac{748{,}15\ \text{K}}{100}\right)^4\right]$$

$$= 4{,}8846 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} \cdot (69\ 412{,}010\ 59\ \text{K}^4 - 3132{,}959\ 070\ \text{K}^4) = 323\ 747 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad \text{(SI)}$$

De grootheid $C_{1,2}$ kreeg de benaming stralingsfaktor, en de grootheden C_1, C_2 en C_S de benaming stralingskonstante (dus dezelfde benamingen als voor respektievelijk $K_{1,2}$ en K_1, K_2, K_S).

Het is foutief de waarde van $C_{1,2}$ (uit ons voorbeeld) aan te geven als volgt (zoals men wel in sommige handboeken aantreft) :

$$C_{1,2} = 4{,}2 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \left(\frac{{}^\circ\text{K}}{100}\right)^4} \quad \text{(TS)}$$

$$C_{1,2} = 4{,}8846 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \left(\frac{\text{K}}{100}\right)^4}, \quad \text{(SI)}$$

Deze beide laatste waarden zijn immers niet gelijk aan $10^8 \cdot K_{1,2}$, doch wel aan $10^{16} \cdot K_{1,2}$, zoals hierna blijkt :

$$4{,}2 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \left(\frac{^\circ\text{K}}{100}\right)^4} = 4{,}2 \cdot 100^4 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{K}^4} = 4{,}2 \cdot 10^8 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{K}^4}$$

$$= 10^{16} \cdot 4{,}2 \cdot 10^{-8} \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{K}^4}$$

$$= 10^{16} \, K_{1,2}$$

$$4{,}8846 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \left(\frac{\text{K}}{100}\right)^4} = 4{,}8846 \cdot 100^4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} = 4{,}8846 \cdot 10^8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$$

$$= 10^{16} \cdot 4{,}8846 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$$

$$= 10^{16} \, K_{1,2}$$

7. Getalwaardenvergelijkingen

7.1. Definitie

Een getalwaardenvergelijking is een vergelijking waarin de symbolen van grootheden getalwaarden betekenen. De betrokken getalwaarden zouden kunnen weergegeven worden door het plaatsen van het symbool van elke betrokken grootheid tussen akkolades, met als index de eenheid die de getalwaarde van de betrokken grootheid bepaalt. Normaal worden er echter geen akkolades gebruikt maar voegt men aan de vergelijking een legende toe met opgave van de eenheden waarbij de betrokken getalwaarden behoren. Een paar voorbeelden zullen dit duidelijk maken.

a. Getalwaardenvergelijking in verband met de oppervlakte van een driehoek

Wanneer men, bij de berekening van de oppervlakte van een driehoek, b en h wil uitdrukken in ft (voet) en men toch de oppervlakte wenst in m^2, kan men gebruik maken van volgende getalwaardenvergelijking (met 1 ft = 0,3048 m en 1 ft^2 = 0,092 903 04 m^2) :

$$\{A_d\}_{\text{m}^2} = \frac{1}{2} \cdot (0{,}3048)^2 \cdot \{b\}_{\text{ft}} \cdot \{h\}_{\text{ft}}$$

$$= 0{,}046\,451\,52 \cdot \{b\}_{\text{ft}} \cdot \{h\}_{\text{ft}}$$

Het getal 0,046 451 52 is hier gelijk aan het produkt van de getalfaktor $f = \frac{1}{2}$ (uit de afgeleide vergelijking $A_d = \frac{b \cdot h}{2}$) en een omrekeningsfaktor tussen eenheden.

Deze getalwaardenvergelijking kan ook geschreven worden als volgt :

$$A_d = 0{,}046\ 451\ 52\ b\ .\ h$$

met als bijhorende legende :

A_d = oppervlakte van driehoek in m^2

b = basis van driehoek in ft

h = hoogte van driehoek in ft

Voorbeeld :

met b = 50 ft en h = 25 ft, bekomt men :

$$A_d = 0{,}046\ 451\ 52 \times 50 \times 25\ m^2 = 58{,}0644\ m^2$$

Toepassing van de algemene groothedenvergelijking bij gebruik van SI-eenheden (met b = 15,24 m en h = 7,62 m) geeft rechtstreeks :

$$A_d = \frac{b\ .\ h}{2} = \frac{15{,}24\ m\ .\ 7{,}62\ m}{2} = 58{,}0644\ m^2$$

Bij aanwending van het SI wordt een meetkundige betrekking of een fysische wetmatigheid nooit weergegeven door een getalwaardenvergelijking, doch steeds door een algemene groothedenvergelijking.

b. Getalwaardenvergelijkingen in verband met het vereist pompvermogen

Vroeger waren allerhande getalwaardenvergelijkingen in gebruik voor het weergeven van het vereist pompvermogen (vermogen toegevoerd aan de as van de pomp, vroeger voorgesteld door het symbool N_{as}, thans echter door het symbool P_{as}) (zie ook Hoofdstuk XIV, onder 2.3.11.).

Een eerste getalwaardenvergelijking in verband met het pompvermogen (gebruikelijk in het technisch stelsel) was als volgt :

$$\left\{N_{as}\right\}_{pk} = \frac{\left\{Q\right\}_{\frac{L}{min}} \cdot \left\{\gamma\right\}_{\frac{kgf}{dm^3}} \cdot \left\{H_{man}\right\}_{m}}{4500\ \eta_p}$$

De gebruikelijke schrijfwijze was echter :

$$N_{as} = \frac{Q\ .\ \gamma\ .\ H_{man}}{4500\ \eta_p}$$

met als bijhorende legende :

N_{as} = vereist vermogen in pk

Q = volumestroom in $\frac{L}{min}$

γ = soortelijk gewicht in $\frac{kgf}{dm^3}$

H_{man} = manometrische opvoerhoogte in m

η_p = pomprendement

Een tweede getalwaardenvergelijking in verband met het pompvermogen (eveneens gebruikelijk in het technisch stelsel) was als volgt :

$$\left\{N_{as}\right\}_{pk} = \frac{\left\{Q\right\}_{\frac{m^3}{h}} \cdot \left\{\gamma\right\}_{\frac{kgf}{dm^3}} \cdot \left\{H_{man}\right\}_{m}}{270\ \eta_p}$$

De gebruikelijke schrijfwijze was echter :

$$N_{as} = \frac{Q \cdot \gamma \cdot H_{man}}{270\ \eta_p}$$

met als bijhorende legende :

N_{as} = vereist vermogen in pk

Q = volumestroom in $\frac{m^3}{h}$

γ = soortelijk gewicht in $\frac{kgf}{dm^3}$

H_{man} = manometrische opvoerhoogte in m

η_p = pomprendement

De vergelijkingen $N_{as} = \frac{Q \cdot \gamma \cdot H_{man}}{4500\ \eta_p}$ en $N_{as} = \frac{Q \cdot \gamma \cdot H_{man}}{270\ \eta_p}$ zijn getalwaardenvergelijkingen omdat het symbool van elke grootheid de getalwaarde voorstelt die behoort bij de opgelegde eenheid.

In het SI luidt de algemene groothedenvergelijking in verband met het pompvermogen als volgt (met q_v als symbool voor de volumestroom in plaats van Q) :

$$P_{as} = \frac{q_v \cdot \rho \cdot g \cdot H_{man}}{\eta_p}$$

Voorbeeld :

Met Q = 600 $\frac{L}{min}$ = 36 $\frac{m^3}{h}$ hetzij q_v = 0,01 $\frac{m^3}{s}$

γ = 1 $\frac{kgf}{dm^3}$ hetzij ρ = 1000 $\frac{kg}{m^3}$

H_{man} = 30 m

η_p = 0,75

g = 9,81 $\frac{m}{s^2}$

bekomt men volgens bovenstaande getalwaardenvergelijkingen respektievelijk :

$$N_{as} = \frac{600 \times 1 \times 30}{4500 \times 0{,}75} \text{ pk} = 5{,}333 \ldots \text{ pk}$$

$$N_{as} = \frac{36 \times 1 \times 30}{270 \times 0{,}75} \text{ pk} = 5{,}333 \ldots \text{ pk}$$

Bij aanwending van de algemene groothedenvergelijking en het gebruik van koherente SI-eenheden bekomt men :

$$P_{as} = \frac{0{,}01 \frac{m^3}{s} \cdot 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 9{,}81 \frac{m}{s^2} \cdot 30 \text{ m}}{0{,}75} = 3924 \text{ W}$$

(Bemerk dat $\frac{m^3}{s} \cdot \frac{kg}{m^3} \cdot \frac{m}{s^2} \cdot m = \frac{kg \cdot \frac{m}{s^2} \cdot m}{s} = \frac{N \cdot m}{s} = \frac{J}{s} = W$)

In de twee behandelde getalwaardenvergelijkingen zijn de getallen $\frac{1}{4500}$ en $\frac{1}{270}$ niet gelijk te stellen aan de getalfaktor f uit de algemene groothedenvergelijking $X = f \cdot A^a \cdot B^b \ldots$ (zie onderhavig hoofdstuk onder 4.). De betrokken getallen bestaan uitsluitend uit het produkt van omrekeningsfaktoren tussen eenheden; in het algemeen geldt dat het getal dat voorkomt in een getalwaardenvergelijking gelijk is aan het produkt van omrekeningsfaktoren tussen eenheden, vermenigvuldigd met de getalfaktor f (die in veel gevallen gelijk is aan 1).

c. Getalwaardenvergelijking in verband met draaimoment, hoeksnelheid en overgebracht vermogen bij draaiende beweging

Hierna zal eerst de algemene groothedenvergelijking in verband met draaimoment, hoeksnelheid en overgebracht vermogen worden opgesteld, en hiervan zal vervolgens de in het TS gebruikelijke getalwaardenvergelijking worden afgeleid.

Zij F = omtrekskracht

r = straal

M = draaimoment = $F \cdot r$

n = toerental

ω = hoeksnelheid = $2 \pi \cdot n$

v = omtreksnelheid = $2 \pi \cdot r \cdot n = \omega \cdot r$

P = overgebracht vermogen

Daar in het algemeen geldt :

vermogen = arbeid gedeeld door tijd

= kracht maal afgelegde weg gedeeld door tijd

= kracht x snelheid

bekomt men :

$P = F \cdot v = F \cdot 2\,\pi \cdot r \cdot n = F \cdot \omega \cdot r = M \cdot 2\,\pi \cdot n = M \cdot \omega$

waaruit volgende algemene groothedenvergelijking volgt :

$$M = \frac{P}{2\,\pi \cdot n} = \frac{P}{\omega}$$

Bij het gebruik van de grondeenheden en de hiervan afgeleide koherente eenheden, worden M, P en ω uitgedrukt in volgende eenheden

TS		SI	
M in	kgf . m	M in	N . m
P in	$\frac{\text{kgf . m}}{\text{s}}$	P in	$\frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{W}$
n in	s^{-1}	n in	s^{-1}
ω in	$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	ω in	$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$

In het TS werd de hierboven opgestelde algemene groothedenvergelijking niet gebruikt, doch wel een getalwaardenvergelijking die hierna zal worden afgeleid.

Het vermogen (vroeger in het TS voorgesteld door het symbool N) werd in het TS uitgedrukt in pk, en het moment M in kgf . m. De grootheid hoeksnelheid ω werd in de getalwaardenvergelijking niet gebruikt; in de plaats daarvan kwam de grootheid toerental n, uitgedrukt in min^{-1}.

Na één toer is de afgelegde weg gelijk aan $2\,\pi\,r$, en de geleverde arbeid gelijk aan $2\,\pi\,r \cdot F = 2\,\pi \cdot M$.

Na n toeren, dus na één minuut, is de geleverde arbeid gelijk aan $2\,\pi \cdot M \cdot n$. Na 1 sekonde is de geleverde arbeid gelijk aan :

$$\frac{2\,\pi \cdot M \cdot n}{60}$$

Men bekomt het vermogen in $\frac{\text{kgf . m}}{\text{s}}$, wanneer M wordt uitgedrukt in kgf . m en n in min^{-1}. Wanneer men het geheel deelt door 75, bekomt men het vermogen N in pk (vermits 1 pk = 75 $\frac{\text{kgf . m}}{\text{s}}$) :

$$N = \frac{2\,\pi}{75 \times 60} \cdot M \cdot n$$

Hieruit volgt de gezochte getalwaardenvergelijking :

$$M = \frac{75 \times 60}{2\,\pi} \cdot \frac{N}{n} = 716{,}197\ 243\ 8\ \frac{N}{n} \approx 716{,}2\ \frac{N}{n}$$

met M = draaimoment in kgf . m

N = vermogen in pk

n = toerental in min^{-1}

Bovenstaande getalwaardenvergelijking kan ook rechtstreeks worden afgeleid uit de algemene groothedenvergelijking

$$M = \frac{P}{2\,\pi \cdot n} = \frac{P}{\omega}$$

De vergelijking $\omega = 2\,\pi\,n$ is een algemene groothedenvergelijking; drukt men n uit in s^{-1}, dan bekomt men ω in rad . s^{-1}; drukt men n uit in min^{-1}, dan bekomt men ω in rad . min^{-1}.

Indien men ω wil uitdrukken in rad . s^{-1} en n in min^{-1}, dan wordt het verband tussen beide grootheden gegeven door de getalwaardenvergelijking $\omega = \frac{2\,\pi \cdot n}{60}$, vermits geldt

$$\{\omega\}_{\text{rad . s}^{-1}} = 2\,\pi \cdot \frac{\{n\}_{\text{min}^{-1}}}{60}$$

Het verband tussen de getalwaarde van n in s^{-1} en de getalwaarde van n in min^{-1} wordt gegeven door

$$\{n\}_{\text{s}^{-1}} = \frac{\{n\}_{\text{min}^{-1}}}{60}$$

Men gaat in het TS van de algemene groothedenvergelijking $M = \frac{P}{2\,\pi \cdot n} = \frac{P}{\omega}$ over naar de gezochte getalwaardenvergelijking als volgt :

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{2\,\pi\,n} = \frac{75 \cdot \{N\}_{\text{pk}}}{2\,\pi \cdot \frac{\{n\}_{\text{min}^{-1}}}{60}} = 716{,}2 \cdot \frac{\{N\}_{\text{pk}}}{\{n\}_{\text{min}^{-1}}} = 716{,}2\ \frac{N}{n}$$

Wanneer het draaimoment M wordt uitgedrukt in kgf . cm (in plaats van kgf . m) bekomt men uiteraard als getalwaardenvergelijking :

$$M = 71\ 620\ \frac{N}{n}$$

Voorbeeld :

Bereken het draaimoment M, aan de hand van volgende gegevens :

$$P = 10\ \text{kW} = 10\ 000\ \text{W}\ \left(= 10\ 000\ \frac{\text{J}}{\text{s}} = 10\ 000\ \frac{\text{N . m}}{\text{s}}\right)$$

$$= \frac{10\ 000}{9{,}806\ 65}\ \frac{\text{kgf . m}}{\text{s}} = 1019{,}716\ \frac{\text{kgf . m}}{\text{s}}$$

$$= \frac{10\ 000}{75 \times 9{,}806\ 65}\ \text{pk} = 13{,}596\ \text{pk}$$

$$n = 15\ \text{s}^{-1}$$

$$= 900\ \text{min}^{-1}$$

$$\omega = 15 \times 2\ \pi\ \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 30\ \pi\ \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Men bekomt volgens de algemene groothedenvergelijking $M = \frac{P}{2\ \pi\ n} = \frac{P}{\omega}$

in het TS :

$$M = \frac{P}{2\ \pi\ .\ n} = \frac{1019{,}716\ \frac{\text{kgf . m}}{\text{s}}}{2\ \pi\ .\ 15\ \text{s}^{-1}} = \frac{1019{,}716\ \frac{\text{kgf . m}}{\text{s}}}{\frac{30\ \pi}{\text{s}}} = 10{,}819\ \text{kgf . m}$$

$$= \frac{P}{\omega} = \frac{1019{,}716\ \frac{\text{kgf . m}}{\text{s}}}{30\ \pi\ \frac{\text{rad}}{\text{s}}} = 10{,}819\ \text{kgf . m}$$

in het SI :

$$M = \frac{P}{2\ \pi\ .\ n} = \frac{10\ 000\ \text{W}}{2\ \pi\ .\ 15\ \text{s}^{-1}} = \frac{10\ 000\ \frac{\text{N . m}}{\text{s}}}{\frac{30\ \pi}{\text{s}}} = 106{,}103\ \text{N . m}$$

$$= \frac{P}{\omega} = \frac{10\ 000\ \text{W}}{30\ \pi\ \frac{\text{rad}}{\text{s}}} = \frac{10\ 000\ \frac{\text{N . m}}{\text{s}}}{30\ \pi\ \frac{\text{rad}}{\text{s}}} = 106{,}103\ \text{N . m}$$

Men bekomt volgens de getalwaardenvergelijking die in het TS gebruikelijk was :

$$M = 716{,}2\,\frac{N}{n} = 716{,}2\ .\ \frac{13{,}596}{900}\ \text{kgf . m}$$

$$= 10{,}819\ \text{kgf . m}$$

7.2. Algemene groothedenvergelijking beschouwd als een speciaal geval van een getalwaardenvergelijking

Een algemene groothedenvergelijking zou wel kunnen worden omschreven als een getalwaardenvergelijking waarbij in verband met iedere grootheid uitsluitend getalwaarden voorkomen die overeenstemmen met een eenheid behorend tot een stelsel van koherente eenheden. Vermits er uitsluitend koherente eenheden aan te pas komen, is het niet meer nodig de betrokken eenheden als index neer te schrijven bij de akkoladevorm; een stap verder is het weglaten van de akkolade zelf.

Een algemene groothedenvergelijking kan dus worden beschouwd als een getalwaardenvergelijking waarvan de akkolades weggelaten zijn en waarbij uitsluitend getalwaarden in aanmerking komen behorend bij eenheden die onderling koherent zijn. In wezen echter is een algemene groothedenvergelijking helemaal niet aan bepaalde eenheden of een bepaald eenhedenstelsel (al dan niet koherent) gebonden. Het gebruik van koherente eenheden biedt echter enorme voordelen (zie onderhavig hoofdstuk onder 8.).

8. Nut van het gebruik van algemene groothedenvergelijkingen en een koherent eenhedenstelsel

Een algemene groothedenvergelijking $X = f\ .\ A^a\ .\ B^b\ .\ \ldots$ kan worden gesplitst (zie onderhavig hoofdstuk onder 5.) in een getalwaardenvergelijking :

$$\{X\} = f\ .\ \{A\}^a\ .\{B\}^b\ .\ \ldots$$

en een eenhedenvergelijking :

$$[X] = [A]^a\ .\ [B]^b\ .\ \ldots$$

Bij uitsluitend gebruik van koherente eenheden kan de betrokken getalwaardenvergelijking, los van de er bijhorende eenhedenvergelijking, als

volgt voorgesteld worden (met k.e. = koherente eenheid) :

$$\{X\}_{k.e.} = f \cdot \{A\}^{a}_{k.e.} \cdot \{B\}^{b}_{k.e.}$$

Als steeds koherente eenheden gebruikt worden, is het niet nodig, telkens k.e. te schrijven als index bij de akkoladevorm. Wanneer ook de akkoladevorm achterwege wordt gelaten, bekomt men de algemene groothedenvergelijking zelf. Indien men dus in een groothedenvergelijking de grootheden *A, B, ...* vervangt door de getalwaarden die behoren bij de betreffende koherente eenheden, krijgt men een produkt van getallen (inbegrepen de getalfaktor *f*), dat de getalwaarde oplevert die behoort bij de koherente eenheid van de grootheid *X*. Een algemene groothedenvergelijking kan dus aangezien worden als een getalwaardenvergelijking (zie onderhavig hoofdstuk onder 7.2.) op voorwaarde dat uitsluitend koherente eenheden worden toegepast.

Men begaat echter geen fout, wanneer men bij de uitwerking van een algemene groothedenvergelijking, willekeurige eenheden zou gebruiken, die onderling niet koherent zijn en zelfs tot verschillende eenhedenstelsels behoren. Het is immers een kenmerk van een algemene groothedenvergelijking dat zij niet gebonden is aan bepaalde eenheden of aan een bepaald eenhedenstelsel. Hierna zal echter aan de hand van twee voorbeelden aangetoond worden dat het logisch en zeer praktisch is, uitsluitend koherente eenheden te gebruiken bij de uitwerking van algemene groothedenvergelijkingen.

Nemen we als eerste voorbeeld de berekening van het pompvermogen, waarvan de algemene groothedenvergelijking luidt :

$$P_{as} = \frac{q_v \cdot \rho \cdot g \cdot H_{man}}{\eta_p}$$

In plaats van uitsluitend koherente eenheden toe te passen, volgt hierna een uitwerking (met dezelfde gegevens als in het voorbeeld in verband met het vereist pompvermogen dat werd behandeld bij de bespreking van de getalwaardenvergelijkingen, zie onderhavig hoofdstuk onder 7.1.) waarbij allerhande niet-koherente eenheden door elkaar worden gebruikt :

$$P_{as} = \frac{36 \frac{m^3}{h} \cdot 1 \frac{kg}{dm^3} \cdot 981 \frac{cm}{s^2} \cdot 30 \text{ m}}{0,75}$$

$$= 1\ 412\ 640 \frac{m^3 \cdot kg \cdot cm \cdot m}{h \cdot dm^3 \cdot s^2}$$

De betrokken eenheid van vermogen $\frac{m^3 \cdot kg \cdot cm \cdot m}{h \cdot dm^3 \cdot s^2}$ is nietszeggend, niet gemakkelijk te onderkennen als een eenheid van vermogen en moeilijk te vergelijken met andere vormen van eenheden van vermogen op een gelijkaardige manier bekomen (door toepassing van willekeurige eenheden).

Verdere uitwerking van het bekomen resultaat, met omzetting in koherente SI-eenheden van alle eenheden waaruit de betrokken eenheid van vermogen is samengesteld, geeft :

$$P_{as} = 1\ 412\ 640 \cdot \frac{m^3 \cdot kg \cdot 0{,}01\ m \cdot m}{3600\ s \cdot 0{,}001\ m^3 \cdot s^2}$$

$$= 1\ 412\ 640 \cdot \frac{0{,}01}{3600 \cdot 0{,}001} \frac{kg \cdot m^2}{s^3}$$

$$= 3924\ W$$

Dit is het resultaat dat men rechtstreeks zou bekomen uit de algemene groothedenvergelijking bij toepassing van koherente SI-eenheden :

$$\{P_{as}\}_W = \frac{\{q_v\}_{\frac{m^3}{s}} \cdot \{\rho\}_{\frac{kg}{m^3}} \cdot \{g\}_{\frac{m}{s^2}} \cdot \{H_{man}\}_m}{\eta_p} = \frac{0{,}01 \times 1000 \times 9{,}81 \times 30}{0{,}75} = 3924$$

$$P = \frac{0{,}01\ \frac{m^3}{s} \cdot 1000\ \frac{kg}{m^3} \cdot 9{,}81\ \frac{m}{s^2} \cdot 30\ m}{0{,}75} = 3924\ \frac{kg \cdot m^2}{s^3} = 3924\ W$$

Nemen we als tweede voorbeeld de berekening van de oppervlakte van een driehoek met volgende afmetingen (met 1 foot = 1 ft = 0,3048 m) :

b = 50 ft = 15,24 m

h = 25 ft = 7,62 m

De algemene groothedenvergelijking luidt : $A_d = \frac{b \cdot h}{2}$

Volgende uitwerking is korrekt :

$$A_d = \frac{50\ ft \cdot 762\ cm}{2} = 19\ 050\ ft \cdot cm$$

De eenheid ft . cm kan worden voorgesteld door de oppervlakte van een rechthoek waarvan de lengte gelijk is aan 1 ft en de breedte gelijk aan 1 cm. Op analoge wijze kunnen veel eenheden van oppervlakte worden gevonden, die uiteindelijk onderling moeilijk rechtstreeks te vergelijken zijn.

Verdere uitwerking van het bekomen resultaat met omzetting in SI-eenheden van alle eenheden waaruit de betrokken eenheid van oppervlakte is samengesteld, geeft :

$$A_d = 19\ 050 \cdot 0{,}3048\ m \cdot 0{,}01\ m$$
$$= 58{,}0644\ m^2$$

In plaats van in de algemene groothedenvergelijking willekeurige eenheden toe te passen of een getalwaardenvergelijking aan te wenden, met voor iedere grootheid een welbepaalde verplichte eenheid, is het veel eenvoudiger gebruik te maken van de algemene groothedenvergelijking

$$A_d = \frac{b \cdot h}{2}$$

en bij de uitwerking uitsluitend koherente eenheden toe te passen (in dit geval koherente SI-eenheden) :

$$\{A_d\}_{m^2} = \frac{\{b\}_m \cdot \{h\}_m}{2} = \frac{15{,}24 \times 7{,}62}{2} = 58{,}0644$$

De gewone schrijfwijze ziet er uit als volgt :

$$A_d = \frac{b \cdot h}{2} = \frac{15{,}24\ m \cdot 7{,}62\ m}{2} = 58{,}0644\ m^2$$

9. Opbouw van het SI

Het SI wordt uitvoerig behandeld in Hoofdstuk X onder 2.; hier wordt beknopt de opbouw van het SI besproken in zover dit wenselijk en nodig bleek teneinde hierna de begrippen dimensie (zie onderhavig hoofdstuk onder 10.) en dimensiekontrole en eenhedenkontrole (zie onderhavig hoofdstuk onder 11.) te kunnen uitleggen aan de hand van een welbepaald eenhedenstelsel.

Bij de opbouw van een koherent eenhedenstelsel dient men eerst de basisgroothedensoorten te kiezen en voor elke basisgroothedensoort een eenheid te bepalen; deze eenheden vormen dan de grondeenheden. Vervolgens worden de afgeleide groothedensoorten gedefinieerd door definitievergelijkingen (zie onderhavig hoofdstuk onder 4.). De eenheid van een afgeleide groothedensoort wordt op een koherente wijze afgeleid uit de betrokken definitievergelijking (zie onderhavig hoofdstuk onder 5.). Naast de definitievergelijkingen (die een afgeleide groothedensoort invoeren) bestaan er vergelijkingen die afgeleid zijn uit de definitievergelijkingen en daarom

afgeleide vergelijkingen genoemd worden (zie onderhavig hoofdstuk onder 6.). Alleen uit definitievergelijkingen worden eenheden afgeleid. De afgeleide vergelijkingen zijn dusdanig, dat koherente SI-eenheden kunnen toegepast worden voor al de er in voorkomende grootheden.

Het SI omvat :

- zeven grondeenheden (grondeenheden zijn eenheden van basisgrootheden);
- twee aanvullende eenheden;
- en vele op een koherente wijze afgeleide eenheden, uit de definities van de afgeleide grootheden verkregen als produkten van (positieve en negatieve) machten van grondeenheden (en eventueel ook van aanvullende eenheden).

De zeven grondeenheden en de twee aanvullende eenheden van het SI, alsook de bijbehorende grootheden zijn weergegeven in tabel II.1. en tabel II.2.

In het SI is een koherente afgeleide eenheid (zie onderhavig hoofdstuk onder 5.) van de gedaante :

$$[X] = m^{\alpha} \cdot kg^{\beta} \cdot s^{\gamma} \cdot A^{\delta} \cdot K^{\epsilon} \cdot mol^{\zeta} \cdot cd^{\eta}$$

Hierin zijn α, β, ... meestal (doch niet noodzakelijk) een geheel getal (positief of negatief) of gelijk aan nul. In sommige gevallen komt daar nog de eenheid rad of sr of een macht daarvan bij.

Bij de weergave van de gedaante van een afgeleide SI-eenheid worden als exponenten Griekse letters gebruikt terwijl voor de gedaante van een afgeleide grootheid (zie onderhavig hoofdstuk onder 4.) als exponent Romeinse letters worden gebruikt ($X = f \cdot A^{a} \cdot B^{b} \cdot \ldots$). De reden hiervoor is gelegen in het feit dat het om totaal verschillende exponenten kan gaan. Dit blijkt bijvoorbeeld uit de definitievergelijking van kracht (kracht = massa x versnelling) en de afleiding van de SI-eenheid van kracht :

$$F = m^{1} \cdot a^{1} = m \cdot a$$

$$[F]_{SI} = [m]_{SI} \cdot [a]_{SI} = kg^{1} \cdot m^{1} \cdot s^{-2} = kg \cdot m \cdot s^{-2}$$

Voorbeelden van afgeleide SI-eenheden, uitgedrukt in de grondeenheden :

- eenheid van kapaciteit $= m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^{4} \cdot A^{2} \cdot K^{0} \cdot mol^{0} \cdot cd^{0}$

$$= m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^{4} \cdot A^{2}$$

$$= \frac{A^{2} \cdot s^{4}}{kg \cdot m^{2}} = F \quad \text{(farad)}$$

- eenheid van stralingssterkte

$$= m^2 \cdot kg^1 \cdot s^{-3} \cdot A^0 \cdot K^0 \cdot mol^0 \cdot cd^0 \cdot sr^{-1}$$

$$= \frac{kg \cdot m^2}{s^3 \cdot sr} = \frac{W}{sr} \quad \text{(watt per steradiaal)}$$

Tabel II.1. *Basisgrootheden en grondeenheden in het SI*

basisgrootheid		grondeenheid	
naam	symbool	naam	symbool
lengte	l	meter	m
massa	m	kilogram	kg
tijd	t	sekonde	s
elektrische stroom	I	ampère	A
termodynamische temperatuur	T	kelvin	K
hoeveelheid stof	n	mol	mol
lichtsterkte	I_v	candela	cd

Tabel II.2. *Aanvullende grootheden en aanvullende eenheden in het SI*

aanvullende grootheid		aanvullende eenheid	
naam	symbool	naam	symbool
(vlakke) hoek	α	radiaal	rad
ruimtehoek	Ω	steradiaal	sr

Een aantal koherente afgeleide eenheden kregen een eigen naam en een eigen symbool (zie Hoofdstuk X, onder 2.2.2.). Men kan deze namen gebruiken in plaats van de overeenkomstige samenstelling van namen van grondeenheden. Hetzelfde geldt voor de symbolen. Ook kombinaties van deze nieuwe namen (respektievelijk de symbolen ervan) en namen van grondeenheden (respektievelijk de symbolen ervan) mogen aangewend worden. Hierna volgen enkele voorbeelden van afgeleide SI-eenheden waaraan een eigen benaming en een eigen symbool werden toegekend (de eerste term bestaat steeds uitsluitend uit grondeenheden) :

s^{-1} = Hz (enkel als SI-eenheid van frekwentie)

$\frac{kg \cdot m}{s^2}$ = N (SI-eenheid van kracht)

$\frac{kg}{m \cdot s^2} = \frac{kg \cdot m}{m^2 \cdot s^2} = \frac{N}{m^2}$ = Pa (SI-eenheid van druk)

$\frac{kg \cdot m^2}{s^2}$ = N . m = J (SI-eenheid van energie)

$\frac{kg \cdot m^2}{s^3} = \frac{J}{s}$ = W (SI-eenheid van vermogen)

A . s = C (SI-eenheid van elektrische lading)

$\frac{kg \cdot m^2}{A \cdot s^3} = \frac{W}{A}$ = V (SI-eenheid van elektrische spanning)

$\frac{A^2 \cdot s^4}{kg \cdot m^2} = \frac{C}{V}$ = F (SI-eenheid van kapaciteit)

$\frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^3} = \frac{V}{A}$ = Ω (SI-eenheid van elektrische weerstand)

$\frac{cd \cdot sr}{m^2} = \frac{lm}{m^2}$ = lx (SI-eenheid van verlichtingssterkte)

Met behulp van voorvoegsels (zie Hoofdstuk X, onder 2.6.) kunnen naar behoefte decimale veelvouden en delen van koherente SI-eenheden worden gevormd zoals kilometer (km), milliampère (mA), mega-ohm (MΩ), nanosekonde (ns), pikofarad (pF). De op deze wijze gevormde eenheden zijn toegelaten, doch ze mogen niet worden bestempeld als "SI-eenheden" en ze behoren uiteraard niet tot het koherent stelsel van SI-eenheden.

Te noteren valt echter dat de koherente SI-eenheid van massa, het kilogram (gram voorafgegaan door het voorvoegsel kilo-) is en niet het gram (zie ook Hoofdstuk X, onder 2.6.1.).

10. Dimensies

Een algemene grootheidsvergelijking (definitievergelijking of afgeleide vergelijking) kan worden weergegeven uitsluitend met behulp van basisgroothedensoorten (eventueel voorafgegaan door een getalfaktor).

Elke basisgroothedensoort kan hierbij door verscheidene grootheden (die onderling in grootte verschillen) vertegenwoordigd zijn. Hierbij valt op te merken dat grootheden die tot dezelfde groothedensoort behoren, verschillende benamingen en symbolen kunnen hebben; zo behoren de groot-

heden lengte l, hoogte h, breedte b, dikte d of δ, straal r, diameter d en afgelegde weg s allemaal tot de groothedensoort "lengte".

Wanneer men nu in een definitievergelijking of een afgeleide vergelijking, in het rechterlid de eventueel aanwezige getalfaktor weglaat en iedere grootheid vervangt door een overeengekomen symbool naargelang van de basisgroothedensoort waartoe de betrokken grootheid behoort, en men het resultaat verwerkt tot een produkt van machten (positief of negatief) van de betrokken symbolen, bekomt men hetgeen men noemt de dimensie van de afgeleide groothedensoort X, voorgesteld door $\dim(X)$. De betrokken symbolen worden gronddimensies genoemd.

In het SI onderscheidt men 7 gronddimensies, overeenkomstig met de 7 basisgrootheden :

L = gronddimensie van lengte
M = gronddimensie van massa
T = gronddimensie van tijd
I = gronddimensie van (elektrische) stroom
Θ = gronddimensie van termodynamische temperatuur
N = gronddimensie van hoeveelheid stof
J = gronddimensie van lichtsterkte

In dimensie-uitdrukkingen worden normaal geen maal-tekens of vermenigvuldigingspunten geplaatst.

De dimensie van een afgeleide grootheid X heeft in het SI bijgevolg de vorm : $\dim(X) = L^{\alpha} M^{\beta} T^{\gamma} I^{\delta} \Theta^{\epsilon} N^{\zeta} J^{\eta}$.

Tussen de dimensie van een afgeleide grootheid (uitgedrukt in gronddimensies) en de koherente eenheid (uitgedrukt in de grondeenheden) bestaat een overeenkomst : men bekomt immers de koherente eenheid (uitgedrukt in de grondeenheden) als men in een dimensie-uitdrukking iedere gronddimensie vervangt door de grondeenheid van de betrokken groothedensoort met behoud van de exponent zoals die voorkomt in de dimensie-uitdrukking.

Energie (symbool E) komt voor onder twee vormen : arbeid (symbool W) en warmte (symbool Q). De dimensie en de eenheid van energie zijn afgeleid uit de definitievergelijking van arbeid W :

$$W = F \cdot s$$

Men bekomt :

$$\dim(E) = \dim(W) = L^2 \, M \, T^{-2}$$

$$[E]_{SI} = [W]_{SI} = \frac{kg \cdot m^2}{s^2} = \frac{kg \cdot m}{s^2} \cdot m = N \cdot m = J$$

Vermits warmte een vorm is van energie, geldt ook :

$$\dim(Q) = L^2 \, M \, T^{-2}$$

$$[Q]_{SI} = J$$

Zijn in de uitdrukking $\dim(X) = L^{\alpha} M^{\beta} T^{\gamma} I^{\delta} \Theta^{\epsilon} J^{\zeta} N^{\eta}$ alle exponenten gelijk aan nul, dan noemt men de desbetreffende grootheid dimensieloos of van dimensie 1. Een voorbeeld is de relatieve verlenging van een staaf door uitrekking of door uitzetting tengevolge van opwarming :

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

$$\dim(\epsilon) = L \, L^{-1} = L^0 = 1$$

Grootheden die worden uitgedrukt in de zogezegde eenheden neper (Np) en decibel (dB) moeten als dimensieloos worden beschouwd (zie Hoofdstuk IX, onder 1.3. en Hoofdstuk X, onder 4.).

Ook de vlakke hoek en de ruimtehoek worden als dimensieloze grootheden beschouwd (zie Hoofdstuk VIII, onder 2.1. en 3.1.). Toch wordt soms aan vlakke hoek en ruimtehoek een dimensiesymbool toegekend, namelijk respektievelijk ω en Ω.

Daar het vektor- of tensorkarakter van grootheden buiten beschouwing wordt gelaten, kunnen verschillende grootheidensoorten dezelfde eenheid en dezelfde dimensie hebben. Het klassieke voorbeeld in dit verband zijn de grootheidensoorten "energie" en "moment van een kracht". Beide grootheden hebben als eenheid (we beperken ons hier tot de SI-eenheden) newton meter (N . m). Echter alleen als energie-eenheid heeft newton meter (N . m) een eigen benaming gekregen, namelijk joule (J). Verder hebben beide grootheden dezelfde dimensie, namelijk : $L^2 \, M \, T^{-2}$.

Tabel II.3. geeft enkele voorbeelden van definitievergelijkingen van afgeleide groothedensoorten, alsmede de dimensie van de betrokken grootheden en de SI-eenheid waarin ze worden uitgedrukt.

Tabel II.3. *Definitievergelijkingen van enkele groothedensoorten, dimensie van de betrokken grootheden en SI-eenheden waarin ze worden uitgedrukt*

groothedensoort	definitievergelijking	dimensie	SI-eenheid
snelheid	$v = \frac{ds}{dt}$	$L\ T^{-1}$	$\frac{m}{s}$
versnelling	$a = \frac{dv}{dt}$	$L\ T^{-2}$	$\frac{m}{s^2}$
kracht	$F = m \cdot a$	$L\ M\ T^{-2}$	$\frac{kg \cdot m}{s^2} = N$
druk	$p = \frac{F}{A}$	$L^{-1}\ M\ T^{-2}$	$\frac{kg}{m \cdot s^2} = \frac{N}{m^2} = Pa$
energie onder de vorm van arbeid	$E = W = F \cdot s$	$L^2\ M\ T^{-2}$	$\frac{kg \cdot m^2}{s^2} = N \cdot m = J$
vermogen	$P = \frac{W}{t}$	$L^2\ M\ T^{-3}$	$\frac{kg \cdot m^2}{s^3} = \frac{J}{s} = W$
soortelijke warmtekapaciteit	$c = \frac{dQ}{m \cdot dT}$ (met Q=energie onder de vorm van warmte)	$L^2\ T^{-2}\ \Theta^{-1}$	$\frac{m^2}{s^2 \cdot K} = \frac{J}{kg \cdot K}$
entropie	$dS = \frac{dQ}{T}$ (met Q=energie onder de vorm van warmte)	$L^2\ M\ T^{-2}\ \Theta^{-1}$	$\frac{kg \cdot m^2}{s^2 \cdot K} = \frac{J}{K}$
elektrische spanning	$U = \frac{P}{I}$	$L^2\ M\ T^{-3}\ I^{-1}$	$\frac{kg \cdot m^2}{A \cdot s^3} = V$
elektrische weerstand	$R = \frac{U}{I}$	$L^2\ M\ T^{-3}\ I^{-2}$	$\frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^3} = \Omega$
elektrische lading	$Q = I \cdot t$	$I\ T$	$A \cdot s = C$
kapaciteit	$C = \frac{Q}{U}$ (met Q=elektrische lading)	$L^{-2}\ M^{-1}\ T^4\ I^2$	$\frac{A^2 \cdot s^4}{kg \cdot m^2} = F$
molaire massa	$M = \frac{m}{n}$	$M\ N^{-1}$	$\frac{kg}{mol}$
luminantie	$L_v = \frac{I_v}{A}$	$L^{-2}\ J$	$\frac{cd}{m^2}$

11. Dimensiekontrole, eenhedenkontrole

Bij elke algemene groothedenvergelijking dienen de dimensie-uitdrukking van het linkerlid en de dimensie-uitdrukking van het rechterlid aan elkaar gelijk te zijn. De dimensiekontrole bestaat er in na te gaan, of aan deze voorwaarde voldaan is.

Een evenwaardige kontrole bestaat er in, na te gaan of aan beide zijden van het gelijkheidsteken het produkt van alle eenheden, uitgedrukt in de grondeenheden van het gekozen eenhedenstelsel, hetzelfde is; deze kontrole wordt eenhedenkontrole genoemd.

De dimensie- en eenhedenkontrole zal worden toegelicht aan de hand van enkele voorbeelden; hierbij wordt als eenhedenstelsel uitsluitend het SI in aanmerking genomen.

- De toestandsvergelijking van een ideaal gas geeft weer, dat het produkt van de druk p en het volume V, gedeeld door het produkt van de hoeveelheid stof n en de termodynamische (of absolute) temperatuur T, een konstante is :

$$\frac{p \cdot V}{n \cdot T} = \mathcal{R} \quad \text{hetzij} \quad p \cdot V \cdot n^{-1} \cdot T^{-1} = \mathcal{R}$$

De konstante $\mathcal{R}$ wordt genoemd : molaire (of algemene of universele) gaskonstante.

De dimensie van de molaire gaskonstante $\mathcal{R}$ dient gelijkgesteld te worden aan de dimensie van het linkerlid :

$$\dim(\mathcal{R}) = \dim(p \cdot V \cdot n^{-1} \cdot T^{-1})$$
$$= L^{-1}\, M\, T^{-2} \cdot L^3 \cdot N^{-1} \cdot \Theta^{-1} = L^2\, M\, T^{-2}\, \Theta^{-1}\, N^{-1}$$

De (kohere nte) SI-eenheid waarin $\mathcal{R}$ dient te worden uitgedrukt, wordt op een gelijkaardige wijze gevonden :

$$[\mathcal{R}]_{SI} = \frac{[p]_{SI} \cdot [V]_{SI}}{[n]_{SI} \cdot [T]_{SI}} = \frac{\frac{N}{m^2} \cdot m^3}{mol \cdot K}$$

$$= \frac{\frac{\frac{kg \cdot m}{s^2}}{m^2} \cdot m^3}{mol \cdot K} = \frac{kg \cdot m^2}{s^2 \cdot mol \cdot K} \qquad \text{(in grondeenheden)}$$

$$= \frac{N \cdot m}{mol \cdot K} = \frac{J}{mol \cdot K}$$

De toestandsvergelijking van een ideaal gas kan ook als volgt geformuleerd worden : het produkt van de druk en het soortelijk volume (volume gedeeld

door massa), gedeeld door de termodynamische temperatuur, is een konstante die specifiek is voor ieder gassoort :

$$\frac{p \cdot v}{T} = R \quad \text{hetzij} \quad p \cdot v \cdot T^{-1} = R$$

De konstante R wordt specifieke gaskonstante genoemd.

De dimensie van de specifieke gaskonstante R dient gelijkgesteld te worden aan de dimensie van het linkerlid :

$$\dim(R) = \dim(p \cdot v \cdot T^{-1}) = L^{-1}\, M\, T^{-2} \cdot L^3\, M^{-1} \cdot \Theta^{-1} = L^2\, T^{-2}\, \Theta^{-1}$$

De (koherente) SI-eenheid waarin R dient te worden uitgedrukt, wordt op een gelijkaardige wijze gevonden :

$$[R]_{SI} = \frac{[p]_{SI} \cdot [v]_{SI}}{[T]_{SI}} = \frac{\text{Pa} \cdot \frac{m^3}{kg}}{K} = \frac{\frac{N}{m^2} \cdot \frac{m^3}{kg}}{K}$$

$$= \frac{\frac{kg \cdot \frac{m}{s^2}}{m^2} \cdot \frac{m^3}{kg}}{K} = \frac{m^2}{s^2 \cdot K} \quad \text{(in grondeenheden)}$$

$$= \frac{N \cdot m}{kg \cdot K} = \frac{J}{kg \cdot K}$$

- De voortplantingssnelheid van het geluid in een ideaal gas wordt gegeven door volgende algemene groothedenvergelijking :

$$c = \sqrt{\kappa \cdot R \cdot T} = \kappa^{1/2} \cdot R^{1/2} \cdot T^{1/2}$$

$$\text{met } \kappa = \frac{c_p}{c_v} = \text{dimensieloos}$$

De dimensie- en eenhedenkontrole levert op :

$$\dim(c) = L\, T^{-1}$$

$$[c]_{SI} = \frac{m}{s}$$

$$\dim(\kappa^{1/2} \cdot R^{1/2} \cdot T^{1/2}) = L\, T^{-1}\, \Theta^{-1/2} \cdot \Theta^{1/2} = L\, T^{-1}$$

$$[R]_{SI}^{1/2} \cdot [T]_{SI}^{1/2} = \frac{m}{s \cdot K^{1/2}} \cdot K^{1/2} = \frac{m}{s}$$

- De valsnelheid in het luchtledige wordt gegeven door de volgende algemene groothedenvergelijking :

$$v = \sqrt{2\, g \cdot h} = \sqrt{2} \cdot g^{1/2} \cdot h^{1/2}$$

De dimensie- en eenhedenkontrole levert op :

$$\dim(v) = L\, T^{-1}$$

$$[v]_{SI} = \frac{m}{s}$$

$$\dim(g^{1/2} \cdot h^{1/2}) = L^{1/2}\, T^{-1}\, L^{1/2} = L\, T^{-1}$$

$$[g]_{SI}^{1/2} \cdot [h]_{SI}^{1/2} = \frac{m^{1/2}}{s} \cdot m^{1/2} = \frac{m}{s}$$

- De slingertijd of periode T (tijd nodig voor één heen- en één terugkerende beweging) van een matematische slinger met lengte l wordt gegeven door de volgende algemene groothedenvergelijking :

$$T = 2\,\pi\sqrt{\frac{l}{g}} = 2\,\pi\,.\,l^{1/2}\,.\,g^{-1/2}$$

De dimensie- en eenhedenkontrole levert op :

$$\dim(T) = T$$

$$[T]_{SI} = s$$

$$\dim(l^{1/2}\,.\,g^{-1/2}) = L^{1/2}\,.\,L^{-1/2}\,T = T$$

$$[l]_{SI}^{1/2}\,.\,[g]_{SI}^{-1/2} = m^{1/2}\,.\,\frac{m^{-1/2}}{s^{-1}} = s$$

- De warmte-indringingskoëfficiënt b wordt gegeven door volgende algemene groothedenvergelijking :

$$b = \sqrt{\lambda\,.\,c\,.\,\rho} = \lambda^{1/2}\,.\,c^{1/2}\,.\,\rho^{1/2}$$

met λ = warmtegeleidingskoëfficiënt (SI-eenheid : $\frac{W}{m\,.\,K}$)

c = soortelijke warmtekapaciteit (SI-eenheid : $\frac{J}{kg\,.\,K}$)

ρ = soortelijke massa (SI-eenheid : $\frac{kg}{m^3}$)

De dimensie en de SI-eenheid van de warmte-indringingskoëfficiënt b worden gevonden als volgt :

$$\dim(b) = \sqrt{L\,M\,T^{-3}\,\Theta^{-1}\,.\,L^2\,T^{-2}\,\Theta^{-1}\,.\,M\,L^{-3}}$$

$$= L^{1/2}\,M^{1/2}\,T^{-3/2}\,\Theta^{-1/2}\,.\,L\,T^{-1}\,\Theta^{-1/2}\,.\,M^{1/2}\,L^{-3/2}$$

$$= M\,T^{-5/2}\,\Theta^{-1}$$

$$[b]_{SI} = \sqrt{\frac{J}{m\,.\,s\,.\,K}\,.\,\frac{J}{kg\,.\,K}\,.\,\frac{kg}{m^3}}$$

$$= \sqrt{\frac{kg\,.\,m}{s^3\,.\,K}\,.\,\frac{m^2}{s^2\,.\,K}\,.\,\frac{kg}{m^3}}$$

$$= \sqrt{\frac{kg^2}{s^5\,.\,K^2}} = \frac{kg}{s^{5/2}\,.\,K} \quad \text{(in SI-grondeenheden)}$$

$$= \frac{J}{m^2\,.\,s^{5/2}\,.\,K} = \frac{J\,.\,s^{1/2}}{s\,.\,m^2\,.\,K} = \frac{W\,.\,s^{1/2}}{m^2\,.\,K}$$

12. Dimensieloze kengrootheden (dimensieloze parameters)

Voor het beschrijven van bepaalde fysische verschijnselen wordt gebruik gemaakt van dimensieloze samenstellingen van grootheden. Aan een reeks van dergelijke dimensieloze samenstellingen van grootheden werd een eigen naam en een eigen symbool toegekend, die zijn afgeleid van een

persoonsnaam. Het betrokken symbool wordt geschreven met twee letters waarvan de eerste een hoofdletter is.

Een voorbeeld is de "kengrootheid van Reynolds" (met ρ = soortelijke massa, v = snelheid, l = lengte, η = dynamische viskositeit) :

$$\frac{\rho \cdot v \cdot l}{\eta} \text{ , met als symbool } Re$$

$$\text{Dus : } Re = \frac{\rho \cdot v \cdot l}{\eta} = \rho \cdot v \cdot l \cdot \eta^{-1}$$

De dimensies en de SI-eenheden van de verschillende grootheden uit deze samenstelling zijn respektievelijk :

$\dim(\rho) = L^{-3} M$ $\qquad [\rho]_{SI} = \frac{kg}{m^3}$

$\dim(v) = L T^{-1}$ $\qquad [v]_{SI} = \frac{m}{s}$

$\dim(l) = L$ $\qquad [l]_{SI} = m$

$\dim(\eta) = L^{-1} M T^{-1}$ $\qquad [\eta]_{SI} = \frac{kg}{m \cdot s} = \frac{kg \cdot m \cdot s}{m^2 \cdot s^2} = \frac{N \cdot s}{m^2} = Pa \cdot s$

Hieruit volgt :

$$\dim(Re) = L^{-3} M \cdot L T^{-1} \cdot L \cdot L M^{-1} T = 1$$

$$[Re]_{SI} = \frac{\frac{kg}{m^3} \cdot \frac{m}{s} \cdot m}{\frac{kg}{m \cdot s}} = 1$$

Bij een konkrete uitwerking (berekening) van Re bekomt men dus een getal en dit is de aanleiding er toe geweest, Re te betitelen als "getal van Reynolds". Re is echter evenzeer een variabele grootheid als de erin voorkomende afzonderlijke grootheden ρ, v, l en η, ook al is $\dim(Re) = 1$. Het is daarom beter te spreken van "kengrootheid van Reynolds" of "parameter van Reynolds". Een gelijkaardige redenering geldt ook voor de overige dimensieloze kengrootheden (zie Hoofdstuk XIV, onder 2.3.23.).

Bij uitwerking van een kengrootheid dienen steeds koherente eenheden toegepast te worden; alleen dan kunnen alle eenheden weggedeeld worden.

13. Betrekkingen tussen eenheden

Een grootheid kan gemeten worden met behulp van een eenheid, die eveneens een grootheid is, en wel een grootheid van dezelfde soort en dezelfde dimensie als de te meten grootheid. Vergelijkingen die de betrekkingen weergeven tussen eenheden van dezelfde soort en dezelfde dimensie, worden eenhedenvergelijkingen genoemd, bijvoorbeeld :

$$1 \text{ km} = 1000 \text{ m}$$

$$1 \text{ yd} = 3 \text{ ft} = 36 \text{ in} = 0{,}9144 \text{ m}$$

Bij betrekkingen tussen eenheden van dezelfde soort en dezelfde dimensie, wordt van het gelijkheidsteken = gebruik gemaakt.

Het is echter mogelijk dat een bepaalde fysische grootheid (grootheidensoort) een andere dimensie krijgt door de keuze van een ander eenhedenstelsel. In dit geval mag, voor het weergeven van de betrekkingen tussen de betrokken eenheden, niet meer het gelijkheidsteken = aangewend worden doch wel het teken $\hat{=}$, hetgeen betekent "stemt overeen met", ofwel het teken $\hat{\approx}$, hetgeen betekent "stemt overeen ongeveer met".

Naargelang van de keuze van de basisgrootheden voor een bepaald domein van de wetenschap, kan immers een welbepaalde fysische grootheid op verschillende wijzen gedefinieerd worden, zodat men ook verschillende dimensies bekomt voor de betrokken fysische grootheid. Een voorbeeld zal dit duidelijk maken. Het CGS-stelsel (zie Hoofdstuk III, onder 5.) kent maar drie basisgrootheden, namelijk lengte, massa en tijd. De dimensie van elke afgeleide grootheid X, en dus ook van alle afgeleide elektrische en elektromagnetische grootheden, is in het CGS-stelsel van de gedaante :

$$\dim(X) = L^{\alpha} M^{\beta} T^{\gamma}$$

terwijl alle koherente CGS-eenheden (dus ook de koherente afgeleide eenheden van elektrische en elektromagnetische grootheden) volgende gedaante hebben :

$$[X] = \text{cm}^{\alpha} \cdot \text{g}^{\beta} \cdot \text{s}^{\gamma}$$

In het MKSA-stelsel (zie Hoofdstuk IV, onder 3.) echter werd in verband met het invoeren van elektrische en elektromagnetische grootheden,

naast lengte, massa en tijd, ook nog elektrische stroom als basisgrootheid aangenomen. In het MKSA-stelsel is de dimensie en de koherente eenheid van een afgeleide elektrische of elektromagnetische grootheid respektievelijk van de volgende gedaante (met $\delta \neq 0$) :

$$\dim(X) = L^{\alpha}\, M^{\beta}\, T^{\gamma}\, I^{\delta}$$

$$[X] = m^{\alpha} \cdot kg^{\beta} \cdot s^{\gamma} \cdot A^{\delta}$$

Het verschil in dimensie tussen de volgens het elektrostatisch CGS-stelsel of het elektromagnetisch CGS-stelsel gedefinieerde elektrische of elektromagnetische grootheid en dezelfde fysische grootheid, echter gedefinieerd volgens het MKSA-stelsel, brengt mee dat er geen gelijkheidsteken mag worden geplaatst in de betrekkingen tussen de betrokken CGS- en MKSA-eenheden. De oorzaak hiervan is gelegen in het feit, dat in het MKSA-stelsel, ampère (A) een grondeenheid is die niet in eenheden van de dimensie $L^{\alpha}\, M^{\beta}\, T^{\gamma}$ kan omgezet worden.

Voorbeelden (met ese = elektrostatische eenheid en eme = elektromagnetische eenheid) :

1 CGS-ese van stroom = 1 $cm^{3/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-2}$ $\approx$ 0,333 564 095 . 10^{-9} A_{MKSA}

1 CGS-ese van spanning = 1 $cm^{1/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-1}$ $\approx$ 299,792 458 V_{MKSA}

1 CGS-ese van weerstand = 1 $cm^{-1} \cdot s$ $\approx$ 898,755 178 . 10^{9} Ω_{MKSA}

1 CGS-eme van stroom = 1 $cm^{1/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-1}$ $\hat{=}$ 10 A_{MKSA}

1 CGS-eme van spanning = 1 $cm^{3/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-2}$ $\hat{=}$ 10^{-8} V_{MKSA}

1 CGS-eme van weerstand = 1 $cm \cdot s^{-1}$ $\hat{=}$ 10^{-9} Ω_{MKSA}

Op te merken valt, dat alle MKSA-eenheden ook SI-eenheden zijn; uitgedrukt in de grondeenheden (geldend voor beide stelsels) m, kg, s en A bekomt men bijvoorbeeld voor de eenheden van spanning en stroom :

$$V_{MKSA} = V_{SI} = \frac{kg \cdot m^2}{A \cdot s^3}$$

$$\Omega_{MKSA} = \Omega_{SI} = \frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^3}$$

In betrekkingen tussen CGS-elektromagnetische eenheden en kwadrant-eenheden (zie Hoofdstuk IV, onder 1.) komt wel het gelijkheidsteken = voor vermits de betrokken eenheden dezelfde dimensie hebben. In betrekkingen

echter tussen CGS-elektrostatische eenheden en kwadranteenheden, en tussen CGS-elektrostatische en CGS-elektromagnetische eenheden, dient gebruik gemaakt te worden van het teken $\hat{=}$ of $\hat{\approx}$, omdat de dimensies van de betrokken eenheden verschillend zijn.

De dimensies van CGS-elektrostatische en CGS-elektromagnetische eenheden in verband met dezelfde (elektrische of elektromagnetische) grootheid zijn verschillend, niettegenstaande alle CGS-eenheden (en dus ook de elektrostatische en de elektromagnetische CGS-eenheden) afgeleid zijn van dezelfde basisgrootheden (lengte, massa en tijd), omdat enerzijds de permittiviteit ϵ_0 in de definitievergelijking van de grootheid "lading" in het elektrostatisch CGS-stelsel, en anderzijds de permeabiliteit μ_0 in de definitievergelijking van de grootheid "elektrische stroom" in het elektromagnetisch CGS-stelsel, aangenomen werden als een dimensieloze grootheid en gelijkgesteld werden aan 1. Dit gaf aanleiding tot het ontstaan van twee CGS-stelsels, namelijk het elektrostatisch CGS-stelsel en het elektromagnetisch CGS-stelsel.

Voorbeelden (met KS = kwadrantstelsel) :

	waarde in em-CGS-eenheden	waarde in es-CGS-eenheden
$1\ A_{KS}$	$= 10^{-1}\ cm^{1/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-1}$	$\hat{\approx} 2{,}997\ 924\ 58 \cdot 10^{9}\ cm^{3/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-2}$
$1\ V_{KS}$	$= 10^{8}\ cm^{3/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-2}$	$\hat{\approx} \frac{1}{299{,}792\ 458}\ cm^{1/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-1}$
$1\ \Omega_{KS}$	$= 10^{9}\ cm \cdot s^{-1}$	$\hat{\approx} \frac{1}{(2{,}997\ 924\ 58)^2 \cdot 10^{11}}\ cm^{-1} \cdot s$

Beschouwen we thans de betrekkingen tussen de SI-eenheden en de overeenkomstige TS-eenheden (eenheden van het technisch stelsel, zie Hoofdstuk XI) wat betreft de grootheden massa, kracht, arbeid en vermogen. In het stelsel van de grootheden lengte, tijd, massa, kracht, arbeid en vermogen dienen er drie als basisgrootheid aangenomen te worden; de drie overige grootheden zijn dan afgeleide grootheden. In het SI zijn lengte, massa en tijd basisgrootheden (met als gronddimensies L, M en T), in het TS daarentegen lengte, kracht en tijd (met als gronddimensies L, F en T). In tabel II.4. en II.5. zijn de betrokken grootheden weergegeven met hun dimensie-uitdrukking en hun koherente eenheid.

Tabel II.4. *Dimensie en koherente eenheid in het SI, van de grootheden lengte, massa, tijd, kracht, arbeid, vermogen*

SI				
	grootheid	dimensie		koherente eenheid
basis-grootheden	lengte l	L	grond-eenheden	m
	massa m	M		kg
	tijd t	T		s
afgeleide grootheden	kracht $F = m \cdot a$	$L\ M\ T^{-2}$	afgeleide eenheden	$\frac{kg \cdot m}{s^2} = N$
	arbeid W	$L^2\ M\ T^{-2}$		$\frac{kg \cdot m^2}{s^2} = N \cdot m = J$
	vermogen P	$L^2\ M\ T^{-3}$		$\frac{kg \cdot m^2}{s^3} = \frac{J}{s} = W$

Tabel II.5. *Dimensie en koherente eenheid in het TS van de grootheden lengte, kracht, tijd, massa, arbeid, vermogen*

TS				
	grootheid	dimensie		koherente eenheid
basis-grootheden	lengte l	L	grond-eenheden	m
	kracht F	F		kgf
	tijd t	T		s
afgeleide-grootheden	massa $= \frac{G_n}{g_n}$	$L^{-1}\ F\ T^2$	afgeleide eenheden	$\frac{kgf \cdot s^2}{m}$
	arbeid W	L F		kgf . m
	vermogen N, P (vroeger N, thans P)	$L\ F\ T^{-1}$		$\frac{kgf \cdot m}{s}$

In het SI werd de grootheid massa als basisgrootheid gekozen, met als eenheid van massa de massa van het standaardkilogram. Kracht is in het SI een afgeleide grootheid, met als definitievergelijking :

$F = m \cdot a$ (tweede wet van Newton)

Hieruit wordt de koherente SI-eenheid van kracht afgeleid :

$$[m]_{SI} \cdot [a]_{SI} = kg \cdot \frac{m}{s^2} = N$$

In het TS werd de grootheid kracht als basisgrootheid aangenomen. De eenheid van kracht (kgf) is hier gedefiniëerd als de kracht waarmede het standaardkilogram (zijnde de belichaming van de eenheid van massa in het SI !) wordt aangetrokken door het zwaarteveld van de aarde bij een versnelling van de zwaartekracht gelijk aan de normversnelling $g_n = 9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2}$. In het TS is de eenheid van kracht (kgf) dus per definitie gelijk aan het normgewicht van het standaardkilogram.

Massa is in het TS een afgeleide grootheid, waarvan de definitievergelijking afgeleid is uit de tweede wet van Newton.
Deze wet luidt :

$$\text{kracht} = \text{massa} \times \text{versnelling}$$

Hieruit volgt :

$$\text{massa} = \frac{\text{kracht}}{\text{versnelling}} = \frac{\text{gewicht}}{\text{versnelling van de zwaartekracht}} = \frac{\text{normgewicht}}{\text{normversnelling}}$$

$$\text{massa} = \frac{F}{a} = \frac{G}{g} = \frac{G_n}{g_n}$$

In het TS geldt als definitievergelijking van de afgeleide grootheid massa :

$$\text{massa} = \frac{G_n}{g_n}$$

Hieruit wordt de koherente TS-eenheid van massa afgeleid :

$$\frac{[G_n]_{TS}}{[g_n]_{TS}} = \frac{kgf}{\frac{m}{s^2}} = \frac{kgf \cdot s^2}{m}$$

De grootheid massa had in het TS geen eigen symbool en werd voorgesteld door $\frac{G_n}{g_n}$; de (afgeleide) eenheid van massa $\left(\frac{kgf \cdot s^2}{m}\right)$ kreeg ook geen eigen benaming.

De grootheid G_n is trouwens een kunstmatige grootheid, die, uitgedrukt in kgf, dezelfde getalwaarde oplevert als de massa, uitgedrukt in kg :

$$\{G_n\}_{kgf} = \{m\}_{kg}$$

De dimensies van massa en kracht, uitgedrukt in de SI-gronddimensies, verschillen in gedaante van de dimensies van massa en kracht, uitgedrukt in TS-gronddimensies, enkel en alleen door het feit dat in het SI de grootheid massa, en in het TS de grootheid kracht als basisgrootheid werd gekozen.

In het TS is de keuze van kracht als basisgrootheid enigszins kunstmatig : men doet eerst beroep op een massa (namelijk de massa van het standaardkilogram, zijnde de belichaming van de eenheid van massa in het SI) om de eenheid van kracht (kgf) te definiëren; vervolgens wordt de aldus gedefinieerde eenheid van kracht (kgf) verheven tot grondeenheid en de grootheid kracht tot basisgrootheid, waardoor de grootheid massa een afgeleide grootheid wordt.

De TS-eenheid van kracht is bijgevolg niets anders dan een speciale benaming voor een kracht die, uitgedrukt in SI-eenheden, gelijk is aan 9,806 65 N (hier is dus het gelijkheidsteken = op zijn plaats) :

$$1 \text{ kgf} = \text{normgewicht van het standaardkilogram}$$

$$= 1 \text{ kg} \cdot 9{,}806\ 65 \frac{m}{s^2} \quad \text{(definitie van kgf)}$$

$$= 9{,}806\ 65 \frac{\text{kg} \cdot m}{s^2}$$

$$= 9{,}806\ 65 \text{ N}$$

Het verband tussen de TS-eenheid van massa $\left(\frac{\text{kgf} \cdot s^2}{m}\right)$ en de SI-eenheid van massa (kg) wordt als volgt gevonden :

$$1 \frac{\text{kgf} \cdot s^2}{m} = \frac{1 \text{ kgf}}{1 \frac{m}{s^2}}$$

$$= \frac{9{,}806\ 65 \text{ N}}{1 \frac{m}{s^2}}$$

$$= \frac{9{,}806\ 65\ \frac{kg\ .\ m}{s^2}}{1\ \frac{m}{s^2}}$$

$$= 9{,}806\ 65\ kg$$

Tussen de koherente TS-eenheden en de koherente SI-eenheden, gelden wat betreft de grootheden kracht, massa, arbeid en vermogen volgende betrekkingen :

$$1\ kgf = 9{,}806\ 65\ N$$

$$1\ \frac{kgf\ .\ s^2}{m} = 9{,}806\ 65\ kg$$

$$1\ kgf\ .\ m = 9{,}806\ 65\ J$$

$$1\ \frac{kgf\ .\ m}{s} = 9{,}806\ 65\ W$$

$$1\ N = \frac{1}{9{,}806\ 65}\ kgf \approx 0{,}102\ kgf$$

$$1\ kg = \frac{1}{9{,}806\ 65}\ \frac{kgf\ .\ s^2}{m} \approx 0{,}102\ \frac{kgf\ .\ s^2}{m}$$

$$1\ J = \frac{1}{9{,}806\ 65}\ kgf\ .\ m \approx 0{,}102\ kgf\ .\ m$$

$$1\ W = \frac{1}{9{,}806\ 65}\ \frac{kgf\ .\ m}{s} \approx 0{,}102\ \frac{kgf\ .\ m}{s}$$

14. Onjuiste definities van (afgeleide) grootheden bestaande uit kotiënten van grootheden; onjuiste benamingen van afgeleide grootheden

In een definitie van een afgeleide grootheid mogen geen eenheden voorkomen, doch uitsluitend grootheden (eventueel voorafgegaan van een getalfaktor).

Voorbeelden :

- snelheid v ≠ afgelegde weg (s) per sekonde (of per minuut of per uur, enz.)
  ≠ afgelegde weg (s) per eenheid van tijd
  = afgelegde weg gedeeld door tijd
  = afgelegde weg per tijd
  $= \frac{\text{afgelegde weg}}{\text{tijd}} = \frac{s}{t}$
- versnelling a ≠ verandering van snelheid (Δv) per sekonde (of per minuut of per uur, enz.)

≠ verandering van snelheid (Δv) per eenheid van tijd

= verandering van snelheid gedeeld door tijd

= verandering van snelheid per tijd

$$= \frac{\text{verandering van snelheid}}{\text{tijd}} = \frac{\Delta v}{t}$$

- vermogen P ≠ arbeid (W) per sekonde (of per minuut of per uur, enz.)

≠ arbeid (W) per eenheid van tijd

= arbeid gedeeld door tijd

= arbeid per tijd

$$= \frac{\text{arbeid}}{\text{tijd}} = \frac{W}{t}$$

- druk p ≠ kracht (F) per m^2 (of per cm^2, enz.)

≠ kracht (F) per eenheid van oppervlakte

= kracht gedeeld door oppervlakte

= kracht per oppervlakte

$$= \frac{\text{kracht}}{\text{oppervlakte}} = \frac{F}{A}$$

- soortelijke massa ρ ≠ massa (m) per m^3 (of per dm^3, enz.)

≠ massa (m) per eenheid van volume

= massa gedeeld door volume

= massa per volume

$$= \frac{\text{massa}}{\text{volume}} = \frac{m}{V}$$

- soortelijke warmtekapaciteit c ≠ warmte (Q) per kg en K

≠ warmte (Q) per eenheid van massa en eenheid van temperatuurverschil

= warmte gedeeld door massa en temperatuurverschil

= warmte per massa en temperatuurverschil

$$= \frac{\text{warmte}}{\text{massa x temperatuurverschil}} = \frac{Q}{m \cdot \Delta T}$$

Een laatste voorbeeld tenslotte zal iets uitvoeriger worden behandeld. De juiste definitie van de warmtedoorgangskoëfficiënt (warmtetransmissiekoëfficiënt) k van een wand luidt als volgt :
de warmtedoorgangskoëfficiënt k van een wand is de hoeveelheid warmte die van het medium langs de ene kant van een wand doorheen de wand overgaat naar het medium langs de andere kant, gedeeld door oppervlakte, tijd en temperatuurverschil (verschil tussen de temperatuur van beide media).

In deze definitie komen geen namen van eenheden voor. De SI-eenheid waarin de warmtedoorgangskoëfficiënt k wordt uitgedrukt, is $\frac{W}{m^2 \cdot K}$; de vroeger (vóór de invoering van het SI) algemeen gebruikte eenheid was $\frac{kcal}{m^2 \cdot h \cdot °C}$. De foutieve formulering echter van de definitie van de warmtedoorgangskoëfficiënt was en is nog zodanig ingeburgerd, dat men ze zelfs nog aantreft in de volgende vorm (zelfs wanneer men de SI-eenheid $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ reeds toepast) : de warmtedoorgangskoëfficiënt k is de hoeveelheid warmte die per uur door 1 m^2 van een wand gaat bij een temperatuurverschil van 1 °C (of 1 K). In deze laatste definitie komen er eenheden voor (uur, m^2 en °C),hetgeen uiteraard foutief is. Verder komt niet de eenheid uur, maar wel de eenheid sekonde voor in de SI-eenheid, vermits $\frac{W}{m^2 \cdot K} = \frac{J}{m^2 \cdot s \cdot K}$. Indien men de definitie "konsekwent foutief" zou willen formuleren, zou men komen tot volgende definitie : de warmtedoorgangskoëfficiënt k is de hoeveelheid warmte die per sekonde door 1 m^2 van een wand gaat bij een temperatuurverschil van 1 K. Een dergelijke definitie blijft echter foutief vermits er eenheden in voorkomen.

Niet alleen mogen er in de definitie van een afgeleide grootheid geen eenheden voorkomen, ook in de benaming zelf van de afgeleide grootheid mag geen benaming van een eenheid voorkomen :
Wanneer $v = 50 \frac{km}{h}$, mag men niet schrijven :

de uursnelheid = $50 \frac{km}{h}$

doch wel : de snelheid = $50 \frac{km}{h}$

In dit opzicht zijn ook de volgende algemeen gebruikte benamingen foutief omdat er een verwijzing in voorkomt naar een eenheid, namelijk de eenheid mol (naast de grootheid wordt telkens de SI-eenheid weergegeven) :

molaire gaskonstante	J/(mol . K)
molaire massa	kg/mol
molair volume	m^3/mol
molaire inwendige energie	J/mol
molaire warmtekapaciteit	J/(mol . K)
molaire entropie	J/(mol . K)
molaire konsentratie	mol/m^3

Er wordt voorgesteld, het woord "molair" alvast te beperken tot de betekenis "per hoeveelheid stof". De benamingen molaire gaskonstante, molaire massa, molair volume, molaire inwendige energie, molaire warmtekapaciteit en molaire entropie kunnen dan behouden blijven; de benaming molaire koncentratie kan vervangen worden door stofkoncentratie.

De benaming "toerental" zou eventueel nog toegelaten zijn omdat "toer" geen eenheid is en dus ook niet als dusdanig mag gebruikt worden; het is echter beter te spreken van "rotatiefrekwentie". Bij het gebruik van koherente SI-eenheden wordt de rotatiefrekwentie uitgedrukt in s^{-1} (en uiteraard niet in toeren per sekonde) :

$$n = 20\ s^{-1}$$

De volgende schrijfwijze is foutief :

$$n = 20\ \frac{tr}{s}$$

Ook is het niet toegelaten voor het aanduiden van een grootheid, een eenheid als index te schrijven bij het symbool van de betrokken grootheid; schrijfwijzen als $v_{m/s}$ en U_{kV} voor het weergeven van de grootheden snelheid en spanning zijn dus foutief. De betrokken voorstellingen worden wel soms gebruikt in getalwaardenvergelijkingen; $v_{m/s}$ en U_{kV} stellen dan de getalwaarde voor die behoort respektievelijk bij de eenheden $\frac{m}{s}$ en kV; dan geldt :

$$v_{m/s} = \{v\}_{m/s} \qquad U_{kV} = \{U\}_{kV}$$

Bij de benaming van bepaalde grootheden of ter omschrijving ervan werden ook nieuwe woorden ingevoerd :

- lineïek = gedeeld door lengte, per lengte
- areïek = gedeeld door oppervlakte, per oppervlakte
- volumiek = gedeeld door volume, per volume
- massiek = gedeeld door massa, per massa
- steradiek = gedeeld door ruimtehoek, per ruimtehoek

Voorbeelden :

lineïeke massa ρ_l = massa gedeeld door lengte
SI-eenheid : kg/m

areïeke massa ρ_A = massa gedeeld door oppervlakte
SI-eenheid : kg/m^2

energetische exitantie M_e = geëmitteerde areïeke stralingsflux
SI-eenheid : W . m^{-2}

stralingssterkte I_e = steradieke stralingsflux
SI-eenheid : W . sr^{-1}

radiantie L_e = areïeke stralingsflux per ruimtehoek
= steradieke areïeke stralingsflux
SI-eenheid : W . m^{-2} . sr^{-1}

bestralingssterkte E_e = ontvangen areïeke stralingsflux
SI-eenheid : W . m^{-2}

Men streeft er ook naar, het woord "soortelijk (specifiek)", dat in verschillende betekenissen wordt gebruikt, te vervangen door een meer nauwkeurige aanduiding wanneer dit mogelijk blijkt :

soortelijke massa ρ = massa gedeeld door volume
= volumieke massa
SI-eenheid : kg/m^3

soortelijk volume v = volume gedeeld door massa
= massiek volume
SI-eenheid : m^3/kg

soortelijke warmtekapaciteit c = warmtekapaciteit gedeeld door massa
= massieke warmtekapaciteit
SI-eenheid : J . kg^{-1} . K^{-1}

De Duitse norm DIN 5490 (April 1974) schrijft voor, het woord "spezifisch" enkel te gebruiken voor een grootheid die een stofeigenschap is, gedeeld door massa, bijvoorbeeld : spezifisches Volumen, spezifische Wärmekapazität, spezifische innere Energie.
De benaminge "soortelijke weerstand" en "soortelijke geleiding" kunnen in overeenstemming met deze Duitse norm, vervangen worden respektievelijk door "resistiviteit" en "konduktiviteit" :

soortelijke weerstand = resistiviteit = $\rho = R \cdot \frac{A}{l}$

soortelijke geleiding = konduktiviteit = γ (ook : σ) = $\frac{1}{R} \cdot \frac{l}{A}$

De benaming van een grootheid moet duidelijk en nauwkeurig zijn. Zo is de benaming "soortelijke warmte" minder nauwkeurig, hoewel iedereen weet wat hiermee bedoeld wordt. Het is echter niet de warmte die een stofeigenschap is, doch wel de warmtekapaciteit, zodat het beter is te spreken van

"soortelijke warmtekapaciteit" of "massieke warmtekapaciteit". Ook de benaming "temperatuurgeleidingskoëfficiënt" is niet nauwkeurig; beter is het de benaming "temperatuurvereffeningskoëfficiënt" te gebruiken. Daartegenover is de benaming "warmtegeleidingskoëfficiënt" wel een nauwkeurige benaming. Verder is de benaming "debiet" onduidelijk; hiervoor komen twee benamingen in aanmerking : ofwel massastroom (SI-eenheid : kg/s) of volumestroom (SI-eenheid : m^3/s), naargelang van het geval.

15. Onjuiste voorstellingen van symbolen van eenheden

Gelijkaardige overwegingen als deze hierboven uiteengezet wat betreft het toevoegen aan grootheden van verwijzingen naar eenheden, gelden ook wat betreft het toevoegen aan eenheden van verwijzingen naar grootheden. Een eenheid mag dus nooit een aanduiding bevatten betreffende de grootheid zelf. Hierna volgen enkele toepassingen van deze regel.

In het TS is de technische atmosfeer (at) een eenheid van druk (1 at = 1 $\frac{kgf}{cm^2}$). Het is niet toegelaten, voor het weergeven van een absolute druk het symbool ata (in het Duits eveneens ata), of voor het weergeven van een overdruk het symbool ato (in het Duits atü) te gebruiken. Bij het symbool van de grootheid zelf mag echter wel steeds een cijferindex (bijv. p_1, p_2, ...) of een letterindex (bijv. p_a, p_b, ...) geplaatst worden teneinde een onderscheid te kunnen maken tussen verschillende drukken; aldus kan een absolute druk als volgt weergegeven worden :

$$\text{absolute druk} = p_a = 3 \text{ at}$$

$$\text{ofwel absolute druk} = p_{abs} = 3 \text{ at}$$

De schrijfwijzen $p = 3$ ata en p_a of $p_{abs} = 3$ ata zijn foutief.

Een normvolume (volume bij 0 °C hetzij 273,15 K en bij een druk gelijk aan de normale atmosferische druk hetzij 101 325 Pa) wordt weergegeven in m^3 en niet in nm^3 of Nm^3 (de zogezegde "normaal-kubieke-meter") :

$$V_n = 5 \text{ m}^3$$

De volgende schrijfwijzen zijn foutief :

$$V = 5 \text{ nm}^3 \qquad V = 5 \text{ Nm}^3$$

$$V_n = 5 \text{ nm}^3 \qquad V_n = 5 \text{ Nm}^3$$

Een volumestroom van een gas onder een bepaalde druk p en op een temperatuur T kan op twee wijzen worden weergegeven :

$$q_v = \frac{V}{t} \qquad \text{SI-eenheid : } m^3/s$$

$$q_{v,n} = \frac{V_n}{t} = \frac{V \cdot \frac{p}{101\ 325\ Pa} \cdot \frac{273,15\ K}{T}}{t} = q_v \cdot \frac{p}{101\ 325\ Pa} \cdot \frac{273,15\ K}{T}$$

Ook hier is de SI-eenheid m^3/s, en niet nm^3/s of Nm^3/s. De grootheid $q_{v,n}$ wordt genoemd : normvolumestroom (volumestroom betrokken op normale omstandigheden van druk en temperatuur).

Een effektieve spanning wordt weergegeven in V en niet in V_{eff} :

$$U_{eff} = 220\ V$$

De schrijfwijze U of $U_{eff} = 220\ V_{eff}$ is foutief.

Het is toegelaten, na het symbool van de eenheid een aanwijzing te geven betreffende de grootheid; deze aanwijzing dient tussen haakjes te staan en van het symbool gescheiden te zijn door een spatie. De betrokken aanwijzing is immers geen toevoeging aan de eenheid, maar een verklarende tekst.

Voorbeeld :

Men mag schrijven kW (elektr.) om aan te geven dat het om een elektrisch vermogen gaat. Analoog mag men ook schrijven kW (mech.) en kW (term.), om aan te duiden dat het gaat respektievelijk om een mechanisch vermogen en een termisch vermogen.

Een uitzondering op de regel die zegt dat het symbool van een eenheid geen aanduiding mag bevatten betreffende de grootheid zelf, vormt de eenheid voor het weergeven van het reaktief vermogen (blind vermogen) van wisselstroom, namelijk de eenheid var. Vermogen (en dus ook elektrisch vermogen) heeft als SI-eenheid : watt (W). Dit geldt zowel voor het effektief of werkzaam elektrisch vermogen, als voor het schijnbaar elektrisch vermogen en het reaktief elektrisch vermogen. Voor het weergeven

van het schijnbaar elektrisch vermogen en het reaktief elektrisch vermogen gebruikt men dikwijls een andere benaming voor de eenheid watt : het schijnbaar elektrisch vermogen wordt veelal uitgedrukt in volt ampère (1 VA = 1 W), en het reaktief elektrisch vermogen in volt ampère reaktief (1 var = 1 W). De benaming var komt echter niet voor in de CGPM-resoluties.

16. Namen van grootheden, voluit geschreven

De naam van een grootheid begint met een kleine letter, ook als hij is afgeleid van een eigennaam.
Voorbeeld : avogadrokonstante (echter : konstante van Avogadro).
Het begin van een zin begint echter altijd met een hoofdletter, dus uiteraard ook als het eerste woord de naam van een grootheid is.

Bij namen van produkten van grootheden komt tussen de namen van de grootheden "maal" of het vermenigvuldigingsteken x voor (nooit een vermenigvuldigingspunt).
Voorbeeld : massa maal versnelling
massa x versnelling

Bij namen van kotiënten van grootheden plaatst men tussen de namen van teller en noemer "gedeeld door", ofwel "per" ofwel een horizontale deelstreep ofwel een schuine deelstreep.
Voorbeeld : lengte gedeeld door tijd
lengte per tijd
$\frac{\text{lengte}}{\text{tijd}}$
lengte/tijd

17. Namen van eenheden, voluit geschreven

De naam van een eenheid begint met een kleine letter, ook als hij is afgeleid van een eigennaam.
Voorbeelden : newton, ampère, kelvin, watt.
Het begin van een zin begint echter altijd met een hoofdletter, dus

uiteraard ook wanneer het eerste woord van de zin de naam van een eenheid is.

In namen van eenheden bestaande uit het woord "graad" gevolgd door een eigennaam, wordt de eigennaam wel met een hoofdletter geschreven.
Voorbeeld : graad Celsius.

Indien een eenheid wordt gebruikt in kombinatie met een decimaal voorvoegsel, wordt de betrokken kombinatie als één woord geschreven.
Voorbeeld : millimeter, megawatt.

De naam van een eenheid voorafgegaan door een getal blijft in het enkelvoud.
Voorbeeld : Deze stok is drie meter lang.

De eenheden sekonde, minuut,(decimale)graad en dag krijgen echter de meervoudsvorm.

Het is af te raden, uitdrukkingen te gebruiken als "strekkende meter" of "lopende meter", daar de betrokken hoedanigheidswoorden niets toevoegen aan het begrip.

Wat betreft de schrijfwijze van de benaming van een eenheid die is gevormd door een produkt van een aantal eenheden, verschilt de Belgische norm NBN X 02-003 (1979) van de Nederlandse norm NEN 3069 (1974).
NBN X 02-003 geeft volgende richtlijn :
In de naam van een eenheid die is gevormd door een produkt van een aantal eenheden, schrijft men de namen van deze eenheden aan elkaar, bijvoorbeeld ampèresekonde, wattuur, newtonmetersekonde.
Als dergelijke samenstellingen te onoverzichtelijk worden,kunnen koppeltekens gebruikt worden. Voorbeeld : newton-meter-sekonde.
In NEN 3069 treft men het volgende aan :
In de naam van een eenheid die is gevormd door een produkt van een aantal eenheden, schrijft men de namen van deze eenheden los van elkaar, bijvoorbeeld ampère sekonde, kilowatt uur, newton meter sekonde.
Indien slechts twee faktoren aanwezig zijn, kan men aansluiten bij het

gewone taalgebruik in woordenboeker en dergelijke door ze aaneen te schrijven. Aanbevolen wordt dit echter niet, daar het geen gewone taalkundige samenstellingen zijn : de faktoren zijn gelijkwaardig en hun volgorde mag worden omgekeerd zonder dat de betekenis verandert. Daarentegen veroorzaakt omkering van gewone taalkundige samenstellingen wel betekenisverandering. Voorbeeld : newton meter (= newton maal meter) = meter newton, maar : waterbron ≠ bronwater.

De naam van een eenheid die de vorm van een kotiënt heeft, wordt opgebouwd door achtereenvolgens te vernoemen : de eenheid (of eventueel het produkt van eenheden) die in de teller staat, het woord "per" (dit verwijst naar de breukstreep), en tenslotte de eenheid (of eventueel het produkt van eenheden) die in de noemer staat.
Voorbeelden : meter per sekonde
joule per mol-kelvin (NBN X 02-003)
joule per mol kelvin (NEN 3069).

18. Schrijf- en zetwijzen van symbolen van grootheden en eenheden

In verband met dit onderwerp, zullen hierna slechts enkele van de voornaamste regels worden behandeld; uitvoeriger gegevens kan men aantreffen in volgende Belgische en Nederlandse normen (die nagenoeg met elkaar overeenstemmen) :

- NBN X 02-003 (van 1979) : Grootheden, eenheden en getallen : Schrijf- en zetwijzen (8 blz.)
- NEN 649 (van 1965) : Wiskundige tekens en symbolen te gebruiken in de natuurwetenschappen en in de techniek (8 blz.)
- NEN 3069 (van 1974) : Grootheden, eenheden en getallen : Schrijf- en zetwijzen (22 blz.).

18.1. Schrijfwijze in een gedrukte tekst van symbolen van grootheden

Symbolen van grootheden bestaan doorgaans uit één enkele letter (gewone letter of hoofdletter) van het Latijns of het Grieks alfabet; alleen de symbolen voor kengrootheden bestaan uit twee letters, waarvan de eerste steeds een hoofdletter is.

Achter het symbool van een grootheid komt geen afkortingspunt. In een gedrukte tekst worden de symbolen van grootheden steeds met schuin (kursief) letterschrift weergegeven.

Een symbool van een grootheid kan voorzien worden van één of meer indexen rechts onderaan, en van één of meer aksenten rechts bovenaan.

Indexen bestaande uit lettersymbolen voor grootheden of lettersymbolen voor volgnummers moeten schuin (kursief) weergegeven worden; alle andere indexen worden rechtop weergegeven. Achter een index komt geen punt, ook niet als het om een afkorting van een woord gaat. Voor indexen wordt gewoonlijk een kleiner lettertype gebruikt (hetgeen echter bij schrijfmachineschrift meestal niet mogelijk is).

Voorbeelden :

- de index is op zijn beurt een symbool van een grootheid :
  - q_m (massastroom)
  - q_v (volumestroom)
  - c_p (soortelijke warmtekapaciteit bij konstante druk)
  - v_t (snelheid v op het ogenblik t)
- de index is een lettersymbool ter aanduiding van volgnummers
  - a_n (koëfficiënt met n = 1, 2, 3, ...)
- de index is geen symbool van een grootheid noch een lettersymbool ter aanduiding van volgnummers, noch een afkorting van een woord :
  - p_a, p_b, ... (letterindex ter onderscheiding van verschillende drukken)
  - p_1, p_2, ... (getallenindex ter onderscheiding van verschillende drukken)
- de index is een afkorting van een woord (die een grootheid nader bepaalt) of van een eigennaam :
  - E_k (kinetische energie)
  - p_{max}, p_{min} (maximum druk, minimum druk)
  - p_{abs} (absolute druk)
  - V_m (molair volume)
  - V_n (normvolume)
  - N_A (avogadrokonstante)

Het gebruik van meervoudige indexen moet, indien mogelijk, vermeden worden. Indien toch een meervoudige index wordt gebruikt, moeten de delen ervan op dezelfde hoogte staan. Een uitzondering op deze regel mag worden gemaakt in het geval waarin een symbool voorzien van een index wordt gebruikt.
Voorbeeld : de snelheid v op het tijdstip t_1 kan worden geschreven als v_{t_1} of eenvoudiger als v_{t1}.

Voor de duidelijkheid kunnen de verschillende delen van een meervoudige index door kleine spaties van elkaar worden gescheiden. Het gebruik van komma's of andere leestekens tussen de delen van een index moet worden vermeden tenzij dit noodzakelijk is om dubbelzinnigheid te vermijden.

18.2. Schrijfwijze in een gedrukte tekst van symbolen van eenheden

De schrijfwijze van symbolen van eenheden moet aan volgende regels voldoen :

- ze worden met rechte letter geschreven (ook in voor het overige kursief gedrukte tekst);
- ze worden niet gevolgd door een afkortingspunt;
- ze hebben geen meervoudsvorm;
- ze zijn in alle talen dezelfde;
- het symbool van een voorvoegsel wordt onmiddellijk, zonder spatie, voor het eenheidssymbool geplaatst;
- aan symbolen van eenheden mogen geen aanwijzingen (bijvoorbeeld door een index) worden toegevoegd;
- de voorgeschreven hoofd- en kleine letters dienen geëerbiedigd te worden. Het symbool van een eenheid wordt weergegeven in kleine letter, tenzij het betrokken symbool afgeleid is van een eigennaam. Symbolen van eenheden zijn internationaal vastgelegd.

Voorbeelden :

m = meter	W = watt
kg = kilogram	mW = milliwatt
A = ampère	MW = megawatt
Hz = hertz	kW.h = kilowatt uur

18.3. Enkele voorbeelden van symbolen die, kursief geschreven, een grootheid beduiden, en rechtop geschreven, een eenheid, een voorvoegsel van een eenheid of een gronddimensie

A = oppervlakte	A = ampère
= arbeid	
a = versnelling	a = are
= temperatuurvereffenings-	= jaar
koëfficiënt (temperatuur-	= atto (voorvoegsel)
geleidingskoëfficiënt)	
C = kapaciteit	C = coulomb
c = soortelijke warmtekapaciteit	c = centi (voorvoegsel)
d = dikte	d = dag
= diameter	= deci (voorvoegsel)
F = kracht	F = farad
f = frekwentie	f = femto (voorvoegsel)
G = gewicht	G = giga (voorvoegsel)
g = versnelling van de zwaarte-	g = gram
kracht (zwaarteveldsterkte)	
E = energie	E = exa (voorvoegsel)
= elektromotorische kracht	
= elektrische veldsterkte	
= verlichtingssterkte	
= elasticiteitsmodulus	
H = magnetische veldsterkte	H = henry
= entalpie	
= belichtingsdosis	
h = hoogte	h = uur
= soortelijke entalpie	= hekto (voorvoegsel)
J = massatraagheidsmoment	J = joule
	= gronddimensie van lichtsterkte
k = gravitatiekonstante	k = kilo (voorvoegsel)
= konstante van Boltzmann	

L = zelfinduktie, elektrische induktantie

l = lengte

M = moment van een kracht
= molaire massa
= wederkerige induktie

m = massa

μ = permeabiliteit

N = aantal molekulen of deeltjes

n = rotatiefrekwentie

Ω = ruimtehoek

ω = hoeksnelheid
= pulsatie, hoekfrekwentie, cirkelfrekwentie

P = vermogen

p = druk

S = oppervlakte
= entropie

s = afgelegde weg
= soortelijke entropie

T = temperatuur
= periode
= moment van een koppel

t = tijd

V = volume
= potentiaal

W = arbeid
= weerstandsmoment

L = liter
= gronddimensie van lengte
= eenheid van lengte in het kwadrantstelsel

l = liter

M = mega (voorvoegsel)
= gronddimensie van massa
= eenheid van massa in het kwadrantstelsel

m = meter
= milli (voorvoegsel)

μ = mikro (voorvoegsel)

N = newton
= gronddimensie van hoeveelheid stof

n = nano (voorvoegsel)

Ω = dimensie van ruimtehoek

Ω = ohm

ω = dimensie van vlakke hoek

P = peta (voorvoegsel)

p = piko (voorvoegsel)

S = siemens

s = sekonde

T = tesla
= tera (voorvoegsel)
= gronddimensie van tijd

t = ton

V = volt

W = watt

19. Voorstelling van produkten en kotiënten van grootheden

Een produkt van de grootheden a en b mag men schrijven als volgt :

$$a \cdot b \quad \text{of} \quad a.b \quad \text{of} \quad a \times b \quad \text{of} \quad ab \quad \text{of} \quad a\ b$$

Het vermenigvuldigingspunt op de lijn is enkel toegelaten in schrijfmachineschrift.

Een kotiënt van grootheden mag men schrijven als volgt :

$$\frac{a}{b} \quad \text{of} \quad a/b \quad \text{of} \quad a \cdot b^{-1} \quad \text{of} \quad a.b^{-1} \quad \text{of} \quad a \times b^{-1} \quad \text{of} \quad ab^{-1} \quad \text{of} \quad a\ b^{-1}$$

In een kotiënt mag niet meer dan één schuine deelstreep op dezelfde hoogte voorkomen. Bij deling door meer dan één grootheid, heeft de horizontale deelstreep de voorkeur boven de schuine deelstreep. Indien men toch de schuine deelstreep gebruikt, dient de noemer tussen haakjes gezet te worden.

Toegelaten schrijfwijzen :

$$\frac{ab/c}{d} \quad \text{of} \quad \frac{a\ b/c}{d} \quad \text{of} \quad \frac{a.b/c}{d} \quad \text{of} \quad \frac{a \times b/c}{d}$$

$$\frac{a\dfrac{b}{c}}{d} \quad \text{of} \quad \frac{a \cdot \dfrac{b}{c}}{d} \quad \text{of} \quad \frac{a \times \dfrac{b}{c}}{d}$$

$$\frac{ab}{cd} \quad \text{of} \quad \frac{a\ b}{c\ d} \quad \text{of} \quad \frac{a.b}{c.d} \quad \text{of} \quad \frac{a \times b}{c \times d}$$

$$ab^{-1}d^{-1} \quad \text{of} \quad a\ b\ c^{-1}d^{-1} \quad \text{of} \quad a.b.c^{-1}.d^{-1} \quad \text{of} \quad a \times b \times c^{-1} \times d^{-1}$$

$$\frac{a/c}{d/b} \quad \text{of} \quad \frac{a/d}{c/b}$$

$$ab/(cd) \quad \text{of} \quad a\ b/(c\ d) \quad \text{of} \quad a.b/(c.d) \quad \text{of} \quad a \times b/(c \times d)$$

Verkeerde schrijfwijzen (omdat er meer dan één deelstreep voorkomt op dezelfde hoogte) :

$$ab/c/d$$

$$a.b/c/d$$

$$a\ b/c/d$$

Bij het gebruik van een schuine deelstreep zijn onduidelijke schrijfwijzen die op verschillende wijze kunnen geïnterpreteerd worden, niet toegelaten :

$a/b.c$ kan verklaard worden als $\frac{a}{b.c}$ of als $\frac{a}{b}.c$

$r/2.10^5$ kan verklaard worden als $\frac{r}{2.10^5} = 5.10^{-6}r = 0{,}000\ 005\ r$

of als $\frac{r}{2}.10^5 = 5.10^4 r = 50\ 000\ r$

$\ln x/3$ kan verklaard worden als $\frac{\ln x}{3}$ of als $\ln \frac{x}{3}$

De schuine deelstreep mag ook aangewend worden wanneer de teller en de noemer bestaan uit een som of een verschil, op voorwaarde dat er haakjes worden gebruikt.

Voorbeeld :

$$\frac{a + b}{c - d} = (a + b)/(c - d)$$ (haakjes verplicht)

Indien men in het rechter lid van bovenstaande uitdrukking haakjes weglaat, bekomt men iets anders :

- bij het weglaten van alle haakjes bekomt men :

$$a + b/c - d = a + \frac{b}{c} - d$$
$$= a + (b/c) - d$$ (haakjes gewenst)

- bij het weglaten van de eerste haakjes bekomt men :

$$a + b/(c - d) = a + \frac{b}{c - d}$$
$$= a + \left[b/(c - d)\right]$$ (rechte haakjes gewenst)

- bij het weglaten van de laatste haakjes bekomt men :

$$(a + b)/c - d = \frac{a + b}{c} - d$$
$$= \left[(a + b)/c\right] - d$$ (rechte haakjes gewenst)

20. Voorstelling van samengestelde eenheden

20.1. Produkt van eenheden

Een samengestelde eenheid die bestaat uit een produkt van twee of meer eenheden, wordt weergegeven als volgt :

- ofwel wordt een vermenigvuldigingspunt geplaatst tussen de symbolen van de betrokken eenheden (op halve hoogte, en bij schrijfmachineschrift ook onderaan);
- ofwel wordt een spatie gelaten tussen de symbolen van de betrokken eenheden.

Voorbeelden :

N·m N.m N m

In dit boek werd, voor het weergeven van een produkt van eenheden, steeds het vermenigvuldigingspunt gebruikt, en vermits het gaat om schrijfmachineschrift, bevindt dit punt zich onderaan de schrijflijn.

Verwarring van het voorvoegselsymbool m (milli) met het eenheidssymbool m (meter) en van het voorvoegselsymbool T (tera) met het eenheidssymbool T (tesla) wordt vermeden door het symbool voor meter respektievelijk tesla zoveel mogelijk naar rechts te verplaatsen zoals hierboven weergegeven bij newton meter. Hoewel ook de vormen m · N en m . N nog toelaatbaar kunnen geacht worden, is dit niet meer het geval voor de schrijfwijze m N (met spatie tussenin) omdat deze vorm gemakkelijk zou kunnen verward worden met millinewton mN (zonder spatie tussenin).

Men aanvaardt ook het aaneenschrijven van een aantal symbolen van eenheden (al of niet in kombinatie met een decimaal voorvoegsel) wanneer er geen verwarring kan ontstaan.

Voorbeelden :

kWh (naast kW·h en kW.h en kW h)

Nm (naast N·m en N.m en N m)

VA (naast V·A en V.A en V A)

Een vorm als Nms is niet toegelaten, omdat dit zowel newton meter sekonde als newton millisekonde kan betekenen.

Het aaneenschrijven van een produkt van twee of meer eenheden (voorgesteld door hun respektievelijke symbolen) is niet toegelaten wanneer één of meer eenheden een exponent heeft.
Voorbeeld :

$\frac{kg}{m^3}$ mag niet geschreven worden als kgm^{-3}

Het aaneenschrijven is eveneens niet toegelaten wanneer m of T gevolgd worden door een eenheid; de symbolen m en T kunnen immers hetzij een voorvoegsel (respektievelijk milli en tera), hetzij een eenheid (respektievelijk meter en tesla) voorstellen. Zowel het aaneenschrijven als het tussenlaten van een spatie zijn in deze gevallen onaanvaardbaar.
Voorbeelden :
m·s of m.s = meter sekonde; meter sekonde nooit voorstellen door ms want ms = millisekonde, noch door m s (met spatie), omdat verwarring mogelijk blijft met ms (zonder spatie).

N·m of N.m of N m of ook Nm = newton meter

m·N of m.N = meter newton; meter newton nooit voorstellen door mN want mN = millinewton, noch door m N (met spatie) omdat verwarring mogelijk blijft met mN (zonder spatie).

Een speciaal geval vormen de volgende eenheden (omdat zowel m en T naast elkaar voorkomen) :
terameter : Tm
millitesla : mT
tesla meter : T·m T.m
niet voorstellen door Tm (dit is terameter)
noch door T m (met spatie) omdat verwarring mogelijk blijft met Tm (zonder spatie)
meter tesla : m·T m.T
niet voorstellen door mT (dit is millitesla)
noch door m T (met spatie) omdat verwarring mogelijk blijft met mT (zonder spatie)

20.2. Kotiënt van eenheden (of van twee produkten van eenheden)

Een samengestelde eenheid die bestaat uit een kotiënt van twee eenheden (of van twee produkten van eenheden), wordt weergegeven als volgt :

- ofwel met behulp van een horizontale deelstreep; bijvoorbeeld :

$$\frac{kg}{m^3}$$

- ofwel met behulp van negatieve exponenten; bijvoorbeeld :

$$kg.m^{-3} \quad \text{of} \quad kg.m^{-3} \quad \text{of} \quad kg\ m^{-3}$$

- ofwel met behulp van een schuine deelstreep; bijvoorbeeld :

$$kg/m^3$$

In een kotiënt mag niet meer dan één schuine deelstreep op dezelfde hoogte voorkomen, daar meerdere deelstrepen door de vermenigvuldigings- en delingsregels tot misverstand aanleiding kunnen geven.

Bij deling door meer dan één eenheid, heeft de horizontale deelstreep de voorkeur boven de schuine deelstreep. Indien men toch de schuine deelstreep gebruikt, dient de noemer tussen haakjes gezet te worden :
Voorbeelden :

De SI-eenheid waarin de warmtedoorgangskoëfficiënt wordt uitgedrukt, wordt als volgt weergegeven :

$$\frac{W}{m^2.K} \quad \text{of} \quad W/(m^2.K) \quad \text{of} \quad W.m^{-2}.K^{-1}$$

of

$$\frac{W}{m^2\ K} \quad \text{of} \quad W/(m^2\ K) \quad \text{of} \quad W\ m^{-2}\ K^{-1}$$

Volgende dubbelzinnige weergaven zijn niet toegelaten :
$W/m^2.K$ of $W/m^2\ K$
(dit zou kunnen verklaard worden als $\frac{W}{m^2}.K$)
$W/m^2/K$ (meer dan één deelstreep op dezelfde hoogte; dit zou kunnen verklaard worden hetzij als $\frac{W/m^2}{K}$ hetzij als $\frac{W}{m^2/K}$).

Schrijf bijvoorbeeld : $\frac{A.m}{V.s}$ of $A.m/(V.s)$ of $A.m.V^{-1}.s^{-1}$ of $\frac{m/s}{V/A}$

of $\frac{A\ m}{V\ s}$ of $A\ m/(V\ s)$ of $A\ m\ V^{-1}\ s^{-1}$

maar niet : $A.m/V.s$ (dit zou kunnen verklaard worden als $A.\frac{m}{V}.s$)

ook niet : m/s/V/A (meer dan één deelstreep op dezelfde hoogte)
ook niet : A.m/V/s (meer dan één deelstreep op dezelfde hoogte).

21. Weergave in gedrukte tekst van dimensiesymbolen

De dimensies van grootheden stelt men voor door middel van kombinaties (zonder vermenigvuldigingspunten) van symbolen, die met rechtopstaande hoofdletters (zonder eindpunt) geschreven worden en die een gronddimensie (dimensie van een basisgrootheid) voorstellen (zie onderhavig hoofdstuk onder 10.).

Voorbeeld :

dimensie van kracht = $\dim(F) = \mathrm{L\ M\ T^{-2}}$

22. Weergave in gedrukte tekst van wiskundesymbolen

Symbolen waarvan de betekenis vrij kan gekozen worden, moeten kursief weergegeven worden.

Voorbeeld :

$f(x)$ = funktie van de veranderlijke x

$\sqrt[n]{3}$

Symbolen met een vaste betekenis moeten rechtop worden gezet.

Voorbeelden :

Δ, d, δ, $\int$, Σ, Π, lim, lg, ln, sin, cos, tg

$\frac{dy}{dx}$ $\int f(x)\,dx$ (d : rechtop; f, x, y : kursief)

Symbolen voor wiskundige konstanten moeten rechtop worden gezet :

e = grondgetal van het stelsel van natuurlijke logaritmen (e = 2,718 28 ...)

y = konstante van Euler (y = 0,577 21 ...)

π = verhouding van omtrek tot middellijn van een cirkel (π = 3,141 59 ...)

i, j = imaginaire eenheid ($i^2 = j^2 = -1$).

Verder worden volgende wiskundige tekens internationaal gebruikt :

$\sim$ is evenredig met

$=$ is gelijk aan

$\neq$ is niet gelijk aan

$\approx$ is gelijk aan ongeveer

$\equiv$ is identiek met

$\hat{=}$ stemt overeen met

$\hat{\approx}$ stemt overeen met ongeveer

$<$ is kleiner dan

$>$ is groter dan

23. Weergave van getallen in cijferschrift

Getallen worden in cijferschrift gevormd met behulp van de Arabische cijfers 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, en 9.

Cijfers dienen steeds rechtop te staan, ook in een tekst die kursief gedrukt is.

In een getal dat een decimaal gedeelte bevat, wordt het gehele gedeelte van het decimale gedeelte gescheiden door een komma (en niet door een punt zoals in Angelsaksische landen, zie onderhavig hoofdstuk onder 24.).

Teneinde de leesbaarheid van uit veel cijfers bestaande getallen te vergemakkelijken, verdient het aanbeveling deze in groepen van drie cijfers in te delen, gerekend vanaf de komma naar links en naar rechts, bijvoorbeeld : 2 370 049,521 68

De scheiding is echter niet opgelegd indien de cijfergroep (voor de komma of na de komma) slechts vier cijfers bevat, bijvoorbeeld :
4672,638 51 86 [illegible],2149 3764,9265

Voor het scheiden van deze groepen van cijfers wordt uitsluitend gebruik gemaakt van een spatie (en dus niet van een punt).
Uitzondering : in geldbedragen wordt in het algemeen, ter voorkoming van vervalsingen, een punt als scheidingsteken gebruikt.

Vóór en na de decimale komma komt geen spatie.

Voor het vermenigvuldigen van getallen dient het vermenigvuldigingsteken x of de punt op halve hoogte gebruikt te worden, en niet de punt op de lijn of de letter **x** (behalve wanneer het uit daktylografisch oogpunt, niet anders mogelijk is).

Voor het weergeven van een produkt van een getal met een macht van 10, mag het teken x of de punt op halve hoogte vervangen worden door een punt op de lijn.
Voorbeelden :
- normale schrijfwijze : $1,5 \times 10^7$ of $1,5 \cdot 10^7$
- toegelaten : $1,5.10^7$
  $1,5.10^7 \times 3,4.10^{-6}$ (groeperen van faktoren)

24. Decimaal teken bij de weergave van decimale getallen in engelstalige teksten

Op het Europese vasteland wordt de komma gebruikt als decimaal teken; in Groot-Brittannië, de Verenigde Staten van Noord-Amerika en andere engelstalige landen wordt hiervoor echter een punt op de lijn aangewend. Tot op heden is het niet mogelijk gebleken hiervoor een éénvormige richtlijn te laten aanvaarden door alle landen ter wereld, alhoewel het maar gaat over "punten en komma's" !

Hierna volgt een uittreksel enerzijds uit de Engelse norm en anderzijds uit de ISO-norm terzake.

In de Engelse norm BS 1991 : Part 1 : 1976 "Recommendations for Letter symbols, signs and abbreviations, Part 1. General" treft men het volgende aan onder de hoofding "Mathematical notation" :

Numbers should usually be printed in upright figures.
In the matter of the decimal marker it has not yet proved possible to achieve effective international standardization. Continental European and many other countries use the comma as the decimal marker : ISO always uses the comma but recognizes that a point on the line may be used in English texts; the UK, USA and some other English-speaking countries use the point. The previous edition of this standard attached no importance to the

positioning of the point, i.e. it could be placed on the base line of the numbers or halfway up the height of the numbers. To improve the possibility of eventual international harmonization, it is here recommended that when the point is used in English texts it should be placed on the base line. To facilitate the reading of numbers consisting of more than four digits on either side of the decimal marker, these numbers may be separated into groups of three, counting from the decimal sign towards the left and the right. The groups should be separated by a small space but never by a comma or a point or by other means. This grouping of extended numbers is not mandatory, because it is inconvenient with some classes of tabular material, but is regarded as a good style that assists assimilation of the numbers. If grouping is adopted, it is very important that the separator be a space, for reasons that will be clear from the remarks relating to the decimal marker.

In numbers smaller than unity, a zero should precede the decimal point, e.g.

0.239 not .239

In de norm ISO 31/0 "Principes généraux concernant les grandeurs, les unités et les symboles" (2de uitgave, 1981) komen volgende voorschriften voor :

Impression des nombres

Les nombres doivent généralement être imprimés en caractères romains (droits).

Afin de faciliter la lecture de nombres comportant beaucoup de chiffres, ces nombres peuvent être séparés en tranches appropriées, de préférence de trois chiffres, à compter de part et d'autre du signe décimal; les tranches doivent être séparées par un petit espace, mais jamais par une virgule, un point ou d'autre manière.

Signe décimal

Le signe décimal préféré est une virgule sur la ligne. Si un point est utilisé, il doit être sur la ligne.

Si la valeur absolue d'un nombre est inférieure à l'unité, le signe décimal doit être précédé d'un zéro.

NOTE - Conformément à une décision du Conseil de l'ISO, le signe décimal est une virgule dans les documents de l'ISO.

Multiplication des nombres

Le signe de la multiplication est une croix (x) ou un point à mi-hauteur.

NOTES

1. Si un point à mi-hauteur est employé comme signe de multiplication, une virgule doit être employée comme signe décimal. Si un point est employé comme signe décimal, une croix doit être employée comme signe de multiplication.
2. Dans les documents de l'ISO, le point n'est pas employé directement entre des nombres pour indiquer la multiplication.

25. Weergave van getalwaarden en eenheden

Tussen een eenheid en het bijbehorende getal dient een spatie gelaten te worden.
Voorbeeld : 2,5 m

In symbolen zoals dat voor "graad Celsius" vormen het graadteken en de daarop volgende letter één geheel. Er mag dus geen spatie gelaten worden tussen het graadteken en de betrokken letter; er dient echter wel een spatie te volgen na de getalwaarde zoals de hierboven weergegeven algemene regel voorschrijft.
Voorbeeld :
schrijf niet : 20° C, doch wel 20 °C
Uitzondering : de symbolen voor de niet-SI-eenheden van vlakke hoek (graad, minuut, sekonde) worden rechts boven naast de getalwaarde geplaatst zonder spatie tussenin :
Voorbeeld : 7° 42' 30"

De schrijfwijze met hooggeplaatste symbolen wordt ook gevolgd voor het aangeven van een tijdstip.
Voorbeeld : de trein vertrok te $7^{h}42^{min}30^{s}$ (zonder enige tussenspatie).
Bij deze schrijfwijze mag het symbool min tot m afgekort worden : $7^{h}42^{m}30^{s}$
Om een tijdstip aan te duiden door opgave van uur en minuten (zonder sekon-

den), mag men ook schrijven : 7h30 of 7.30 (geval van uurroosters).
Voor het aangeven van een tijdsduur geldt de algemene regel.
Voorbeeld : de treinreis duurde 2 h 23 min.

26. Weergave van scheikundesymbolen

Symbolen van scheikundige elementen worden steeds in recht letterschrift weergegeven. Het symbool wordt niet gevolgd door een punt.
Voorbeelden :
Cl Na Ca Zn H N U He

Een index kan voorkomen links boven, links onder, rechts boven en rechts onder :

- links boven : nucleonental of massagetal van een nuclide : geeft het aantal nucleonen (in de kern) weer, dit is de som van de protonen en de neutronen in de kern (zie ook Hoofdstuk VI, onder 1.);
- links onder : protonental of atoomnummer van een nuclide of van een element : geeft de kernlading weer (aantal protonen in de kern); het aantal elektronen in een neutraal atoom is eveneens gelijk aan het protonental of atoomnummer (zie ook Hoofdstuk VI, onder 1.);
- rechts boven : geeft de ionisatietoestand (lading) aan (aangeduid door plus- of min-tekens) ofwel de geëxciteerde toestand (aangeduid door een sterretje);
- rechts onder : geeft het aantal atomen aan.

Voorbeelden :

Cl^- Na^+ Ca^{++} ${}^{63}_{30}Zn^{++}$ H_2 N_2 U^* He^*

Het nucleonental mag ook na het symbool geschreven worden.
Voorbeeld :
U 235

27. Handschrift, schrijfmachineschrift, computertekst, telextekst

In een met de hand geschreven tekst wordt het symbool van een grootheid onderstreept, om aan te duiden dat het gaat om een symbool van een grootheid.

Ook bij het gebruik van een schrijfmachine waarbij uitsluitend rechtopstaande lettertekens beschikbaar zijn, wordt het (dus rechtopstaand)

symbool van een grootheid onderstreept, eveneens om aan te duiden dat het gaat om een symbool van een grootheid.

Voorbeelden :

$\underline{A}$ = oppervlakte (= A) A = ampère

$\underline{m}$ = massa (= m) m = meter

$\underline{p}_a$ = absolute druk (= p_a)

$\underline{c}_{\underline{p}}$ = soortelijke warmtekapaciteit onder konstante druk (= c_p)

In de praktijk blijkt echter, dat bij schrijfmachineschrift het onderstrepen van een rechtopstaand symbool voor het aanduiden van een grootheid, tot op heden weinig wordt toegepast. In de toekomst zal de verspreiding van schrijfmachines met omwisselbare lettertekens (rechtopstaand, kursief, enz.) het betrokken voorschrift wellicht overbodig maken.

Bij gegevensverwerkende apparatuur (computer, telex) zijn de typografische mogelijkheden in verband met het weergeven van symbolen van eenheden nog veel kleiner dan bij schrijfmachineschrift. Hiervoor zijn dan speciale richtlijnen voorzien, vastgelegd in de internationale norm ISO 2955 : "Information processing. Representations of SI and other units in systems with limited character sets" (1983).

HOOFDSTUK III

GESCHIEDENIS VAN DE EENHEDEN METER, KILOGRAM EN SEKONDE; ONTSTAAN EN BESCHRIJVING VAN HET METRIEK STELSEL, HET CGS-STELSEL, HET MKS-STELSEL EN HET MTS-STELSEL

1. Voorgeschiedenis

De eenheden die door de mens het eerst werden vastgelegd, waren eenheden van lengte en van tijd. Toen het ruilverkeer zich ging ontwikkelen, werden eenheden vastgelegd voor het weergeven van hoeveelheden zoals inhoudsmaten en gewichten (gewicht in de zin van massa).

Wat tijd betreft, was de mens in de vroegste tijden uiteraard aangewezen op het jaar en de dag, zijnde voor de hand liggende tijdseenheden. De Babyloniërs verdeelden de dag reeds in 24 uur, het uur in 60 minuten en de minuut in 60 sekonden.

Voor kleinere tijdseenheden dan de dag of voor het aanduiden van een tijdstip gedurende de dag, deed men beroep op technische hulpmiddelen als de zonnewijzer, het wateruurwerk en het zanduurwerk. In de 11^{de} eeuw werden de eerste raderuurwerken vervaardigd en in de 13^{de} eeuw treft men dergelijke uurwerken aan op kerktorens en burchten. Het eerste zakuurwerk zou in het begin van de 16^{de} eeuw vervaardigd geweest zijn.

In 1[illegible]3 stelt Galileo Galilei (Italië), de uitvinder van het slingeruurwerk, de uitdrukking op die de slingertijd of periode T van de wiskundige (of matematische) slinger weergeeft in funktie van de lengte l en de versnelling van de zwaartekracht g; de betrokken uitdrukking luidt :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

De slingertijd of periode T is de tijd waarin een volledige slingerbeweging (een heengaande en een terugkerende beweging) wordt gemaakt. Bij een sekondeslinger bedraagt de halve slingertijd één sekonde. De wiskundige slinger wordt gedacht als een puntmassa, die aan een draad van lengte l

zonder massa en onrekbaar, in een punt is opgehangen, terwijl alle wrijvingskrachten afwezig gedacht worden. Bij een fysische (werkelijke) slinger noemt men "gereduceerde lengte" de lengte van een wiskundige slinger met eenzelfde slingertijd. De gereduceerde lengte van de sekondeslinger bedraagt bijna 1 meter.

In 1656 vindt Christiaan Huygens (Nederland) het slingeruurwerk "opnieuw" uit, nadat de uitvinding van Galileï in dit verband, in vergetelheid was geraakt.

De eerste eenheden van lengte werden in de vroegste tijden afgeleid van bepaalde (gemiddelde) afmetingen van het menselijk lichaam; de namen van volgende oude lengtematen herinneren daar nog aan : voet, duim, palm, el en vadem. Grote afstanden werden weergegeven door de tijd (uitgedrukt bijvoorbeeld in dagreizen) die men nodig had om ze (uiteraard te voet) af te leggen.

De grootte van de gebruikte eenheden verschilde van streek tot streek, en was ook in de tijd aan wijzigingen onderhevig. Verschillende vorsten gaven nieuwe definities aan de betrokken lengtematen of voerden nieuwe lengtematen in. Een veel geciteerd voorbeeld in dit verband is dit van Koning Hendrik I van Engeland, die in 1101 bepaalt dat de eenheid van lengte (yard) in het vervolg gelijk zal zijn aan de afstand tussen de top van zijn neus en het uiteinde van (volgens sommige bronnen) zijn middelvinger of van (volgens andere bronnen) zijn duim, bij zijwaarts gestrekte arm.

In 1266 legt Hendrik III van Engeland voor het bepalen van het gewicht (in de huidige zin van massa) volgende gewichtseenheden vast, op basis van het gewicht van droge tarwekorrels genomen uit het midden van de aar :

- 1 penny (penny-weight) = 32 korrels;
- 1 ounce = 20 pennies;
- 1 pound = 12 ounces.

In de 16de eeuw wordt in Engeland bepaald dat de lengtemaat "voet" (foot) gelijk is aan het zestiende deel van de lengte die wordt gevormd

door een rij achter elkaar geplaatste linkervoeten van zestien willekeurig gekozen personen. Samen vormen deze zestien voeten een roede (perch), en het twaalfde deel van een voet wordt duim (inch) genoemd.

Een volgende stap is, dat men er in vele steden en gewesten toe over gaat, de lengtematen te "materialiseren" : de aldaar gebruikelijke eenheid van lengte wordt dan materieel voorgesteld door de lengte van een staaf, of door de afstand tussen twee strepen op een staaf, of door een ingebeitelde of ingemetselde maat in de gevel van een overheidsgebouw. Aldus ontstaan vele tientallen voetmaten, die onderling nogal van elkaar verschillen. Dit is ook het geval voor gewichts- (in de zin van massa) en volume-maten.

De oorsprong van het gezegde : "meten met twee maten en twee gewichten" is dus gemakkelijk te verklaren; vroeger zal dit gezegde wel vooral letterlijk bedoeld geweest zijn terwijl het thans alleen nog gebruikt wordt in overdrachtelijke zin (op gebieden waar alles zoveel moeilijker objektief "af te wegen" valt).

Niet alleen de handel, doch ook de zich snel ontwikkelende wetenschappen ondervonden veel hinder door het bestaan van vele verschillende maten en gewichten. Daarom wordt er naar gestreefd, een nieuwe eenheid van lengte te bepalen die overal gemakkelijk zou kunnen gereproduceerd worden.

Hierbij komen twee strekkingen naar voor die lange tijd naast elkaar blijven bestaan : de ene strekking wil de nieuwe eenheid van lengte afleiden uit de lengte van de sekondeslinger, terwijl de andere strekking deze eenheid wil afleiden uit bepaalde afmetingen van de aarde.

In 1664 stelt Christiaan Huygens voor, als eenheid van lengte te nemen één derde van de lengte van de sekondeslinger.

Later wordt bekend, dat de versnelling van de zwaartekracht (de zwaarteveldsterkte) niet overal gelijk is op aarde, zodat de lengte van een sekondeslinger eveneens afhankelijk is van de breedtegraad. Het is trouwens precies door het uitvoeren van proefnemingen met een sekondeslinger dat Jean Richer (Frankrijk) in 1672 de veronderstelling uit, dat

de aarde de vorm heeft van een afgeplatte bol. Een uit Parijs naar Cayenne meegebrachte sekondeslinger moest immers iets ingekort worden om daar dezelfde slingertijd te verwezenlijken. De voorstanders van het afleiden van de eenheid van lengte uit de lengte van de sekondeslinger, stellen daarom een welbepaalde breedtegraad voor; omstreeks halfweg de 18de eeuw wordt in Frankrijk door Pierre Bouguer en Charles Marie de la Condamine voorgesteld als eenheid van lengte te nemen de lengte van de sekondeslinger respektievelijk op een breedte van 45° en aan de evenaar.

Het bepalen van de afmetingen van de aarde heeft steeds in de belangstelling gestaan sinds bekend was dat de aarde bolvormig was. Hiertoe meet men de afstand tussen twee punten gelegen op een zelfde meridiaan, en bepaalt men de hoek tussen de aardstralen in beide punten (graadmeting). De betrokken hoek geeft het verschil aan in breedtegraad tussen beide punten. Uit het breedteverschil tussen beide punten en de lengte van de betrokken boog, wordt dan de aardomtrek berekend. Eratosthenes (Alexandrië) voerde omstreeks 220 vóór Kristus de oudst gekende graadmeting uit.

In 1528 stelt Jean Fernel, een natuurkundige aan het hof van Hendrik II van Frankrijk voor de eerste maal voor, een deel van de afmetingen van de aarde (een deel van de meridiaanboog tussen Parijs en Amiens) als basis te nemen voor een algemeen stelsel van maten en gewichten.

Vanaf het begin van de 17de eeuw wordt steeds meer belangstelling opgebracht voor de graadmeting. Een gewichtige bijdrage hiertoe wordt in 1620 geleverd door de Nederlander Willebrord Snellius (Willebrord Snel van Royen), die voor het meten van een meridiaanboog (tussen Alkmaar en Bergen-op-Zoom) voor het eerst gebruik maakt van de triangulatie (driehoeksnet).

In 1585 pleit Simon Stevin (geboren te Brugge in 1548 en overleden te Leiden in 1620) voor een decimale indeling van maten, gewichten en munten. In zijn boekje "DE THIENDE" ontwikkelt hij vooreerst de decimale schrijfwijze van breuken en toont hij aan dat bij gebruik van deze schrijfwijze, de vier hoofdbewerkingen (optellen, aftrekken, vermenigvuldigen en delen) op dezelfde wijze kunnen uitgevoerd worden als met gehele getallen.

Vervolgens pleit hij voor een decimale onderverdeling en vergroting van lengtematen, gewichten en munten.

In 1670 stelt Gabriël Mouton (Frankrijk) voor, de lengte van een meridiaanboog (van de bolvormig geachte aarde) van 1 minuut te nemen als eenheid van lengte. Een dergelijke eenheid van lengte stemt nagenoeg overeen met hetgeen thans gekend is als een zeemijl (1852 m). Hij stelde eveneens een decimale indeling van deze eenheid voor.

In 1682 maakt Jean Picard (Frankrijk) de resultaten bekend van de graadmeting die hij in 1669 aangevangen had, terwijl in 1683 de Italiaan Giovanni Domenico Cassini een meridiaanmeting aanvangt in het noorden van Frankrijk, met de bedoeling te eindigen aan de Pyreneeën. Zijn zoon Jacques Cassini beeindigt deze meting in 1730. Deze stelt voor, als eenheid van lengte het 60 000ste deel van een meridiaanboog overeenstemmend met 1 graad te nemen; de voorgestelde eenheid van lengte is ongeveer gelijk aan 1,852 m (zijnde één duizendste van de huidige zeemijl).

Hoewel de uiteindelijke nieuwe eenheid van lengte niet werd afgeleid van de lengte van een meridiaanboog, overeenstemmend hetzij met 1 graad, hetzij met 1 minuut, wordt hierna toch beknopt de verdere geschiedenis geschetst van de zeemijl, die een belangrijke lengtemaat is in de zeevaart.

Tengevolge van de vaststelling, dat de aarde niet perfekt bolvormig is, stelt Pierre Bouguer (Frankrijk) in 1753 voor, de zeemijl te definiëren als de lengte van de "gemiddelde meridiaanminuut". Hierbij wordt de meridiaangraad bij een geografische breedte van 45° aangenomen als "gemiddelde meridiaangraad" waarvan het 60ste gedeelte de "gemiddelde meridiaanminuut" was.

Later wordt als "gemiddelde meridiaanminuut" of "gemiddelde breedteminuut" aangenomen de lengte van een meridiaankwadrant (afstand tussen pool en evenaar), gedeeld door het produkt 90 x 60 = 5400. Volgens deze definitie bekwam men, naargelang van de verschillende metingen en berekeningen, waarden gelegen tussen 1852,035 m en 1852,279 m.

Een andere definitie bepaalt de zeemijl als de lengte van een boogminuut waarbij de aarde als een perfecte bol wordt aangezien met als straal een "gemiddelde straal" gelijk aan één derde van de som van tweemaal de afstand van het aardmiddelpunt tot aan de evenaar en éénmaal de afstand van het aardmiddelpunt tot aan de pool. Dit leverde waarden op voor de zeemijl variërend van 1853,067 m tot 1853,315 m.

Een imperial nautical mile (Verenigd Koninkrijk) is gelijk aan 1853,181 m terwijl een US nautical mile (Verenigde Staten) gelijk is aan 1853,248 m.

In 1928 wordt internationaal overeengekomen, de (internationale) zeemijl gelijk te stellen aan 1852 m.

Tussen 1735 en 1746 laat de Franse Akademie voor Wetenschappen meridiaanmetingen uitvoeren in Peru en in Lapland. Deze metingen, die doorgingen onder de leiding van Pierre Bouguer en Charles Marie de la Condamine, werden uitgevoerd met behulp van de oud-Franse maat toise (vadem) waarvan de lengte in materiële vorm was weergegeven aan de voet van de trap naar het "Grand Châtelet" te Parijs sinds het begin van de 17de eeuw. In 1668 werd deze materiële voorstelling vernieuwd; deze voorstelling van de eenheid van lengte werd "toise du Châtelet" genoemd. Voor de geplande expeditie naar Peru werd in 1735, met als voorbeeld de ruw-afgewerkte toise du Châtelet, een ijzeren toise-staaf vervaardigd. De betrokken toise-staaf werd in 1748 uit Peru terug overgebracht naar Parijs. In 1766 wordt de betrokken "toise du Pérou" in Frankrijk als wettelijke eenheid van lengte ingevoerd ter vervanging van de "toise du Châtelet", die iets langer was. De andere eenheden werden als volgt afgeleid van de toise :
1 toise (du Pérou) = 6 pieds parisiens = 72 pouces parisiens = 864 lignes parisiennes.

Vergeleken met onze huidige lengte-eenheid meter, was de toise gelijk aan 1,949 037 m.

Kopieën van de "toise du Pérou" werden in de eerste helft van de 19de eeuw ook gebruikt voor de driehoeksmeting van het grondgebied in Pruisen.

2. De eenheden meter en kilogram

2.1. Oorsprong van de meter en het kilogram en hun verdere ontwikkeling en verspreiding

De Franse revolutie (1789) en de er mee gepaard gaande revolutionaire drang naar vernieuwingen zouden leiden tot het bepalen van nieuwe eenheden van lengte en van gewicht (in de huidige zin van massa).

In 1790 doet Frankrijk zelfs een poging om Engeland te betrekken bij het zoeken en vastleggen van nieuwe eenheden van lengte en gewicht (in de huidige zin van massa). Engeland echter ging daar niet op in, wat achteraf gezien een spijtige vergissing is geweest waardoor Engeland en ook de landen die te dien tijde van Engeland afhankelijk waren, nog heden ten dage opgescheept zitten met eenheden als yard, foot, inch en pound.

Eveneens in 1790 werd in Frankrijk aan de Akademie voor Wetenschappen de opdracht gegeven, een nieuw stelsel van eenheden vast te leggen. In Frankrijk bestonden er te dien tijde nog steeds twee strekkingen dienaangaande : sommigen stelden voor, de eenheid van lengte af te leiden van de lengte van de sekondeslinger bij een bepaalde breedtegraad, terwijl anderen voorstelden, als eenheid van lengte een welbepaalde fraktie te nemen van de aardomtrek. Een kommissie aangesteld door de Akademie voor Wetenschappen, en bestaande uit de Borda, Lagrange, Laplace, Monge en Concordet sprak zich uit voor de tweede strekking en trof volgende beslissingen :

- de eenheid van lengte moet rechtstreeks afhangen van de omtrek van de aarde (de kommissie wilde geen bestaande eenheid van lengte nemen teneinde de nieuwe eenheid voor alle landen gemakkelijker aanvaardbaar te maken);
- bij de bepaling van de eenheid van gewicht (in de huidige zin van massa) dient de eenheid van lengte tussen te komen;
- maten en gewichten moeten tiendelig ingedeeld worden.

Konkreet stelde de kommissie voor, als eenheid van lengte te nemen het tienmiljoenste deel van een kwadrant van de aardmeridiaan die door Parijs loopt (een meridiaankwadrant is een vierde van de aardomtrek gemeten volgens de richting van een meridiaan). Dit voorstel werd aanvaard en door

een besluit van 26 maart 1791 wordt deze nieuwe eenheid met als benaming "meter" (afgeleid van het griekse "metron" = maat) als "natuurmaat" aangenomen. De voorvoegsels voor decimale veelvouden werden ontleend aan het Grieks, en de voorvoegsels voor decimale delen aan het Latijn. De definitie van de aldus aangenomen meter is afgeleid van de lengte van een kwadrant van de meridiaan doorheen Parijs, en de juiste lengte van de meter was uiteraard maar gekend in zover de juiste lengte van de betrokken aardmeridiaan gekend was. Daarom werd besloten een nieuwe nauwkeurige graadmeting te laten uitvoeren. Deze graadmeting werd uitgevoerd door de Franse astronomen J.J.B. Delambre en P.F.A. Méchain tussen 1792 en 1798. Van de door Parijs lopende meridiaan werd met behulp van de bestaande Franse lengtemaat "toise", een meridiaanboog gemeten tussen Duinkerke en Barcelona (over een breedteverschil van ongeveer 9,5°).

Aan de uitwerking van de meetgegevens werkten een twintigtal Europese geleerden mede. Een speciale kommissie voor het vastleggen van de meter als het tienmiljoenste deel van een aardkwadrant bestond uit de Nederlander Van Swinden, de Zwitser Tralles, de Spanjaard Ciscar en de Fransen Laplace, Legendre en Méchain.

Op 7 april 1795 (toen de metingen nog niet beëindigd waren) werd de meter door de Franse Nationale Konventie wettelijk vastgelegd als het veertigmiljoenste deel van de aardmeridiaan die loopt door de Sterrewacht van Parijs.

Tevens werd als eenheid van gewicht (in de huidige zin van massa) gekozen het gewicht (massa) van 1 cm^3 zuiver water bij de temperatuur van smeltend ijs (zijnde 0 °C); deze eenheid kreeg de benaming "gram". In 1798 werd deze bepaling reeds gewijzigd, en werd het gram gedefinieerd als het gewicht (massa) van 1 cm^3 zuiver water bij zijn grootste dichtheid (zijnde 4 °C).

In 1799 werd de meter (met een onzekerheid van 30 µm) materieel voorgesteld en verwezenlijkt door een staaf uit platina met rechthoekige doorsnede (25,3 mm x 4 mm), waarvan de afstand tussen de eindvlakken bij 0 °C geacht werd te beantwoorden aan de gegeven definitie. Deze standaard was

dus uitgevoerd als eindmaat. Hij werd aangenomen als "mètre vrai et définitif".

Ook het kilogram, zijnde het duizendvoudige van een gram, werd materieel voorgesteld en verwezenlijkt in 1799 door een cilindervormige blok eveneens uit platina, waarvan het gewicht (in de huidige zin van massa) moest beantwoorden aan het gewicht (massa) van 1 dm^3 water bij 4 °C.

De betrokken meter en kilogram werden in 1799 gedeponeerd in het staatsarchief in het Louvre-paleis, waardoor ze de benaming kregen van respektievelijk "mètre des archives" en "kilogramme des archives". Een uit ijzer vervaardigde kopie van de "archiefmeter" werd verstrekt aan alle staten die hadden meegewerkt aan het tot stand komen van deze nieuwe eenheid.

De eenheden meter en kilogram werden op 12 december 1799 door de "Conseil des Anciens" wettelijk toegelaten en ter gelegenheid van deze belangrijke gebeurtenis werd een medaille geslagen, waarop aan de ene zijde het opschrift staat : "à tous les temps, à tous les peuples". Dit opschrift is als het ware een wens geweest, waarvan de vervulling bijna twee eeuwen op zich heeft laten wachten. De nieuwe eenheden meter en kilogram kenden immers geen snelle verspreiding en aanvaarding. Tussen 1803 en 1820 worden de eenheden meter en kilogram ingevoerd in Italië, in Nederland en dus ook in België (onder het Nederlands Bewind); in 1836 gebeurde dit ook in Griekenland. Het "decimaal metriek stelsel" wordt bevestigd in de eerste IJkwet van het zelfstandige België in 1855 (Loi du 1er octobre 1855 sur les poids et mesures), waarvan het eerste artikel luidt : "Le système métrique décimal des poids et mesures, établi par la loi du 21 août 1816, continue d'être appliqué dans toute la Belgique".

In België moest, krachtens artikel 2 van de wet van 1 oktober 1855, één standaard van de meter en één standaard van het kilogram bewaard worden in het Parlement in een kast die sloot door middel van drie sleutels, waarvan er één toevertrouwd werd aan de Voorzitter van de Senaat, een andere aan de Voorzitter van de Kamer van Volksvertegenwoordigers en de derde aan de Minister onder wiens bevoegdheid het IJkwezen ressorteerde. De betrokken wettelijke bepalingen zijn slechts opgeheven geworden vanaf de inwerkingtreding van het Koninklijk Besluit van 14 september 1970 houdende

gedeeltelijke inwerkingtreding van de Wet van 16 juni 1970 betreffende de meeteenheden, meetstandaarden en meetwerktuigen en tot vaststelling van de wettelijke meeteenheden en van de standaarden en regels ter reproduktie van deze eenheden. De tussenkomst van het Parlement bij de bewaring van de grondslagen van het metriek stelsel was in 1855 beoogeld om het nog algemeen verspreid gebruik van de el en van het pond te bestrijden. Niettemin verliep deze bestrijding niet gemakkelijk, zoals moge blijken uit bijgaande kopie van een krantenbericht, verschenen in 1904 in het dagblad DE GENTENAAR.

Ingeworteld volksgebruik. — Er bestaat, zoo 't schijnt, een koninklijk besluit van 1855, waarbij de benamingen *el, pond, pint, roede, zak, stuiver*, enz. onwettig verklaard zijn en in de aankondigingen van te koop gestelde waren moeten vervangen worden door namen behoorende tot het tientallig stelsel.

Ondanks dat koninklijk besluit, dat welhaast zijn vijftigjarig jubelfeest zal mogen vieren, worden er nog immer granen bij den zak, bier en andere vloeistoffen bij de pint, veldvruchten bij de roede, kruideniers-waren bij het pond en vooral kleerstoffen bij de el verkocht,

M. de minister van nijverheid en arbeid heeft de burgemeesters en policieambtenaars aangemaand de overtredingen op dat punt op te sporen en aan te klagen.

Als die aanmaning van den minister getrouw wordt uitgevoerd, zal het voortaan uit zijn met de aankondigingen van ellegoederen aan *drie ellen voor ne frank*. Doch, die gewoonte is zoo zeer ingeworteld, dat men wellicht nog eene halve eeuw zal noodig hebben om ze uit te roeien. Dat ze taai is bewijst het woord « ellegoederen » zelf, dat nog niet gemakkelijk door *metergoederen*, bij voorbeeld, zal vervangen worden.

In Frankrijk, het land van oorsprong, werden de eenheden meter en kilogram als de enige wettelijke eenheden van lengte en massa erkend met ingang van 1 januari 1840.

Omstreeks 1860 worden meter en kilogram ingevoerd in Spanje, Oostenrijk - Hongarije, en worden ze toegelaten in Groot-Brittannië. Een speciaal geval vormen de Verenigde Staten van Noord-Amerika. Door de wet van 28 juli 1866 werd het metriek stelsel vastgelegd als wettelijk stelsel voor maten en gewichten. Het werd echter in de praktijk niet gebruikt. In de plaats daarvan gebruikte men de US-yard en de US-pound, waarvan de grootte in 1866 per definitie werd bepaald door een welbepaalde verhouding ten opzichte van de meter en het kilogram.

In Duitsland werden meter en kilogram wettelijk erkend met ingang van 1 januari 1872. In 1873 worden de eenheden meter en kilogram ingevoerd in Brazilië.

Op 20 mei 1875 werd in Parijs de Meterkonventie (Convention du mètre) door 17 staten ondertekend (Argentinië, België, Brazilië, Denemarken, Duitsland, Frankrijk, Italië, Noorwegen, Oostenrijk-Hongarije, Peru, Portugal, Rusland, Spanje, Turkije, Verenigde Staten van Noord-Amerika, Zweden en Zwitserland), met het doel een algemene invoering en vervolmaking van het metriek eenhedenstelsel te bewerkstelligen.

Daar de "mètre des archives" uit 1799 te onnauwkeurig bleek voor de steeds hoger wordende eisen van techniek en wetenschap, en de "kilogramme des archives" eveneens uit 1799, niet gans nauwkeurig beantwoordde aan de definitie van het kilogram en van het gram (waarbij beroep werd gedaan op de cm^3 en de waterdichtheid bij 4 °C), werd door de Meterkonventie besloten, een nieuwe definitie vast te leggen van de meter en het kilogram. Uit een legering van 90 delen platina en 10 delen iridium werden een reeks meterstaven (met een X-vormige doorsnede) en een reeks kilogramcilinders vervaardigd, zo nauwkeurig mogelijk beantwoordend aan de oorspronkelijke standaarden, zonder rekening te houden met de teoretische definities van de betrokken oorspronkelijke standaarden.

De nieuwe meterstandaarden waren uitgevoerd als streepjesmaat; dit betekent dat de lengte van de meter op de betrokken staaf werd voorgesteld door de afstand tussen 2 streepjes.

In 1889 werd door de 1ste CGPM één van deze meterstaven en één van deze kilogramcilinders uitgekozen als internationaal prototype van de meter en internationaal prototype van het kilogram. Een volgende stap was het erkennen van deze prototypen als eenheden. Hierdoor waren deze prototypen niet alleen de materiële weergave van de betrokken eenheid; ze waren er ook de definitie van. Aldus werden de eenheden meter en kilogram losgemaakt van de afmetingen der aarde en van de eigenschappen van water. De meter was thans (met een onzekerheid van 0,2 µm) gelijk aan de afstand bij 0 °C tussen 2 streepjes op de betrokken staaf uit platina-iridium met X-vormige doorsnede (vandaar de benaming X-meter), terwijl het kilogram gelijk was aan de massa van de betrokken cilinder, eveneens uit platina-iridium.

De X-meter hield niet lang stand als weergave en definitie van de meter. Deze stoffelijke meter was voor de praktijk nauwkeurig genoeg, doch de fysische wetenschappen stelden hogere eisen naarmate de meettechnieken nauwkeuriger werden. De streepjes op de X-meter hebben een zekere dikte, en onder de mikroskoop zijn ze rafelig en niet scherp afgelijnd waardoor het midden van de streepjes niet met voldoende nauwkeurigheid kon bepaald worden. Daarom werd gezocht naar middelen die een nauwkeuriger definitie mogelijk maken. Tussen 1927 en 1960 werden talrijke proefnemingen uitgevoerd, waarbij bepaalde spektrumlijnen werden onderzocht van het cadmium-isotoop 114, de krypton-isotopen 84 en 86, het xenon-isotoop 136 en het kwik-isotoop 198. Door interferometrische metingen werd bepaald, hoeveel maal de betrokken golflengte begrepen is in het internationale prototype van de meter.

Als resultaat van deze onderzoekingen, werd in 1960 door de 11de CGPM volgende nieuwe definitie van de meter aangenomen : "De meter is de lengte gelijk aan 1 650 763,73 golflengten in het luchtledige van de straling overeenkomend met de overgang tussen de niveaus (toestanden) 2 p_{10} en 5 d_5 van het atoom krypton 86".

Deze nieuwe definitie van de meter levert geen nieuwe eenheid van lengte op; alleen werd de bestaande eenheid nauwkeuriger vastgelegd binnen de tolerantiegrenzen van de oude definitie. Enerzijds werd de nauw-

keurigheid merkelijk verbeterd en anderzijds kon de meter nu in elk daartoe uitgerust natuurkundig laboratorium worden bepaald en was men niet meer afhankelijk van het beschikbaar zijn van het prototype van de meter of van een kopie ervan.

Weldra bleek echter bij het reproduceren van de meter volgens de definitie van 1960, dat de bereikbare nauwkeurigheid begrensd werd door de eigenschappen van de gekozen spektraallijn. Het is echter niet aangewezen, telkens na enkele jaren weer een andere spektraallijn te moeten nemen als grondslag voor een nieuwe definitie van de meter. Daarom werd door de 17de CGPM (Parijs, oktober 1983) een andere weg gekozen en werd de meter gedefinieerd als volgt : de meter is gelijk aan de lengte van de weg die het licht in vacuüm aflegt in een duur van $\frac{1}{299\ 792\ 458}$ sekonde.
In de resoluties goedgekeurd door de 17de CGPM in verband met de meter, wordt uitvoerig uiteengezet waarom tot een nieuwe definitie werd overgegaan (resolutie 1) en welk verder onderzoek nog dient te gebeuren (resolutie 2) :

Résolution 1

La Dix-septième Conférence Générale des Poids et Mesures,

considérant

que la définition actuelle ne permet pas une réalisation du mètre suffisamment précise pour tous les besoins,

que les progrès réalisés dans l'asservissement des lasers permettent d'obtenir des radiations plus reproductibles et plus faciles à utiliser que la radiation étalon émise par une lampe à krypton 86,

que les progrès réalisés dans la mesure des fréquences et des longueurs d'onde de ces radiations ont abouti à des déterminations concordantes de la vitesse de la lumière dont l'exactitude est limitée principalement par la réalisation du mètre dans sa définition actuelle,

que les valeurs des longueurs d'onde déterminées à partir de mesures de fréquence et d'une valeur donnée de la vitesse de la lumière ont une précision supérieure à celle qui peut être obtenue par comparaison avec la longueur d'onde de la radiation étalon du krypton 86,

qu'il y a avantage, notamment pour l'astronomie et la géodésie, à maintenir inchangée la valeur de la vitesse de la lumière recommandée en 1975 par la Quinzième Conférence Générale des Poids et Mesures, dans sa Résolution 2 (c = 299 792 458 m/s),

qu'une nouvelle définition du mètre a été envisagée sous diverses formes qui ont toutes pour effet de donner à la vitesse de la lumière une valeur exacte, égale à la valeur recommandée, et que cela n'introduit aucune discontinuité appréciable de l'unité de longueur, compte tenu de l'incertitude relative de $\pm$ 4 x 10^{-9} des meilleures réalisations du mètre dans sa définition actuelle,

que ces diverses formes, faisant appel soit au trajet parcouru par la lumière dans un intervalle de temps spécifié, soit à la longueur d'onde d'une radiation de fréquence mesurée ou de fréquence spécifiée, ont fait l'objet de consultations et de discussions approfondies, qu'elles ont été reconnues équivalentes et qu'un consensus s'est dégagé en faveur de la première forme,

que le Comité Consultatif pour la Définition du Mètre est dès maintenant en mesure de donner des instructions pour la mise en pratique d'une telle définition, instructions qui pourront inclure l'emploi de la radiation orangée du krypton 86 utilisée jusqu'ici comme étalon et qui pourront être complétées ou révisées par la suite,

décide

1° *Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1/299 792 458 de seconde.*

2° *La définition du mètre en vigueur depuis 1960, fondée sur la transition entre les niveaux $2p_{10}$ et $5d_5$ de l'atome du krypton 86, est abrogée.*

Résolution 2

La Dix-septième Conférence Générale des Poids et Mesures,

invite le Comité International des Poids et Mesures

à établir des instructions pour la mise en pratique de la nouvelle définition du mètre,

à choisir des radiations qui puissent être recommandées comme étalons de longueur d'onde pour la mesure interférentielle des longueurs et à établir des instructions pour leur emploi,

à poursuivre les études entreprises pour améliorer ces étalons.

Men kan zich de vraag stellen, hoe groot de fout was bij de bepaling van de aardomtrek (gemeten volgens een meridiaan) die werd uitgevoerd tussen 1792 en 1798 door Delambre en Méchain. In 1795 werd vooropgesteld, dat de meter een zodanige grootte zou hebben, dat hij precies 10 000 000-maal zou begrepen zijn in de betrokken afstand. Het kwadrant van de aardomtrek gemeten volgens een meridiaan, met andere woorden de afstand van pool tot evenaar, bedraagt echter 10 002 288 meter. Dit betekent dat onze huidige meter iets korter is dan origineel gepland in 1795. Indien onze meter 0,2288 mm langer zou geweest zijn, dan zou deze lengte precies 10 000 000-maal begrepen geweest zijn in de afstand van pool tot evenaar :

$$\frac{10\,002\,288\ m}{1,000\,228\,8\ m} = 10\,000\,000.$$

Wat de eenheid van massa betreft, geldt nog steeds de uitspraak van de 3de CGPM (1901), volgens dewelke de massa van het prototype van platina-iridium (uit 1889) tot internationale standaard van de eenheid van massa werd verklaard met als benaming kilogram.

Na het tot stand komen van de Meterkonventie in 1875, voerden steeds meer landen de eenheden meter en kilogram in : Argentinië in 1887, Bulgarije en Boli [illegible] in 1892-1893, Egypte en Albanië in 1951, Groot-Brittannië in 1965 (traps[illegible]gewijze invoering tussen 1965 en 1975), Columbië in 1967 (trapsgewijze invoering tussen 1967 en 1971), Canada in 1970, Verenigde Staten van Noord-Amerika in 197[illegible] (trapsgewijze invoering tussen 1972 en 1982).

De geschiedenis van de meter en het kilogram zijn gekenmerkt door volgende jaartallen :

- meter :

  1799 : "mètre des archives" : platina-staaf met rechthoekige doorsnede als eindmaat ("mètre vrai et définitif")

1889 : X-meter, aangenomen als internationaal prototype door de 1ste CGPM: streepjesmaat op een X-vormige staaf uit platina-iridium

1960 : de meter wordt door de 11de CGPM gedefinieerd in funktie van de golflengte van een straling

1983 : de meter wordt door de 17de CGPM gedefinieerd door per definitie aan te nemen dat de snelheid van het licht in vacuüm exact gelijk is aan 299 792 458 m/s

- kilogram :

1799 : "kilogramme des archives" : cilindervormige blok uit platina

1889 : cilindervormige blok uit platina-iridium, aangenomen als internationaal prototype door de 1ste CGPM

1901 : het kilogram wordt door de 3de CGPM bevestigd als eenheid van massa en is gelijk aan het internationale prototype van het kilogram (van 1889).

2.2. Het "metriek stelsel"

2.2.1. Eenheden van het metriek stelsel

De benaming "metriek stelsel" werd gegeven aan het eenhedenstelsel dat in de eerste jaren na de Franse revolutie (1789) ontstond met als basis de meter en het kilogram. In deze zin gebruikte ook de "Convention du Mètre" in 1875 de benaming "système métrique" zonder hiervan een klare en duidelijk omschreven definitie te geven. Duidelijk werd bedoeld, het nieuwe stelsel waarin de meter een eenheid was. Het metriek stelsel was in den beginne er vooral op gericht, de "eerlijkheid in de handel" te bevorderen. Dit stelsel bevatte dan ook alleen maar eenheden die voor het handelsverkeer nuttig waren :

- eenheid van lengte : de meter
- eenheid van oppervlakte : de are (aangenomen door het CIPM in 1879)
- eenheid van volume : de liter
- eenheid van gewicht (in de huidige zin van massa) : het kilogram.

Het metriek stelsel met de eenheden meter, are, liter en kilogram was geen koherent stelsel. Aanvankelijk werd dit als geen bezwaar aangevoeld want bij de invoering van het metriek stelsel bestond er nog geen behoefte

aan begrippen zoals algemene groothedenvergelijking, koherentie en dimensie. Het metriek stelsel, tot stand gekomen in het begin van de 19de eeuw, betekende een belangrijke sanering op het gebied van de eenheden, waardoor een einde kon gesteld worden aan de vroegere chaos terzake.

2.2.2. De eenheid "liter"

In 1901 werd door de 3de CGPM volgende resolutie in verband met de liter aangenomen (weergegeven in de originele Franse tekst) :

La Conférence déclare :

1° *L'unité de volume, pour les déterminations de haute précision, est le volume occupé par la masse de 1 kilogramme d'eau pure, à son maximum de densité et sous la pression atmosphérique normale; ce volume est dénommé "litre";*

2° *Dans les déterminations de volume qui ne comportent pas un haut degré de précision, le décimètre cube peut être envisagé comme équivalent au litre; et, dans ces déterminations, les expressions des volumes basées sur le cube de l'unité linéaire peuvent être substituées à celles qui sont rapportées au litre tel qu'il vient d'être défini.*

La Conférence charge le Comité international de faire poursuivre au Bureau les mesures destinées à faire encore mieux connaître le rapport de ces deux grandeurs, et de publier, le plus tôt possible les résultats des recherches déjà effectuées au Bureau, afin de permettre d'utiliser à l'avenir, dans les travaux scientifiques ou techniques de haute précision, la valeur la plus probable de ce rapport.

De soortelijke massa van water bij zijn grootste dichtheid, namelijk bij 4 °C, werd vastgesteld op 0,999 972 $\frac{g}{cm^3}$ hetzij 0,999 972 $\frac{kg}{dm^3}$. Derhalve is het volume van 1 kg water bij 4 °C gelijk aan $\frac{1}{0,999\ 972}$ dm^3, hetzij 1,000 028 dm^3.

Hieruit volgt dus : 1 liter = 1,000 028 dm^3.

Indien zowel het "kilogramme des archives" uit 1799 als het prototype van het kilogram uit 1889 perfekt zouden hebben beantwoord aan de bedoeling die origineel bij de vervaardiging ervan werd vooropgesteld, dus indien beide standaarden een massa zouden gehad hebben die precies gelijk was aan de

massa van 1 dm^3 zuiver water bij zijn grootste dichtheid (dus bij 4 °C), zou er geen onderscheid in grootte geweest zijn tussen liter en dm^3. Dan zou immers de soortelijke massa van water bij zijn grootste dichtheid precies gelijk geweest zijn aan 1 $\frac{g}{cm^3}$ hetzij 1 $\frac{kg}{m^3}$. Daar zowel het "kilogramme des archives" uit 1799 als het prototype van het kilogram uit 1889 niet perfekt beantwoordde aan de originele bedoeling uit de beginjaren van de Franse revolutie, waren de eenheden liter en dm^3 niet volledig gelijk aan elkaar.

Pas in 1964 heeft de 12^{de} CGPM de definitie van de liter zoals die was vastgelegd in 1901, opgeheven en verklaard dat de liter voortaan niets anders zou betekenen dan een speciale benaming voor dm^3. Derhalve geldt vanaf 1964 : 1 liter = 1 dm^3. Tevens werd aanbevolen, de eenheid liter niet meer te gebruiken voor zeer nauwkeurige opgaven van volume.

Wat betreft het symbool voor liter, bestaat er soms mogelijkheid tot verwarring tussen de letter l en het cijfer 1. In 1976 stelde het CIPM voor, in voorkomend geval het woord liter voluit te schrijven ofwel de afkorting ltr. te gebruiken. In 1979 besliste de 16^{de} CGPM (resolutie 5) dat voor het aanduiden van de eenheid liter, twee symbolen mogen gebruikt worden, namelijk l of L (zie ook Hoofdstuk X, onder 3.2.1.1.).

2.2.3. Voorbeeld van oude landmaten

Langs wijlen mijn ouders (Achiel Taveirne - Maria Lamsens) om, landbouwers te Esen (bij Diksmuide) kwam ik destijds in het bezit van een gedrukte tekst (zie bijgaande kopie) betreffende oude landmaten, die vroeger in West-Vlaanderen algemeen in voege waren (en thans nog steeds in beperkte mate). De betrokken tekst werd opgesteld door Achiel Develter (1879 - 1941), die een tijdlang onderwijzer was te Esen, er ook een drukkerij uitbaatte en ook soms landbouwvoordrachten gaf. Er kon thans niet meer achterhaald worden in welk jaar deze tekst gedrukt werd; er mag nochtans worden aangenomen dat het betrokken dokument dateert van kort vóór of kort na de eerste wereldoorlog (1914 - 1918).

Naast de wettelijke landmaten, onderscheidt men er de oude landmaten van Brugge, Yperen (Ieper), Veurne en Kortrijk. Op te merken valt dat bij

KORTEN INHOUD EENER LES OVER DE LANDMATEN.

De meter is de hoofdeenheid der lengtematen.

De veelvouden van den meter zijn : de Decameter (Dm.) of 10 m., de Hectometer (Hm.) of 100 m., de Kilometer (Km.) of 1.000 m. en de Myriameter (Mm.) of 10.000 m.

De onderdeelen van den meter zijn : de decimeter (dm.) = 0,10 m., de centimeter (cm.) = 0,01 m. en de millimeter (mm.) = 0,001 m.

LANDMATEN zijn maten die de oppervlakte van de landerijen te kennen geven.

Men onderscheidt de **wettelijke landmaten** en de **oude landmaten.**

De wettelijke landmaten zijn : de centiare (ca.) = 1 vm., de are (a.) = 100 vm. en de Hectare (Ha.) = 100 aren of 10.000 vierkante meters.

De oude landmaten zijn : de voet, de roede, de lijn en het gemet.

In Vlaanderen heeft men de oude landmaten van Brugge, Yperen, Veurne en Kortrijk. Het gebruik der streek bepaalt welke oude landmaat er in voege is. Zoo bezigt men de Kortrijksche landmaat tot tegen Yperen, de Brugsche landmaat in deze streek tot aan den rechteroever van den Yser, enz.

BRUGSCHE MAAT. — De voet der Brugsche maat is 0,27428 m. lang ; de roede is 14 voeten lang of 3,84 m. ; de lijn heeft eene oppervlakte van 100 roeden of 14 aren, 74 ca. en het gemet heeft eene oppervlakte van 3 lijnen, 300 vierkante roeden, of 44 aren, 23 centiaren.

KORTRIJKSCHE MAAT. — Voet = 0,2976 m. ; Roede = 10 voeten of 2,976 m. ; Honderd lands (100 roeden) = 8 aren, 85 ca. ; gemet = 500 lands of 44 aren, 28 centiaren.

VEURNSCHE MAAT. — Voet = 0,2728 m. ; Roede = 14 voeten of 3,82 m. ; Lijn = 100 roeden of 14 aren, 59 centiaren ; Gemet = *300 roeden of 43 aren, 78 ca.*

YPERSCHE MAAT. — Voet = 0,2729 m. ; Roede = 14 voeten of 3,8208 m. ; Lijn = 100 roeden of 14 aren, 60 ca. ; Gemet = 300 roeden of 43 aren, 79 1/2 ca.

Vergelijking tusschen oude en wettelijke landmaten.

1 Hectare = 678 Brugsche roeden of 2 gemete, 78 roeden.
1 » = 1129 Kortrijksche roeden of 2 gemete, 129 lands.
1 » = 685 3/10 Veurnsche roeden of 2 gemete, 85 3/10 roeden.
1 » = 685 Ypersche roeden of 2 gemete, 85 roeden.

Herleiding van wettelijke maten in roeden.

Men herleidt eerst de wettelijke maat in Hectaren, en men vermenigvuldigt dan door 678 voor de Brugsche maat, door 685 voor de Ypersche, door 685 3/10 voor de Veurnsche en door 1129 voor de Kortrijksche maat.

VOORBEELDEN :

Een stuk zaailand is 2 Ha. 17 aren 25 ca. groot. Hoeveel is dat in Brugsche roeden ?
2,1725 × 678 = 1473 roeden of 4 gemete, 2 lijnen en 73 roeden.
De oppervlakte van een perceel bouwgrond is 7 aren, 36 ca. Hoeveel Br. roeden is dat ?
7 a. 36 ca. = 0,0736 Ha. — 0,0736 × 678 = 50 Brugsche roeden.

Over het meten van landerijen met de roede.

Het is gemakkelijkst eene roede te bezigen die in 10 gelijke deelen verdeeld is. Wanneer men een stuk land wil meten dat 4 rechte zijden heeft, meet men opvolgentlijk de 2 lengtezijden en de 2 breedtezijden. Men vermenigvuldigt dan de helft der lengtezijden door de helft der breedtezijden. — VOORBEELD : De 2 lengtezijden eener partij meten 35,6 roeden + 38,4 roeden = 74 roeden. De 2 breedtezijden meten 22,6 roeden + 19,8 roeden = 42,4 roeden. De oppervlakte = de helft van 74 roeden × door de helft van 42,4 roeden, of 37 r. × 21,2 r. = 784 4/10 roeden of 2 gemete, 1 lijn, 84 4/10 Brugsche roeden.

Wanneer eene of meer zijden gebogen zijn, trekt men eene rechte lijn, en hetgeen overschiet wordt afzonderlijk gemeten, gewoonlijk in 2 driehoeken. De oppervlakte van eenen driehoek bekomt men door de grondlijn te vermenigvuldigen door de helft van de hoogte.

A. DEVELTER.

de gegeven voorbeelden, de omrekening steeds gebeurt van wettelijke maat naar oude maat, en niet omgekeerd. Het opmeten van landerijen gebeurde blijkbaar ook niet met een meter of een dekameter, maar wel met een roede (respektievelijk de "Brugsche", de "Kortrijksche", de "Veurnsche" en de "Ypersche" roede).

3. Eenheid van tijdsduur (sekonde); tijdmeting; kalenderjaar

3.1. De middelbare zonnedag en een eerste definitie van de sekonde

De aarde draait om haar as (ten opzichte van de vaste sterren) in ongeveer 23 uur 56 minuten en om de zon in 1 jaar (ongeveer 365 1/4 dagen). Deze dubbele beweging resulteert in een schijnbare dagelijkse beweging van de zon (opeenvolging van dag en nacht) en de sterren om de aarde en in een schijnbare jaarlijkse beweging van de zon aan de hemel (opeenvolging der vier seizoenen).

Een waarnemer die zich op de zon zou bevinden, zou de aarde een ellips zien beschrijven met de zon in één der brandpunten. Voor een waarnemer op aarde komt het voor, alsof de zon een ellips beschrijft om de aarde (met de aarde in één der brandpunten).

Eenheden voor tijdmeting worden in de astronomie afgeleid uit de aardrotatie (het draaien van de aarde om een ingebeelde as) en uit de (jaarlijkse) omloop van de aarde om de zon. Deze bewegingen van de aarde kunnen maar relatief worden bepaald en gemeten ten opzichte van een buiten de aarde gelegen vergelijkingspunt. In het burgerlijk leven geldt uitsluitend de zon als dergelijk vergelijkingspunt (zonnetijd); voor astronomische doeleinden werden bovendien de vaste sterren en meer speciaal het lentepunt als vergelijkingspunt gekozen (sterretijd).

De zonnedag is het tijdsinterval tussen twee opeenvolgende doorgangen van de zon door het vlak van de meridiaan van de waarnemingspost terwijl de sterredag het tijdsinterval is tussen twee opeenvolgende doorgangen van het lentepunt. Een sterredag is 3 minuten en 56,91 sekonden korter dan een zonnedag en is dus gelijk aan 86 164,09 s.

Na de opkomst van het uurwerk (dat uiteraard onafhankelijk van de hemelverschijnselen loopt) werd bevestigd dat de lengte van de zonnedag in de loop van het jaar wat varieerde (hetgeen reeds vroeger bekend was). De ware zonnedag kon dus geen aanvaardbare tijdmaat zijn daar de duur ervan veranderlijk is. Om de zonnetijd aan die van het uurwerk aan te passen, gebruikt men in het dagelijks leven de middelbare zonnetijd in plaats van de ware zonnetijd. De middelbare zonnetijd is gebaseerd op de beweging van een fiktieve middelbare zon. Het verschil tussen ware zonnetijd en middelbare zonnetijd noemt men tijdvereffening; deze kan variëren van nul tot ongeveer zestien minuten.
De (middelbare zonne-) dag wordt ingedeeld als volgt :

$$1\ d = 24\ h = 1440\ min = 86\ 400\ s$$

Hieruit volgt een eerste definitie van de sekonde : de sekonde, voorheen sinds lange tijd reeds gekend als het $86\ 400^{ste}$ deel van een dag, werd na het invoeren van de middelbare zonnedag, gedefinieerd als het $86\ 400^{ste}$ deel van de middelbare zonnedag. Deze definitie hield officieel stand tot in 1956.

3.2. Het siderische jaar, het tropische jaar, het anomalistische jaar

In het algemeen kan men een jaar (symbool a) definiëren als de tijd die de aarde nodig heeft om éénmaal haar baan om de zon te doorlopen.

In de astronomie onderscheidt men het siderische jaar (of sterrejaar) a_{sid}, het tropische jaar a_{tr} en het anomalistische jaar a_{anom}.

Het siderische jaar (sterrejaar) is de tijd waarin de zon, van de aarde uit gezien, één keer omloopt ten opzichte van de vaste sterren. Dit is de werkelijke omlooptijd van de aarde.

Het tropische jaar is de tijdsduur tussen twee opeenvolgende doorgangen van de zon door het lentepunt, dus de tijd tussen twee opeenvolgende lente-ekwinoxen (lente-eveningen). Op 20 of 21 maart beweegt de zon van zuid naar noord over de hemelekwator door het zogenaamde lentepunt. Dit is per definitie het begin van de astronomische lente. Na gemiddeld

365,242 19 dagen doet zij dit opnieuw. De betrokken tussenliggende periode noemt men het tropische jaar, dat overeenstemt met de opvolging der seizoenen. Doordat het lentepunt de zon tegemoet loopt door de precessie, is het tropische jaar iets korter (ongeveer 20 minuten) dan de werkelijke omlooptijd van de aarde die gegeven is door het siderische jaar. Het is echter duidelijk dat een goede zonnekalender gebaseerd moet zijn op het tropische jaar en niet op het siderische jaar, omdat anders de seizoenen geleidelijk in het jaar zouden opschuiven.
Laat men het tropische jaar (dat een welbepaalde tijdsduur vertegenwoordigt) beginnen wanneer de rechte klimming van de middelbare zon precies 18 h 40 min bedraagt, dan wordt het dan begonnen tropische jaar genoemd : astronomisch jaar of annus fictus of Bessels jaar (naar F.W. BESSEL, 1784 - 1846). Men noteert het begin ervan met decimalen, bijvoorbeeld : 1900,0. Het aldus vastgelegde begin van een tropisch jaar ligt dicht bij het begin van het burgerlijk jaar.

Het anomalistische jaar wordt bepaald door de ellipticiteit van de aardbaan rond de zon en is gelijk aan de tijdsduur tussen twee opeenvolgende periheliumdoorgangen van de aarde in haar baan om de zon. Het anomalistische jaar is iets langer dan het siderische jaar.

Het siderische jaar, het tropische jaar en het anomalistische jaar, die onderling verschillend zijn tengevolge van een telkens ander astronomisch vergelijkingspunt, zijn ook niet konstant in de tijd.

Het siderische jaar benadert het meest een konstante tijdsduur, daar het nauwelijks merkbaar verandert in de tijd.

De duur van het tropische jaar neemt iets af met de tijd (ongeveer 0,53 sekonden per eeuw, hetzij 1 sekonde in 187 jaar), door het feit dat de precessie langzaam toeneemt en de zon het lentepunt dus iets vroeger bereikt.

De duur van het anomalistische jaar neemt iets toe met de tijd (ongeveer 0,27 sekonden per eeuw).

Voor het tijdstip 1900,0 dit is op 1 januari 1900 12 uur 's middags wereldtijd, bedroeg de duur van het siderische, tropische en anomalistische jaar respektievelijk (waarbij dag = middelbare zonnedag en sekonde = $\frac{1}{86\ 400}$ middelbare zonnedag) :

$1\ a_{sid}$ = 365,256 360 416 7 dagen = 365 d 6 h 9 min 9,54 s
= 31 558 149,54 s

$1\ a_{tr}$ = 365,242 198 781 3 dagen = 365 d 5 h 48 min 45,9747 s
= 31 556 925,9747 s

$1\ a_{anom}$ = 365,259 641 203 7 dagen = 365 d 6 h 13 min 53,0 s
= 31 558 433 s

3.3. Het juliaanse jaar en het gregoriaanse of burgerlijke jaar

In verband met de jaarrekening in het burgerlijk leven (kalenderjaren) zijn te vernoemen : het juliaanse jaar (a_{jul}) en het gregoriaanse of burgerlijke jaar (a_{greg}).

Het juliaanse jaar dat in 45 vóór Kristus werd ingevoerd door Julius Caesar op voorstel van Sosigenes en stand hield tot in 1582, telt 365,25 dagen, telkens gerangschikt in 3 jaren van elk 365 dagen en 1 jaar van 366 dagen (schrikkeljaar); ieder jaartal dat deelbaar is door 4 was een schrikkeljaar. Daar het tropische jaar nagenoeg 11 minuten korter is dan het juliaanse jaar, verschoof telkenjare het begin van het juliaanse jaar met ongeveer 11 minuten ten opzichte van het tropische jaar, dat overeenstemt met de opeenvolging van de seizoenen. Om deze verschuiving te korrigeren en in de toekomst ook te verhelpen, voerde paus Gregorius XIII in 1582 een kalenderhervorming door. In 1582 werden 10 dagen overgeslagen : op donderdag 4 oktober 1582, volgde onmiddellijk vrijdag 15 oktober 1582. Teneinde in de toekomst de kalender nagenoeg in overeenstemming te houden met de duur van het tropische jaar, werd verder bepaald dat van de jaren, waarvan het jaartal een veelvoud van 100 is, telkens slechts het vierde als schrikkeljaar zal behouden blijven, en wel de jaren 1600, 2000, 2400, enz. Per vier eeuwen worden er dus drie dagen afgeschaft, met andere woorden, in de jaren 1700, 1800, 1900 en in de jaren 2100, 2200, 2300, enz., wordt telkens een korrektie van 1 dag doorgevoerd, waardoor deze jaren geen schrikkeljaren zijn.

Het gregoriaanse jaar of burgerlijk jaar telt aldus gemiddeld $\frac{(365{,}25 \times 400) - 3}{400}$ = 365,2425 dagen, stemt betrekkelijk goed met het tropische jaar overeen, en vormt sedert 1583 de grondslag van de burgerlijke tijdrekening (het gregoriaanse of burgerlijke jaar is ongeveer 26 sekonden langer dan het tropische jaar).

Voor het juliaanse jaar en het (gemiddelde) gregoriaanse jaar, waarvan de tijdsduur konstant blijft in de tijd, geldt respektievelijk (waarbij dag = gemiddelde zonnedag = 86 400 sekonden)

$1\ a_{jul}$ = 365,25 dagen = 365 d 6 h
= 31 557 600 s

$1\ a_{greg}$ = 365,2425 dagen = 365 d 5 h 49 min 12 s
= 31 556 952 s

De gregoriaanse kalender werd in enkele rooms-katolieke landen (Italië, Spanje, Portugal, Polen) onmiddellijk aangenomen. In Frankrijk gebeurde dit in december 1582. In de Nederlanden vierde men Kerstmis daags na 14 december 1582, behalve in de protestantse provincies, waar men, zoals Kepler (1571 - 1630) het later uitdrukte, het liever oneens was met de zon, dan het eens met de paus. De rooms-katolieke staten van Duitsland en Zwitserland namen de hervorming aan in 1583 - 1584, Hongarije in 1587. In de protestantse gedeelten van de Nederlanden, Duitsland en Zwitserland kwam de nieuwe kalender pas in 1700 in gebruik. Engeland volgde in 1752 en Zweden in 1753. Rusland, Griekenland en enkele andere landen met ortodoxe godsdienst hebben pas in het begin van de 20ste eeuw de gregoriaanse kalender aangenomen.

3.4. Wereldtijd

Sedert 1925,0 neemt in de burgerlijke en astronomische schaal van de middelbare zonnetijd de dag een aanvang om middernacht.

Uit de aard van de definitie, is de zonnetijd gebonden aan de meridiaan van de waarnemingsplaats. Voor het vastleggen van een algemene zonnetijd, moet men een welbepaalde meridiaan kiezen. Voor astronomische waarnemingen werd hiervoor de meridiaan van Greenwich gekozen. In 1883

werd de meridiaan van Greenwich als standaardmeridiaan voor de wereld aanvaard en in 1884 tevens als standaardtijdmeridiaan. De middelbare zonnetijd geldend voor de meridiaan van Greenwich (Greenwich Mean Time : GMT) wordt wereldtijd of universele tijd genoemd (Universal Time UT; Temps Universel TU; Weltzeit WZ; Wereldtijd WT).

3.5. Juliaanse dagen

Voor sommige astronomische berekeningen over een lange tijdsduur wordt een doorlopende dagnummering van middelbare zonnedagen toegepast. Hier wordt de tijd gemeten in "juliaanse dagen"; dit is het aantal middelbare zonnedagen (julian date JD) geteld vanaf 1 januari 4713 vóór Kristus, 12 uur wereldtijd. Deze nummering werd in 1583 geïntroduceerd door J. Scaliger. Men is internationaal overeengekomen, de "juliaanse" dag op de middelbare middag van Greenwich te laten beginnen, ook nadat in 1925,0 het begin van de astronomische dag naar middernacht werd verplaatst.

Tabel III.1. geeft voor enkele data, telkens om 12 uur wereldtijd, het aantal verstreken juliaanse dagen weer.

Tabel III.1. *Aantal verstreken juliaanse dagen, voor enkele data (telkens om 12 uur wereldtijd)*

1.1.1950 : 2 433 283	1.1.2005 : 2 453 372
1.1.1955 : 2 435 109	1.1.2010 : 2 455 198
1.1.1960 : 2 436 935	1.1.2015 : 2 457 024
1.1.1965 : 438 762	1.1.2020 : 2 458 850
1.1.1970 : 2 440 588	1.1.2025 : 2 460 677
1.1.1975 : 2 442 414	1.1.2030 : 2 462 503
1.1.1980 : 2 444 240	1.1.2035 : 2 464 329
1.1.1985 : 2 446 067	1.1.2040 : 2 466 155
1.1.1990 : 2 447 893	1.1.2045 : 2 467 982
1.1.1995 : 2 449 719	1.1.2050 : 2 469 808
1.1.2000 : 2 451 545	1.1.2055 : 2 471 634

3.6. Een tweede definitie van de sekonde; efemeridentijd

Daar de rotatiesnelheid van de aarde niet helemaal konstant is doch (in uiterst geringe mate) afneemt, werd de definitie van de sekonde als zijnde het 86 400ste deel van de middelbare zonnedag, in 1956 door het CIPM vervangen door een andere definitie die luidt als volgt : de sekonde is het 31 556 925,9747ste deel van het tropische jaar dat begon op 0 januari 1900, 12 uur efemeridentijd (dit is 31 december 1899, 12 uur wereldtijd). Deze definitie werd in 1960 bekrachtigd door de 11de CGPM. Door het opnemen van een tijdstip in deze definitie, werd een sekonde bekomen, efemeridensekonde genoemd, die een welbepaalde konstante waarde heeft.

In 1958 nam de IAU volgende resolutie aan in verband met het invoeren van de efemeridentijd :
"Que le Temps des Ephémérides (T.E.) ou Ephemeris Time (E.T.) soit compté depuis l'instant, voisin du début de l'année du calendrier A.D. 1900, où la longitude géométrique moyenne du Soleil était 279°41'48",04, à cet instant la mesure du Temps des Ephémérides était exactement : 1900 Janvier 0 à 12 h. L'unité fondamentale du Temps des Ephémérides est la seconde telle qu'elle est définie par le Comité International des Poids et Mesures (Procès-Verbaux des Séances, deuxième série, Tome XXV, p. 77), c'est à dire : 'la fraction 1/31556925,9747 de l'année tropique pour 1900 Janvier 0 à 12 heures de temps des éphémérides' ".

Het begin van de efemeridentijd werd daardoor per definitie vastgesteld op 31 december 1899 om 12 uur wereldtijd. Het verschil tussen de efemeridentijd en de wereldtijd wordt steeds groter, als gevolg van de verlangzaming van de aardrotatie. In 1973 bedroeg dit verschil ongeveer 44 sekonden; dit verschil kan als gevolg van de onbekende storingen in de aardrotatie pas achteraf worden berekend.

3.7. Een derde definitie van de sekonde; atoomtijd en internationale atoomtijd

De definitie van de sekonde van 1956 hield niet lang stand, en werd reeds in 1967 door de 13de CGPM vervangen door een totaal nieuwe definitie,

waarbij de beweging van de aarde en andere hemellichamen er niet meer aan te pas komt. Er werd immers vastgesteld, dat de resonantiefrekwentie van een molekuul of een atoom in het gebied van de zeer hoge frekwenties een fysische konstante is, die tot grondslag van de definitie van de sekonde kan dienen.

De definitie van 1967 luidt : de sekonde is de tijdsduur van 9 192 631 770 perioden van de straling, overeenkomend met de overgang tussen de twee hyperfijnniveaus van de grondtoestand van het atoom cesium 133. Deze definitie van de sekonde, die helemaal niets meer te maken heeft met de aardrotatie of met de jaarlijkse omloop van de aarde om de zon, gaf aanleiding tot het ontstaan van het begrip "atoomtijd" en "internationale atoomtijd". Dit is een tijdschaal die gebaseerd is op het optellen van atoomsekonden; hieruit ontstaat de atoomtijd TA (temps atomique). De internationale atoomtijd TAI wordt uit de atoomtijden, zoals in een groot aantal landen met cesiumatoomklokken gecreëerd, berekend door de atoomklokken met elkaar te vergelijken (tijdvergelijking); dit geschiedt door het Bureau International de l'Heure (BIH) te Parijs.

In een resolutie (resolutie 1) vroeg de 14de CGPM (1971) aan het CIPM, een definitie te willen geven van "internationale atoomtijd" en de nodige maatregelen te willen nemen om de betrokken tijdschaal te verwezenlijken. Hierna volgt de tekst van de betrokken resolutie :

Résolution 1

La Quatorzième Conférence Général des Poids et Mesures,

considérant

que la seconde, unité de temps du Système International d'Unités, est définie depuis 1967 d'après une fréquence atomique naturelle, et non plus d'après des échelles de temps fournies par des mouvements astronomiques,

que le besoin d'une échelle de Temps Atomique International (TAI) est une conséquence de la définition atomique de la seconde,

que plusieurs organisations internationales ont assuré et assurent encore avec succès l'établissement des échelles de temps fondées sur des mouvements astronomiques, particulièrement grâce aux services permanents du Bureau International de l'Heure (BIH),

que le Bureau International de l'Heure a commencé à établir une échelle de temps atomique dont les qualités sont reconnues et qui a prouvé son utilité,

que les étalons atomiques de fréquence servant à la réalisation de la seconde ont été considérés et doivent continuer de l'être par le Comité International des Poids et Mesures assisté d'un Comité Consultatif, et que l'intervalle unitaire de l'échelle de Temps Atomique International doit être la seconde réalisée conformément à sa définition atomique,

que toutes les organisations scientifiques internationales compétentes et les laboratoires nationaux actifs dans ce domaine ont exprimé le désir que le Comité International et la Conférence Générale des Poids et Mesures donnent une définition du Temps Atomique International, et contribuent à l'établissement de l'échelle de Temps Atomique International,

que l'utilité du Temps Atomique International nécessite une coordination étroite avec les échelles de temps fondées sur des mouvements astronomiques,

demande au Comité International des Poids et Mesures

1° *de donner une définition du Temps Atomique International* (1);

2° *de prendre les mesures nécessaires, en accord avec les organisations internationales intéressées, pour que les compétences scientifiques et les moyens d'action existants soient utilisés au mieux pour la réalisation de l'échelle de Temps Atomique International, et pour que soient satisfaits les besoins des utilisateurs du Temps Atomique International.*

(1) En prévision de cette demande, le Comité International des Poids et Mesures avait chargé son Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde de préparer une définition du Temps Atomique International. Cette définition, approuvée par le Comité International à sa 59e session (octobre 1970), est la suivante :

"Le Temps Atomique International est la coordonnée de repérage temporel établie par le Bureau International de l'Heure sur la base des indications d'horloges atomiques fonctionnant dans divers établissements conformément à la définition de la seconde, unité de temps du Système International d'Unités."

Resolutie 5 van de 15de CGPM (1975) betreft de gekoördineerde wereldtijd UTC (Universal time coordinated); hierna volgt de tekst van de betrokken resolutie :

Résolution 5

La Quinzième Conférence Générale des Poids et Mesures,

considérant que le système appelé "Temps Universel Coordonné" (UTC) est employé très largement, qu'il est diffusé par la plupart des émetteurs hertziens de signaux horaires, que sa diffusion fournit aux utilisateurs à la fois des fréquences étalons, le Temps Atomique International et une approximation du Temps Universel (ou, si l'on préfère, du temps solaire moyen),

constate que ce Temps Universel Coordonné est à la base du temps civil dont l'usage est légal dans la plupart des pays,

estime que cet emploi est parfaitement recommandable.

Wat het verband betreft tussen de internationale atoomtijd (TAI) en de gekoördineerde wereldtijd (UTC), treft men in de 5de uitgave (1985) van de publikatie "Le Système International d'Unités" (uitgegeven door het BIPM) volgende tekst aan :

Temps

Quelques laboratoires de recherche construisent eux-mêmes l'appareillage pour produire des oscillations électriques dont la fréquence est dans un rapport connu avec la fréquence de la transition de l'atome de césium 133 qui définit la seconde. On obtient ainsi des impulsions à la fréquence voulue, par exemple 1 Hz, 1 kHz, etc. Des étalons de temps à césium sont aussi disponibles commercialement.

L'exactitude correspond, dans le cas des appareils les mieux étudiés, à une incertitude de 10^{-13} *et même* 10^{-14}, *en valeur relative.*

Des émissions hertziennes diffusent des ondes entretenues dont la fréquence est connue avec des incertitudes de 10^{-11} *à* 10^{-12}, *en valeur relative.*

Il existe des horloges et des générateurs de fréquence de grande stabilité autres que les appareils à césium, par exemple le maser à hydrogène, les horloges à rubidium et à quartz, etc. Leur fréquence

doit être étalonnée par comparaison avec un étalon de temps à césium, soit directement, soit par l'intermédiaire d'émissions hertziennes.

Les signaux horaires diffusés par voie hertzienne sont donnés dans une échelle de temps appelée Temps Universel Coordonné (UTC) dont l'emploi a été recommandé en 1975 par la 15e CGPM (Résolution 5). UTC est défini de telle façon qu'il diffère au Temps Atomique International (TAI) d'un nombre entier de secondes. La différence UTC - TAI a été fixée égale à - 10 s le 1er janvier 1972, date de mise en application de la réforme de UTC qui comportait auparavant un décalage de fréquence; cette différence peut être modifiée de 1 seconde par l'emploi d'une seconde intercalaire ("leap second") positive ou négative à la fin d'un mois de UTC, de préférence en premier lieu à la fin de décembre ou de juin et en second lieu à la fin de mars ou de septembre, afin que UTC reste en accord avec le temps défini par la rotation de la Terre avec une approximation meilleure que 0,9 s (1). De plus, les temps légaux de la plupart des pays sont décalés d'un nombre entier d'heures (fuseaux horaires et heure dite d'été) par rapport à UTC.

(1) *La différence UTC - TAI était - 22 s le 1er janvier 1985*

In de 3de uitgave (1977) en de 4de uitgave (1981) van dezelfde publikatie stond als voetnota respektievelijk vermeld : *"La différence UTC - TAI est devenue égale à - 16 s le 1er janvier 1977; la différence UTC - TAI était - 19 s le 1er janvier 1981.*

Men onderscheidt in het totaal dus volgende tijdschalen :
- wereldtijd (Universal Time UT) en gekoördineerde wereldtijd (Universal Time Coordinated UTC)
- efemeridentijd (Temps des Ephémérides TE; Ephemeris Time ET)
- atoomtijd (Temps Atomique TA) en internationale atoomtijd (Temps Atomique International TAI).

Voor het berekenen en onderling vergelijken van de verschillende tijdschalen zijn ingewikkelde metingen vereist.

4. Ontstaan van het CGS-stelsel, het MKS-stelsel en het MTS-stelsel

Voor wetenschappelijke doeleinden werd het gebrek aan koherentie tussen de eenheden van het metriek stelsel (meter, are, liter en kilogram) al spoedig als een bezwaar ondervonden. Dit was vooral het geval bij de studie van fysische, elektrische en elektromagnetische verschijnselen. Belangrijke opzoekingen op het gebied van elektrostatische en elektromagnetische verschijnselen werden geleverd door Gauss (1777-1855) en Weber (1804-1891), die een tijdlang (na 1831) hebben samengewerkt en zich zeer verdienstelijk hebben gemaakt bij het zoeken naar een koherent eenhedenstelsel dat zowel mechanische als elektrische eenheden bevatte.

In 1832 voerde Gauss, bij de behandeling van het magnetisme, voor het eerst eenheden in die werden afgeleid van eenheden van lengte, van massa en van tijd; als grondeenheden nam hij hierbij de millimeter, het milligram en de sekonde. Omstreeks 1840 stelden Gauss en Weber een stelsel voor met als grondeenheden de centimeter, het gram en de sekonde (CGS-stelsel). Later (in 1863) werd voor het afleiden van elektrostatische en elektromagnetische eenheden ook nog voorgesteld, als grondeenheden te nemen : de meter, het gram en de sekonde. Uiteindelijk haalde het stelsel met als grondeenheden de centimeter, het gram en de sekonde, de bovenhand, met als benaming : "CGS-stelsel".

Een grote bijdrage tot het tot stand komen en de algemene aanvaarding van het CGS-stelsel, werd geleverd door de British Association for the Advancement of Science (BAAS). In 1873 koos een kommissie (Comittee for the Se[illegible]tion and Nomenclature of Dynamical and Electrical Units), bijeengeroepen door de BAAS, als grondeenheden de centimeter, het gram en de sekonde; het hierop gesteunde eenhedenstelsel (CGS-stelsel) werd aanbevolen als gemeenschappelijk eenhedenstelsel voor de mechanika en de elektrodynamika.

De benamingen dyne en erg komen reeds in 1873 voor als speciale benaming respektievelijk voor de CGS-eenheid van kracht en de CGS-eenheid van arbeid; ook de voorvoegsels "kilo", "hekto", "deka", "centi" en "milli", komen dan reeds voor.

De keuze van de centimeter en het gram als grondeenheden werd onder meer ingegeven door de overweging, dat de getalwaarde van de soortelijke massa van water, uitgedrukt in de koherente van deze grondeenheden afgeleide eenheid (g/cm^3) gelijk is aan 1 (ρ_{water} = 1 g/cm^3). Een stelsel met als grondeenheden de meter, het kilogram en de sekonde (MKS-stelsel) maakte te dien tijde geen kans omdat de getalwaarde van de soortelijke massa van water, uitgedrukt in de koherente van deze grondeenheden afgeleide eenheid (kg/m^3), niet meer gelijk zou zijn aan 1 (ρ_{water} = 1000 kg/m^3).

De mechanische eenheden van het CGS-stelsel hebben ongeveer een eeuw lang stand gehouden en werden vooral in de fysika gebruikt. Als praktisch bezwaar tegen het CGS-stelsel kan worden aangevoerd, dat de betrokken eenheden voor het dagelijks gebruik klein zijn (bijvoorbeeld de dyne als eenheid van kracht en de erg als eenheid van arbeid). Daarom ontstond naderhand naast het CGS-stelsel, het MKS-stelsel met als grondeenheden de meter, het kilogram en de sekonde. Het MKS-stelsel bleef beperkt tot eenheden op het gebied van de mechanika en werd niet uitgebreid met eenheden op het gebied van de elektriciteit, met andere woorden, er werden geen elektrische eenheden afgeleid van de grondeenheden meter, kilogram en sekonde.

In Frankrijk kende men ook nog het MTS-stelsel (meter-ton-sekonde-stelsel), waar het in 1919 voor de handel en de industrie verplicht werd gesteld en in 1948 nog werd bevestigd. In 1960 werd dit stelsel wettelijk opgeheven.

5. Beschrijving van het CGS-stelsel (centimeter-gram-sekonde-stelsel)

5.1. Basisgrootheden en grondeenheden van het CGS-stelsel; toepassingsgebied van de CGS-eenheden

De basisgrootheden van het CGS-stelsel zijn : lengte, massa en tijd. De grondeenheden zijn respektievelijk : centimeter (cm), gram (g), sekonde (s).

Het CGS-stelsel omvat naast mechanische eenheden, ook elektrische en (elektro)magnetische eenheden. Het CGS-stelsel werd vooral in de fysika toegepast.

5.2. Mechanische CGS-eenheden

Enkele van de voornaamste afgeleide mechanische eenheden zijn :

- CGS-eenheid van snelheid : $\frac{cm}{s}$
- CGS-eenheid van versnelling : $\frac{cm}{s^2}$; wanneer het ging om de versnelling van de zwaartekracht werd aan de eenheid $\frac{cm}{s^2}$ dikwijls een speciale benaming gegeven, namelijk gal (symbool Gal) :

$$1 \text{ Gal} = 1 \frac{cm}{s^2}$$

- CGS-eenheid van kracht : dyne (dyn)
  Een dyne is gelijk aan de kracht, die aan een lichaam met een massa van 1 gram, een versnelling geeft van 1 $\frac{cm}{s^2}$:

$$1 \text{ dyn} = 1 \text{ g} \cdot 1 \frac{cm}{s^2} = 1 \text{ g} \cdot \text{cm} \cdot s^{-2}$$

- CGS-eenheid van druk : $\frac{dyn}{cm^2}$, ook barye genoemd (vooral in Frankrijk)

$$10^6 \frac{dyn}{cm^2} = 10^6 \text{ barye} = 1 \text{ bar}$$

$$10^3 \frac{dyn}{cm^2} = 10^3 \text{ barye} = 1 \text{ millibar} = 1 \text{ mbar}$$

$$1 \frac{dyn}{cm^2} = 1 \text{ barye} = 1 \text{ mikrobar} = 1 \text{ µbar}$$

$$= \frac{1 \text{ g} \cdot 1 \frac{cm}{s^2}}{cm^2} = 1 \text{ g} \cdot cm^{-1} \cdot s^{-2}$$

- CGS-eenheid van arbeid : erg (erg)
  Een erg is de arbeid verricht door een kracht van 1 dyne, die een lichaam over een afstand van 1 cm verplaatst in de richting van de kracht :

$$1 \text{ erg} = 1 \text{ dyn} \cdot 1 \text{ cm} = 1 \text{ dyn} \cdot \text{cm} = 1 \text{ g} \cdot 1 \frac{cm}{s^2} \cdot 1 \text{ cm}$$

$$= 1 \frac{g \cdot cm^2}{s^2} = 1 \text{ g} \cdot cm^2 \cdot s^{-2}$$

- CGS-eenheid van vermogen : $\frac{erg}{s}$

$$1 \frac{erg}{s} = 1 \frac{\frac{g \cdot cm^2}{s^2}}{s} = 1 \text{ g} \cdot cm^2 \cdot s^{-3}$$

Tabel III.2. *Enkele van de voornaamste mechanische grootheden, met de overeenkomstige CGS-eenheden*

grootheid	eenheid		
	naam	symbool	uitgedrukt in grondeenheden
lengte	centimeter	cm	cm
oppervlakte	vierkante centimeter	cm^2	cm^2
volume	kubieke centimeter	cm^3	cm^3
tijd	sekonde	s	s
snelheid	centimeter per sekonde	$\frac{cm}{s}$	$cm.s^{-1}$
versnelling	centimeter per sekonde-kwadraat	$\frac{cm}{s^2}$	$cm.s^{-2}$
massa	gram	g	g
kracht	dyne	dyn	$g.cm.s^{-2}$
arbeid	erg	erg	$g.cm^2.s^{-2}$
vermogen	erg per sekonde	$\frac{erg}{s}$	$g.cm^2.s^{-3}$
druk	dyne per vierkante centimeter, barye	$\frac{dyn}{cm^2}$	$g.cm^{-1}.s^{-2}$
dynamische viskositeit	poise	P	$g.cm^{-1}.s^{-1}$
kinematische viskositeit	stokes	St	$cm^2.s^{-1}$

- CGS-eenheid van dynamische viskositeit η : poise (P)

De kracht F die vereist is om een vloeistoflaag met een oppervlakte A te verschuiven met een relatieve snelheid w ten opzichte van een even grote vloeistoflaag die zich bevindt op een afstand d, is gelijk aan de weerstandskracht W. Men noemt dynamische viskositeit η de grootheid $\frac{W \cdot d}{A \cdot w}$.
Men bekomt als koherente eenheid (met als speciale benaming "poise") :

$$1\ P = \frac{1\ dyn \cdot 1\ cm}{1\ cm^2 \cdot 1\ \frac{cm}{s}} = 1\ \frac{dyn \cdot s}{cm^2} = 1\ \frac{\frac{g \cdot cm}{s^2} \cdot s}{cm^2}$$

$$= 1\ \frac{g}{cm \cdot s} = 1\ g \cdot cm^{-1} \cdot s^{-1}$$

Een veel gebruikte eenheid is de centipoise :

$$1\ cP = \frac{1}{100}\ P$$

- CGS-eenheid van kinematische viskositeit ν : stokes (St)

De kinematische viskositeit is gelijk aan de dynamische viskositeit, gedeeld door de soortelijke massa : $\nu = \frac{\eta}{\rho}$

$$1\ \text{St} = \frac{1\ \text{P}}{1\ \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} = \frac{1\ \text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}}{1\ \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}} = 1\ \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} = 1\ \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Een veel gebruikte eenheid is de centistokes :

$$1\ \text{cSt} = \frac{1}{100}\ \text{St}$$

Enkele van de voornaamste mechanische grootheden, met opgave van de naam van de koherente CGS-eenheid en het gebruikte symbool, alsmede de weergave ervan in de grondeenheden cm, g en s, zijn weergegeven in tabel III.2.

5.3. Elektrostatische CGS-eenheden en elektromagnetische CGS-eenheden

Wat betreft de afgeleide eenheden (afgeleid van de grondeenheden cm, g, s) op het gebied van de elektriciteit en het elektromagnetisme, kende het CGS-stelsel een tweevoudige verlenging :

- enerzijds de elektrostatische CGS-eenheden, die een koherent eenhedenstelsel vormen;
- anderzijds de elektromagnetische CGS-eenheden, die eveneens een koherent eenhedenstelsel vormen.

Zowel in het elektrostatische als in het elektromagnetische eenhedenstelsel zijn de eenheden van kracht, arbeid en vermogen respektievelijk de dyne, de erg en de erg per sekonde.

Iedere elektrische grootheid en iedere elektromagnetische grootheid kan zowel in elektrostatische eenheden als in elektromagnetische eenheden worden uitgedrukt. Deze eenheden kregen meestal geen eigen naam, doch werden aangeduid als de ese (elektrostatische eenheid) of de eme (elektromagnetische eenheid) van lading, van stroom, van spanning, van weerstand enz.

Teneinde dit dubbel eenhedenstelsel te vermijden, stelde Gauss achteraf voor, de specifiek elektrische grootheden in ese uit te drukken, en de specifiek elektromagnetische eenheden in eme. Aldus werden door Gauss de specifiek

elektrostatische eenheden uit het ese-stelsel en de specifiek elektromagnetische eenheden uit het eme-stelsel verenigd tot een derde (gemengd) CGS-stelsel voor elektrische en elektromagnetische grootheden.

Hierna zal worden nagegaan, hoe de elektrostatische eenheden en de elektromagnetische eenheden worden afgeleid voor volgende grootheden : elektrische stroom I, elektrische lading Q, elektrische spanning U, weerstand R, kapaciteit C, elektrische induktantie (zelfinduktie L, wederzijdse of wederkerige induktie M), permittiviteit ϵ en permeabiliteit μ. Hiertoe dienen we een reeks groothedenvergelijkingen uit de elektriciteitsleer te kennen.

Van sommige elektrische en elektromagnetische grootheden bestaan er twee verschillende definitievergelijkingen, naargelang van het feit of de betrokken grootheid rationaal of niet-rationaal wordt weergegeven.

De niet-gerationaliseerde schrijfwijze is de schrijfwijze die het eerst werd toegepast, en ook nu nog meestal wordt toegepast bij het gebruik van CGS-eenheden (elektrostatische of elektromagnetische CGS-eenheden).

Bij de invoering van de gerationaliseerde schrijfwijze werd de schrijfwijze van sommige groothedenvergelijkingen uit de elektriciteitsleer zodanig gewijzigd, dat de faktor 4 π alleen nog voorkomt waar de geometrische symmetrie dit vereist.

Bij het gebruik van het MKSA-eenhedenstelsel (Giorgi-stelsel) worden de groothedenvergelijkingen uit de elektriciteitsleer meestal gerationaliseerd geschreven; bij het gebruik van SI-eenheden is dit steeds het geval.

Eén der hoofdwetten van de elektrostatika (elektrostatische wet van Coulomb) luidt : de kracht die twee elektrische ladingen op elkaar uitoefenen, is evenredig met het produkt van deze ladingen en omgekeerd evenredig met het kwadraat van hun afstand. Dit wordt weergegeven door volgende (niet-gerationaliseerde) groothedenvergelijking :

$$F = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{\epsilon \cdot r^2} \qquad \text{(III, 1)}$$

De permittiviteit ϵ (vroeger diëlektrische konstante genoemd) houdt rekening met de elektrische eigenschappen van de middenstof. Heerst er vacuüm (dus als er geen middenstof aanwezig is) dan is $\epsilon = \epsilon_0 = 1$. Is er wel een middenstof aanwezig, dan is de betrokken kracht kleiner, hetgeen betekent dat de permittiviteit ϵ dan groter is dan 1.

In de groothedenvergelijking (III, 1) kan ϵ vervangen worden door het produkt $\epsilon_0 \cdot \epsilon_r$. Hierin stelt ϵ_r de verhouding voor van de permittiviteit ϵ van de betrokken middenstof tot de permittiviteit ϵ_0 van vacuüm. De betrokken verhouding wordt relatieve permittiviteit ϵ_r genoemd. De relatieve permittiviteit ϵ_r van elke middenstof is dus groter dan 1.

Gelijksoortige ladingen (beide positief of beide negatief) stoten elkaar af; ongelijksoortige ladingen (de ene lading positief, en de andere negatief) trekken elkaar aan.

Eén der hoofdwetten uit het elektromagnetisme luidt : de kracht die twee evenwijdige geleiders, waardoor een elektrische stroom vloeit, op elkaar uitoefenen, is evenredig met de grootte van beide stromen en omgekeerd evenredig met de onderlinge afstand tussen de geleiders. Verder is die kracht ook afhankelijk van de middenstof waarin die geleiders zich bevinden (hiermede wordt rekening gehouden door de permeabiliteit μ), en van de beschouwde lengte van de geleiders. Dit wordt weergegeven door volgende (niet-gerationaliseerde) groothedenvergelijking :

$$F = \frac{2 \mu \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot l}{r} \qquad \text{(III, 2)}$$

De getalfaktor 2 in de groothedenvergelijking (III, 2) vloeit voort uit de gevolgde afleiding van de betrokken vergelijking.

De permeabiliteit μ houdt rekening met de magnetische eigenschappen van de middenstof. Heerst er vacuüm (dus als er geen middenstof aanwezig is) dan is $\mu = \mu_0 = 1$. Is er wel een middenstof aanwezig, dan kan de permeabiliteit μ zowel groter als kleiner dan 1 zijn.

In de groothedenvergelijking (III, 2) kan μ vervangen worden door het produkt $\mu_0 \cdot \mu_r$. Hierin stelt μ_r de verhouding voor van de permeabiliteit

μ van de betrokken middenstof tot de permeabiliteit μ_o van vacuüm. De betrokken verhouding wordt relatieve permeabiliteit μ_r genoemd.

Van sommige stoffen is μ iets kleiner dan μ_o en de relatieve permeabiliteit μ_r dus iets kleiner dan 1; men noemt deze stoffen diamagnetische stoffen. Voor andere stoffen is μ groter dan μ_o en de relatieve permeabiliteit μ_r dus groter dan 1. Wanneer μ_r niet veel groter dan 1 is, spreekt men van paramagnetische stoffen. Voor ijzerhoudende stoffen, en ook voor stoffen die nikkel, kobalt of chroom bevatten, kan μ_r zeer grote waarden aannemen (tot een waarde van ongeveer 10 000); men noemt deze stoffen ferromagnetische stoffen.

Wanneer de stroom in beide evenwijdige geleiders dezelfde zin heeft, trekken de betrokken geleiders elkaar aan; wanneer de zin tegengesteld is, stoten ze elkaar af. De verklaring van het verschijnsel is gelegen in het feit dat een stroom om zijn geleider heen een magnetisch veld doet ontstaan dat invloed uitoefent op een geleider die zich in dat veld bevindt en waardoor ook stroom vloeit.

De niet-gerationaliseerde groothedenvergelijking (III, 1) laat ons toe (met $\epsilon = \epsilon_o = 1$) een eerste elektrostatische CGS-eenheid af te leiden, namelijk de ese van lading. De overige es-eenheden worden dan afgeleid aan de hand van de algemene wetten van de elektriciteitsleer, terwijl voor het bepalen van de dimensie en de eenheid van μ in het elektrostatisch CGS-eenhedenstelsel, beroep wordt gedaan op de niet-gerationaliseerde groothedenvergelijking (III, 2).

De niet-gerationaliseerde groothedenvergelijking (III, 2) laat ons toe (met $\mu = \mu_o = 1$) een eerste elektromagnetische eenheid af te leiden, namelijk de eme van stroom. De overige em-eenheden worden dan afgeleid aan de hand van de algemene wetten van de elektriciteitsleer, terwijl voor het bepalen van de dimensie en de eenheid van ϵ in het elektromagnetisch CGS-eenhedenstelsel, beroep wordt gedaan op de niet-gerationaliseerde groothedenvergelijking (III, 1).

Bij het afleiden van elektrostatische en elektromagnetische eenheden wordt gebruik gemaakt van de algemene wetten van de elektriciteitsleer,

waarvan er enkele hierna besproken worden.

- De lading Q die door een geleider stroomt, gedeeld door de tijd t, wordt elektrische stroom I genoemd :

$$I = \frac{Q}{t} \qquad \text{(III, 3)}$$

- Om een lading te verplaatsen is energie nodig. Het onderhouden van een elektrische stroom I in een geleider vereist dus een vermogen P. Om een stroom I tot stand te brengen moet er tussen twee punten van een geleider een potentiaalverschil zijn. Dit potentiaalverschil noemt men de elektrische spanning U. Het vermogen P is evenredig met de spanning U en met de stroom I :

$$P = U \cdot I \qquad \text{(III, 4)}$$

- De elektrische weerstand R wordt gedefinieerd als volgt :

$$R = \frac{U}{I} \qquad \text{(III, 5)}$$

- De kapaciteit C van een geleider is gelijk aan zijn lading Q, gedeeld door de potentiaal V. De vergelijking luidt :

$$C = \frac{Q}{V} \qquad \text{(III, 6)}$$

5.4. Het elektrostatische CGS-stelsel

Vergelijking (III, 1), met $\epsilon = \epsilon_o = 1$, vormt de definitievergelijking van de grootheid "elektrische lading" in het es-CGS-eenhedenstelsel. Dit laat ons toe de ese van lading af te leiden uit de grondeenheden cm, g, s. De ese van lading is de lading die in het luchtledige ($\epsilon = \epsilon_o = 1$) op een even grote lading, geplaatst op 1 cm afstand, een kracht uitoefent van 1 dyne.

Aldus bekomt men als ese van lading, met behulp van de definitievergelijking (III, 1) :

$$1 \text{ dyn} = \frac{\text{ese van lading} \times 1 \text{ ese van lading}}{(1 \text{ cm})^2}$$

Waaruit volgt :

$$\text{ese van lading} = \sqrt{\text{dyn} \cdot \text{cm}^2} = \sqrt{\text{cm} \cdot \text{g} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{cm}^2} = \text{cm}^{3/2} \cdot \text{g}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$$

Hiermede is op het gebied van de elektriciteit een eerste eenheid van het es-CGS-stelsel vastgelegd, en kunnen met behulp van de algemene wetten van de elektriciteitsleer, de ese-eenheden worden afgeleid waarin de overige

elektrische en elektromagnetische grootheden worden uitgedrukt. Hierna volgen enkele voorbeelden :

- ese van stroom :

  uit (III, 3) volgt :

$$\text{ese van stroom} = \frac{cm^{3/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-1}}{s} = cm^{3/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-2}$$

- ese van spanning :

  uit (III, 4), geschreven als $U = \frac{P}{I}$, volgt :

$$\text{ese van spanning} = \frac{cm^2 \cdot g \cdot s^{-3}}{cm^{3/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-2}} = cm^{1/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-1}$$

- ese van weerstand :

  uit (III, 5) volgt :

$$\text{ese van weerstand} = \frac{cm^{1/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-1}}{cm^{3/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-2}} = cm^{-1} \cdot s$$

- ese van kapaciteit :

  uit (III, 6) volgt :

$$\text{ese van kapaciteit} = \frac{cm^{3/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-1}}{cm^{1/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-1}} = cm$$

- ese van elektrische induktantie (zelfinduktie L en wederzijdse of wederkerige induktie M, waarvan de definitievergelijkingen hier niet worden behandeld) :

$$\frac{\text{ese van spanning x sekonde}}{\text{ese van stroom}} = \frac{cm^{1/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-1} \cdot s}{cm^{3/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-2}} = cm^{-1} \cdot s^2$$

- ese van permeabiliteit :

  uit (III, 2) geschreven als $\mu = \frac{F \cdot r}{2 I_1 \cdot I_2 \cdot l}$, volgt :

$$\text{ese van permeabiliteit} = \frac{cm \cdot g \cdot s^{-2} \cdot cm}{(cm^{3/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-2})^2 \cdot cm} = cm^{-2} \cdot s^2$$

Het es-CGS-stelsel is een koherent stelsel.

5.5. Het elektromagnetische CGS-stelsel

Vergelijking (III, 2), met $\mu = \mu_0 = 1$, vormt de definitievergelijking van de grootheid "elektrische stroom" in het em-CGS-eenhedenstelsel. Dit laat ons toe de eme van stroom af te leiden uit de grondeenheden cm, g, s : de eme van stroom is de stroom die, wanneer hij door een rechte geleider stroomt, op een evenwijdige geleider die zich in het luchtledige

($\mu = \mu_o = 1$) op een afstand van 1 cm bevindt, en waardoor een even grote stroom vloeit, per centimeter lengte een kracht uitoefent gelijk aan 2 dyne. Aldus bekomt men als eme van stroom, met behulp van de definitievergelijking (III, 2) :

$$2 \text{ dyn} = \frac{2 \times 1 \text{ eme van stroom} \times 1 \text{ eme van stroom} \times 1 \text{ cm}}{1 \text{ cm}}$$

waaruit volgt :

$$\text{eme van stroom} = \sqrt{\text{dyn}} = \sqrt{\text{cm} \cdot \text{g} \cdot \text{s}^{-2}} = \text{cm}^{1/2} \cdot \text{g}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$$

Hiermede is op het gebied van de elektriciteit, een eerste eenheid van het em-CGS-stelsel vastgelegd, en kunnen met behulp van de algemene wetten van de elektriciteitsleer, de em-eenheden worden afgeleid waarin de overige elektrische en elektromagnetische grootheden worden uitgedrukt. Hierna volgen enkele voorbeelden :

- eme van lading :

  uit (III, 3) geschreven als $Q = I \cdot t$, volgt :

  $$\text{eme van lading} = \text{cm}^{1/2} \cdot \text{g}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{s} = \text{cm}^{1/2} \cdot \text{g}^{1/2}$$

- eme van spanning :

  uit (III, 4) geschreven als $U = \frac{P}{I}$, volgt :

  $$\text{eme van spanning} = \frac{\text{cm}^2 \cdot \text{g} \cdot \text{s}^{-3}}{\text{cm}^{1/2} \cdot \text{g}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}} = \text{cm}^{3/2} \cdot \text{g}^{1/2} \cdot \text{s}^{-2}$$

- eme van weerstand :

  uit (III, 5) volgt :

  $$\text{eme van weerstand} = \frac{\text{cm}^{3/2} \cdot \text{g}^{1/2} \cdot \text{s}^{-2}}{\text{cm}^{1/2} \cdot \text{g}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}} = \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$$

- eme van kapaciteit :

  uit (III, 6) volgt :

  $$\text{eme van kapaciteit} = \frac{\text{cm}^{1/2} \cdot \text{g}^{1/2}}{\text{cm}^{3/2} \cdot \text{g}^{1/2} \cdot \text{s}^{-2}} = \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^2$$

- eme van elektrische induktantie (zelfinduktie L en wederzijdse of wederkerige induktie M, waarvan de definitievergelijkingen hier niet worden behandeld) :

  $$\frac{\text{eme van spanning} \times \text{sekonde}}{\text{eme van stroom}} = \frac{\text{cm}^{3/2} \cdot \text{g}^{1/2} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{s}}{\text{cm}^{1/2} \cdot \text{g}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}} = \text{cm}$$

- eme van permittiviteit :

  uit (III, 1) geschreven als $\epsilon = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{F \cdot r^2}$, volgt :

  $$\text{eme van permittiviteit} = \frac{(\text{cm}^{1/2} \cdot \text{g}^{1/2})^2}{\text{dyne} \cdot \text{cm}^2} = \frac{(\text{cm}^{1/2} \cdot \text{g}^{1/2})^2}{\text{cm} \cdot \text{g} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{cm}^2}$$

  $$= \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^2$$

Vier elektromagnetische eenheden (waarvan de wijze van afleiding hier niet behandeld wordt) kregen een eigen benaming :

- eme van magnetische spanning = $cm^{1/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-1}$ = gilbert (Gb)
- eme van magnetische veldsterkte = $cm^{-1/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-1}$ = oersted (Oe)
- eme van magnetische fluxdichtheid (magnetische induktie) = $cm^{-1/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-1}$ = gauss (Gs)
- eme van magnetische flux = $cm^{3/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-1}$ = maxwell (Mx).

De eerste elektromagnetische eenheid die hierboven werd afgeleid, was de eme van stroom. Historisch gezien, werd niet de eme van stroom het eerst afgeleid, doch wel de eme van magnetische poolsterkte. Hiertoe ging men uit van de (niet-gerationaliseerde) groothedenvergelijking :

$$F = \frac{p_1 \cdot p_2}{\mu_0 \cdot r^2} \quad (\text{met } \mu_0 = 1) \qquad \text{(III, 7)}$$

Als eme van magnetische poolsterkte bekwam men dan :

$$\sqrt{dyn \cdot cm^2} = \sqrt{\frac{g \cdot cm}{s^2} \cdot cm^2} = cm^{3/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-1}$$

Het em-CGS-stelsel is een koherent eenhedenstelsel.

5.6. Overzicht van de voornaamste elektrostatische en elektromagnetische CGS-eenheden

Tabel III. 3. geeft een overzicht van de voornaamste es- en em-eenheden; voor elke grootheid wordt tevens de SI-eenheid opgegeven, alsook het verband tussen de betrokken SI-eenheid en de overeenkomstige ese en eme.

5.7. Verband tussen het es-CGS-stelsel en het em-CGS-stelsel

Uit tabel III.3. blijkt, dat de dimensie van elke elektrische of (elektro)magnetische grootheid in het es-CGS-stelsel verschillend is van de dimensie van dezelfde grootheid in het em-CGS-stelsel. De verhouding van de betrokken dimensies is gelijk aan de dimensie van snelheid LT^{-1} of een gehele (positieve of negatieve) macht hiervan. Enkele voorbeelden zullen dit duidelijk maken :

$$\frac{\dim(I)_{ese}}{\dim(I)_{eme}} = \frac{L^{3/2} M^{1/2} T^{-2}}{L^{1/2} M^{1/2} T^{-1}} = L T^{-1}$$

$$\frac{\dim(U)_{ese}}{\dim(U)_{eme}} = \frac{L^{1/2}\ M^{1/2}\ T^{-1}}{L^{3/2}\ M^{1/2}\ T^{-2}} = L^{-1}\ T = (L\ T^{-1})^{-1}$$

$$\frac{\dim(R)_{ese}}{\dim(R)_{eme}} = \frac{L^{-1}\ T}{L\ T^{-1}} = L^{-2}\ T^{2} = (L\ T^{-1})^{-2}$$

$$\frac{\dim(\epsilon)_{ese}}{\dim(\epsilon)_{eme}} = \frac{1}{L^{-2}\ T^{2}} = L^{2}\ T^{-2} = (L\ T^{-1})^{2}$$

Dit verschil in dimensie voor eenzelfde grootheid, toont de relatieve betekenis aan van het begrip "dimensie".

Bij de opbouw van het stelsel van es-CGS-eenheden en van het stelsel van em-CGS-eenheden, werden respektievelijk de permittiviteit van vacuüm ϵ_0 en de permeabiliteit van vacuüm μ_0 gelijkgesteld aan 1. Te dien tijde was het nog niet bekend dat er een verband bestaat tussen beide grootheden. Uit ervaring is achteraf gebleken, dat volgende betrekking het verband weergeeft tussen ϵ_0 en μ_0 :

$$\epsilon_0 \cdot \mu_0 \cdot c_0^2 = 1$$

met c_0 = lichtsnelheid in vacuüm
= snelheid van vrije elektromagnetische golven in vacuüm
Uitgedrukt in CGS-eenheden, geldt :

$$c_0 = 2{,}997\ 924\ 58 \cdot 10^{10}\ \frac{cm}{s}$$
$$\approx 3 \cdot 10^{10}\ \frac{cm}{s}$$

In een koherent eenhedenstelsel dient het betrokken verband uiteraard gerespecteerd te worden.

Indien men bij de opbouw van het koherent em-eenhedenstelsel, in de (niet-gerationaliseerde) grootheidenvergelijking (III, 2) μ_0 gelijk stelt aan 1, dan ligt in dat stelsel ook de waarde van ϵ_0 vast :

$$\epsilon_0 = \frac{1}{c_0^2} = \frac{1}{(2{,}997\ 924\ 58 \cdot 10^{10})^2}\ \frac{s^2}{cm^2} \approx \frac{1}{(3 \cdot 10^{10})^2}\ \frac{s^2}{cm^2}$$

Bij de opbouw van het stelsel van es-CGS-eenheden, werd de ese van ladi g als volgt afgeleid uit de (niet-gerationaliseerde) grootheidenvergelijking : $\quad = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{\epsilon_0 \cdot r^2}$ (met $\epsilon_0 =$, op de volgende wijze :

Tabel III.3. *Overzicht van de voornaamste elektrostatische en elektromagnetische CGS-eenheden (met* $\zeta = 2{,}997\ 924\ 58 \cdot 10^{10}$*)*

grootheid en symbool		ese	eme	SI-eenheid	Verband tussen SI-eenheid en ese	Verband tussen SI-eenheid en eme
elektrische stroom	I	$cm^{3/2}.g^{1/2}.s^{-2}$	$cm^{1/2}.g^{1/2}.s^{-1}$	A	$1\ A \triangleq \frac{\zeta}{10}$ ese	$1\ A \triangleq \frac{1}{10}$ eme
stroomdichtheid	J	$cm^{-1/2}.g^{1/2}.s^{-2}$	$cm^{-3/2}.g^{1/2}.s^{-1}$	$\frac{A}{m^2}$	$1\ \frac{A}{m^2} \triangleq \frac{\zeta}{10^5}$ ese	$1\ \frac{A}{m^2} \triangleq 10^{-5}$ eme
elektrische lading	Q	$cm^{3/2}.g^{1/2}.s^{-1}$	$cm^{1/2}.g^{1/2}$	C	$1\ C \triangleq \frac{\zeta}{10}$ ese	$1\ C \triangleq \frac{1}{10}$ eme
elektrische spanning	U	$cm^{1/2}.g^{1/2}.s^{-1}$	$cm^{3/2}.g^{1/2}.s^{-2}$	V	$1\ V \triangleq \frac{10^8}{\zeta}$ ese	$1\ V \triangleq 10^8$ eme
elektrische weerstand	R	$cm^{-1}.s$	$cm.s^{-1}$	Ω	$1\ \Omega \triangleq \frac{10^9}{\zeta^2}$ ese	$1\ \Omega \triangleq 10^9$ eme
soortelijke weerstand (resistiviteit)	ρ	s	$cm^2.s^{-1}$	$\Omega.m$	$1\ \Omega.m \triangleq \frac{10^{11}}{\zeta^2}$ ese	$1\ \Omega.m \triangleq 10^{11}$ eme
elektrische geleiding (konduktantie)	G	$cm.s^{-1}$	$cm^{-1}.s$	S	$1\ S \triangleq \frac{\zeta^2}{10^9}$ ese	$1\ S \triangleq 10^{-9}$ eme
soortelijke geleiding (konduktiviteit)	σ	s^{-1}	$cm^{-2}.s$	$\frac{S}{m}$	$1\ \frac{S}{m} \triangleq \frac{\zeta^2}{10^{11}}$ ese	$1\ \frac{S}{m} \triangleq 10^{-11}$ eme
elektrische kapaciteit	C	cm	$cm^{-1}.s^2$	F	$1\ F \triangleq \frac{\zeta^2}{10^9}$ ese	$1\ F \triangleq 10^{-9}$ eme
elektrische veldsterkte	E	$cm^{-1/2}.g^{1/2}.s^{-1}$	$cm^{1/2}.g^{1/2}.s^{-2}$	$\frac{V}{m}, \frac{N}{C}$	$1\ \frac{V}{m} \triangleq \frac{10^6}{\zeta}$ ese	$1\ \frac{V}{m} \triangleq 10^6$ eme
elektrische fluxdichtheid (elektrische induktie of elektrische verplaatsing)	D	$cm^{-1/2}.g^{1/2}.s^{-1}$	$cm^{-3/2}.g^{1/2}$	$\frac{C}{m^2}$	$1\ \frac{C}{m^2} \triangleq \frac{4\pi\zeta}{10^5}$ ese	$1\ \frac{C}{m^2} \triangleq \frac{4\pi}{10^5}$ eme

elektrische flux	Ψ	$cm^{3/2}.g^{1/2}.s^{-1}$	$cm^{1/2}.g^{1/2}$	C	1 C $\triangleq \frac{4\pi\zeta}{10}$ ese	1 C $\triangleq \frac{4\pi}{10}$ eme
elektrische polarisatie	D, D_i	$cm^{-1/2}.g^{1/2}.s^{-1}$	$cm^{-3/2}.g^{1/2}$	$\frac{C}{m^2}$	1 $\frac{C}{m^2} \triangleq \frac{\zeta}{10^5}$ ese	1 $\frac{C}{m^2} \triangleq 10^{-5}$ eme
elektrisch dipoolmoment	p	$cm^{5/2}.g^{1/2}.s^{-1}$	$cm^{3/2}.g^{1/2}$	C.m	1 C.m $\triangleq$ 10 ζ ese	1 C.m $\triangleq$ 10 eme
elektrische induktantie (zelfinduktie L, wederzijdse of wederkerige induktie M)	L, M	$cm^{-1}.s^2$	cm	H	1 H $\triangleq \frac{10^9}{\zeta^2}$ ese	1 H $\triangleq 10^9$ eme
magnetische spanning	U_m	$cm^{3/2}.g^{1/2}.s^{-2}$	$cm^{1/2}.g^{1/2}.s^{-1}$ = Gb	A	1 A $\triangleq \frac{4\pi\zeta}{10}$ ese	1 A $\triangleq \frac{4\pi}{10}$ eme
magnetische veldsterkte	H	$cm^{1/2}.g^{1/2}.s^{-2}$	$cm^{-1/2}.g^{1/2}.s^{-1}$ = Oe	$\frac{A}{m}$, $\frac{N}{Wb}$	1 $\frac{A}{m} \triangleq \frac{4\pi\zeta}{10^3}$ ese	1 $\frac{A}{m} \triangleq \frac{4\pi}{10^3}$ eme
magnetische fluxdichtheid (magnetische induktie)	B	$cm^{-3/2}.g^{1/2}$	$cm^{-1/2}.g^{1/2}.s^{-1}$ = Gs	T	1 T $\triangleq \frac{10^4}{\zeta}$ ese	1 T $\triangleq 10^4$ eme
magnetische flux	Φ	$cm^{1/2}.g^{1/2}$	$cm^{3/2}.g^{1/2}.s^{-1}$ = Mx	Wb	1 Wb $\triangleq \frac{10^8}{\zeta}$ ese	1 Wb $\triangleq 10^8$ eme
magnetische polarisatie	J, B_i	$cm^{-3/2}.g^{1/2}$	$cm^{-1/2}.g^{1/2}.s^{-1}$	T	1 T $\triangleq \frac{10^4}{4\pi\zeta}$ ese	1 T $\triangleq \frac{10^4}{4\pi}$ eme
magnetisatie	M, H_i	$cm^{1/2}.g^{1/2}.s^{-2}$	$cm^{-1/2}.g^{1/2}.s^{-1}$	$\frac{A}{m}$	1 $\frac{A}{m} \triangleq \frac{\zeta}{10^3}$ ese	1 $\frac{A}{m} \triangleq 10^{-3}$ eme
(elektro)magnetisch moment	m	$cm^{7/2}.g^{1/2}.s^{-2}$	$cm^{5/2}.g^{1/2}.s^{-1}$	$A.m^2$	1 $A.m^2 \triangleq 10^3\zeta$ ese	1 $A.m^2 \triangleq 10^3$ eme
magnetisch dipoolmoment	j	$cm^{3/2}.g^{1/2}$	$cm^{5/2}.g^{1/2}.s^{-1}$	Wb.m, $\frac{N.m^2}{A}$	1 Wb.m $\triangleq \frac{10^{10}}{4\pi\zeta}$ ese	1 Wb.m $\triangleq \frac{10^{10}}{4\pi}$ eme
magnetische poolsterkte	p, M	$cm^{1/2}.g^{1/2}$	$cm^{3/2}.g^{1/2}.s^{-1}$	Wb	1 Wb $\triangleq \frac{10^8}{4\pi\zeta}$ ese	1 Wb $\triangleq \frac{10^8}{4\pi}$ eme

$$1 \text{ dyn} = \frac{1 \text{ ese van lading} \times 1 \text{ ese van lading}}{(1 \text{ cm})^2}$$

waaruit volgt :

$$\text{ese van lading} = \sqrt{\text{dyn} \cdot \text{cm}^2} = \sqrt{\text{cm} \cdot \text{g} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{cm}^2} = \text{cm}^{3/2} \cdot \text{g}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$$

Indien de ladingen Q_1 en Q_2 niet in de ese van lading, doch in de eme van lading worden uitgedrukt, geldt volgende (niet-gerationaliseerde) groothedenvergelijking :

$$F = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{\epsilon_o \cdot r^2} \quad (\text{met } \epsilon_o = \frac{1}{c_o^2})$$

$$= \frac{c_o^2 \cdot Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$$

Het aantal eme van lading dat overeenstemt met 1 ese van lading stellen we voor door x.

Het verband tussen de ese van lading en de eme van lading wordt gevonden als volgt :

$$1 \text{ dyn} = \frac{1 \text{ ese van lading} \times 1 \text{ ese van lading}}{(1 \text{ cm})^2}$$

$$= \frac{c_o^2 \times x \text{ eme van lading} \times x \text{ eme van lading}}{(1 \text{ cm})^2}$$

$$= \frac{(2{,}997\ 924\ 58 \cdot 10^{10})^2 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}^2} \times x^2 \text{ (eme van lading)}^2}{(1 \text{ cm})^2}$$

waaruit volgt : $x = \dfrac{1}{2{,}997\ 924\ 58 \cdot 10^{10}}$

$$\approx \frac{1}{3 \cdot 10^{10}}$$

Bijgevolg : 1 ese van lading $\hat{=} \dfrac{1}{2{,}997\ 924\ 58 \cdot 10^{10}}$ eme van lading

1 eme van lading $\hat{=}$ $2{,}997\ 924\ 58 \cdot 10^{10}$ ese van lading

$\hat{\approx}$ $3 \cdot 10^{10}$ ese van lading

Indien men bij de opbouw van het koherent es-eenhedenstelsel, in de (niet-gerationaliseerde) groothedenvergelijking (III, 1) ϵ_o gelijk stelt aan 1, dan ligt in dat stelsel ook de waarde van μ_o vast :

$$\mu_o = \frac{1}{c_o^2} = \frac{1}{(2{,}997\ 924\ 58 \cdot 10^{10})^2} \frac{\text{s}^2}{\text{cm}^2} \approx \frac{1}{(3 \cdot 10^{10})^2} \frac{\text{s}^2}{\text{cm}^2}$$

Bij de opbouw van het stelsel van em-CGS-eenheden, werd de eme van stroom afgeleid uit de (niet gerationaliseerde) groothedenvergelijking : $F = \frac{2\,\mu_o \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot l}{r}$ (met $\mu_o = 1$), op de volgende wijze :

$$2 \text{ dyn} = \frac{2 \times 1 \text{ eme van stroom} \times 1 \text{ eme van stroom} \times 1 \text{ cm}}{1 \text{ cm}}$$

waaruit volgt :

$$\text{eme van stroom} = \sqrt{\text{dyn}} = \sqrt{\text{cm} \cdot \text{g} \cdot \text{s}^{-2}} = \text{cm}^{1/2} \cdot \text{g}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$$

Indien de elektrische stromen I_1 en I_2 niet in de eme van stroom, doch in de ese van stroom worden uitgedrukt, geldt volgende (niet-gerationaliseerde) groothedenvergelijking :

$$F = \frac{2\,\mu_o \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot l}{r} \quad (\text{met } \mu_o = \frac{1}{c_o^2})$$

$$= \frac{2\,I_1 \cdot I_2 \cdot l}{c_o^2 \cdot r}$$

Het aantal ese van stroom dat overeenstemt met 1 eme van stroom stellen we voor door y.

Het verband tussen de eme van stroom en de ese van stroom wordt gevonden als volgt :

$$2 \text{ dyn} = \frac{2 \times 1 \text{ eme van stroom} \times 1 \text{ eme van stroom} \times 1 \text{ cm}}{1 \text{ cm}}$$

$$= \frac{2 \times y \text{ ese van stroom} \times y \text{ ese van stroom} \times 1 \text{ cm}}{c_o^2 \times 1 \text{ cm}}$$

$$= \frac{2\,y^2 \times (\text{ese van stroom})^2 \times 1 \text{ cm}}{(2{,}997\,924\,58 \cdot 10^{10})^2 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}^2} \times 1 \text{ cm}}$$

waaruit volgt : $y = 2{,}99\ 924\ 58 \cdot 10^{10} \approx 3 \cdot 10^{10}$

Bijgevolg : 1 eme van stroom $\hat{=}$ $2{,}997\,924\,58 \cdot 10^{10}$ ese van stroom

$$1 \text{ ese van stroom} \hat{=} \frac{1}{2{,}997\,924\,58 \cdot 10^{10}} \text{ eme van stroom}$$

$$\hat{\approx} \frac{1}{3 \cdot 10^{10}} \text{ eme van stroom}$$

Het verband tussen de eme en de ese voor de andere grootheden, kan worden afgeleid uit de algemene wetten van de elektriciteitsleer. Dit ver-

band zal hierna ten titel van voorbeeld worden afgeleid voor de grootheden "elektrische spanning" en "weerstand".

Voor de grootheid "elektrische spanning" bekomt men, aan de hand van de wet $U = \frac{P}{I}$ (waarbij te noteren valt dat 1 ese van vermogen = 1 eme van vermogen = 1 $\frac{\text{erg}}{\text{s}}$) :

$$1 \text{ ese van spanning} = \frac{1 \text{ ese van vermogen}}{1 \text{ ese van stroom}}$$

$$\hat{\approx} \frac{1 \text{ eme van vermogen}}{\frac{1}{3 \cdot 10^{10}} \text{ eme van stroom}}$$

$$\hat{\approx} 3 \cdot 10^{10} \text{ eme van spanning}$$

$$1 \text{ eme van spanning} = \frac{1 \text{ eme van vermogen}}{1 \text{ eme van stroom}}$$

$$\hat{\approx} \frac{1 \text{ ese van vermogen}}{3 \cdot 10^{10} \text{ ese van stroom}}$$

$$\hat{\approx} \frac{1}{3 \cdot 10^{10}} \text{ ese van spanning}$$

Voor de grootheid "weerstand" bekomt men, aan de hand van de wet $R = \frac{U}{I}$:

$$1 \text{ ese van weerstand} = \frac{1 \text{ ese van spanning}}{1 \text{ ese van stroom}}$$

$$\hat{\approx} \frac{3 \cdot 10^{10} \text{ eme van spanning}}{\frac{1}{3 \cdot 10^{10}} \text{ eme van stroom}}$$

$$\hat{\approx} 9 \cdot 10^{20} \text{ eme van weerstand}$$

$$1 \text{ eme van weerstand} = \frac{1 \text{ eme van spanning}}{1 \text{ eme van stroom}}$$

$$\hat{\approx} \frac{\frac{1}{3 \cdot 10^{10}} \text{ ese van spanning}}{3 \cdot 10^{10} \text{ ese van stroom}}$$

$$\hat{\approx} \frac{1}{9 \cdot 10^{20}} \text{ ese van weerstand}$$

In het algemeen geldt, dat de verhouding van de getalwaarde van een elektrische of elektromagnetische grootheid uitgedrukt in ese, tot de getalwaarde uitgedrukt in eme, gelijk is aan de getalwaarde van de lichtsnelheid in vacuüm (uitgedrukt in CGS-eenheden), of een positieve of negatieve macht hiervan :

$$\frac{\{X\}_{\text{ese}}}{\{X\}_{\text{eme}}} = \{c_0\}^n_{\text{CGS}} = (2{,}997\ 924\ 58 \cdot 10^{10})^n = \zeta^n \approx (3 \cdot 10^{10})^n$$

met ζ = 2,997 924 58 . 10^{10} en n = een positief of negatief getal.

5.8. Verband tussen enerzijds de gebruikelijke es- en em-eenheden en anderzijds de overeenkomstige SI-eenheden : zie tabel III.4.

Het feit dat in het CGS-stelsel steeds niet-gerationaliseerde groothedenvergelijkingen worden aangewend, en in het SI (wat betreft de elektriciteitsleer) steeds gerationaliseerde groothedenvergelijkingen (zie Hoofdstuk IV, onder 3.3.), heeft tot gevolg dat bepaalde es- of em-eenheden niet zomaar (zonder te weten om welke grootheid het gaat) kunnen omgezet worden in SI-eenheden. Voorbeelden hiervan zijn :

es-eenheden	1 ese van elektrische lading	$= cm^{3/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-1} \triangleq \frac{10}{\zeta}$ C
	1 ese van elektrische flux	$= cm^{3/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-1} \triangleq \frac{10}{4\pi\zeta}$ C
	1 ese van elektrische polarisatie	$= cm^{-1/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-1} \triangleq \frac{10^5}{\zeta} \frac{C}{m^2}$
	1 ese van elektrische fluxdichtheid (elektrische induktie of elektrische verplaatsing)	$= cm^{-1/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-1} \triangleq \frac{10^5}{4\pi\zeta} \frac{C}{m^2}$
em-eenheden	1 eme van magnetisatie	$= cm^{-1/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-1} \triangleq 10^3 \frac{A}{m}$
	1 eme van magnetische veldsterkte	$= cm^{-1/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-1} = Oe \triangleq \frac{10^3}{4\pi} \frac{A}{m}$
	1 eme van magnetische fluxdichtheid (magnetische induktie)	$= cm^{-1/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-1} = Gs \triangleq 10^{-4}$ T
	1 eme van magnetische polarisatie	$= cm^{-1/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-1} \triangleq 4\pi \cdot 10^{-4}$ T

Bemerk dat de vier behandelde em-eenheden onderling gelijk zijn. In het SI bekomt men onderlinge verschillende eenheden (respektievelijk $\frac{A}{m}$ en T). Het feit dat bijvoorbeeld in het em-CGS-eenhedenstelsel, de magnetische veldsterkte en de magnetische fluxdichtheid (magnetische induktie) dezelfde eenheid hebben, en dit niet het geval is in het SI, is te wijten aan het feit dat μ in het em-CGS-stelsel dimensieloos is, terwijl μ in het SI uitgedrukt wordt in de eenheid $\frac{H}{m}$. Het verband tussen de magnetische fluxdichtheid (magnetische induktie) B en de veldsterkte H wordt gegeven door :

$$B = \mu \cdot H = \mu_o \cdot \mu_r \cdot H$$

Tabel III.4. *Verband tussen enerzijds de gebruikelijke es- en em-eenheden en anderzijds de overeenkomstige SI-eenheden (met* $\zeta = 2{,}997\ 924\ 58.10^{10}$*)*

grootheid en symbool		verband tussen de betrokken eenheden
elektrische stroom	I	1 ese $\triangleq \frac{10}{\zeta}$ A $\approx$ 3, 35 640 952.10^{-10} A
stroomdichtheid	J	1 ese $\triangleq \frac{10^5}{\zeta} \frac{A}{m^2} \approx$ 3,335 640 952.10^{-6} $\frac{A}{m^2}$
elektrische lading	Q	1 ese $\triangleq \frac{10}{\zeta}$ C $\approx$ 3,335 640 952.10^{-10} C
elektrische spanning	U	1 ese $\triangleq 10^{-8}.\zeta$ V $\approx$ 2,997 924 580.10^2 V
elektrische weerstand	R	1 ese $\triangleq 10^{-9}.\zeta^2$ $\Omega \approx$ 8,987 551 787.10^{11} Ω
soortelijke weerstand (resistiviteit)	ρ	1 ese $\triangleq 10^{-11}.\zeta^2$ Ω.m $\approx$ 8,987 551 787.10^9 Ω.m
elektrische geleiding (konduktantie)	G	1 ese $\triangleq \frac{10^9}{\zeta^2}$ S $\approx$ 1,112 650 056.10^{-12} S
soortelijke geleiding (konduktiviteit)	σ	1 ese $\triangleq \frac{10^{11}}{\zeta^2} \frac{S}{m} \approx$ 1,112 650 056.10^{-10} $\frac{S}{m}$
elektrische kapaciteit	C	1 ese $\triangleq \frac{10^9}{\zeta^2}$ F $\approx$ 1,112 650 056.10^{-12} F
elektrische veldsterkte	E	1 ese $\triangleq 10^{-6}.\zeta \frac{V}{m} \approx$ 2,997 924 580.10^4 $\frac{V}{m}$
elektrische fluxdichtheid (elektrische induktie of elektrische verplaatsing)	D	1 ese $\triangleq \frac{10^5}{4\pi\zeta} \frac{C}{m^2} \approx$ 2,654 418 728.10^{-7} $\frac{C}{m^2}$
elektrische flux	Ψ	1 ese $\triangleq \frac{10}{4\pi\zeta}$ C $\approx$ 2,654 418 728.10^{-11} C
elektrische polarisatie	P, D_i	1 ese $\triangleq \frac{10^5}{\zeta} \frac{C}{m^2} \approx$ 3,335 640 952.10^{-6} $\frac{C}{m^2}$
elektrisch dipoolmoment	p	1 ese $\triangleq \frac{10^{-1}}{\zeta}$ C.m $\approx$ 3,335 640 952.10^{-12} C.m
elektrische induktantie (zelfinduktie L, wederzijdse inductie M)	L, M	1 eme $\triangleq 10^{-9}$ H
magnetische spanning	U_m	1 eme = 1 Gb $\triangleq \frac{10}{4\pi}$ A $\approx$ 7,957 747 151.10^{-1} A
magnetische veldsterkte	H	1 eme = 1 Oe $\triangleq \frac{10^3}{4\pi} \frac{A}{m} \approx$ 7,957 747 151.10^1 $\frac{A}{m}$
magnetische fluxdichtheid (magnetische induktie)	B	1 eme = 1 Gs $\triangleq 10^{-4}$ T
magnetische flux	Φ	1 eme = 1 Mx $\triangleq 10^{-8}$ Wb
magnetische polarisatie	J, B_i	1 eme $\triangleq 4\pi.10^{-4}$ T $\approx$ 1,256 637 062.10^{-3} T
magnetisatie	M, H_i	1 eme $\triangleq 10^3$ $\frac{A}{m}$
(elektro)magnetisch moment	m	1 eme $\triangleq 10^{-3}$ A.m^2
magnetisch dipoolmoment	j	1 eme $\triangleq 4\pi.10^{-10}$ Wb.m $\approx$ 1,256 637 062.10^{-9} Wb.m
magnetische poolsterkte	p, M	1 eme $\triangleq 4\pi.10^{-8}$ Wb $\approx$ 1,256 637 062.10^{-7} Wb

5.9. Waarde van de permittiviteit van vacuüm ϵ_o en de permeabiliteit van vacuüm μ_o in de CGS-stelsels, het niet-gerationaliseerd MKSA-stelsel en het gerationaliseerd MKSA-stelsel (dat overeenstemt met het SI); waarde van de elektrische susceptibiliteit X_e en de magnetische susceptibiliteit X_m in de niet-gerationaliseerde eenhedenstelsels en in de gerationaliseerde eenhedenstelsels

De waarden van ϵ_o en μ_o in de genoemde eenhedenstelsels zijn weergegeven in tabel III.5.

Elektrische susceptibiliteit X_e en magnetische susceptibiliteit X_m zijn dimensieloze grootheden, die in het CGS-stelsel, het niet-gerationaliseerd MKSA-stelsel en het gerationaliseerd MKSA-stelsel (dat overeenstemt met het SI) respektievelijk als volgt kunnen weergegeven worden :

- in het CGS-stelsel en het niet-gerationaliseerd MKSA-stelsel :

$$X_e = \frac{\epsilon_r - 1}{4\pi} \qquad X_m = \frac{\mu_r - 1}{4\pi}$$

- in het gerationaliseerd MKSA-stelsel (en dus ook in het SI) :

$$X_e = \epsilon_r - 1 \qquad X_m = \mu_r - 1$$

De waarde in het gerationaliseerd MKSA-stelsel (en dus ook in het SI) van X_e en X_m is gelijk aan de waarde van X_e en X_m in het CGS-stelsel of het niet-gerationaliseerd MKSA-stelsel, vermenigvuldigd met 4π.

5.10. Neo-CGS-stelsels

Er zijn na de tweede wereldoorlog voorstellen geweest (onder andere van J. de Boer en M. Landolt) om een elektrostatisch en een elektromagnetisch eenhedenstelsel te bouwen met een vierde grondeenheid naast de grondeenheden cm, g, s.

Het betrokken elektrostatisch eenhedenstelsel heeft als vierde grondeenheid de eenheid van lading franklin (Fr); de franklin stemt overeen met de (afgeleide) ese van lading (uit het stelsel met drie grondeenheden) er is, uitgedrukt in SI-eenheden, gelijk aan $\frac{10}{\zeta}$ C :

Tabel III.5. *Waarden van ϵ_0 en μ_0 in verschillende eenhedenstelsels*

es-CGS-stelsel	em-CGS-stelsel	niet-gerationaliseerd MKSA-stelsel	gerationaliseerd MKSA-stelsel SI
$\mu_0 \cdot c_0^2 = 1$	$\epsilon_0 \cdot c_0^2 = 1$	$\epsilon_0 \cdot \mu_0 \cdot c_0^2 = 1$	$\epsilon_0 \cdot \mu_0 \cdot c_0^2 = 1$
$\epsilon_0 = 1$	$\epsilon_0 = \frac{1}{c_0^2} = \frac{1}{(2{,}997\ 924\ 58.10^{10}\ \frac{cm}{s})^2} \approx \frac{1}{9 \cdot 10^{20}}\ \frac{s^2}{cm^2}$	$\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 \cdot c_0^2} = \frac{1}{10^{-7}\ \frac{H}{m} \times (2{,}997\ 924\ 58.10^{8}\ \frac{m}{s})^2} \approx \frac{1}{9 \cdot 10^{9}}\ \frac{F}{m}$	$\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 \cdot c_0^2} = \frac{1}{4\pi.10^{-7}\ \frac{H}{m} \times (2{,}997\ 924\ 58.10^{8}\ \frac{m}{s})^2} \approx \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^{9}}\ \frac{F}{m}$
$\mu_0 = \frac{1}{c_0^2} = \frac{1}{(2{,}997\ 924\ 58.10^{10}\ \frac{cm}{s})^2} \approx \frac{1}{9 \cdot 10^{20}}\ \frac{s^2}{cm^2}$	$\mu_0 = 1$	$\mu_0 = 10^{-7}\ \frac{H}{m}$	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\ \frac{H}{m}$

$$1\ \text{Fr} \triangleq 1\ \text{ese van lading}$$
$$= \frac{10}{\zeta}\ \text{C} \approx \frac{10}{3 \cdot 10^{10}}\ \text{C}$$
$$\approx \frac{1}{3 \cdot 10^{9}}\ \text{C}$$
$$= 3{,}335\ 640\ 952 \cdot 10^{-10}\ \text{C}$$

Het betrokken elektromagnetisch stelsel heeft als vierde grondeenheid de eenheid van stroom biot (Bi); de biot stemt overeen met de (afgeleide) eme van stroom (uit het stelsel met drie grondeenheden) en is, uitgedrukt in SI-eenheden, gelijk aan 10 A :

$$1\ \text{Bi} \triangleq 1\ \text{eme van stroom}$$
$$= 10\ \text{A}$$

Een overzicht van de voornaamste eenheden van de neo-CGS-stelsels is weergegeven in tabel III.6.

In de voorstelling van de betrokken eenheden komen geen gebroken exponenten meer voor (dit was wel het geval bij de klassieke es- en em-eenheden, zie tabel III.3.).

Voor elke grootheid stemt de neo-ese en de neo-eme overeen respektievelijk met de klassieke ese en de klassieke eme.

De verhouding tussen de getalwaarde van een bepaalde grootheid, uitgedrukt in neo-ese, tot de getalwaarde uitgedrukt in neo-eme is bijgevolg ook gelijk aan de verhouding tussen de getalwaarde uitgedrukt in de klassieke ese tot de getalwaarde uitgedrukt in de klassieke eme.

5.11. Bezwaren tegen het CGS-stelsel

Een eerste bezwaar tegen het CGS-stelsel in het algemeen is, dat een aantal eenheden minder geschikt zijn voor praktisch gebruik omdat ze zeer klein zijn en bijgevolg aanleiding geven tot grote getalwaarden.

Een tweede bezwaar is het veelvuldig voorkomen van gebroken exponenten in de dimensie-uitdrukkingen en in de eenheden van elektrische en elektromagnetische grootheden.

Tabel III.6. *Overzicht van de voornaamste eenheden van de neo-CGS-stelsels*

grootheid en symbool		elektrostatisch neo-CGS-stelsel of cm-g-s-Fr-stelsel	elektromagnetisch neo-CGS-stelsel of cm-g-s-Bi-stelsel
elektrische stroom	I	$s^{-1} \cdot Fr$	Bi
stroomdichtheid	J	$cm^{-2} \cdot s^{-1} \cdot Fr$	$cm^{-2} \cdot Bi$
elektrische lading	Q	Fr	$s \cdot Bi$
elektrische spanning	U	$cm^2 \cdot g \cdot s^{-2} \cdot Fr^{-1}$	$cm^2 \cdot g \cdot s^{-3} \cdot Bi^{-1}$
elektrische weerstand	R	$cm^2 \cdot g \cdot s^{-1} \cdot Fr^{-2}$	$cm^2 \cdot g \cdot s^{-3} \cdot Bi^{-2}$
soortelijke weerstand (resistiviteit)	ρ	$cm^3 \cdot g \cdot s^{-1} \cdot Fr^{-2}$	$cm^3 \cdot g \cdot s^{-3} \cdot Bi^{-2}$
elektrische geleiding (konduktantie)	G	$cm^{-2} \cdot g^{-1} \cdot s \cdot Fr^2$	$cm^{-2} \cdot g^{-1} \cdot s^3 \cdot Bi^2$
soortelijke geleiding (konduktiviteit)	σ	$cm^{-3} \cdot g^{-1} \cdot s \cdot Fr^2$	$cm^{-3} \cdot g^{-1} \cdot s^3 \cdot Bi^2$
elektrische kapaciteit	C	$cm^{-2} \cdot g^{-1} \cdot s^2 \cdot Fr^2$	$cm^{-2} \cdot g^{-1} \cdot s^4 \cdot Bi^2$
elektrische veldsterkte	E	$cm \cdot g \cdot s^{-2} \cdot Fr^{-1}$	$cm \cdot g \cdot s^{-3} \cdot Bi^{-1}$
elektrische fluxdichtheid (elektrische induktie of elektrische verplaatsing)	D	$cm^{-2} \cdot Fr$	$cm^{-2} \cdot s \cdot Bi$
elektrische flux	Ψ	Fr	$s \cdot Bi$
elektrische polarisatie	P, D_i	$cm^{-2} \cdot Fr$	$cm^{-2} \cdot s \cdot Bi$
elektrisch dipoolmoment	p	$cm \cdot Fr$	$cm \cdot s \cdot Bi$
elektrische induktantie (zelfinduktie L, wederzijdse induktie M)	L, M	$cm^2 \cdot g \cdot Fr^{-2}$	$cm^2 \cdot g \cdot s^{-2} \cdot Bi^{-2}$
magnetische spanning	U_m	$s^{-1} \cdot Fr$	Bi
magnetische veldsterkte	H	$cm^{-1} \cdot s^{-1} \cdot Fr$	$cm^{-1} \cdot Bi$
magnetische fluxdichtheid (magnetische induktie)	B	$g \cdot s^{-1} \cdot Fr^{-1}$	$g \cdot s^{-2} \cdot Bi^{-1}$
magnetische flux	Φ	$cm^2 \cdot g \cdot s^{-1} \cdot Fr^{-1}$	$cm^2 \cdot g \cdot s^{-2} \cdot Bi^{-1}$
magnetische polarisatie	J, B_i	$g \cdot s^{-1} \cdot Fr^{-1}$	$g \cdot s^{-2} \cdot Bi^{-1}$
magnetisatie	M, H_i	$cm^{-1} \cdot s^{-1} \cdot Fr$	$cm^{-1} \cdot Bi$
(elektro)magnetisch moment	m	$cm^2 \cdot s^{-1} \cdot Fr$	$cm^2 \cdot Bi$
magnetisch dipoolmoment	j	$cm^3 \cdot g \cdot s^{-1} \cdot Fr^{-1}$	$cm^3 \cdot g \cdot s^{-2} \cdot Bi^{-1}$
magnetische poolsterkte	p, M	$cm^2 \cdot g \cdot s^{-1} \cdot Fr^{-1}$	$cm^2 \cdot g \cdot s^{-2} \cdot Bi^{-1}$
permittiviteit	ϵ	$cm^{-3} \cdot g^{-1} \cdot s^2 \cdot Fr^2$	$cm^{-3} \cdot g^{-1} \cdot s^4 \cdot Bi^2$
permeabiliteit	μ	$cm \cdot g \cdot Fr^{-2}$	$cm \cdot g \cdot s^{-2} \cdot Bi^{-2}$

Een derde bezwaar is gelegen in het feit, dat zowel in het es-CGS-stelsel als in het em-CGS-stelsel sommige elektrische groothedensoorten dezelfde dimensie (en bijgevolg ook dezelfde eenheid) hebben als sommige mechanische groothedensoorten; dit is het geval bijvoorbeeld voor volgende groothedensoorten :

☆ in het es-CGS-stelsel :
- kapaciteit en lengte, met dimensie L en eenheid cm
- elektrische geleiding en snelheid, met dimensie LT^{-1} en eenheid $cm \cdot s^{-1}$
- soortelijke (elektrische) weerstand en tijd, met dimensie T en eenheid s

☆ in het em-CGS-stelsel :
- elektrische induktantie en lengte, met dimensie L en eenheid cm
- elektrische weerstand en snelheid, met dimensie LT^{-1} en eenheid $cm \cdot s^{-1}$
- soortelijke (elektrische) weerstand en kinematische viskositeit, met dimensie $L^2\ T^{-1}$ en eenheid $cm^2 \cdot s^{-1}$

Een vierde bezwaar is gelegen in het feit dat, door elektrische eenheden te willen afleiden van de mechanische eenheden cm, g en s, de eigen aard van de elektriciteit niet tot uiting komt.

6. Beschrijving van het MKS-stelsel (meter-kilogram-sekonde-stelsel)

6.1. MKS-eenheden

Het MKS-stelsel heeft dezelfde basisgroothedeen als het CGS-stelsel, namelijk : lengte, massa, tijd.
De grondeenheden zijn respektievelijk :

meter (m), kilogram (kg), sekonde (s)

Enkele van de voornaamste afgeleide koherente eenheden zijn :

- MKS-eenheid van kracht : newton (N)

  Een newton is gelijk aan de kracht die aan de eenheid van massa (1 kg) een versnelling geeft van 1 $\frac{m}{s^2}$:

$$1\ N = 1\ kg \cdot 1\ \frac{m}{s^2} = 1\ kg \cdot \frac{m}{s^2} = 1\ kg \cdot m \cdot s^{-2}$$

  De benaming "newton" voor de eenheid van kracht in het MKS-stelsel werd in 1938 vastgelegd door de IEC (International Electrotechnical Commission), en in 1946 aangenomen door de IUPAP (International Union of Pure and Applied Physics) en eveneens in 1948, bekrachtigd door de 9de CGPM.

- MKS-eenheid van arbeid : newton meter (N.m) of joule (J)

  Een newton meter of joule is de arbeid verricht door een kracht van 1 newton, die een lichaam over een afstand van 1 meter verplaatst in de richting van de kracht :

$$1\ J = 1\ N\ .\ 1\ m = 1\ N\ .\ m$$

$$= 1\ kg\ .\ 1\ \frac{m}{s^2}\ .\ 1\ m = 1\ kg\ .\ \frac{m^2}{s^2} = 1\ kg\ .\ m^2\ .\ s^{-2}$$

  De benaming "joule" voor de eenheid van arbeid in het MKS-stelsel dateert van vóór 1900.

- MKS-eenheid van vermogen : $\frac{\text{joule}}{\text{sekonde}}$ $\left(\frac{J}{s}\right)$ of watt (W)

$$1W = 1\ \frac{J}{s} = 1\ \frac{kg\ .\ m^2\ .\ s^{-2}}{s} = 1\ kg\ .\ m^2\ .\ s^{-3}$$

  De benaming "watt" voor de eenheid van vermogen in het MKS-stelsel dateert van vóór 1900.

- MKS-eenheid van druk : $\frac{\text{newton}}{m^2}$ $\left(\frac{N}{m^2}\right)$ of pascal (Pa)

$$1\ Pa = 1\ \frac{N}{m^2} = 1\ \frac{kg\ .\ m\ .\ s^{-2}}{m^2} = 1\ kg\ .\ m^{-1}\ .\ s^{-2}$$

  De eenheid van druk $\frac{N}{m^2}$ kreeg slechts in 1971 (14de CGPM) de benaming pascal (Pa).

- MKS-eenheid van dynamische viskositeit η : Pa . s

  De kracht F die vereist is om een vloeistoflaag met een oppervlakte A te verschuiven met een relatieve snelheid w ten opzichte van een even grote vloeistoflaag die zich bevindt op een afstand d, is gelijk aan de weerstandskracht W. Men noemt dynamische viskositeit η de grootheid $\frac{W\ .\ d}{A\ .\ w}$. Men bekomt als koherente eenheid :

$$\frac{1\ N\ .\ 1\ m}{1\ m^2\ .\ 1\ \frac{m}{s}} = 1\ \frac{N\ .\ s}{m^2} = 1\ Pa\ .\ s$$

$$= 1\ \frac{\frac{kg\ .\ m}{s^2}\ .\ s}{m^2} = 1\ \frac{kg}{m\ .\ s} = 1\ kg\ .\ m^{-1}\ .\ s^{-1}$$

- MKS-eenheid van kinematische viskositeit ν : $\frac{m^2}{s}$

  De kinematische viskositeit is gelijk aan de dynamische viskositeit, gedeeld door de soortelijke massa : $\nu = \frac{\eta}{\rho}$

$$\frac{1\ Pa\ .\ s}{1\ \frac{kg}{m^3}} = \frac{1\ kg\ .\ m^{-1}\ .\ s^{-1}}{1\ kg\ .\ m^{-3}} = 1\ \frac{m^2}{s} = 1\ m^2\ .\ s^{-1}$$

Enkele van de voornaamste mechanische grootheden, met opgave van de naam van de koherente MKS-eenheid en het gebruikte symbool, alsmede de afleiding uit de grondeenheden m, kg en s, zijn weergegeven in tabel III.7.

Tabel III.7. *Enkele van de voornaamste mechanische grootheden, met de overeenkomstige MKS-eenheden*

grootheid	eenheid		
	naam	symbool	uitgedrukt in grondeenheden
lengte	meter	m	m
oppervlakte	vierkante meter	m^2	m^2
volume	kubieke meter	m^3	m^3
tijd	sekonde	s	s
snelheid	meter per sekonde	$\frac{m}{s}$	$m \cdot s^{-1}$
versnelling	meter per sekonde-kwadraat	$\frac{m}{s^2}$	$m \cdot s^{-2}$
massa	kilogram	kg	kg
kracht	newton	N	$kg \cdot m \cdot s^{-2}$
arbeid	newton meter = joule	$N \cdot m = J$	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$
vermogen	$\frac{\text{joule}}{\text{sekonde}}$ = watt	$\frac{J}{s} = W$	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-3}$
druk	$\frac{\text{newton}}{\text{vierk. meter}}$ = pascal	$\frac{N}{m^2} = Pa$	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$
dynamische viskositeit	pascal sekonde	$Pa \cdot s$	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
kinematische viskositeit	meter-kwadraat per sekonde	$\frac{m^2}{s}$	$m^2 \cdot s^{-1}$

Het MKS-stelsel werd niet uitgebreid tot het gebied van elektrische en (elektro)magnetische grootheden, hoewel het mogelijk zou geweest zijn eveneens elektrostatische en elektromagnetische MKS-eenheden af te leiden uit de grondeenheden m, kg en s op een analoge wijze als bij de afleiding van de elektrostatische CGS-eenheden en de elektromagnetische CGS-eenheden uit de grondeenheden cm, g en s.

Door het feit dat de drie grondeenheden van het MKS-stelsel (m, kg, s) eveneens grondeenheden zijn in het SI, zijn alle MKS-eenheden uiteraard ook SI-eenheden.

6.2. Verband tussen MKS-eenheden (die ook SI-eenheden zijn) en CGS-eenheden

Lengte : $1\ m = 100\ cm$

Oppervlakte : $1\ m^2 = 10\ 000\ cm^2$

Volume : $1\ m^3 = 1\ 000\ 000\ cm^3$

Snelheid : $1\ \frac{m}{s} = 100\ \frac{cm}{s}$

Versnelling : $1\ \frac{m}{s^2} = 100\ \frac{cm}{s^2}$

Massa : $1\ kg = 1000\ g$

Kracht : $1\ N = 1\ kg\ .\ \frac{m}{s^2} = 1000\ g\ .\ \frac{100\ cm}{s^2}$

$$= 1000\ g\ .\ 100\ \frac{cm}{s^2}$$

$$= 100\ 000\ \frac{g\ .\ cm}{s^2}$$

$$= 100\ 000\ dyn = 10^5\ dyn$$

Arbeid : $1\ J = 1\ N\ .\ m = 1\ \frac{kg\ .\ m^2}{s^2} = \frac{1000\ g\ .\ (100\ cm)^2}{s^2}$

$$= 1000\ g\ .\ 100\ \frac{cm}{s^2}\ .\ 100\ cm$$

$$= 10\ 000\ 000\ \frac{g\ .\ cm^2}{s^2}$$

$$= 10\ 000\ 000\ erg = 10^7\ erg$$

Vermogen : $1\ W = 1\ \frac{J}{s} = 1\ \frac{kg\ .\ m^2}{s^3} = \frac{1000\ g\ .\ (100\ cm)^2}{s^3}$

$$= \frac{1000\ g\ .\ 100\ \frac{cm}{s^2}\ .\ 100\ cm}{s}$$

$$= 10\ 000\ 000\ \frac{g\ .\ cm^2}{s^3}$$

$$= 10\ 000\ 000\ \frac{erg}{s} = 10^7\ \frac{erg}{s}$$

Druk : $1\ Pa = 1\ \frac{N}{m^2} = 1\ \frac{kg}{m\ .\ s^2} = \frac{1000\ g}{100\ cm\ .\ s^2}$

$$= \frac{1000\ g\ .\ 100\ \frac{cm}{s^2}}{(100\ cm)^2}$$

$$= 10\ \frac{g}{cm\ .\ s^2}$$

$$= 10\ \frac{dyn}{cm^2}$$

Dynamische viskositeit : $1\ Pa\ .\ s = 10\ \frac{dyn\ .\ s}{cm^2} = 10\ P = 1000\ cP$

Kinematische viskositeit : $1\ \frac{m^2}{s} = \frac{(100\ cm)^2}{s} = 10\ 000\ \frac{cm^2}{s} = 10\ 000\ St$

$= 1\ 000\ 000\ cSt$

7. Beschrijving van het MTS-stelsel (meter-ton-sekonde-stelsel)

Het MTS-stelsel heeft dezelfde basisgrootheden als het CGS- en het MKS-stelsel, namelijk lengte, massa, tijd.

De grondeenheden zijn respektievelijk :

meter (m), ton (t), sekonde (s)

De koherente afgeleide eenheden van kracht en druk kregen een eigen benaming :

- MTS-eenheid van kracht : de sthène (sn)

$$1\ sn = 1\ t\ .\ 1\ \frac{m}{s^2} = 1\ \frac{t\ .\ m}{s^2} = 1\ t\ .\ m\ .\ s^{-2}$$

- MTS-eenheid van druk : de pièze (pz)

$$1\ pz = 1\ \frac{sn}{m^2} = \frac{1\ \frac{t\ .\ m}{s^2}}{m^2} = 1\ \frac{t}{m\ .\ s^2} = 1\ t\ .\ m^{-1}\ .\ s^{-2}$$

Omgezet in MKS-eenheden (of SI-eenheden), bekomt men respektievelijk voor de MTS-eenheden van kracht en druk :

$1\ sn = 1\ t\ .\ m\ .\ s^{-2} = 1000\ kg\ .\ m\ .\ s^{-2} = 1000$ newton

$1\ pz = 1\ t\ .\ m^{-1}\ .\ s^{-2} = 1000\ kg\ .\ m^{-1}\ .\ s^{-2} = 1000$ pascal

Een veel voorkomend veelvoud van pièze is hectopièze :

$1\ hpz = 100\ 000\ Pa = 1$ bar

HOOFDSTUK IV

DE WEG VANAF DE "ABSOLUTE PRAKTISCHE ELEKTRISCHE EENHEDEN" VAN 1881 (KWADRANTSTELSEL) OVER DE "INTERNATIONALE ELEKTRISCHE EENHEDEN" VAN 1908 NAAR DE "ABSOLUTE ELEKTRISCHE EENHEDEN" VAN 1948 (MKSA-EENHEDEN); GESCHIEDENIS VAN DE AMPERE

1. "Absolute praktische elektrische eenheden" (1881), kwadrantstelsel (KS)

1.1. Ontstaan en opbouw van het kwadrantstelsel

In de tweede helft van de 19de eeuw ontstond in de zich toen snel ontwikkelende elektrotechniek behoefte aan praktisch bruikbare eenheden voor weerstand, stroom en spanning.

Als basis voor de "absolute praktische elektrische eenheden" werd in 1881 aangenomen :

$$1 \text{ ohm} = 10^9 \text{ eme van weerstand} = 10^9 \text{ cm} \cdot s^{-1}$$

$$1 \text{ volt} = 10^8 \text{ eme van spanning} = 10^8 \text{ cm}^{3/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-2}$$

Eveneens in 1881 werden de ampère, de coulomb en de farad als volgt bepaald (vertrekkend vanaf ohm en volt) :

$$\text{ampère} = \frac{\text{volt}}{\text{ohm}}$$

$$\text{coulomb} = \text{ampère} \times \text{sekonde}$$

$$\text{farad} = \frac{\text{coulomb}}{\text{volt}}$$

De eenheden ohm, volt, ampère, coulomb en farad, die voor de praktijk goed bruikbaar waren, sloten echter niet aan op de overige elektrische eenheden, die koherent waren met de centimeter, het gram en de sekonde (es-CGS-stelsel en em-CGS-stelsel).

Teneinde toch tot een koherent eenhedenstelsel te komen, stelde Maxwell (1831 - 1879) voor, nieuwe grondeenheden te kiezen voor de lengte en de massa. Deze nieuwe grondeenheden waren :

- voor de lengte : een lengte L, gelijk aan 10^9 cm ($1 \text{ cm} = 10^{-9}$ L)
- voor de massa : een massa M, gelijk aan 10^{-11} g ($1 \text{ g} = 10^{11}$ M)

De nieuwe grondeenheid L, die gelijk is aan 10^9 cm hetzij 10^7 m, heeft een lengte die ongeveer gelijk is aan een vierde van de aardomtrek gemeten volgens de richting van een meridiaan, hetgeen gestaafd wordt door de oorspronkelijke definitie van de meter die luidde : de meter is het tienmiljoenste deel van de afstand van pool tot evenaar (zie Hoofdstuk III, onder 2.1.). Om deze reden is Maxwell's stelsel het "kwadrantstelsel" (KS) genoemd.

Het kwadrantstelsel was voor de mechanika onbruikbaar vanwege de onpraktische afmetingen van de eenheid L (veel te groot) en de eenheid M (veel te klein). De soortelijke massa van water bijvoorbeeld, uitgedrukt in eenheden van het kwadrantstelsel, is gelijk aan :

$$\rho_{water} = 10^{38}\ \frac{M}{L^3}$$

$$\left(\text{afleiding : } \rho_{water} = 1000\ \frac{kg}{m^3} = 10^3 \cdot \frac{10^{14}\ M}{(10^{-7})^3\ L^3} = 10^{38}\ \frac{M}{L^3}\right)$$

Binnen de elektrotechniek was het kwadrantstelsel voor een reeks elektrische grootheden goed bruikbaar.

Volgende logisch afgeleide, koherente kwadrant-eenheden (KS-eenheden) kregen een eigen benaming :

KS-eenheid van weerstand R = ohm (Ω)

$= 10^9$ eme van weerstand $= 10^9$ cm $\cdot$ s^{-1} $= L \cdot s^{-1}$

KS-eenheid van spanning U = volt (V)

$= 10^8$ eme van spanning $= 10^8$ $cm^{3/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-2}$

$= L^{3/2} \cdot M^{1/2} \cdot s^{-2}$

KS-eenheid van stroom I = ampère (A)

$= 10^{-1}$ eme van stroom $= 10^{-1}$ $cm^{1/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-1}$

$= L^{1/2} \cdot M^{1/2} \cdot s^{-1}$

KS-eenheid van lading Q = coulomb (C)

$= 10^{-1}$ eme van lading $= 10^{-1}$ $cm^{1/2} \cdot g^{1/2}$

$= L^{1/2} \cdot M^{1/2}$

KS-eenheid van kapaciteit C = farad (F)

$= 10^{-9}$ eme van kapaciteit $= 10^{-9}$ $cm^{-1} \cdot s^2$

$= L^{-1} \cdot s^2$

KS-eenheid van arbeid W = joule (J)

$= 10^7$ eme van arbeid $= 10^7$ $cm^2 \cdot g \cdot s^{-2}$

$= 10^7$ erg $= L^2 \cdot M \cdot s^{-2}$

KS-eenheid van vermogen P = watt (W)

= 10^7 eme van vermogen = 10^7 $cm^2 \cdot g \cdot s^{-3}$

= $10^7 \frac{erg}{s} = L^2 \cdot M \cdot s^{-3}$

KS-eenheid van elektrische induktantie

(zelfinduktie L, wederzijdse induktie M) = henry (H)

= 10^9 eme van elektrische induktantie = 10^9 cm = L

De KS-eenheden ohm, ampère, volt, coulomb en farad werden in 1881 aangenomen op het 1ste Internationaal Elektriciteitskongres; de KS-eenheden joule, watt en henry werden aangenomen op het 2de Internationaal Elektriciteitskongres in 1889.

De KS-eenheden ohm, volt, ampère, coulomb, farad, joule, watt en henry, zoals ze hierboven werden bepaald, werden ook "absolute praktische elektrische eenheden" genoemd.

De eenheden L (met 1 L = 10^9 cm), M (met 1 M = 10^{-11} g), s, Ω, V, A, C, F, J, W en H waren onderling koherent, doch uiteraard niet koherent met de eenheden meter en kilogram uit het MKS-stelsel.

Voor bepaalde elektrische grootheden was het kwadrantstelsel onbruikbaar; de eenheid voor stroomdichtheid zou een grootte krijgen overeenstemmend met (uitgedrukt in SI-eenheden) $10^{-14} \frac{A}{m^2}$, immers (met $A_{KS} \triangleq A_{SI}$)

$$\frac{A_{KS}}{L^2} \triangleq \frac{A_{SI}}{(10^9\ cm)^2} = \frac{A_{SI}}{10^{18}\ cm^2} = \frac{A_{SI}}{10^{14}\ m^2} = 10^{-14} \frac{A_{SI}}{m^2}$$

Ook voor de meeste magnetische grootheden was het kwadrantstelsel onbruikbaar, en gebruikte men de eenheden van het em-CGS-stelsel (die uiteraard niet koherent zijn met de KS-eenheden).

Naast de KS-eenheid van arbeid (joule) en de KS-eenheid van vermogen (watt), werden ook volgende niet-koherente eenheden van arbeid en vermogen aangewend :

- voor vermogen : kilowatt (kW)

1kW = 1000 W

- voor arbeid : watt uur (W.h)

$1\ W.h = 1\ \frac{J}{s} \cdot 3600\ s = 3600\ J$

kilowatt uur (kW.h)

$1\ kW.h = 1000\ \frac{J}{s} \cdot 3600\ s = 3{,}6 \cdot 10^6\ J$

$= 3{,}6 \cdot 10^3\ kJ$

$= 3{,}6\ MJ$

1.2. Eenheden van arbeid en van vermogen in het kwadrantstelsel (KS) en in het MKS-stelsel

Beschouwen we thans nader de eenheden van arbeid en van vermogen in het kwadrantstelsel (KS) en in het MKS-stelsel.

In het MKS-stelsel (dat geen elektrische eenheden bevat) geldt :

$1\ \text{MKS-eenheid van arbeid} = 1\ kg \cdot 1\ \frac{m}{s^2} \cdot 1\ m = 1\ kg \cdot \frac{m^2}{s^2}$

$= 1\ kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} = 1\ N \cdot m$

$1\ \text{MKS-eenheid van vermogen} = \frac{1\ kg \cdot 1\ \frac{m}{s^2} \cdot 1\ m}{1\ s} = 1\ kg \cdot \frac{m^2}{s^3}$

$= 1\ kg \cdot m^2 \cdot s^{-3} = 1\ \frac{N \cdot m}{s}$

In het kwadrantstelsel (dat zowel onpraktische mechanische als praktische elektrische eenheden bevat) geldt :

1 KS-eenheid van arbeid

$= 1\ M \cdot 1\ \frac{L}{s^2} \cdot 1\ L = 1\ M \cdot \frac{L^2}{s^2} = 1\ M \cdot L^2 \cdot s^{-2}$

$= 1\ J$

$= 1\ V \cdot 1\ A \cdot 1\ s = 1\ M^{1/2} \cdot L^{3/2} \cdot s^{-2} \times 1\ M^{1/2} \cdot L^{1/2} \cdot s^{-1} \times 1\ s$

$= 1\ M \cdot L^2 \cdot s^{-2}$

$= 1\ J$

1 KS-eenheid van vermogen $= \frac{1\ M \cdot 1\ \frac{L}{s^2} \cdot 1\ L}{1\ s} = 1\ M \cdot \frac{L^2}{s^3} = 1\ M \cdot L^2 \cdot s^{-3}$

$= 1\ \frac{J}{s} = 1\ W$

$= 1\ V \cdot 1\ A$

$= 1\ M^{1/2} \cdot L^{3/2} \cdot s^{-2} \times 1\ M^{1/2} \cdot L^{1/2} \cdot s^{-1}$

$= 1\ M \cdot L^2 \cdot s^{-3}$

$= 1\ \frac{J}{s} = 1\ W$

Bij het vergelijken van de betrokken eenheden van arbeid en van vermogen stellen we vast dat de KS-eenheden van arbeid en van vermogen respektievelijk gelijk zijn aan de MKS-eenheden van arbeid en van vermogen :

1 KS-eenheid van arbeid $= 1\ M\ .\ L^2\ .\ s^{-2}$

$= 10^{-14}\ kg\ .\ (10^7\ m)^2\ .\ s^{-2}$

$= 1\ kg\ .\ m^2\ .\ s^{-2} = 1$ MKS-eenheid van arbeid

1 KS-eenheid van vermogen $= 1\ M\ .\ L^2\ .\ s^{-3}$

$= 10^{-14}\ kg\ .\ (10^7\ m)^2\ .\ s^{-3}$

$= 1\ kg\ .\ m^2\ .\ s^{-3} = 1$ MKS-eenheid van vermogen

Met behulp van de em-CGS-eenheden bekomt men uiteraard hetzelfde resultaat :

1 KS-eenheid van arbeid $= 10^7$ eme van arbeid

$= 10^7\ g\ .\ cm^2\ .\ s^{-2}$

$= (1000\ g)\ .\ (100\ cm)^2\ .\ s^{-2}$

$= 1\ kg\ .\ m^2\ .\ s^{-2}$

= 1 MKS-eenheid van arbeid

1 KS-eenheid van vermogen $= 10^7$ eme van vermogen

$= 10^7\ g\ .\ cm^2\ .\ s^{-3}$

$= (1000\ g)\ .\ (100\ cm)^2\ .\ s^{-3}$

$= 1\ kg\ .\ m^2\ .\ s^{-3}$

= 1 MKS-eenheid van vermogen.

Besluit : De KS-eenheid van arbeid (joule) en de KS-eenheid van vermogen (watt) zijn gelijk respektievelijk aan de MKS-eenheid van arbeid (newton meter) en de MKS-eenheid van vermogen $\left(\frac{\text{newton meter}}{\text{sekonde}}\right)$:

$$1 \text{ joule} = 1 \text{ newton meter} = 1\ kg\ .\ m^2\ .\ s^{-2} = 1\ M\ .\ L^2\ .\ s^{-2}$$

$$1\ \frac{\text{joule}}{\text{sekonde}} = 1\ \frac{\text{newton meter}}{\text{sekonde}} = 1 \text{ watt} = 1\ kg\ .\ m^2\ .\ s^{-3} = 1\ M\ .\ L^2\ .\ s^{-3}$$

Er valt op te merken dat de (niet gebruikte) KS-eenheid van kracht niet gelijk is aan de MKS-eenheid (of SI-eenheid) van kracht. De MKS-eenheid (of SI-eenheid) van kracht is de newton, terwijl de KS-eenheid van kracht (volgens de definitievergelijking : $F = m\ .\ a$) gelijk is aan :

$$1\ M\ .\ \frac{L}{s^2} = 10^{-14}\ kg\ .\ 10^7\ \frac{m}{s^2} = 10^{-7}\ \frac{kg\ .\ m}{s^2} = 10^{-7} \text{ newton}$$

Wat de elektrische grootheden betreft, stemmen de KS-eenheden van de grootheden weerstand (ohm), spanning (volt), stroom (ampère), lading

(coulomb), kapaciteit (farad), arbeid (joule), vermogen (watt) en elektrische induktantie (henry), overeen met (≙) de overeenkomstige SI-eenheden (die trouwens dezelfde benamingen dragen : ohm, volt, ampère, coulomb, farad, joule, watt, henry).

2. "Internationale" elektrische eenheden (1908)

In 1908 werden volgende definities internationaal aangenomen :

- 1 ohm (Ω_{int}) is de weerstand van een kolom kwik met een massa van 14,4521 g en een lengte van 106,300 cm bij konstante doorsnede gemeten bij de temperatuur van smeltend ijs;
- 1 ampère (A_{int}) is de elektrische stroom die in 1 sekonde 1,118 mg zilver elektrolytisch neerslaat uit een zilvernitraatoplossing.

Bij de definities van deze materiële standaarden lag de bedoeling voor, dat 1 Ω_{int} zou gelijk zijn aan 10^9 eme van weerstand, en 1 A_{int} gelijk aan 10^{-1} eme van elektrische stroom. Tengevolge van de toenemende nauwkeurigheid bij elektrische metingen, werd achteraf vastgesteld, dat de materiële standaarden van 1908 niet volledig overeenstemden met de overeenkomstige praktische absolute eenheden (KS-eenheden) van 1881 (die hun oorsprong vonden in het em-CGS-stelsel).

Door hun binding aan een materiële standaard, maakten de Ω_{int} en de A_{int} zich los van het CGS-stelsel, en werden steeds meer als onafhankelijke grondeenheden aangezien.

De overige "internationale" elektrische eenheden werden afgeleid als volgt (vertrekkend vanaf de Ω_{int}, de A_{int} en de sekonde) :

spanning (volt) : $V_{int} = A_{int} \cdot \Omega_{int}$

lading (coulomb) : $C_{int} = A_{int} \cdot s$

kapaciteit (farad) : $F_{int} = \frac{C_{int}}{V_{int}}$

vermogen (watt) : $W_{int} = V_{int} \cdot A_{int}$

arbeid (joule) : $J_{int} = W_{int} \cdot s$

elektrische induktantie (henry) : $H_{int} = \frac{V_{int} \cdot s}{A_{int}}$

Later kwamen daar nog volgende eenheden bij :

elektrische geleiding (siemens) : $S_{int} = \frac{A_{int}}{V_{int}}$

magnetische flux (weber) : $Wb_{int} = V_{int} \cdot s$

magnetische induktie (tesla) (magnetische fluxdichtheid) : $T_{int} = \frac{Wb_{int}}{m^2}$

Achteraf is gebleken dat men, door het aannemen van materiële standaarden voor het bepalen van de eenheid van weerstand en van de eenheid van stroom, een verkeerde weg was opgegaan. Hieraan werd verholpen door het in voege brengen van het Giorgi-stelsel (MKSA-stelsel).

3. "Absolute" elektrische eenheden (1948); Giorgi-stelsel of MKSA-stelsel

3.1. Grondeenheden en afgeleide eenheden van het Giorgi- of MKSA-stelsel

Eén der grootste bezwaren tegen de "internationale" elektrische eenheden van 1908, was gelegen in het feit, dat de eenheid van arbeid, de "internationale" joule (J_{int}) niet meer helemaal gelijk was aan de joule uit het MKS-stelsel. De "internationale" elektrische eenheden van 1908 waren bijgevolg niet perfekt afgestemd op de mechanische eenheden.

Het is de grote verdienste geweest van Giovanni Giorgi (1871 - 1950), de weg te hebben geopend naar een integraal koherent eenhedenstelsel, met behoud enerzijds van de grondeenheden meter, kilogram en sekonde van het MKS-stelsel, en anderzijds van de praktische elektrische eenheden die echter opnieuw op een andere wijze werden gedefinieerd.

In het Giorgi- of MKSA-stelsel vormt de (absolute) ampère de vierde grondeenheid, naast meter, kilogram en sekonde. De definitie van de (absolute) ampère, die opnieuw (zoals in het kwadrantstelsel) exakt overeenstemt met $\frac{1}{10}$ em-CGS-eenheid van elektrische stroom, berust niet meer op een materiële standaard, maar op de wet van de wederzijdse krachten tussen twee evenwijdige rechtlijnige geleiders waardoor een stroom vloeit. Dit is trouwens dezelfde wet waarop ook de definitie van de eme van stroom in het em-CGS-stelsel berust. Deze wet in niet-gerationaliseerde schrijfwijze luidt :

$$F = \frac{2\mu \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot l}{r}$$

In het em-CGS-stelsel werd μ_o (vacuüm) gelijkgesteld aan 1.

Hieruit volgt onmiddellijk de elektromagnetische CGS-eenheid van stroom : twee gelijke evenwijdige, rechtlijnige stromen hebben elk de waarde van 1 eme van stroom, als zij in vacuüm op een afstand van 1 cm, op elkaar een kracht van 2 dyne per cm lengte uitoefenen.

Daar 1 (absolute) ampère = $\frac{1}{10}$ em-CGS-eenheid van stroom (= $\frac{1}{10}$ $cm^{1/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-1}$) en 1 m = 100 cm, oefenen dus twee evenwijdige rechtlijnige stromen, ieder 1 (absolute) A groot, in vacuüm op een afstand van 1 meter, een kracht op elkaar uit (per meter lengte) van :

$$\frac{F}{l} = \frac{2\,\mu_o \cdot I_1 \cdot I_2}{r} = \frac{2 \times \frac{1}{10}\ cm^{1/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-1} \times \frac{1}{10}\ cm^{1/2} \cdot g^{1/2} \cdot s^{-1}}{100\ cm}$$

$$= 2 \cdot 10^{-4}\ \frac{cm \cdot g \cdot s^{-2}}{cm} = 2 \cdot 10^{-4}\ \frac{dyn}{cm}$$

$$= 2 \cdot 10^{-2}\ \frac{dyn}{m}$$

$$= 2 \cdot 10^{-7}\ \frac{N}{m}$$

Omgekeerd kan men hieruit de thans internationaal aanvaarde definitie van de (absolute) ampère afleiden : de ampère is de konstante elektrische stroom die, indien hij geleid wordt door twee evenwijdige, rechtlijnige en oneindig lange geleiders van te verwaarlozen cirkelvormige doorsnede, welke geplaatst zijn in het luchtledige op een onderlinge afstand van 1 meter, tussen deze twee geleiders per meter lengte een kracht van $2 \cdot 10^{-7}$ newton veroorzaakt.

In 1901 wees Giovanni Giorgi op de mogelijkheid, de praktische elektrische eenheden te koppelen aan de MKS-eenheden in een koherent eenhedenstelsel mits het aanvaarden van één der praktische elektrische eenheden als grondeenheid, naast de grondeenheden m, kg en s. Hij vond echter te dien tijde geen gehoor.

Pas in 1935 aanvaarde de IEC (International Electrotechnical Commission) het eenhedenstelsel met als basisgrootheden lengte, massa, tijd en elektrische stroom (met als grondeenheden m, kg, s en A) en gaf dit stelsel de naam van Giorgi-stelsel. In 1954 werd daarnaast ook de benaming MKSA-stelsel aanvaard.

Het CIPM besloot in 1946 dat de "absolute" elektrische eenheden (afgeleid van de grondeenheden m, kg, s en A) in de plaats van de "internationale" elektrische eenheden (van 1908) zouden komen met ingang van 1 januari 1948. Dit werd in 1948 bekrachtigd door de 9de CGPM. Eveneens in 1948 werd het Giorgi-stelsel erkend door de IUPAP (International Union of Pure and Applied Physics).

Gezien het feit dat de koherente eenheden van arbeid en van vermogen in het MKS-stelsel respektievelijk gelijk zijn aan de koherente "absolute" elektrische eenheden van arbeid en van vermogen in het kwadrant-stelsel (1 newton meter = 1 joule = 1 watt sekonde; $1 \frac{\text{newton meter}}{\text{s}} = 1 \frac{\text{joule}}{\text{s}} = 1$ watt), kon men, na het toevoegen van de ampère als vierde grondeenheid aan het MKS-stelsel (waardoor het MKS-stelsel thans MKSA-stelsel werd), alle overige elektrische eenheden op een koherente wijze afleiden van de watt en de ampère.

Het feit dus dat de watt enerzijds de koherente eenheid van vermogen is in het MKS-stelsel, en anderzijds ook de koherente eenheid van vermogen in het kwadrantstelsel, maakte het mogelijk, door het vastleggen van de ampère als grondeenheid, een nieuw koherent eenhedenstelsel te ontwerpen waarin zowel de vroegere MKS-eenheden als een reeks praktische absolute elektrische eenheden (kwadrant-eenheden) konden worden ondergebracht (uiteraard mits vervanging van de benaming kwadrant-eenheid door MKSA-eenheid en mits een nieuwe definitie).

De benamingen newton , joule en watt werden behouden voor de MKSA-eenheden van respektievelijk kracht, arbeid en vermogen.

In de plaats van de definities uit het kwadrantstelsel voor de benamingen volt, ohm, coulomb, farad en henry, krijgt men thans volgende definities (vertrekkend van de watt en de ampère, met watt = $kg \cdot m^2 \cdot s^{-3}$) :

- MKSA-eenheid van spanning U = volt (V)

$$\text{volt} = \frac{\text{watt}}{\text{ampère}} = kg \cdot m^2 \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$$

- MKSA-eenheid van weerstand R = ohm (Ω)

$$\text{ohm} = \frac{\text{volt}}{\text{ampère}} = kg \cdot m^2 \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$$

- MKSA-eenheid van lading Q = coulomb (C)

$$\text{coulomb} = \text{ampère} \times \text{sekonde} = A \cdot s$$

- MKSA-eenheid van kapaciteit C = farad (F)

$$\text{farad} = \frac{\text{coulomb}}{\text{volt}} = kg^{-1} \cdot m^{-2} \cdot s^4 \cdot A^2$$

- MKSA-eenheid van elektrische induktantie (zelfinduktie L, wederzijdse induktie M) = henry (H)

$$\text{henry} = \frac{\text{volt} \times \text{sekonde}}{\text{ampère}} = kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$$

De benamingen ampère, ohm, volt, coulomb, farad, watt, joule en henry die eerst werden gegeven aan een reeks afgeleide eenheden uit het kwadrantstelsel, werden behouden voor de overeenstemmende (even grote) eenheden uit het MKSA-stelsel. In het kwadrantstelsel zijn alle elektrische eenheden (en dus ook de ampère) afgeleide eenheden, terwijl in het MKSA-stelsel de ampère een grondeenheid is.

In 1935 werden de benamingen siemens (S) en weber (Wb) toegekend respektievelijk aan de MKSA-eenheden van elektrische geleiding G en van magnetische flux Φ, en in 1954 werd de benaming tesla (T) toegekend aan de MKSA-eenheid van magnetische induktie (magnetische fluxdichtheid) B :

- MKSA-eenheid van elektrische geleiding = siemens (S)

$$\text{siemens} = \frac{\text{ampère}}{\text{volt}} = kg^{-1} \cdot m^{-2} \cdot s^3 \cdot A^2$$

- MKSA-eenheid van magnetische flux = weber (Wb)

$$\text{weber} = \text{volt} \times \text{sekonde} = kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$$

- MKSA-eenheid van magnetische induktie (magnetische fluxdichtheid) = tesla (T)

$$\text{tesla} = \frac{\text{weber}}{m^2} = kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$$

De MKSA-eenheid van magnetische spanning is de ampère, die in dit geval dikwijls als "ampère-winding" werd aangeduid. De benaming "ampère-winding" werd in het SI niet behouden.

Het Giorgi- of MKSA-stelsel, met als grondeenheden m, kg, s en A, en als afgeleide eenheden onder andere : newton, joule, watt, volt, ohm, coulomb, farad, henry, siemens, weber en tesla, vormt een koherent eenhedenstelsel.

In het CGS-stelsel, met zijn drie basisgrootheden lengte, massa en tijd, werden de eenheden van alle elektrische en elektromagnetische grootheden afgeleid van de grondeenheden cm, g, s. Hierdoor kwam het zelfstandig karakter van de elektrische en elektromagnetische verschijnselen minder tot uiting. Door het aannemen van één elektrische grootheid, namelijk elektrische stroom, als basisgrootheid,werd ook hieraan verholpen. In alle eenheden van elektrische en elektromagnetische grootheden, uitgedrukt in de grondeenheden (m, kg, s, A) komt steeds de grondeenheid A (of een macht hiervan) voor.

3.2. Verband tussen de "internationale" elektrische eenheden van 1908 en de elektrische eenheden van het MKSA-stelsel van 1948

Van de reproduceerbare standaarden (van 1908) voor de ohm en de ampère werden secundaire standaarden voor de ohm (standaardweerstand) en de volt (standaardcel) afgeleid. Als resultaat van talrijke metingen in verschillende landen, stelde het CIPM in 1946 de gemiddelde waarde van deze secundaire standaarden vast als volgt :

$$1\ \Omega_{int} \triangleq 1{,}000\ 49\ \Omega$$

$$1\ V_{int} \triangleq 1{,}000\ 34\ V$$

Uit deze waarden werd dan het verband berekend tussen de overige internationale elektrische eenheden van 1908 en de absolute elektrische eenheden (MKSA-eenheden); dit gaf als resultaat :

$1\ A_{int} \triangleq 0{,}999\ 85\ A$	$1\ S_{int} \triangleq 0{,}999\ 51\ S$
$1\ C_{int} \triangleq 0{,}999\ 85\ C$	$1\ Wb_{int} \triangleq 1{,}000\ 34\ Wb$
$1\ F_{int} \triangleq 0{,}999\ 51\ F$	$1\ J_{int} \triangleq 1{,}000\ 19\ J$
$1\ H_{int} \triangleq 1{,}000\ 49\ H$	$1\ W_{int} \triangleq 1{,}000\ 19\ W$

In de USA wordt dikwijls gerekend met de volgende waarden die door het NBS (National Bureau of Standards, Washington) werden bepaald :

$$1\ US\ \Omega_{int} \triangleq 1{,}000\ 495\ \Omega$$

$$1\ US\ V_{int} \triangleq 1{,}000\ 330\ V$$

Door berekening bekomt men dan verder :

$1\ US\ A_{int} \triangleq 0{,}999\ 835\ A$	$1\ US\ S_{int} \triangleq 0{,}999\ 505\ S$
$1\ US\ C_{int} \triangleq 0{,}999\ 835\ C$	$1\ US\ Wb_{int} \triangleq 1{,}000\ 330\ Wb$

1 US F_{int} ≙ 0,999 505 F 1 US J_{int} ≙ 1,000 165 J
1 US H_{int} ≙ 1,000 495 H 1 US W_{int} ≙ 1,000 165 W

3.3. Het gerationaliseerde en het niet-gerationaliseerde Giorgi-stelsel (MKSA-stelsel)

Het onderscheid tussen het gerationaliseerd en het niet-gerationaliseerd Giorgi-stelsel (MKSA-stelsel) bestaat hierin dat bij het gerationaliseerd stelsel de schrijfwijze van de hoofdwetten van de elektriciteitsleer zodanig wordt gewijzigd, dat de faktor 4 π alleen nog voorkomt waar de geometrische symmetrie dat vereist.

Een ganse reeks elektrische en elektromagnetische grootheden worden door de rationalisatie niet beïnvloed, zoals bijvoorbeeld : elektrische stroom I, stroomdichtheid J, elektrische lading Q, elektrische spanning U, elektrische weerstand R, soortelijke weerstand ρ, elektrische geleiding G, soortelijke geleiding σ, elektrische kapaciteit C, elektrische veldsterkte E, elektrische polarisatie P of D_i, elektrisch dipoolmoment p, elektrische induktantie (zelfinduktie L, wederzijdse induktie M), magnetische fluxdichtheid (magnetische induktie) B, magnetische flux Φ, magnetisatie M of H_i, (elektro)magnetisch moment m.

De voornaamste elektrische en elektromagnetische grootheden die wel beïnvloed worden door de rationalisatie zijn :

- elektrische flux Ψ
- elektrische fluxdichtheid, ook genoemd elektrische verplaatsing of elektrische induktie D
- permittiviteit ϵ
- elektrische susceptibiliteit χ_e
- magnetische veldsterkte H
- magnetische spanning U_m
- permeabiliteit μ
- magnetische susceptibiliteit χ_m
- magnetische polarisatie J, B_i
- magnetisch dipoolmoment j
- magnetische poolsterkte p, M

Het doorvoeren van de rationalisatie bestaat erin, dat bepaalde elektrische en elektromagnetische grootheden een andere definitievergelijking krijgen.

Als voorbeeld behandelen we hierna de elektrische fluxdichtheid D (ook genoemd elektrische verplaatsing of elektrische induktie) en de magnetische veldsterkte H.

De elektrische fluxdichtheid op de afstand r van een puntvormige lading Q, wordt uitgedrukt als volgt :

- in niet-gerationaliseerde schrijfwijze :

$$D_n = \frac{Q}{r^2} \qquad \left(\text{eenheid} : \frac{C}{m^2} = \frac{A \cdot s}{m^2}\right)$$

- in gerationaliseerde schrijfwijze :

$$D_{rat} = \frac{Q}{4\,\pi \cdot r^2} \qquad \left(\text{eenheid} : \frac{C}{m^2} = \frac{A \cdot s}{m^2}\right)$$

Hierin is de term $4\,\pi \cdot r^2$ gelijk aan de oppervlakte van een bol met straal r, met in het middelpunt de lading Q, waarbij r ook de afstand is tussen de lading in het middelpunt en het punt waarin men de elektrische fluxdichtheid D wil bepalen (bolsymmetrisch systeem).

De magnetische veldsterkte op een afstand r van een oneindig lange rechte stroomgeleider, wordt uitgedrukt als volgt :

- in niet-gerationaliseerde schrijfwijze :

$$H_n = \frac{2\,I}{r} \qquad \left(\text{eenheid} : \frac{A}{m}\right)$$

- in gerationaliseerde schrijfwijze :

$$H_{rat} = \frac{1}{4\,\pi} \cdot \frac{2\,I}{r} = \frac{I}{2\,\pi \cdot r} \qquad \left(\text{eenheid} : \frac{A}{m}\right)$$

Hierin is de term $2\,\pi \cdot r$ gelijk aan de omtrek van een cirkel met straal r waarvan het middelpunt in het midden van de stroomgeleider ligt en die door het punt gaat waarin men de magnetische veldsterkte H wil bepalen (cilindersymmetrisch systeem).

De rationalisatie brengt mede, dat de getalwaarden van D_{rat} en H_{rat} $4\,\pi$ maal kleiner zijn dan de getalwaarden van D_n en H_n.

Wat de elektriciteitsleer betreft, is het de gewoonte bij het gebruik van CGS-eenheden (elektrostatische CGS-eenheden of elektromagnetische CGS-eenheden) de niet-gerationaliseerde schrijfwijze te volgen, en

bij het gebruik van MKSA-eenheden (Giorgi-eenheden) de gerationaliseerde schrijfwijze. Bij het gebruik van de SI-eenheden worden de groothedenvergelijkingen uit de elektriciteitsleer uitsluitend in de gerationaliseerde schrijfwijze weergegeven.

Wat betreft het MKSA- of Giorgi-stelsel, geldt volgend verband tussen de rationaal en de niet-rationaal opgevatte grootheden (respektievelijk voorgesteld door X_{rat} en X_n) :

elektrische fluxdichtheid (elektrische induktie of elektrische verplaatsing)	D	$D_{rat} = \frac{D_n}{4\pi}$
elektrische flux	Ψ	$\Psi_{rat} = \frac{\Psi_n}{4\pi}$
magnetische spanning	U_m	$U_{m,rat} = \frac{U_{m,n}}{4\pi}$
magnetische veldsterkte	H	$H_{rat} = \frac{H_n}{4\pi}$
magnetische polarisatie	J, B_i	$J_{rat} = 4\pi \cdot J_n$
magnetisch dipoolmoment	j	$j_{rat} = 4\pi \cdot j_n$
magnetische poolsterkte	p, M	$p_{rat} = 4\pi \cdot p_n$
permittiviteit	ϵ	$\epsilon_{rat} = \frac{\epsilon_n}{4\pi}$
permeabiliteit	μ	$\mu_{rat} = 4\pi \cdot \mu_n$
elektrische susceptibiliteit	χ_e	$\chi_{e,rat} = 4\pi \cdot \chi_{e,n}$
magnetische susceptibiliteit	χ_m	$\chi_{m,rat} = 4\pi \cdot \chi_{m,n}$

De definitievergelijking van de rationaal opgevatte MKSA-grootheden uit de elektriciteitsleer vormt ook de definitievergelijking in het SI van dezelfde grootheden.

Alleen wat de elektriciteitsleer betreft, wordt in het SI uitsluitend de rationale schrijfwijze van groothedenvergelijkingen toegepast.

De niet-rationale schrijfwijze die vroeger algemeen was (zie de CGS-stelsels), wordt thans in het SI nog toegepast in de mechanika.

Het klassieke voorbeeld in dit verband is de groothedenvergelijking die de gravitatiewet (vierde wet van Newton, zie hoofdstuk XIII, onder 2.1.) weergeeft :

$$F = k \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$ (niet-rationale, gebruikelijke schrijfwijze in het SI)

$$\text{met } k = 66{,}720 \cdot 10^{-12} \frac{N \cdot m^2}{kg^2}$$

De rationale (doch niet-gebruikelijke) schrijfwijze in het SI zou geweest zijn :

$$F = \frac{1}{4\pi} \cdot k \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

$$\text{met } k = 4\pi \cdot 66{,}720 \cdot 10^{-12} \frac{N \cdot m^2}{kg^2}$$

Deze vergelijkingen zijn analoog met de vergelijkingen die de aantrekkingskracht weergeven tussen 2 elektrische ladingen of tussen 2 puntpolen :

$$F = \frac{1}{\epsilon_o} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$$ (niet-rationale en in het SI niet-gebruikelijke schrijfwijze)

$$\text{met } \epsilon_o \approx \frac{1}{9 \cdot 10^9} \frac{F}{m}$$

$$F = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{1}{\epsilon_o} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$$ (rationale, in het SI gebruikelijke schrijfwijze)

$$\text{met } \epsilon_o \approx \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \frac{F}{m}$$

$$F = \frac{1}{\mu_o} \cdot \frac{p_1 \cdot p_2}{r^2}$$ (niet-rationale en in het SI niet-gebruikelijke schrijfwijze)

$$\text{met } \mu_o = 10^{-7} \frac{H}{m}$$

$$F = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{1}{\mu_o} \cdot \frac{p_1 \cdot p_2}{r^2}$$ (rationale, in het SI gebruikelijke schrijfwijze)

$$\text{met } \mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$$

3.4. De permeabiliteit van vacuüm in het gerationaliseerd MKSA-stelsel

Bij de opbouw van het elektromagnetisch CGS-stelsel, werd de permeabiliteit μ beschouwd als een dimensieloze grootheid; daarenboven werd de permeabiliteit van vacuüm μ_o gelijkgesteld aan 1. In het MKSA-stelsel is de permeabiliteit van vacuüm noch dimensieloos, noch gelijk aan 1.

Uit de definitie van de ampère (in het MKSA-stelsel), en de geratio-naliseerde vergelijking $F = \frac{\mu \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot l}{2 \pi \cdot r}$ leidt men voor vacuüm af :

$$2 \cdot 10^{-7}\ N = \frac{\mu_o \cdot 1\ A \cdot 1\ A \cdot 1\ m}{2 \pi \cdot 1\ m}$$

Hieruit volgt de waarde van de permeabiliteit van vacuüm, in het gerationa-liseerd MKSA-stelsel :

$$\mu_o = 4 \pi \cdot 10^{-7} \frac{N}{A^2} = 4 \pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$$

(Uit $N \cdot m = J = W \cdot s = V \cdot A \cdot s$, bekomt men : $\frac{N}{A} = \frac{V \cdot s}{m}$, zodat $\frac{N}{A^2} = \frac{V \cdot s}{A \cdot m} = \frac{\frac{V \cdot s}{A}}{m} = \frac{H}{m}$)

Zoals hier uit de definitie van de ampère, de waarde van μ_o volgt, kon men ook omgekeerd, eerst de waarde van μ_o per definitie vastgelegd hebben ($\mu_o = 4 \pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$), waarmede dan de waarde van de ampère kon afgeleid worden. In 1938 is de IEC (International Electrotechnical Commission) ook eerst deze weg opgegaan, door de permeabiliteit van vacuüm (met als definitie : $\mu_o = 4 \pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$) aan te nemen als de schakel tussen de elektrische eenheden en de mechanische MKS-eenheden.
Terloops weze hier vermeld, dat in het niet-gerationaliseerd MKSA-stelsel, μ_o gelijk is aan : $10^{-7} \frac{N}{A^2} = 10^{-7} \frac{H}{m}$.

3.5. De permittiviteit van vacuüm in het gerationaliseerd MKSA-stelsel

Bij de opbouw van het elektrostatisch CGS-stelsel, werd de permittiviteit ϵ beschouwd als een dimensieloze grootheid; daarenboven werd de permittiviteit van vacuüm ϵ_o gelijkgesteld aan 1. In het MKSA-stelsel is de permittiviteit van vacuüm noch dimensieloos, noch gelijk aan 1. Uit ervaring is gebleken dat volgende betrekking geldig is :

$$\epsilon_o \cdot \mu_o \cdot c_o^2 = 1 \qquad \text{(dimensieloos)}$$

waarin c_o = lichtsnelheid in vacuüm = $2{,}997\ 924\ 58 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$
Hieruit volgt de waarde van de permittiviteit van vacuüm, in het gerationaliseerd MKSA-stelsel :

$$\epsilon_o = \frac{1}{\mu_o \cdot c_o^2} = \frac{1}{4 \pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m} \cdot (2{,}997\ 924\ 58 \cdot 10^8 \frac{m}{s})^2}$$

$$= 8{,}854\ 187\ 818 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}$$

Bemerk dat $\frac{1}{\frac{H}{m} \cdot \frac{m^2}{s^2}} = \frac{1}{\frac{V \cdot s}{A \cdot m} \cdot \frac{m^2}{s^2}} = \frac{1}{\frac{V}{A} \cdot \frac{m}{s}} = \frac{A \cdot s}{V \cdot m} = \frac{C}{V \cdot m} = \frac{F}{m}$

Indien men c_o afrondt tot $3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$, bekomt men voor ϵ_o :

$$\epsilon_o \approx \frac{1}{4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m} \cdot (3 \cdot 10^8 \frac{m}{s})^2}$$

$$\approx \frac{1}{36\pi \cdot 10^9} \frac{F}{m}$$

Terloops weze hier vermeld, dat in het niet-gerationaliseerd MKSA-stelsel, men voor ϵ_o bekomt :

$$\epsilon_o = \frac{1}{10^{-7} \frac{H}{m} \cdot (2{,}997\ 924\ 58 \cdot 10^8 \frac{m}{s})^2} = 1{,}112\ 650\ 056 \cdot 10^{-10} \frac{F}{m}$$

$$\approx \frac{1}{9 \cdot 10^9} \frac{F}{m}$$

Als voorbeeld berekenen we hierna de kapaciteit van een vlakke kondensator (met lucht als middenstof, waarvoor geldt : $\epsilon \approx \epsilon_o$), waarvan de bekleedsels een diameter hebben van 28 cm (r = 14 cm = 0,14 m) en die zich op een onderlinge afstand van 1 mm (= 0,1 cm = 0,001 m) bevinden.

Als oppervlakte van de bekleedsels bekomt men :

$S = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot (14\ cm)^2 = 196\ \pi\ cm^2$

$= \pi \cdot (0{,}14\ m)^2 = 0{,}0196\ \pi\ m^2$

☆ es-CGS-stelsel en niet-gerationaliseerde schrijfwijze (met $\epsilon \approx \epsilon_o = 1$)

$$C = \frac{\epsilon \cdot S}{4\pi \cdot d} = \frac{1 \times 196\ \pi\ cm^2}{4\pi \cdot 0{,}1\ cm} = 490\ cm$$

= 490 ese van kapaciteit

☆ MKSA-stelsel (Giorgi-stelsel) en niet gerationaliseerde schrijfwijze

$$\left(\text{met } \epsilon \approx \epsilon_o = \frac{1}{10^{-7} \frac{H}{m} \cdot (2{,}997\ 924\ 58 \cdot 10^8 \frac{m}{s})^2}\right)$$

$$C = \frac{\epsilon \cdot S}{4\pi \cdot d} = \frac{1}{10^{-7} \frac{H}{m} \cdot (2{,}997\ 924\ 58 \cdot 10^8 \frac{m}{s})^2} \cdot \frac{0{,}0196\ \pi\ m^2}{4\pi \cdot 0{,}001\ m}$$

$= 5{,}451\ 985\ 275 \cdot 10^{-10}$ farad

$= 5{,}451\ 985\ 275 \cdot 10^{-4}$ mikrofarad

= 545,198 527 5 pikofarad

☆ MKSA-stelsel (Giorgi-stelsel) en gerationaliseerde schrijfwijze

$$\left(\text{met } \epsilon \approx \epsilon_o = \frac{1}{4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m} \cdot (2{,}997\ 924\ 58 \cdot 10^8 \frac{m}{s})^2}\right)$$

$$C = \frac{\epsilon \cdot S}{d} = \frac{1}{4\,\pi \cdot 10^{-7}\,\frac{H}{m} \cdot (2{,}997\,924\,58 \cdot 10^{8}\,\frac{m}{s})^2} \cdot \frac{0{,}0196\,\pi\,m^2}{0{,}001\,m}$$

$$= 5{,}451\,985\,275 \cdot 10^{-10} \text{ farad}$$

$$= 5{,}451\,985\,275 \cdot 10^{-4} \text{ mikrofarad}$$

$$= 545{,}198\,527\,5 \text{ pikofarad}$$

In tabel III.3. vindt men :

1 F $\hat{=}$ $\frac{\zeta^2}{10^9}$ ese van kapaciteit (met $\zeta = 2{,}997\,924\,58 \cdot 10^{10}$)

$\hat{=}$ $8{,}987\,551\,787 \cdot 10^{11}$ cm

Hieruit volgt :

545,198 527 5 pF = $545{,}198\,527\,5 \cdot 10^{-12}$ F $\hat{=}$ 490 cm.

3.6. Overzicht van de behandelde algemene groothedenvergelijkingen in verband met elektrische en elektromagnetische eenheden

In tabel IV.1. wordt een overzicht gegeven van de algemene groothedenvergelijkingen die in het es-CGS-stelsel, het em-CGS-stelsel, het niet-geratiunaliseerd MKSA-stelsel en het gerationaliseerd MKSA-stelsel (dat overeenstemt met het SI), de volgende krachtwerkingen (in vacuüm) weergeven :

- de krachtwerking tussen 2 elektrische ladingen (elektrostatische wet van Coulomb);
- de krachtwerking tussen 2 stroomvoerende evenwijdige geleiders;
- de krachtwerking tussen twee puntpolen (elektromagnetische wet van Coulomb).

De algemene groothedenvergelijkingen die voorkomen in tabel IV.1. werden hierna uitgewerkt aan de hand van een konkreet voorbeeld, met, voor het gerationaliseerd MKSA-stelsel (dus voor het SI), volgende waarden :

$Q_1 = Q_2 = 1$ C

$I_1 = I_2 = 1$ A

$p_1 = p_2 = 1$ Wb

$r = 1$ m

$l = 1$ m

Voor de andere eenhedenstelsels (es-CGS-stelsel, em-CGS-stelsel, niet-gerationaliseerd MKSA-stelsel) worden hiermede overeenstemmende hoeveelheden genomen; deze overeenstemmende hoeveelheden zijn weergegeven in tabel IV. 2.

Tabel IV.1. *Overzicht van enkele groothedenvergelijkingen gebruikelijk bij verschillende eenhedenstelsels*

	es-CGS-stelsel	em-CGS-stelsel	niet-gerationaliseerd MKSA-stelsel	gerationaliseerd MKSA-stelsel SI
krachtwerking tussen 2 elektrische ladingen (in vacuüm)	$F = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{\epsilon_0 \cdot r^2} = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$	$\left(F = \frac{c_0^2 \cdot Q_1 \cdot Q_2}{r^2}\right)$	$F = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{\epsilon_0 \cdot r^2}$	$F = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot r^2}$
krachtwerking tussen 2 stroomvoerende evenwijdige geleiders (in vacuüm)	$\left(F = \frac{2 I_1 \cdot I_2 \cdot l}{c_0^2 \cdot r}\right)$	$F = \frac{2 \mu_0 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot l}{r} = \frac{2 I_1 \cdot I_2 \cdot l}{r}$	$F = \frac{2 \mu_0 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot l}{r}$	$F = \frac{\mu_0 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot l}{2\pi \cdot r}$
krachtwerking tussen 2 puntpolen (in vacuüm)	$\left(F = \frac{c_0^2 \cdot p_1 \cdot p_2}{r^2}\right)$	$F = \frac{p_1 \cdot p_2}{\mu_0 \cdot r^2} = \frac{p_1 \cdot p_2}{r^2}$	$F = \frac{p_1 \cdot p_2}{\mu_0 \cdot r^2}$	$F = \frac{p_1 \cdot p_2}{4\pi \cdot \mu_0 \cdot r^2}$

Tabel IV 1. *Overeenstemmende keuzewijzen van enkele grootheden in verschillende eenhedenstelsels (met* $\zeta = 2{,}997\ 924\ 58 \cdot 10^{10}$)

	es-CGS-stelsel	em-CGS-stelsel	niet-gerationaliseerd MKSA-stelsel	gerationaliseerd MKSA-stelsel SI
permittiviteit	$\epsilon_0 = 1$	$\left(\epsilon_0 = \frac{1}{\zeta^2}\right)$	$\epsilon_0 = \frac{1}{10^{-7} \cdot (2{,}997\ 924\ 58 \cdot 10^8)^2} \frac{F}{m}$ $\approx \frac{1}{9 \cdot 10^9} \frac{F}{m}$	$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot (2{,}997\ 924\ 58 \cdot 10^8)^2} \frac{F}{m}$ $\approx \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \frac{F}{m}$
permeabiliteit	$\left(\mu_0 = \frac{1}{\zeta^2}\right)$	$\mu_0 = 1$	$\mu_0 = 10^{-7} \frac{H}{m}$	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$
lading	$Q_1 = Q_2 = \frac{\zeta}{10}$ ese van lading $\approx 3 \cdot 10^9$ ese van lading	$\left(Q_1 = Q_2 = \frac{1}{10}\right.$ eme van lading$\left.\right)$	$Q_1 = Q_2 = 1$ C	$Q_1 = Q_2 = 1$ C
stroom	$\left(I_1 = I_2 = \frac{\zeta}{10}\right.$ ese van stroom $\left.\approx 3 \cdot 10^9 \text{ ese van stroom}\right)$	$I_1 = I_2 = \frac{1}{10}$ eme van stroom	$I_1 = I_2 = 1$ A	$I_1 = I_2 = 1$ A
magnetische poolsterkte	$\left(p_1 = p_2 = \frac{10^8}{4\pi\zeta}\right.$ ese van poolsterkte$\left.\right)$	$p_1 = p_2 = \frac{10^8}{4\pi}$ eme van poolsterkte	$p_1 = p_2 = \frac{1}{4\pi}$ Wb	$p_1 = p_2 = 1$ Wb
afstand	$r = 100$ cm	$r = 100$ cm	$r = 1$ m	$r = 1$ m
lengte	$l = 100$ cm	$l = 100$ cm	$l = 1$ m	$l = 1$ m

Dit brengt mede dat telkens hetzelfde resultaat wordt bekomen bij de uitwerking volgens de verschillende eenhedenstelsels, zoals hierna blijkt (noteer hierbij dat 1 N = 10^5 dyn).

a. Krachtwerking tussen 2 elektrische ladingen (in vacuüm) :

- es-CGS-stelsel :

$$F = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$$

$$= \frac{2{,}997\ 924\ 58 \cdot 10^9 \text{ ese van lading} \times 2{,}997\ 924\ 58 \cdot 10^9 \text{ ese van lading}}{(100 \text{ cm})^2}$$

$$= 8{,}987\ 551\ 787 \cdot 10^{14} \text{ dyn}$$

$$\approx 9 \cdot 10^{14} \text{ dyn}$$

- em-CGS-stelsel :

$$F = \frac{c_o^2 \cdot Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$$

$$= \frac{\left(2{,}997\ 924\ 58 \cdot 10^{10} \frac{\text{cm}}{\text{s}}\right)^2 \times \frac{1}{10} \text{ eme van lading} \times \frac{1}{10} \text{ eme van lading}}{(100 \text{ cm})^2}$$

$$= 8{,}987\ 551\ 787 \cdot 10^{14} \text{ dyn}$$

$$\approx 9 \cdot 10^{14} \text{ dyn}$$

- niet-gerationaliseerd MKSA-stelsel :

$$F = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{\epsilon_o \cdot r^2}$$

$$= \frac{1 \text{ C} \times 1 \text{ C}}{\frac{1}{10^{-7} \cdot (2{,}997\ 924\ 58 \cdot 10^8)^2} \frac{\text{F}}{\text{m}} \times (1 \text{ m})^2}$$

$$= 8{,}987\ 551\ 787 \cdot 10^9 \text{ N}$$

$$\approx 9 \cdot 10^9 \text{ N}$$

- gerationaliseerd MKSA-stelsel, SI :

$$F = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{4\pi \cdot \epsilon_o \cdot r^2}$$

$$= \frac{1 \text{ C} \times 1 \text{ C}}{4\pi \times \frac{1}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot (2{,}997\ 924\ 58 \cdot 10^8)^2} \frac{\text{F}}{\text{m}} \times (1 \text{ m})^2}$$

$$= 8{,}987\ 551\ 787 \cdot 10^9 \text{ N}$$

$$\approx 9 \cdot 10^9 \text{ N}$$

b. Krachtwerking tussen 2 stroomvoerende evenwijdige geleiders (in vacuüm) :

- es-CGS-stelsel

$$F = \frac{2 I_1 \cdot I_2 \cdot l}{c_o^2 \cdot r}$$

$$= \frac{2 \times \frac{\zeta}{10} \text{ ese van stroom} \times \frac{\zeta}{10} \text{ ese van stroom} \times 100 \text{ cm}}{\left(2{,}997\ 924\ 58 \cdot 10^{10} \frac{\text{cm}}{\text{s}}\right)^2 \times 100 \text{ cm}}$$

$$= 2 \cdot 10^{-2} \text{ dyn}$$

- em-CGS-stelsel :

$$F = \frac{2 I_1 \cdot I_2 \cdot l}{r}$$

$$= \frac{2 \times \frac{1}{10} \text{ eme van stroom} \times \frac{1}{10} \text{ eme van stroom} \times 100 \text{ cm}}{100 \text{ cm}}$$

$$= 2 \cdot 10^{-2} \text{ dyn}$$

- niet-gerationaliseerd MKSA-stelsel :

$$F = \frac{2 \mu_o \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot l}{r}$$

$$= \frac{2 \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}} \times 1 \text{ A} \times 1 \text{ A} \times 1 \text{ m}}{1 \text{ m}}$$

$$= 2 \cdot 10^{-7} \text{ N}$$

- gerationaliseerd MKSA-stelsel, SI :

$$F = \frac{\mu_o \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot l}{2 \pi \cdot r}$$

$$= \frac{4 \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}} \times 1 \text{ A} \times 1 \text{ A} \times 1 \text{ m}}{2 \pi \times 1 \text{ m}}$$

$$= 2 \cdot 10^{-7} \text{ N}$$

c. Krachtwerking tussen 2 puntpolen :

- es-CGS-stelsel :

$$F = \frac{\zeta_o^2 \cdot p_1 \cdot p_2}{r^2}$$

$$= \frac{\left(2{,}997\ 924\ 58 \cdot 10^{10} \frac{\text{cm}}{\text{s}}\right)^2 \times \left(\frac{10^8}{4 \pi \cdot 2{,}997\ 924\ 58 \cdot 10^{10}} \text{ ese van pool-sterkte}\right)^2}{(100 \text{ cm})^2}$$

$$= 6{,}332\ 573\ 970 \cdot 10^9 \text{ dyn}$$

- em-CGS-stelsel :

$$F = \frac{p_1 \cdot p_2}{r^2}$$

$$= \frac{\frac{10^8}{4 \pi} \text{ eme van poolsterkte} \times \frac{10^8}{4 \pi} \text{ eme' van poolsterkte}}{(100 \text{ cm})^2}$$

$$= 6{,}332\ 573\ 970 \cdot 10^9 \text{ dyn}$$

- niet-gerationaliseerd MKSA-stelsel :

$$F = \frac{p_1 \cdot p_2}{\mu_o \cdot r^2}$$

$$= \frac{\frac{1}{4\pi}\ \text{Wb} \times \frac{1}{4\pi}\ \text{Wb}}{10^{-7}\ \frac{\text{H}}{\text{m}} \times (1\ \text{m})^2}$$

$$= 6{,}332\ 573\ 970 \cdot 10^4\ \text{N}$$

- gerationaliseerd MKSA-stelsel, SI :

$$F = \frac{p_1 \cdot p_2}{4\pi \cdot \mu_o \cdot r^2}$$

$$= \frac{1\ \text{Wb} \times 1\ \text{Wb}}{4\pi \times 4\pi \cdot 10^{-7}\ \frac{\text{H}}{\text{m}} \times (1\ \text{m})^2}$$

$$= 6{,}332\ 573\ 970 \cdot 10^4\ \text{N}$$

4. Geschiedenis van de ampère

De geschiedenis van de ampère kan als volgt samengevat worden :

1881 : ampère = is de eigen benaming voor de afgeleide eenheid van stroom in het kwadrantstelsel (KS-stelsel); symbool : A
= is dus de KS-eenheid van stroom = $L^{1/2} \cdot M^{1/2} \cdot s^{-1}$
= 10^{-1} eme van stroom (em-CGS-stelsel)

1908 : ampère = internationale eenheid van stroom, gebonden aan een materiële standaard; symbool : A_{int}

1948 : ampère = vierde grondeenheid (naast m, kg, s) in het Giorgi- of MKSA-stelsel; symbool : A
= absolute elektrische eenheid van stroom
≙ 10^{-1} eme van stroom (em-CGS-stelsel)

1960 : ampère = vierde grondeenheid in het SI; het SI is in feite ontstaan uit het (gerationaliseerd) MKSA-stelsel met als grondeenheden : m, kg, s en A, waaraan in 1960 de grondeenheden graad Kelvin (°K) en candela (cd) werden toegevoegd. De benaming graad Kelvin (symbool : °K) werd in 1967 gewijzigd in de benaming kelvin (symbool : K). In 1971 werd de mol (eenheid van hoeveelheid stof) eveneens als grondeenheid in het SI aangenomen, en werd in de rij van de grondeenheden gerangschikt op de zesde plaats waardoor de candela de zevende plaats inneemt.

Hierna volgt nog een overzicht betreffende de oorsprong van de elektrische eenheden in de verschillende eenhedenstelsels; hieruit kan ook de geschiedenis van de ampère worden afgeleid.

eenhedenstelsel	elektrische eenheden
TS grondeenheden : m, kgf, s	geen elektrische eenheden
CGS-stelsel (± 1840) grondeenheden : cm, g, s	elektrische eenheden afgeleid uit de grondeenheden cm, g, s : es-CGS-eenheden ($\epsilon_o = 1$) em-CGS-eenheden ($\mu_o = 1$)
MKS-stelsel grondeenheden : m, kg, s	geen elektrische eenheden
KS (1881) (absolute praktische elektrische eenheden; kwadrantstelsel) achteraf ingevoerde grondeenheden : L, M, s	basis : ohm en volt met : 1 ohm = 10^9 CGS-eme van weerstand 1 volt = 10^8 CGS-eme van spanning de overige elektrische eenheden zijn hieruit afgeleid, waaronder : 1 ampère = 10^{-1} CGS-eme van stroom
Internationale elektrische eenheden (1908)	basis : Ω_{int} en A_{int} beide eenheden zijn bepaald door een materiële standaard overige elektrische eenheden : afgeleid uit Ω_{int} en A_{int}
MKSA-stelsel of Giorgi-stelsel (1948) grondeenheden : m, kg, s, A	basis : A = grondeenheid (overeenstemmend met 10^{-1} CGS-eme van stroom) overige elektrische eenheden : afgeleid uit A en $\frac{N \cdot m}{s} = \frac{J}{s} = W$
SI (1960) grondeenheden : m, kg, s, A, K, mol (vanaf 1971), cd	basis : A = grondeenheid (overeenstemmend met 10^{-1} CGS-eme van stroom) overige elektrische eenheden : afgeleid uit A en $\frac{N \cdot m}{s} = \frac{J}{s} = W$

HOOFDSTUK V

EENHEDEN VAN TEMPERATUUR EN WARMTE

1. Temperatuur

1.1. Inleiding

Door het toevoegen van een vierde basisgrootheid, namelijk temperatuur, aan de drie basisgrootheden van de mechanische eenhedenstelsels (lengte, massa en tijd,of lengte, kracht en tijd), beschikte men over een eenhedenstelsel dat ook geschikt was voor het meten van grootheden uit de warmte- en de stralingsleer. De betrokken eenheid van temperatuur werd vroeger genoemd : graad Kelvin (°K), en thans (sinds 1967) kortweg : kelvin (K).

Aldus kwam men vroeger tot volgende eenhedenstelsels :
- aangevuld CGS-stelsel, met de 4 grondeenheden cm, g, s, °K
- aangevuld MKS-stelsel, met de 4 grondeenheden m, kg, s, °K
- aangevuld cm-gf-s-stelsel, met de 4 grondeenheden cm, gf, s, °K
- aangevuld m-kgf-s-stelsel, met de 4 grondeenheden m, kgf, s, °K

De kelvin werd als vijfde grondeenheid opgenomen in het thans algemeen aanvaard internationaal eenhedenstelsel (SI-eenheden). Dit stelsel omvat in het totaal 7 grondeenheden : de meter (m), het kilogram (kg), de sekonde (s), de ampère (A), de kelvin (K), de mol (mol), de candela (cd).

1.2. Termisch evenwicht, temperatuur

We beschouwen twee stelsels die met elkaar in kontakt gebracht worden, van elkaar slechts gescheiden door een diaterme wand en voor het overige volledig van de omgeving geïsoleerd. Een diaterme wand is een wand die alle stofwisseling of onderlinge mechanische wisselwerking (wederzijdse inwerking) tussen beide stelsels verhindert, doch wel warmteovergang van het ene stelsel naar het andere toelaat.

Hoewel beide stelsels door een diaterme wand van elkaar gescheiden zijn, stelt men een toestandsverandering in beide stelsels vast. Inge-

volge de termische wisselwerking tussen beide stelsels, stelt zich een termisch evenwicht in.

De ervaring toont aan dat twee stelsels, die zich in termisch evenwicht bevinden met een derde stelsel, ook onderling in termisch evenwicht staan.

Hieruit leidt men in de termodynamika het bestaan af van een toestandsgrootheid, die temperatuur wordt genoemd. Stelsels waarvan bij een goed termisch kontakt de fysische eigenschappen niet veranderen, zijn in termisch evenwicht; men kent hen dezelfde temperatuur toe. Bij een gas kan de betrokken grootheid (de temperatuur) worden bepaald als een funktie van volume en druk. Volume en druk kan men dusdanig laten variëren (onder invloed van een uitwendige kracht en van warmtetoevoer of warmteafvoer) dat de betrokken grootheid konstant blijft.

In het algemeen geldt :

- de temperatuur van een stelsel is een toestandsgrootheid die alleen van de eigenschappen van het betrokken stelsel afhangt (bijvoorbeeld de temperatuur van een bepaalde hoeveelheid gas ligt vast als de druk en het volume gekend zijn);
- stelsels die met elkaar in termisch evenwicht staan, hebben dezelfde temperatuur;
- stelsels die met elkaar niet in termisch evenwicht staan, hebben niet dezelfde temperatuur.

1.3. Termometers en empirische temperaturen

Termometers zijn toestellen die dienen om de temperatuur te meten. Ze bezitten een nauwkeurig meetbare eigenschap, die zich wijzigt volgens de waargenomen temperatuur. Bij een vloeistoftermometer dient de lengte van een vloeistofkolom in een capillaire buis als "termometrische" eigenschap. Bij een gastermometer kan men ofwel de druk als "termometrische" eigenschap benutten wanneer men het volume van een bepaalde hoeveelheid gas konstant houdt, ofwel het volume wanneer men de druk konstant houdt. Temperatuurmeting met behulp van weerstandstermometers berust op het feit, dat de elektrische weerstand van metalen (vooral platina wordt aangewend)

zich wijzigt bij veranderende temperatuur. De temperatuurmeting met behulp van termokoppels is gesteund op het meten van een elektrische spanning.

Een ervaringswet uit de termodynamika zegt dat twee stelsels die zich in termisch evenwicht bevinden met een derde stelsel, zich ook ten opzichte van elkaar in termisch evenwicht bevinden. Teneinde vast te stellen of twee stelsels A en B zich in termisch evenwicht met elkaar bevinden, kan men ze bijgevolg achtereenvolgens in termisch kontakt brengen met een stelsel C. Indien de massa van het stelsel C zeer klein is in vergelijking met de massa van de stelsels A en B, zal de toestandsverandering (temperatuurverandering) van de stelsels A en B verwaarloosbaar klein zijn gedurende het instellen van het termisch evenwicht. Brengt men nu eerst het stelsel C in kontakt met het stelsel A, dan zal in het stelsel C een toestandsverandering (temperatuurverandering) optreden, die zich uit in een wijziging van de "termometrische" eigenschap (bijvoorbeeld een volumeverandering, een drukverandering, een elektrische weerstandsverandering, enz. ...). Na het bereiken van het termisch evenwicht heeft deze toestandsveranderlijke (de temperatuur) en dus ook de "termometrische" eigenschap van het stelsel C een nieuwe vaste waarde aangenomen. Brengt men nu het stelsel C in kontakt met het stelsel B, dan zal zich in het stelsel C geen toestandsverandering voordoen indien de stelsels B en A zich in termisch evenwicht bevonden, terwijl er zich wel een toestandsverandering in het stelsel C zal voordoen wanneer de stelsels B en A zich niet in termisch evenwicht bevonden. Het is dus mogelijk een bepaalde eigenschap van het stelsel C ("termometrische" eigenschap) aan te wenden om na te gaan, of er al dan niet termisch evenwicht heerst tussen twee stelsels. Het stelsel C noemt men een termometer.

Met behulp van een dergelijke termometer kan men ook een willekeurige empirische temperatuurschaal vastleggen, door aan de vastgestelde waarden van de "termometrische" eigenschap, bepaalde temperatuurwaarden toe te kennen. Nemen we bijvoorbeeld een vloeistoftermometer, waarvoor we twee willekeurig gekozen vaste punten bepalen : bij een lengte l_0 van de vloeistofkolom kiezen we als temperatuur een willekeurige waarde ϑ_0, en bij een lengte l_1 een willekeurige waarde ϑ_1. Op de betrokken termometer wordt thans een schaalverdeling aangebracht waartoe alvast de twee zoëven

besproken temperaturen ϑ_o en ϑ_1 behoren. De afstand $l_1 - l_o$ wordt thans ingedeeld in een aantal gelijke delen, gelijk aan de waarde van het temperatuurverschil $\vartheta_o - \vartheta_1$. De temperatuur ϑ die wordt afgelezen bij een vloeistofkolom met lengte l, voldoet dan per definitie aan de uitdrukkingen :

$$\frac{\vartheta - \vartheta_o}{l - l_o} = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_o}{l_1 - l_o}$$

$$\vartheta = \vartheta_o + \frac{\vartheta_1 - \vartheta_o}{l_1 - l_o} \cdot (l - l_o)$$

Als vaste punten koos Fahrenheit (1686-1736) in 1714 het smeltpunt van ijs en het kookpunt van water (telkens onder normale atmosferische druk), met gebruikname van een kwiktermometer. Fahrenheit duidde de temperatuur van het smeltpunt van ijs aan met 32 °F en de temperatuur van het kookpunt van water met 212 °F. De afstand waarover de vloeistofzuil zich uitzet tussen beide vaste punten, werd in 180 gelijke delen ingedeeld.

Celsius (1701-1744) nam in 1742 dezelfde vaste punten aan, eveneens met gebruikname van een kwiktermometer, doch hij kende aan de betrokken punten een andere waarde toe. Oorspronkelijk duidde Celsius de temperatuur van het smeltpunt van ijs aan met 100 °C en de temperatuur van het kookpunt van water met 0 °C. Later ging men over tot de thans nog geldende aanduiding waarbij de temperatuur van het smeltpunt van ijs aangeduid wordt met 0 °C en de temperatuur van het kookpunt van water met 100 °C. De afstand waarover de vloeistofkolom van de termometer zich uitzet tussen beide vaste punten, werd in 100 gelijke delen ingedeeld.

Het nadeel van deze empirische temperaturen is gelegen in het feit, dat zij niet steeds overeenstemmen, zelfs niet wanneer dezelfde vaste punten gekozen worden. Zo blijkt dat termometers met verschillende vloeistofvulling, die op de vaste punten met elkaar overeenstemmen, een onderlinge afwijking kunnen vertonen wanneer ze in termisch evenwicht gebracht worden met een stelsel, dat een temperatuur heeft die niet gelijk is aan de temperatuur van de vaste punten. Een kwiktermometer en een alkoholtermometer kunnen aldus voor een zelfde te meten temperatuur een verschillende aanduiding geven, omdat de uitzetting van kwik en van alkohol in funktie van de temperatuur, niet helemaal op dezelfde wijze verloopt.

Het is precies om deze reden dat men spreekt van "empirische" temperaturen, omdat de gemeten waarde steeds afhankelijk is van toevallige eigenschappen van het meetinstrument.

1.4. Empirische temperatuur, gemeten met behulp van een gastermometer

Een gastermometer bestaat in principe uit een bepaalde hoeveelheid gas, die in een konstant volume opgesloten zit, en waarvan de druk gemeten wordt met behulp van een drukmeter. Het geheel dient klein te zijn ten opzichte van de stelsels, waarmede een termisch evenwicht dient verwezenlijkt te worden. Met behulp van de druk p, die op de drukmeter wordt afgelezen nadat het termisch evenwicht bereikt is tussen de gastermometer en het stelsel waarvan de temperatuur dient gemeten te worden, wordt de empirische temperatuur ϑ hier per definitie eenvoudig als volgt berekend :

$$\vartheta = \vartheta_o \cdot \frac{p}{p_o}$$

Hierin is p_o de druk, die de gastermometer aantoont bij het vast punt met de temperatuur ϑ_o. Vooreerst moet het vast punt vastgelegd worden, waaraan een willekeurig te kiezen waarde ϑ_o toegekend wordt. Sedert 1954 wordt als enig vast punt het tripelpunt van water genomen. Dit is die toestand, waarin de drie fasen waterdamp, vloeibaar water en ijs, in onderling evenwicht kunnen samen bestaan onder een druk gelijk aan de eigen dampspanning. Zolang de drie fasen in onderling evenwicht samen zijn, blijven de temperatuur en de dampspanning (die in het tripelpunt 0,006 315 bar hetzij 631,5 Pa bedraagt) van dit stelsel konstant. Men gaf de voorkeur aan het tripelpunt van water als vast punt, daar de temperatuur van het tripelpunt van water met meer zekerheid kan gereproduceerd worden dan de temperatuur van andere punten.

De temperatuur van het tripelpunt van water heeft men willekeurig, doch rekening houdend met de historische ontwikkeling, bepaald op exact 273,16 kelvin. Thans bepaalt men de druk p_o, die de gastermometer vertoont wanneer hij in termisch evenwicht wordt gebracht met vloeibaar water, waterdamp en ijs in het tripelpunt. Eenmaal dat de druk p_o gekend is (voor de welbepaalde hoeveelheid gas die onder konstant volume gehouden wordt), kan men nu elke willekeurige (empirische) temperatuur berekenen door het meten van de druk p die de gastermometer aanwijst wanneer hij

met de betrokken stelsels in evenwicht wordt gebracht. De gezochte temperatuur wordt dan gegeven door :

$$\vartheta = 273{,}16\ \text{K} \cdot \frac{p}{p_o}$$

1.5. Termodynamische temperatuur

De vraag stelde zich of het mogelijk was, een absolute of universele temperatuur te definiëren, zodat aan een stelsel in een bepaalde toestand steeds dezelfde temperatuurwaarde toegekend wordt, onafhankelijk van de soort termometer waarmede gemeten wordt. Bij de definitie van deze absolute temperatuur mogen de toevallige eigenschappen van de aangewende termometer niet tussenkomen. In 1848 kwam Thomson (Lord Kelvin, 1824 - 1907) tot de bevinding, dat een dergelijke temperatuur kon bepaald worden op basis van de tweede hoofdwet uit de termodynamika. De betrokken temperatuur die universeel geldig is en steunt op fysische wetten, wordt termodynamische temperatuur genoemd. De termodynamische temperatuur heeft een absoluut karakter, en hangt niet meer af van de toevallige eigenschappen van een termometervloeistof of van een gas zoals dit wel het geval is bij empirische temperaturen. De termodynamische temperatuur werd vroeger ook "absolute temperatuur" genoemd.

De termodynamische temperatuur kan experimenteel worden verwezenlijkt door de temperatuur van de ideale gastermometer. Keren we eerst even terug tot de empirische temperatuur, gemeten met behulp van een gastermometer (uiteraard gevuld met een reëel gas), en gegeven door de uitdrukking :

$$\vartheta = 273{,}16\ \text{K} \cdot \frac{p}{p_o}$$

Uit de ervaring is gebleken dat bij een temperatuurmeting de verhouding $\frac{p}{p_o}$ in zeer lichte mate afhankelijk is enerzijds van de hoeveelheid gas die in het konstant volume opgesloten is en anderzijds van de aard van het gas. Indien het gas in de gastermometer zich zou gedragen als een ideaal gas, zou men geen empirische temperatuur bekomen, doch wel de termodynamische temperatuur, vermits de verhouding $\frac{p}{p_o}$ in dit geval niet meer zou afhangen van de hoeveelheid gas of van de aard van het gas. Naarmate echter een reëel gas meer verdund wordt, gaat het zich meer gedragen als

een ideaal gas. Naarmate bijgevolg steeds minder gas in het konstant gehouden volume ingesloten is (dus naarmate p_o kleiner is), nadert de waarde van de verhouding $\frac{p}{p_o}$ dan ook tot eenzelfde waarde, onafhankelijk van de de aard van het gas.

Wanneer we nu een temperatuur definiëren door de vergelijking :

$$T = 273{,}16\ \text{K} \cdot \lim \frac{p}{p_o} \quad \text{met} \quad p_o \to 0$$

dan is de betrokken temperatuur T onafhankelijk van de eigenschappen van het aangewende gas. In de termodynamika wordt aangetoond, dat deze temperatuur identiek is aan de absolute of termodynamische temperatuur die wordt afgeleid uit de tweede hoofdwet. Termodynamische temperaturen worden in het SI aangegeven in de eenheid kelvin (K).

Het tripelpunt van water vormt (naast het absoluut nulpunt) het enige vast punt van de termodynamische temperatuurschaal. Aan dit vast punt werd per definitie de temperatuur T = 273,16 K toegekend, zoals blijkt uit de derde resolutie van de 10de CGPM (1954) :

Résolution 3

La Dixième Conférence Générale des Poids et Mesures décide de définir l'échelle thermodynamique de température au moyen du point triple de l'eau comme point fixe fondamental, en lui attribuant la température 273,16 *degrés Kelvin, exactement.*

Hierdoor is de termodynamische temperatuurschaal of termodynamische kelvinschaal volledig bepaald.

Door de 13de CGPM (1967) werd de benaming "graad Kelvin" (met als symbool : °K) gewijzigd in "kelvin" (met als symbool : K).

De eenheid kelvin is bijgevolg gedefinieerd door de vergelijking :

$$1\ \text{K} = \frac{T_{tr}}{273{,}16}$$

met T_{tr} = de termodynamische temperatuur van het tripelpunt van water (die per definitie exact gelijk is aan 273,16 K).

De definitie van de kelvin luidt als volgt :
"De kelvin, eenheid van termodynamische temperatuur, is het 1/273,16 gedeelte van de termodynamische temperatuur van het tripelpunt van water" (13de CGPM - 1967 - resolutie 4).

Het vastleggen van het nulpunt van de termodynamische kelvinschaal (T = 0 K) is gesteund op fysische wetten (tweede hoofdwet van de termodynamika); de kelvinschaal begint immers aan het absoluut nulpunt. Het bestaan van het absoluut nulpunt kan ook worden verklaard door de kinetische gasteorie, waarbij de druk wordt voorgesteld als het gevolg van de botsingen van de gasmolekulen op de wanden. Door het afkoelen van een ideaal gas onder konstant volume verandert de druk per graad Celsius temperatuurafname met $\frac{1}{273,15}$ van zijn waarde bij 0 °C. Indien we het (ideaal) gas zouden kunnen afkoelen tot 273,15 °C onder 0 °C zou de druk op nul gevallen zijn, hetgeen betekent dat de gasmolekulen zich dan niet meer bewegen. We bekomen aldus een natuurlijke onderste grens van de temperatuur, die we het absoluut nulpunt noemen.

Volgens de tweede hoofdwet van de termodynamika kan de termodynamische temperatuur T nooit negatief zijn.

In de Angelsaksische landen wordt naast de temperatuureenheid kelvin ook de kleinere eenheid graad Rankine (°R) gebruikt als eenheid van termodynamische temperatuur. Tussen beide eenheden bestaat volgend verband :

$$1\ °R = \frac{5}{9}\ K$$

Als SI-eenheid van temperatuur geldt echter alleen de kelvin.

1.6. Termodynamische celsiustemperatuur, termodynamische fahrenheittemperatuur

De termodynamische celsiustemperatuur is per definitie bepaald als volgt :

$$t = T - 273,15\ K$$

De getalwaarde 273,15 is een exacte waarde en als dusdanig internationaal vastgelegd. Termodynamische celsiustemperaturen t zijn bijgevolg

temperatuurverschillen tegenover de vaste termodynamische temperatuur T = 273,15 K. De eenheid van termodynamische celsiustemperatuur t is bijgevolg eveneens de kelvin. Het is nochtans de gewoonte, voor termodynamische celsiustemperaturen het speciaal teken °C te gebruiken zoals bij empirische celsiustemperaturen, zodat de graad Celsius (°C) te beschouwen is als een speciale naam voor kelvin wanneer men de termodynamische celsiustemperatuur weergeeft. Men zou het zo kunnen stellen : in plaats van te zeggen "de termodynamische celsiustemperatuur (als temperatuurverschil) is 20 K" zegt men steeds : "de temperatuur is 20 °C".

Vóór 1954 werd de celsiustemperatuur (empirische temperatuur) bepaald door twee willekeurig gekozen vaste punten : het smeltpunt van ijs (0 °C) en het kookpunt van water (100 °C), telkens onder normale atmosferische druk (101 325 Pa). Deze bepaling werd in 1954 opgeheven, ten voordele van de definitie $t = T - 273{,}15$ K. Nochtans behouden na de nieuwe definitie van de celsiustemperatuur, in het kader van de meetnauwkeurigheid, het smeltpunt van ijs en het kookpunt van water de temperaturen 0 °C en 100 °C. De termodynamische temperatuur T = 273,15 K stemt in de termodynamische celsiusschaal per definitie absoluut nauwkeurig overeen met t = 0 °C. Deze temperatuur is praktisch gelijk aan de temperatuur van smeltend ijs, daar volgens nauwkeurige metingen van de termodynamische temperatuur van smeltend ijs, men de volgende waarde bekomt :

$$T = (273{,}15 \pm 0{,}0002)\ \text{K}$$

waaruit volgt : $t = (0 \pm 0{,}0002)$ °C

Het nulpunt van de termodynamische celsiusschaal (dat overeenstemt met de termodynamische temperatuur T = 273,15 K) stemt dus met een mogelijke fout van ± 0,0002 K na, overeen met het smeltpunt van ijs.

Te noteren valt, dat hiertegenover de termodynamische temperatuur en de termodynamische celsiustemperatuur van het tripelpunt van water per definitie exact gelijk zijn respektievelijk aan 273,16 K en 0,01 °C.

Ook de termodynamische celsiustemperatuur van kokend water onder normale atmosferische druk (101 325 Pa) verschilt slechts in zeer geringe mate van de empirische celsiustemperatuur van kokend water die nauwkeurig

100 °C bedraagt. Volgens de meest recente metingen bekomt men :

$$T = (373{,}1464 \pm 0{,}0036)\ \text{K}$$

waaruit volgt : $t = (99{,}9964 \pm 0{,}0036)\ ^\circ\text{C}$

De termodynamische fahrenheittemperatuur wordt bekomen door omrekening uit de termodynamische celsiustemperatuur. Vóór 1954 werd de fahrenheittemperatuur (empirische temperatuur) eveneens door twee willekeurig gekozen vaste punten bepaald.

Het verschil tussen enerzijds de termodynamische celsiustemperatuur en de termodynamische fahrenheittemperatuur en anderzijds de empirische celsiustemperatuur en de empirische fahrenheittemperatuur is eerder van teoretisch belang. Door het invoeren van de termodynamische celsiustemperatuur en de termodynamische fahrenheittemperatuur, komen de vaste punten "temperatuur van smeltend ijs" en "temperatuur van kokend water" te vervallen. In het SI wordt alleen de termodynamische celsiustemperatuur erkend (en niet de termodynamische fahrenheittemperatuur).

1.7. Internationale temperatuurschaal

Nauwkeurige metingen met gastermometers zijn buitengewoon moeilijk en tijdrovend. Daarom werd een gemakkelijk te hanteren temperatuurschaal ontworpen, de zogenaamde internationale temperatuurschaal. Hierbij ligt de bedoeling voor dat een temperatuur volgens de internationale temperatuurschaal zo nauwkeurig mogelijk de termodynamische temperatuur zou benaderen. Hiertoe werd van een aantal gemakkelijk te reproduceren vaste punten de termodynamische temperatuur zo nauwkeurig mogelijk gemeten; deze vaste punten maken deel uit van de internationale temperatuurschaal.

De internationale temperatuurschaal werd voor het eerst aangenomen in 1927; in 1948, 1968 en 1975 werd ze gewijzigd of aangevuld. De internationale temperatuurschaal ("International Practical Temperature Scale of 1968, amended edition of 1975", goedgekeurd door de 15de CGPM) ziet er uit als volgt (hierbij gaat het steeds om evenwichtstoestanden) :

vaste punten	T in K	t in °C
- tripelpunt van waterstof	13,81	- 259,34
- evenwicht tussen de vloeibare en de dampvormige fase van waterstof bij een druk van 33 330,6 Pa (= $\frac{25}{76}$ atm)	17,042	- 256,108
- kookpunt van waterstof onder normale atmosferische druk	20,28	- 252,87
- kookpunt van neon onder normale atmosferische druk	27,102	- 246,048
- tripelpunt van zuurstof	54,361	- 218,789
- tripelpunt van argon	83,798	- 189,352
- kookpunt van zuurstof onder normale atmosferische druk	90,188	- 182,962
- tripelpunt van water	273,16 (exact)	0,01 (exact)
- kookpunt van water onder normale atmosferische druk	373,15	100
- stolpunt van tin onder normale atmosferische druk	505,1181	231,9681
- stolpunt van zink onder normale atmosferische druk	692,73	419,58
- stolpunt van zilver onder normale atmosferische druk	1235,08	961,93
- stolpunt van goud onder normale atmosferische druk	1337,58	1064,43

De internationale temperatuurschaal berust enerzijds op de hierboven aangegeven vaste punten (evenwichtstemperaturen) waaraan welbepaalde waarden werden toegekend, en anderzijds op nauwkeurig vastgelegde formules, die de betrekking weergeven tussen de gezochte temperatuur en de aanwijzing van meetinstrumenten, die bij deze vaste punten geijkt werden.

Verder werden ook de meetinstrumenten zelf vastgelegd en de meetmetodes omschreven die dienen toegepast te worden om temperaturen te meten die gelegen zijn in de intervallen tussen de vaste punten. Hierbij wordt

gebruik gemaakt van volgende fysische eigenschappen die zich wijzigen in funktie van de temperatuur :

- tussen het tripelpunt van waterstof (13,81 K ≙ - 259,34 °C) en het stolpunt van antimoon (903,89 K ≙ 630,74 °C) : de verandering van de elektrische weerstand van een platina-draad (platina-weerstandstermometer);
- tussen het stolpunt van antimoon (903,89 K ≙ 630,74 °C) en het stolpunt van goud (1337,58 K ≙ 1064,43 °C) : de termo-elektrische spanning opgewekt door een termokoppel platina/platinarhodium (10 % rhodium).

Boven het stolpunt van goud wordt de internationale temperatuur gegeven door de stralingswet van Planck. Bij temperaturen van omstreeks 2000 °C is de orde van grootte van eventuele fouten, gelijk aan enige graden Celsius. Bijgevolg is het zinloos om bijvoorbeeld bij temperaturen boven 1500 °C, nog tienden van een graad aan te geven.

De internationale temperatuurschaal mag niet beschouwd worden als een zelfstandige temperatuurschaal; het is slechts een middel dat tot doel heeft dat de bekomen waarde zoveel mogelijk de waarde van de termodynamische temperatuur zou benaderen.

1.8. Temperatuurverschil, temperatuurtolerantie, samengestelde eenheden waarin de eenheid van temperatuur voorkomt

Bij het gebruik van het SI is het aanbevolen, het gebruik van de eenheid °C te beperken uitsluitend tot het aangeven van de temperatuur (het temperatuurniveau) volgens de celsiusschaal.

Temperatuurverschillen en -veranderingen worden bij voorkeur in kelvin (K) uitgedrukt; bijvoorbeeld :

$$\Delta T = 293{,}15\ \text{K} - 263{,}15\ \text{K} = 30\ \text{K}$$

$$\Delta t = 20\ ^\circ\text{C} - (-\ 10\ ^\circ\text{C}) = 30\ \text{K (en niet : 30 °C)}$$

Wanneer de termodynamische temperatuur T voorgesteld wordt onder de vorm :

$$T = T_0 + t = 273{,}15\ \text{K} + t$$

schrijft men bijvoorbeeld voor een temperatuur t = 20 °C :

$$T = T_0 + t = 273{,}15\ \text{K} + 20\ \text{K}$$
$$= 293{,}15\ \text{K}$$

Bij de opgave van temperatuurtoleranties worden volgende schrijfwijzen aanbevolen :

T = (298,15 ± 0,1) K

t = (25 ± 0,1) °C

T = 298,15 K ± 0,1 K

t = 25 °C ± 0,1 K (ook toegestaan : t = 25 °C ± 0,1 °C)

In het SI komt als eenheid van temperatuur in samengestelde eenheden uitsluitend K voor en nooit °C; bijvoorbeeld :

- SI-eenheid van soortelijke warmtekapaciteit : $\frac{J}{kg \cdot K}$
- SI-eenheid van warmtegeleidingskoëfficiënt : $\frac{W}{m \cdot K}$
- SI-eenheid van warmtedoorgangskoëfficiënt : $\frac{W}{m^2 \cdot K}$
- SI-eenheid van warmte-isolatiekoëfficiënt : $\frac{K \cdot m^2}{W}$

1.9. Weergave van een temperatuur volgens de verschillende temperatuurschalen

Termodynamische temperaturen, uitgedrukt enerzijds in kelvin (K) en anderzijds in graden Rankine (°R), mogen onderling gelijkgesteld worden met behulp van het gelijkheidsteken =, bijvoorbeeld : 400 K = 720 °R.

In alle andere gevallen dient men het teken ≙ ("stemt overeen met") te gebruiken. Men mag derhalve niet schrijven : 32 °F = 0 °C

373,15 K = 100 °C

doch wel : 32 °F ≙ 0 °C

373,15 K ≙ 100 °C

De reden hiervoor is gelegen in het feit, dat zowel de kelvin- als de rankinetemperatuurschaal bij het absolute nulpunt (een begrip uit de termodynamika) respektievelijk de temperatuur 0 K en 0 °R hebben, terwijl

de andere schalen ontstaan zijn door een willekeurige verschuiving van het schaal-nulpunt. Tussen de getalwaarde van een temperatuur, uitgedrukt in K en de getalwaarde van dezelfde temperatuur, uitgedrukt in °R, bestaat steeds dezelfde verhouding; dit is echter niet het geval wanneer men bijvoorbeeld een celsiustemperatuur of een fahrenheittemperatuur vergelijkt met de overeenstemmende temperatuur uitgedrukt in K of °R.

Voor het opstellen van de betrekkingen waarmede een temperatuur wordt weergegeven in verschillende eenheden, wordt gebruik gemaakt van volgende gegevens :

- ☆ het absoluut nulpunt = 0 K = 0 °R
- ☆ het nulpunt van de celsiusschaal (termodynamische celsiustemperatuur) stemt per definitie overeen met de termodynamische temperatuur T = 273,15 K
- ☆ de temperatuur t = 32 °F (termodynamische fahrenheittemperatuur) stemt per definitie overeen met het nulpunt van de celsiusschaal (termodynamische celsiustemperatuur) :

  32 °F ≙ 0 °C
- ☆ een temperatuurverschil van 1 K is gelijk aan :
  - een temperatuurverschil van 1 °C
  - een temperatuurverschil van $\frac{9}{5}$ °R
  - een temperatuurverschil van $\frac{9}{5}$ °F

Voor het weergeven van een temperatuur in de verschillende temperatuurschalen gelden volgende betrekkingen :

$$w\ °C \triangleq (\tfrac{9}{5} \cdot w + 32)\ °F$$

$$\triangleq \tfrac{9}{5} \cdot (w + \tfrac{5}{9} \cdot 32)\ °F$$

$$\triangleq \tfrac{9}{5} \cdot (w + 17\tfrac{7}{9})\ °F$$

$$\triangleq \tfrac{9}{5} \cdot (w + 17{,}777\ldots)\ °F$$

$$w\ °C \triangleq (w + 273{,}15)\ K$$

$$w\ °C \triangleq \tfrac{9}{5} \cdot (w + 273{,}15)\ °R$$

$\triangleq (\frac{9}{5} w + \frac{9}{5} \cdot 273{,}15)$ °R

$\triangleq (\frac{9}{5} w + 491{,}67)$ °R

x °F $\triangleq \frac{5}{9} \cdot (x - 32)$ °C

$\triangleq (\frac{5}{9} x - \frac{5}{9} \cdot 32)$ °C

$\triangleq (\frac{5}{9} x - 17\frac{7}{9})$ °C

$\triangleq (\frac{5}{9} x - 17{,}777\ ...)$ °C

x °F $\triangleq \frac{5}{9} \cdot (x - 32 + \frac{9}{5} \cdot 273{,}15)$ K

$\triangleq \frac{5}{9} \cdot (x - 32 + 491{,}67)$ K

$\triangleq \frac{5}{9} \cdot (x + 459{,}67)$ K

$\triangleq (\frac{5}{9} x - 17\frac{7}{9} + 273{,}15)$ K

$\triangleq (\frac{5}{9} x + 255\frac{67}{180})$ K

$\triangleq (\frac{5}{9} x + 255{,}372\ ...)$ K

x °F $\triangleq (x - 32 + \frac{9}{5} \cdot 273{,}15)$ °R

$\triangleq (x - 32 + 491{,}67)$ °R

$\triangleq (x + 459{,}67)$ °R

y K $\triangleq (y - 273{,}15)$ °C

y K $\triangleq \frac{9}{5} \cdot (y - 273{,}15 + 17\frac{7}{9})$ °F

$\triangleq \frac{9}{5} \cdot (y - 255\frac{67}{180})$ °F

$\triangleq \frac{9}{5} \cdot (y - 255{,}372\ ...)$ °F

$\triangleq (\frac{9}{5} y - \frac{9}{5} \cdot 273{,}15 + 32)$ °F

$\triangleq (\frac{9}{5} y - 491{,}67 + 32)$ °F

$\triangleq (\frac{9}{5} y - 459{,}67)$ °F

y K $\triangleq \frac{9}{5} y$ °R

$$z\ °R \triangleq (\frac{5}{9}\ z - 273{,}15)\ °C$$

$$\triangleq \frac{5}{9} \cdot (z - \frac{9}{5} \cdot 273{,}15)\ °C$$

$$\triangleq \frac{5}{9} \cdot (z - 491{,}67)\ °C$$

$$z\ °R \triangleq (z - \frac{9}{5} \cdot 273{,}15 + 32)\ °F$$

$$\triangleq (z - 491{,}67 + 32)\ °F$$

$$\triangleq (z - 459{,}67)\ °F$$

$$z\ °R \triangleq \frac{5}{9}\ z\ K$$

De betrokken omrekeningen kunnen ook op een andere wijze worden voorgesteld. Stellen we de getalwaarden van eenzelfde temperatuur, uitgedrukt in °C, °F, K en °R voor respektievelijk door $\{t\}_{°C}$, $\{t\}_{°F}$, $\{T\}_K$ en $\{T\}_{°R}$. Dan gelden volgende betrekkingen tussen de betrokken getalwaarden :

$$\{T\}_K = \{t\}_{°C} + 273{,}15$$

$$= \frac{5}{9}\left(\{t\}_{°F} + 459{,}67\right) = \frac{5}{9}\{t\}_{°F} + 255\ \frac{67}{180}$$

$$= \frac{5}{9}\{t\}_{°F} + 255{,}372\ \ldots$$

$$= \frac{5}{9}\{T\}_{°R}$$

$$\{t\}_{°C} = \{T\}_K - 273{,}15$$

$$= \frac{5}{9}\left(\{t\}_{°F} - 32\right) = \frac{5}{9}\{t\}_{°F} - 17\ \frac{7}{9}$$

$$= \frac{5}{9}\{t\}_{°F} - 17{,}777\ \ldots$$

$$= \frac{5}{9}\left(\{T\}_{°R} - 491{,}67\right) = \frac{5}{9}\{T\}_{°R} - 273{,}15$$

$$\{T\}_{°R} = \{t\}_{°F} + 459{,}67$$

$$= \frac{9}{5}\left(\{t\}_{°C} + 273{,}15\right) = \frac{9}{5}\{t\}_{°C} + 491{,}67$$

$$= \frac{9}{5}[T]_K$$

$$\{t\}_{°F} = \{T\}_{°R} - 459{,}67$$

$$= \frac{9}{5}\left(\{t\}_{°C} + 17\,\frac{7}{9}\right) = \frac{9}{5}\{t\}_{°C} + 32$$

$$= \frac{9}{5}\{T\}_{K} - 459{,}67 = \frac{9}{5}\left(\{T\}_{K} - 255\,\frac{67}{180}\right)$$

$$= \frac{9}{5}\left(\{T\}_{K} - 255{,}372\ \ldots\right)$$

Voorbeelden :

☆ absoluut nulpunt :
0 K ≙ - 273,15 °C ≙ 0 °R ≙ - 459,67 °F

☆ nulpunt van de fahrenheitschaal :
0 °F ≙ 459,67 °R ≙ - 17,777 ... °C ≙ 255,372 ... K

☆ smeltpunt van ijs (onder normale atmosferische druk) :
0 °C ≙ 273,15 K ≙ 32 °F ≙ 491,67 °R

☆ tripelpunt van water :
273,16 K ≙ 0,01 °C ≙ 491,688 °R ≙ 32,018 °F

☆ kookpunt van water (onder normale atmosferische druk) :
100 °C ≙ 373,15 K ≙ 212 °F ≙ 671,67 °R

☆ enkele willekeurige temperaturen :
- 50 °C ≙ 223,15 K ≙ - 58 °F ≙ 401,67 °R
50 °C ≙ 323,15 K ≙ 122 °F ≙ 581,67 °R
- 50 °F ≙ 409,67 °R ≙ - 45,555 ... °C ≙ 227,594 ... K
50 °F ≙ 509,67 °R ≙ 10 °C ≙ 283,15 K
200 K ≙ - 73,15 °C ≙ 360 °R ≙ - 99,67 °F
400 K ≙ 126,85 °C ≙ 720 °R ≙ 260,33 °F
200 °R ≙ - 259,67 °F ≙ 111,111 ... K ≙ - 162,038 ... °C
400 °R ≙ 59,67 °F ≙ 222,222 ... K ≙ - 50,927 ... °C

☆ Daar w °C ≙ $(\frac{9}{5}\,w + 32)$ °F en x °F ≙ $\frac{5}{9}\,(x - 32)$ °C, zullen de getalwaarden x en w aan elkaar gelijk zijn voor de waarde van w gegeven door de vergelijking $w = \frac{9}{5}\,w + 32$, of voor de waarde van x gegeven door de vergelijking $x = \frac{5}{9}\,(x - 32)$; men bekomt : $w = x = - 40$:

- 40 °C ≙ 233,15 K ≙ 419,67 °R ≙ - 40 °F

1.10. Verband tussen de temperatuur en de kinetische translatie-energie van de molekulen van een ideaal gas

1.10.1. Enkele gegevens uit de kinetische gasteorie

In verband met de snelheid van de molekulen van een gas, wordt onderscheid gemaakt tussen drie snelheden, gedefinieerd als volgt (met w = werkelijke molekuulsnelheid en N = aantal molekulen in het betrokken volume gas) :

- het gemiddeld snelheidskwadraat $(w^2)_g = \frac{\Sigma w^2}{N}$; deze grootheid wordt gebruikt bij de berekening van de gemiddelde kinetische translatie-energie van een molekuul;
- de in de snelheidsverdeling (volgens de wet van Maxwell) meest voorkomende (meest waarschijnlijke) snelheid w_m;
- de gemiddelde snelheid $w_g = \frac{\Sigma w}{N}$; het kwadraat van de gemiddelde snelheid wordt hier voorgesteld door $(w_g)^2$.

In de kinetische gasteorie wordt aangetoond, dat tussen de betrokken snelheden volgend verband bestaat :

$$(w^2)_g = \frac{3}{2} \cdot w_m^2 = \frac{3\pi}{8} \cdot (w_g)^2$$

$$w_m^2 = \frac{2}{3} \cdot (w^2)_g = \frac{\pi}{4} \cdot (w_g)^2$$

$$w_m : w_g : \sqrt{(w^2)_g} = 1 : \frac{1}{\sqrt{\frac{\pi}{4}}} : \frac{1}{\sqrt{\frac{2}{3}}} = 1 : 1{,}128 : 1{,}225$$

De molekulen van een ideaal gas bezitten steeds kinetische translatie-energie; twee- en meeratomige molekulen bezitten daarenboven ook nog rotatie-energie (door het op zichzelf ronddraaien van een molekuul) en vibratie-energie (door het onderling vibreren van de atomen van eenzelfde molekuul).

De inwendige energie U van een ideaal gas is gelijk aan de som van de translatie-energie, de rotatie-energie en de vibratie-energie van al de molekulen samen :

$$U = U_{tra} + U_{rot} + U_{vib}$$

Hierna wordt het verband nagegaan tussen de temperatuur T en de kinetische translatie-energie van een ideaal gas, waarbij gebruik gemaakt zal worden van de volgende grootheden :

p = druk

V = volume

T = termodynamische temperatuur (vroeger absolute temperatuur genoemd)

m = massa

n = hoeveelheid stof

N = aantal molekulen

$V_m = \frac{V}{n}$ = molair volume

$M = \frac{m}{n}$ = molaire massa

$v = \frac{1}{\rho} = \frac{V}{m}$ = soortelijk volume

$\rho = \frac{1}{v} = \frac{m}{V}$ = volumieke massa (soortelijke massa)

$m' = \frac{m}{N} = \frac{M}{N_A}$ = massa van één molekuul

$R = \frac{\mathfrak{R}}{M}$ = specifieke gaskonstante

$\mathfrak{R}$ = molaire (of algemene of universele) gaskonstante = 8,314 41 $\frac{J}{mol \cdot K}$

$N_A = \frac{N}{n}$ = konstante van Avogadro = 6,022 045 . 10^{23} mol^{-1}

$k = \frac{\mathfrak{R}}{N_A}$ = konstante van Boltzmann = 1,380 662 . 10^{-23} $\frac{J}{K}$

Onder normvolume van een bepaalde hoeveelheid gas verstaat men het volume dat men zou bekomen onder normale atmosferische druk (101 325 Pa) bij 0 °C (T = 273,15 K). Onder molair normvolume V_{mn} verstaat men het volume dat 1 mol van een gas inneemt onder dezelfde omstandigheden; voor een ideaal gas geldt :

$$V_{mn} = 22{,}413\ 83 \cdot 10^{-3}\ \frac{m^3}{mol}$$

In de kinetische gasteorie wordt het volgende bewezen :

$$p \cdot V = p \cdot n \cdot V_m = n \cdot \mathfrak{R} \cdot T = n \cdot N_A \cdot k \cdot T = N \cdot k \cdot T$$
$$= m \cdot R \cdot T = N \cdot m' \cdot R \cdot T = n \cdot M \cdot R \cdot T$$
$$= m \cdot p \cdot v = N \cdot m' \cdot p \cdot v = n \cdot M \cdot p \cdot v$$

$$= \frac{2}{3} \cdot N \cdot \frac{m' \cdot (\omega^2)_g}{2} = \frac{2}{3} \cdot U_{tra}$$

$$= N \cdot \frac{m' \cdot \omega_m^2}{2} = N\text{-maal de translatie-energie van een molekuul met de snelheid } \omega_m.$$

Voor 1 mol van een ideaal gas geldt dan (met $U_{tra,m}$ = totale translatie-energie van al de molekulen begrepen in 1 mol) :

$$p \cdot V_m = \mathcal{R} \cdot T = N_A \cdot k \cdot T$$

$$= M \cdot R \cdot T = N_A \cdot m' \cdot R \cdot T$$

$$= M \cdot p \cdot v = N_A \cdot m' \cdot p \cdot v$$

$$= \frac{2}{3} \cdot N_A \cdot \frac{m' \cdot (\omega^2)_g}{2} = \frac{2}{3} \cdot U_{tra,m}$$

$$= N_A \cdot \frac{m' \cdot \omega_m^2}{2} = N_A\text{-maal de translatie-energie van een molekuul met de snelheid } \omega_m.$$

Bovenstaande uitdrukkingen laten toe, de snelheden $\sqrt{(\omega^2)_g}$, ω_m en ω_g te berekenen :

$$\sqrt{(\omega^2)_g} = \sqrt{3\ R \cdot T} = \sqrt{\frac{3\ \mathcal{R} \cdot T}{M}} = \sqrt{3\ p \cdot v} = \sqrt{\frac{3\ p}{\rho}}$$

$$\omega_m = \sqrt{2\ R \cdot T} = \sqrt{\frac{2\ \mathcal{R} \cdot T}{M}} = \sqrt{2\ p \cdot v} = \sqrt{\frac{2\ p}{\rho}}$$

$$\omega_g = \sqrt{\frac{8\ R \cdot T}{\pi}} = \sqrt{\frac{8\ \mathcal{R} \cdot T}{\pi \cdot M}} = \sqrt{\frac{8\ p \cdot v}{\pi}} = \sqrt{\frac{8\ p}{\pi \cdot \rho}}$$

Nemen we als voorbeeld zuurstof, waarvoor geldt :

$$M = 0{,}031\ 989\ 83\ \frac{kg}{mol}\ (\approx 0{,}032\ \frac{kg}{mol})$$

$$R = \frac{\mathcal{R}}{M} = \frac{8{,}314\ 41\ \frac{J}{mol \cdot K}}{0{,}031\ 989\ 83\ \frac{kg}{mol}} = 259{,}9\ \frac{J}{kg \cdot K}$$

Bij een temperatuur van 0 °C (T = 293,15 K) bekomt men volgende snelheden :

$$\sqrt{(\omega^2)_g} = \sqrt{3\ R \cdot T} = \sqrt{3 \times 259{,}9\ \frac{J}{kg \cdot K} \times 293{,}15\ K} = 478{,}1\ \frac{m}{s}$$

$$\omega_m = \sqrt{2\ R \cdot T} = \sqrt{2 \times 259{,}9\ \frac{J}{kg \cdot K} \times 293{,}15\ K} = 390{,}4\ \frac{m}{s}$$

$$\omega_g = \sqrt{\frac{8\ R \cdot T}{\pi}} = \sqrt{\frac{8 \times 259{,}9\ \frac{J}{kg \cdot K} \times 293{,}15\ K}{\pi}} = 440{,}5\ \frac{m}{s}$$

1.10.2. Temperatuur als afgeleide grootheid

Een gevolgtrekking die kan worden gemaakt uit de kinetische gasteorie is dat het niet absoluut noodzakelijk was, de temperatuur aan te nemen als een basisgrootheid. Uit bovenstaande uiteenzettingen blijkt, dat de termodynamische temperatuur T van een ideaal gas rechtstreeks evenredig is enerzijds met het produkt $p \cdot V_m$ en anderzijds met de molaire kinetische translatie-energie $U_{tra,m}$:

$$T = \frac{1}{\mathcal{R}} \cdot p \cdot V_m = \frac{\frac{2}{3}}{\mathcal{R}} \cdot U_{tra,m} \qquad \text{(met } \mathcal{R} \text{ = een konstante)}$$

Voor het bepalen van de temperatuur als afgeleide grootheid lagen twee verschillende definitievergelijkingen voor de hand.
Een eerste mogelijke definitievergelijking luidt :

$$T' = \frac{p \cdot V}{n} = p \cdot V_m = \frac{2}{3} \cdot U_{tra,m} = \frac{2}{3} \cdot \frac{U_{tra}}{n}$$

$$= \frac{2}{3} \cdot N_A \cdot \frac{m' \cdot \langle \omega^2 \rangle_g}{2} = \frac{2}{3} \cdot \frac{N}{n} \cdot \frac{m' \cdot \langle \omega^2 \rangle_g}{2}$$

$$= N_A \cdot \frac{m' \cdot \omega_m^2}{2} = \frac{N}{n} \cdot \frac{m' \cdot \omega_m^2}{2}$$

De aldus gedefinieerde temperatuur T' zou als SI-eenheid gehad hebben :

$$[T'] = \frac{J}{mol} = \frac{\frac{kg \cdot m^2}{s^2}}{mol}$$

Het onderling verband tussen $[T']$ en K wordt gevonden als volgt :

$$p \cdot V_m = \mathcal{R} \cdot T = T'$$

$$= 8{,}314\ 41\ \frac{J}{mol \cdot K} \cdot \{T\} \cdot K = \{T'\} \cdot \frac{J}{mol}$$

waaruit volgt :

$$8{,}314\ 41 \cdot \{T\} = \{T'\}$$

Daar de onderlinge verhouding van de getalwaarden het omgekeerde is van de onderlinge verhouding van de bijhorende eenheden, zou men bekomen hebben :

$$1\ K \triangleq 8{,}314\ 41\ \frac{J}{mol}$$

$$1\ \frac{J}{mol} \triangleq 0{,}120\ 273\ 116\ K$$

Met bovenstaande definitie van de temperatuur, zou de algemene gaswet er uitgezien hebben als volgt :

$$p \cdot V = n \cdot T' = m \cdot p \cdot v$$

$$p \cdot V_m = T' = M \cdot p \cdot v$$

$$p \cdot v = \frac{n \cdot T'}{m} = \frac{T'}{M}$$

Een tweede mogelijke definitievergelijking luidt :

$$T'' = \frac{U_{tra}}{n} = U_{tra,m} = \frac{3}{2} \frac{p \cdot V}{n} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot V_m$$

$$= N_A \cdot \frac{m' \cdot (\omega^2)_g}{2} = \frac{N}{n} \cdot \frac{m' \cdot (\omega^2)_g}{2}$$

De aldus gedefinieerde temperatuur T'' is niets anders dan de molaire translatie-energie $U_{tra,m}$ en zou als SI-eenheid gehad hebben :

$$[T''] = \frac{J}{mol} = \frac{\frac{kg \cdot m^2}{s^2}}{mol}$$

Het onderling verband tussen $[T'']$ en K wordt gevonden als volgt :

$$p \cdot V_m = \mathcal{R} \cdot T = \frac{2}{3} T''$$

$$= 8{,}314\ 41 \frac{J}{mol \cdot K} \cdot \{T\} \cdot K = \frac{2}{3} \cdot \{T''\} \cdot \frac{J}{mol}$$

waaruit volgt :

$$8{,}314\ 41 \cdot \{T\} = \frac{2}{3} \cdot \{T''\}$$

Daar de onderlinge verhouding van de getalwaarden het omgekeerde is van de onderlinge verhouding van de bijhorende eenheden, zou men bekomen hebben :

$$1\ K \triangleq \frac{3}{2} \cdot 8{,}314\ 41 \frac{J}{mol}$$

$$\triangleq 12{,}471\ 615 \frac{J}{mol}$$

$$1 \frac{J}{mol} \triangleq \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{8{,}314\ 41} K$$

$$\triangleq 0{,}080\ 182\ 077\ 46\ K$$

Met bovenstaande definitie van de temperatuur, zou de algemene gaswet er uitgezien hebben als volgt :

$$p \cdot V = \frac{2}{3} n \cdot T'' = m \cdot p \cdot v$$

$$p \cdot V_m = \frac{2}{3} T'' = M \cdot p \cdot v$$

$$p \cdot v = \frac{2}{3} \frac{n \cdot T''}{m} = \frac{2}{3} \frac{T''}{M}$$

Als voorbeeld beschouwen we een ideaal gas op een temperatuur van 20 °C. Hiervoor geldt :

$$T = 293{,}15\ \mathrm{K}$$

$$T' = 8{,}314\ 41 \times 293{,}15\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{mol}} = 2437{,}369\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{mol}}$$

$$T'' = 12{,}471\ 615 \times 293{,}15\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{mol}} = 3656{,}054\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{mol}}$$

De waarde van het produkt $p \cdot V_m$ is uiteraard onafhankelijk van de wijze waarop de grootheid temperatuur werd gedefinieerd :

$$p \cdot V_m = \mathfrak{R} \cdot T = 8{,}314\ 41\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{mol} \cdot \mathrm{K}} \cdot 293{,}15\ \mathrm{K} = 2437{,}369\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{mol}}$$

$$= N_A \cdot k \cdot T$$

$$= 6{,}022\ 045 \cdot 10^{23}\ \mathrm{mol}^{-1} \cdot 1{,}380\ 662 \cdot 10^{-23}\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{K}} \cdot 293{,}15\ \mathrm{K}$$

$$= 8{,}314\ 41 \times 293{,}15\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{mol}}$$

$$= 2437{,}369\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{mol}}$$

$$p \cdot V_m = T' = 2437{,}369\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{mol}}$$

$$p \cdot V_m = \frac{2}{3} T'' = \frac{2}{3} \cdot 3656{,}054\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{mol}} = 2437{,}369\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{mol}}$$

1.10.3. De natuurkonstanten $\mathfrak{R}$ (molaire of algemene of universele gaskonstante) en k (konstante van Boltzmann)

Ten opzichte van de molaire translatie-energie $U_{tra,m}$ en het produkt $p \cdot V_m$ geldt :

$$T = \frac{1}{\mathfrak{R}} \cdot \frac{2}{3} \cdot U_{tra,m} = \frac{p \cdot V_m}{\mathfrak{R}} = \frac{p \cdot V_m}{N_A \cdot k}$$

$$T' = \frac{2}{3} \cdot U_{tra,m} = p \cdot V_m \qquad \text{(definitievergelijking van } T')$$

$$T'' = U_{tra,m} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot V_m \qquad \text{(definitievergelijking van } T'')$$

De "natuurkonstante" $\mathfrak{R}$ vindt haar oorsprong enkel en alleen in het feit dat de termodynamische temperatuur T werd aangenomen als basisgrootheid. Aan $\mathfrak{R}$ werd de dimensie gegeven die nodig was om de groothedenvergelijking $p \cdot V_m = \mathfrak{R} \cdot T$ dimensioneel korrekt te maken; de betrokken dimensie is (in het SI) (zie ook Hoofdstuk II, onder 11.) :

$$\frac{\frac{M \quad L^2}{T^2}}{N \quad \Theta}$$; de SI-eenheid van $\mathcal{R}$ is $\frac{\frac{kg \cdot m^2}{s^2}}{mol \cdot K} = \frac{J}{mol \cdot K}$

Een gelijkaardige redenering geldt voor de konstante van Boltzmann, gegeven door :

$$k = \frac{\mathcal{R}}{N_A} = \frac{p \cdot V}{N \cdot T} = \frac{p \cdot V_m}{N_A \cdot T}$$

Uit de hoger behandelde betrekkingen kan men immers afleiden :

$$k \cdot T = \frac{m' \cdot \omega_m^2}{2} = \frac{T'}{N_A}$$

$$= \frac{2}{3} \cdot \frac{m' \cdot \langle \omega^2 \rangle_g}{2} = \frac{2}{3} \cdot \frac{3}{2} \cdot k \cdot T = \frac{2}{3} \cdot \frac{T''}{N_A} = \frac{2}{3} \cdot \frac{U_{tra,m}}{N_A}$$

De grootheid $k \cdot T$ is gelijk aan de kinetische translatie-energie van een molekuul waarvan de snelheid gelijk is aan de meest voorkomende snelheid. De grootheid $\frac{3}{2} \cdot k \cdot T$ is gelijk aan de gemiddelde kinetische translatie-energie per molekuul.

2. Eenheden van energie in de warmteleer

2.1. Inleiding

Een stelsel kan energie opnemen of afgeven onder twee vormen : als arbeid of als warmte. De totale energie die door een stelsel wordt opgenomen of afgegeven, is dan ook gelijk aan de som van de opgenomen of afgegeven arbeid en warmte. Hierbij wordt thans meestal aan de energie (arbeid of warmte) die aan een stelsel wordt toegevoerd, het positief teken toegekend, en het negatief teken aan de energie (arbeid of warmte) die door een stelsel wordt afgegeven (vroeger was het juist andersom).

De SI-eenheid van energie, dus zowel van arbeid als van warmte, is de joule (uitgedrukt in de SI-grondeenheden : $J = \frac{kg \cdot m^2}{s^2}$).

Vroeger gebruikte men op het Europese vasteland als eenheid van warmte de calorie en de kilocalorie. In de Angelsaksische landen was de eenheid van warmte de British thermal unit. Van de calorie, de kilocalorie

en de British thermal unit bestaan verschillende definities, die hierna in het kort zullen behandeld worden.

2.2. Eenheden van warmte, waarvan de definitie berust op de soortelijke warmtekapaciteit van water

2.2.1. Eenheden die gebruikelijk waren op het Europese vasteland

Hier worden volgende eenheden bedoeld : de 15°-calorie ($cal_{15°}$), de 15°-kilocalorie ($kcal_{15°}$), de gemiddelde calorie ($\overline{cal}$), de gemiddelde kilocalorie ($\overline{kcal}$), de 4°-calorie ($cal_{4°}$), de 4°-kilocalorie ($kcal_{4°}$), de 20°-calorie ($cal_{20°}$), de 20°-kilocalorie ($kcal_{20°}$).

De 15°-calorie en de 15°-kilocalorie zijn respektievelijk gelijk aan de hoeveelheid warmte die vereist is om 1 gram water en 1 kilogram water op te warmen, onder normale atmosferische druk, van 14,5 °C tot 15,5 °C. Deze eenheden zijn dus bepaald door de soortelijke warmtekapaciteit $c_{p_0}^{15\,°C}$ van water bij de temperatuur t = 15 °C en de druk p_0 = 101 325 Pa.

Aanleunend bij het MTS-stelsel, kende men in Frankrijk ook nog de thermie (th), zijnde de hoeveelheid warmte die vereist is om, onder normale atmosferische druk, een hoeveelheid water van 1 ton (1000 kg) op te warmen van 14,5 °C tot 15,5 °C; hier geldt :

$$1\ th = 10^3\ kcal_{15°} = 10^6\ cal_{15°}$$

Als soortelijke warmtekapaciteit van water bij 15 °C, onder normale atmosferische druk, werd in 1950 aangenomen :

$$c_{p_0}^{15\,°C}\ (H_2O) = 4{,}1855\ \frac{J}{g\ .\ K} = 4185{,}5\ \frac{J}{kg\ .\ K}$$

Hieruit volgt :

$$\begin{aligned} 1\ cal_{15°} &= 4{,}1855\ J \\ &= 4{,}1855\ .\ 10^7\ erg \\ &= 4{,}1855\ .\ 10^7\ erg\ .\ \frac{1}{980{,}665}\ \frac{gf\ .\ cm}{erg} \\ &= 42\ 680{,}2\ \ldots\ gf\ .\ cm \end{aligned}$$

$$1\ \text{kcal}_{15°} = 4185{,}5\ \text{J}$$

$$= 4185{,}5\ \text{J} \cdot \frac{1}{9{,}806\ 65}\ \frac{\text{kgf . m}}{\text{J}}$$

$$= 426{,}802\ \ldots\ \text{kgf . m}$$

De gemiddelde calorie ($\overline{\text{cal}}$) en de gemiddelde kilocalorie ($\overline{\text{kcal}}$) zijn gelijk aan het honderdste deel van de hoeveelheid warmte die vereist is om respektievelijk 1 gram en 1 kilogram water, onder normale atmosferische druk, op te warmen van 0 °C tot 100 °C.

Tussen $\text{cal}_{15°}$ en $\text{kcal}_{15°}$ enerzijds en $\overline{\text{cal}}$ en $\overline{\text{kcal}}$ anderzijds, werd volgend verband vastgesteld :

$$1\ \overline{\text{cal}} = 1{,}001\ 006\ \text{cal}_{15°}$$

$$1\ \overline{\text{kcal}} = 1{,}001\ 006\ \text{kcal}_{15°}$$

Hieruit volgt :

$$1\ \overline{\text{cal}} = 1{,}001\ 006 \times 4{,}1855\ \text{J} = 4{,}189\ 71\ \text{J (afgerond)}$$

$$= 4{,}189\ 71 \cdot 10^7\ \text{erg}$$

$$= 4{,}189\ 71 \cdot 10^7\ \text{erg} \cdot \frac{1}{980{,}665}\ \frac{\text{gf . cm}}{\text{erg}}$$

$$= 42\ 723{,}1\ \ldots\ \text{gf . cm}$$

$$1\ \overline{\text{kcal}} = 1{,}001\ 006 \times 4185{,}5\ \text{J} = 4189{,}71\ \text{J (afgerond)}$$

$$= 4189{,}71\ \text{J} \cdot \frac{1}{9{,}806\ 65}\ \frac{\text{kgf . m}}{\text{J}}$$

$$= 427{,}231\ \ldots\ \text{kgf . m}$$

De 4°-calorie, de 4°-kilocalorie, de 20°-calorie en de 20°-kilocalorie (die minder gebruikelijk waren) hebben de volgende waarden :

$$1\ \text{cal}_{4°} = 4{,}2045\ \text{J}$$

$$1\ \text{kcal}_{4°} = 4204{,}5\ \text{J}$$

$$1\ \text{cal}_{20°} = 4{,}1816\ \text{J}$$

$$1\ \text{kcal}_{20°} = 4181{,}6\ \text{J}$$

Men noemt mechanisch warmte-ekwivalent j de verhouding van de hoeveelheid mechanische arbeid (te meten in mechanische eenheden) die gelijk is aan de eenheid van warmte, tot deze eenheid van warmte (het mechanisch warmte-ekwivalent is dus een kotiënt van twee gelijksoortige fysische grootheden, uitgedrukt in verschillende eenheden) :

$$1 \equiv j = 4{,}1855 \cdot 10^{7} \frac{\text{erg}}{\text{cal}_{15°}} = 1{,}1855 \cdot 10^{7} \frac{\text{erg}}{\text{cal}_{15°}} \cdot \frac{1}{980{,}665} \frac{\text{gf . cm}}{\text{erg}}$$

$$= 42\ 680{,}2 \ldots \frac{\text{gf . cm}}{\text{cal}_{15°}}$$

$$= 4185{,}5 \frac{\text{J}}{\text{kcal}_{15°}} = 4185{,}5 \frac{\text{J}}{\text{kcal}_{15°}} \cdot \frac{1}{9{,}806\ 65} \frac{\text{kgf . m}}{\text{J}}$$

$$= 426{,}802 \ldots \frac{\text{kgf . m}}{\text{kcal}_{15°}}$$

De omgekeerde waarde is het kalorisch ekwivalent van de mechanische energie-eenheid en is gelijk aan :

$$1 \equiv \frac{1}{j} = \frac{1}{4{,}1855 \cdot 10^{7}} \frac{\text{cal}_{15°}}{\text{erg}} = 2{,}389\ 20 \cdot 10^{-8} \frac{\text{cal}_{15°}}{\text{erg}}$$

$$= \frac{1}{4{,}268\ 02 \cdot 10^{4}} \frac{\text{cal}_{15°}}{\text{gf . cm}} = 2{,}343\ 00 \cdot 10^{-5} \frac{\text{cal}_{15°}}{\text{gf . cm}}$$

$$= \frac{1}{4185{,}5} \frac{\text{kcal}_{15°}}{\text{J}} = 2{,}389\ 20 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kcal}_{15°}}{\text{J}}$$

$$= \frac{1}{426{,}802} \frac{\text{kcal}_{15°}}{\text{kgf . m}} = 2{,}343\ 00 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kcal}_{15°}}{\text{kgf . m}}$$

Tot aan de invoering van de nieuwe "absolute" elektrische eenheden in 1948 (ter vervanging van de "internationale" elektrische eenheden van 1908), kende men ook nog een elektrisch warmte-ekwivalent j', gedefinieerd als de verhouding van de elektrische arbeid (te meten in elektrische eenheden) die gelijk is aan de eenheid van warmte, tot deze eenheid van warmte; hiervoor gold de volgende waarde :

$$1 \equiv j' = 4{,}184\ 705 \frac{\text{J}_{\text{int}}}{\text{cal}_{15°}} = 4184{,}705 \frac{\text{J}_{\text{int}}}{\text{kcal}_{15°}}$$

Voor de omgekeerde waarde bekomt men :

$$1 \equiv \frac{1}{j'} = \frac{1}{4{,}184\ 705} \frac{\text{cal}_{15°}}{\text{J}_{\text{int}}} = 0{,}238\ 965\ 4 \frac{\text{cal}_{15°}}{\text{J}_{\text{int}}}$$

$$= \frac{1}{4184{,}705} \frac{\text{kcal}_{15°}}{\text{J}_{\text{int}}} = 2{,}389\ 654 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kcal}_{15°}}{\text{J}_{\text{int}}}$$

2.2.2. Eenheden die gebruikelijk waren in de Angelsaksische landen

Hier worden volgende eenheden bedoeld : de 39,2 °F British thermal unit ($Btu_{39,2\ °F}$), de 60,5 °F British thermal unit ($Btu_{60,5\ °F}$), de mean 32 to 212 °F British thermal unit (Btu_{mean}), de Centigrade thermal unit (CTU), de Centigrade heat unit (CHU).

In de Angelsaksische landen gebruikte men bij voorkeur als eenheid van warmte de British thermal unit (Btu, B.th.u., BTU, B.Th.U). Eén Btu is gelijk aan de hoeveelheid warmte die vereist is om 1 pound (lb) water 1 graad Fahrenheit op te warmen, onder normale atmosferische druk, respektievelijk bij volgende temperaturen of temperatuurintervallen :

- bij de 39,2 °F British thermal unit : is de temperatuur waarbij de opwarming gebeurt, gelijk aan de temperatuur van de maximale waterdichtheid, zijnde 39,2 °F of 4 °C (dus opwarming van 38,7 °F tot 39,7 °F);
- bij de 60,5 °F British thermal unit : opwarming van 60 °F tot 61 °F (60,5 °F ≙ 15,83 °C).

Verder heeft men nog de mean 32 to 212 °F British thermal unit (Btu_{mean}), die gelijk is aan het 180^{ste} deel van de hoeveelheid warmte die vereist is om 1 pound (lb) water op te warmen van 32 °F (≙ 0 °C) tot 212 °F (≙ 100 °C).

De eenhedenverhouding $\frac{Btu}{cal}$ (of $\frac{Btu}{kcal}$) is bij gelijke definitietemperaturen een konstante, daar ze gelijk is aan het produkt van de eenhedenverhoudingen $\frac{lb}{g}$ (of $\frac{lb}{kg}$) en $\frac{°F}{°C}$:

$$\frac{Btu}{cal} = \frac{lb}{g} \cdot \frac{°F}{°C}$$

$$\frac{Btu}{kcal} = \frac{lb}{kg} \cdot \frac{°F}{°C}$$

Met 1 lb = 0,453 592 3 kg (vroegere waarde) of 0,453 529 37 kg (huidige waarde) bekomt men (bij gelijke definitietemperaturen) respektievelijk :

$$\frac{Btu}{kcal} = \frac{lb}{kg} \cdot \frac{°F}{°C} = 0,453\ 592\ 3 \cdot \frac{5}{9} = 0,251\ 995\ 722\ 2$$

$$\frac{Btu}{kcal} = \frac{lb}{kg} \cdot \frac{°F}{°C} = 0,453\ 592\ 37 \cdot \frac{5}{9} = 0,251\ 995\ 761\ 1$$

Daar $\frac{c_{p_o}^{4\ °C\ (H_2O)}}{c_{p_o}^{15\ °C\ (H_2O)}} = 1{,}004\ 539$ en $\frac{c_{p_o}^{15{,}83\ °C\ (H_2O)}}{c_{p_o}^{15\ °C\ (H_2O)}} = 0{,}999\ 821$

bekomt men voor de verhouding van de $Btu_{39,2\ °F}$ en de $Btu_{60,5\ °F}$ (met telkens 1b = 0,453 592 3 kg) tot de $kcal_{15°}$:

$$\frac{Btu_{39,2\ °F}}{kcal_{15°}} = 1{,}004\ 539 \times 0{,}453\ 592\ 3 \times \frac{5}{9} = 0{,}253\ 139\ 5 \text{ (afgerond)}$$

$$\frac{Btu_{60,5\ °F}}{kcal_{15°}} = 0{,}999\ 821 \times 0{,}453\ 592\ 3 \times \frac{5}{9} = 0{,}251\ 950\ 6 \text{ (afgerond)}$$

Daar $\frac{Btu_{mean}}{kcal_{mean}} = \frac{lb}{kg} \cdot \frac{°F}{°C}$ en $\frac{kcal_{mean}}{kcal_{15°}} = 1{,}001\ 006$ (met $kcal_{mean} = \overline{kcal}$),

bekomt men voor de verhouding van de Btu_{mean} tot de $kcal_{15°}$:

$$\frac{Btu_{mean}}{kcal_{15°}} = 0{,}453\ 592\ 3 \times \frac{5}{9} \times 1{,}001\ 006 = 0{,}252\ 249\ 2 \text{ (afgerond)}$$

Uitgedrukt in joule, bekomt men (afgerond) :

$$Btu_{39,2\ °F} = 0{,}253\ 139\ 5 \times 4185{,}5\ J = 1059{,}52\ J$$

$$Btu_{60,5\ °F} = 0{,}251\ 950\ 6 \times 4185{,}5\ J = 1054{,}54\ J$$

$$Btu_{mean} = 0{,}252\ 249\ 2 \times 4185{,}5\ J = 1055{,}79\ J$$

Hieruit volgt :

$$1\ J = \frac{1}{1059{,}52}\ Btu_{39,2\ °F} = 0{,}000\ 943\ 824\ Btu_{39,2\ °F}$$

$$= \frac{1}{1054{,}54}\ Btu_{60,5\ °F} = 0{,}000\ 948\ 281\ Btu_{60,5\ °F}$$

$$= \frac{1}{1055{,}79}\ Btu_{mean} = 0{,}000\ 947\ 158\ Btu_{mean}$$

$Btu_{39,2\ °F}$ wordt ook dikwijls geschreven als $Btu_{39°}$, en $Btu_{60,5\ °F}$ als $Btu_{60°}$.

Naast de British thermal unit (Btu) kende men in de Angelsaksische landen nog een andere eenheid van warmte, de Centigrade thermal unit (CTU), en de Centigrade heat unit (CHU), eveneens gesteund op de soortelijke warmtekapaciteit van water, waarbij als temperatuurverhoging 1 °C in aanmerking wordt genomen in plaats van 1 °F. Bij de bepaling van de eenheid CTU wordt als temperatuurinterval genomen, het interval tussen 14,5 °C en 15,5 °C (zoals bij de $cal_{15°}$ en de $kcal_{15°}$), terwijl bij de bepaling van de eenheid CHU het honderste deel van de warmte in aanmerking wordt

genomen die vereist is om 1 lb (met de vroeger gebruikelijke waarde 1 lb = 0,453 592 3 kg) water op te warmen van 0 °C tot 100 °C.
Hierbij geldt :

$$\frac{CTU_{15\ °C}}{kcal_{15°}} = \frac{CHU_{mean}}{\overline{kcal}} = \frac{\overline{lb}}{kg} = 0,453\ 592\ 3$$

$$\frac{CHU_{mean}}{Btu_{mean}} = \frac{°C}{°F} = 1,8 = \frac{CHU_{mean}}{C,252\ 249\ 2\ kcal_{15°}} = 3,964\ 334\ \frac{CHU_{mean}}{kcal_{15°}}$$

Hieruit volgt (afgerond) :

$$CTU_{15\ °C} = 0,453\ 592\ 3\ kcal_{15°}$$
$$= 0,453\ 592\ 3 \times 4185,5\ J = 1898,51\ J$$
$$CHU_{mean} = 1,8\ Btu_{mean}$$
$$= 1,8 \times 1055,79\ J = 1900,42\ J$$

Verder bekomt men :

$$1\ J = \frac{1}{1898,51}\ CTU_{15\ °C} = 0,000\ 526\ 729\ CTU_{15\ °C}$$
$$= \frac{1}{1900,42}\ CHU_{mean} = 0,000\ 526\ 199\ CHU_{mean}$$

2.3. Eenheden van warmte die rechtstreeks per definitie werden gelijkgesteld aan een welbepaalde getalwaarde maal een reeds bekende energie-eenheid (J_{int} of J)

2.3.1. Inleiding

De definitie van een eenheid van warmte die gesteund was op de soortelijke warmtekapaciteit van water bij een bepaalde temperatuur, gaf geen bevrediging daar de nauwkeurigheid waarmede de betrokken soortelijke warmtekapaciteit kon gemeten worden, ook bepalend was voor de nauwkeurigheid van de grootte van de betrokken warmte-eenheid. Daarom werd uitgezien naar andere definities.

2.3.2. De Rossini-calorie of termochemische calorie

In de Verenigde Staten van Amerika kent men de Rossini- of termochemische calorie, vóór 1948 gedefinieerd als volgt :

$$1\ cal_{termoch} = 4,1833\ J_{int} \quad (NBS)$$

Hierin is J_{int} (NBS) niet de "gemiddelde" internationale elektrische energie-eenheid J_{int} zoals die internationaal vastgelegd werd in 1935, doch wel de internationale elektrische energie-eenheid zoals ze werd vastgesteld door het National Bureau of Standards (NBS) in Washington. De $cal_{termoch}$ wordt vooral aangetroffen in Amerikaanse werken die termochemische evenwichten behandelen.

Bij de invoering in 1948 van de absolute elektrische eenheden (ter vervanging van de internationale elektrische eenheden van 1908), werd door het NBS bepaald : 1 J_{int} (NBS) $\triangleq$ 1,000 165 J (zie Hoofdstuk IV, onder 3.2.). Hoewel hieruit volgt : 1 $cal_{termoch}$ = 4,1833 x 1,000 165 J

= 4,183 990 ... J

werd deze waarde echter niet gebruikt, daar het NBS er de voorkeur aan gaf, de termochemische calorie aan te sluiten aan de absolute elektrische eenheden van 1948, door een nieuwe definitievergelijking (toegepast sinds 1948), gegeven door :

$$1\ cal_{termoch} = 4{,}184\ J \quad \text{(exact)}$$

Daaruit volgt :

$$\frac{cal_{termoch}}{cal_{15°}} = \begin{cases} \text{vóór 1948} & \dfrac{4{,}1833\ J_{int}\ \text{(NBS)}}{4{,}1855\ J} = \dfrac{4{,}1833 \times 1{,}000\ 165\ J}{4{,}1855\ J} \\ & = 0{,}999\ 639\ 289 \\ & = 0{,}999\ 64\ \text{(afgerond)} \\ \text{na 1948} & \dfrac{4{,}184\ J}{4{,}1855\ J} = 0{,}999\ 641\ 619 \\ & = 0{,}999\ 64\ \text{(afgerond)} \end{cases}$$

2.3.3. De internationale tafel(kilo)calorie van 1929 en 1956, de Steam Table British thermal unit van 1929 en de International Table British thermal unit van 1956

Het gaat hier om volgende eenheden : de internationale tafelcalorie en internationale tafelkilocalorie van 1929 ($cal_{IT(1929)}$, $kcal_{IT(1929)}$), de Steam Table British thermal unit van 1929 (Btu_{ST}), de internationale tafelcalorie en internationale tafelkilocalorie van 1956 ($cal_{IT(1956)}$, $kcal_{IT(1956)}$) en de International Table British thermal unit van 1956 (Btu_{IT}).

In 1929 werd door de 1ste "International Steam Table Conference" een nieuwe calorie en kilocalorie gedefinieerd (in verband met het opstellen van internationale stoomtabellen) met als symbool cal_{IT} (International Steam Table-calorie, internationale (stoom)tafel-calorie), met als definitievergelijking :

$$1\ kW_{int} \cdot h = 860\ kcal_{IT(1929)} = 8{,}6 \cdot 10^5\ cal_{IT(1929)} \quad \text{(exact)}$$

Uit bovenstaande definitie volgt (met $1\ J_{int} \triangleq 1{,}000\ 19\ J$) :

$$1\ cal_{IT(1929)} = \frac{kW_{int} \cdot h}{8{,}6 \cdot 10^5} = \frac{3{,}6 \cdot 10^6\ J_{int}}{8{,}6 \cdot 10^5}$$

$$= 4{,}186\ 05\ J_{int} \text{ (afgerond)}$$

$$= \frac{1{,}000\ 19 \times 3{,}6 \cdot 10^6\ J}{8{,}6 \cdot 10^5}$$

$$= 4{,}186\ 84\ J \text{ (afgerond)}$$

$$1\ kcal_{IT(1929)} = \frac{1\ kW_{int} \cdot h}{860} = 1000\ cal_{IT(1929)}$$

$$= 4186{,}84\ J \text{ (afgerond)}$$

$$1\ J = \frac{1}{4{,}186\ 84}\ cal_{IT(1929)} = 0{,}238\ 844\ cal_{IT(1929)}$$

$$1\ J = \frac{1}{4186{,}84}\ kcal_{IT(1929)} = 0{,}000\ 238\ 844\ kcal_{IT(1929)}$$

In de Angelsaksische landen werd eveneens in 1929 een nieuwe warmteeenheid ingevoerd, namelijk de Steam Table British thermal unit (Btu_{ST}), gedefinieerd door :

$$1\ \frac{cal_{IT(1929)}}{g} = 1{,}8\ \frac{Btu_{St}}{lb}$$

Daar te dien tijde 1 pound (lb) nog gelijk was aan 0,453 592 3 kg (thans is 1 lb = 0,453 592 37 kg), bekwam men :

$$1\ Btu_{ST} = \frac{lb}{g} \cdot \frac{1}{1{,}8}\ cal_{IT(1929)}$$

$$= \frac{453{,}5923}{1{,}8}\ cal_{IT(1929)}$$

$$= 251{,}996\ cal_{IT(1929)}$$

$$\approx 252\ cal_{IT(1929)}$$

$$= 0{,}251\ 996\ \text{kcal}_{\text{IT(1929)}}$$

$$\approx 0{,}252\ \text{kcal}_{\text{IT(1929)}}$$

$$= \frac{453{,}5923}{1{,}8}\ \text{cal}_{\text{IT(1929)}} \cdot 4{,}186\ 84\ \frac{\text{J}}{\text{cal}_{\text{IT(1929)}}}$$

$$= 1055{,}066\ \text{J}$$

$$1\ \text{J} = \frac{1}{1055{,}066}\ \text{Btu}_{\text{ST}} = 0{,}000\ 947\ 808\ \text{Btu}_{\text{ST}}$$

Verder heeft men ook nog :

$$\frac{\text{kcal}_{\text{IT(1929)}}}{\text{kcal}_{15°}} = \frac{4186{,}84\ \text{J}}{4185{,}5\ \text{J}} = 1{,}000\ 320 \quad \text{(afgerond)}$$

$$\frac{\text{Btu}_{\text{ST}}}{\text{kcal}_{15°}} = \frac{1055{,}066\ \text{J}}{4185{,}5\ \text{J}} = 0{,}252\ 076 \quad \text{(afgerond)}$$

Door de 5de International Steam Table Conference (1956) werd nogmaals bevestigd dat, in overeenstemming met de beslissing genomen in 1948 door de 9de CGPM, de joule de eenheid is zowel van arbeid als van warmte. In verband met het opstellen van de internationale stoomtabellen, werd in 1956 als referentietoestand voor water gekozen de vloeibare fase van zuiver water in het tripelpunt. De entropie en de inwendige energie van water in de betrokken referentietoestand, werden konventioneel gelijkgesteld aan nul. Tevens werd, eveneens in 1956, een nieuwe definitie gegeven van de internationale tafelcalorie en de British thermal unit, die voorlopig ook nog als warmte-eenheden werden erkend. Deze nieuwe definities waren immers wenselijk geworden door het invoeren in 1948 van de "absolute" elektrische eenheden (ter vervanging van de "internationale" elektrische eenheden van 1908). Bij het gebruik van de in 1956 gedefinieerde internationale calorie en kilocalorie wordt het jaartal (1956) enkel vermeld als men speciaal de aandacht wil vestigen op het onderscheid met de definitie van 1929; in de andere gevallen wordt het jaartal (1956) weggelaten, terwijl ook meestal de index IT wordt weggelaten :

$$1\ \text{cal}_{\text{IT(1956)}} = 1\ \text{cal}_{\text{IT}} = 1\ \text{cal}$$

$$1\ \text{kcal}_{\text{IT(1956)}} = 1\ \text{kcal}_{\text{IT}} = 1\ \text{kcal}$$

Iets gelijkaardigs geldt voor de International Table British thermal unit van 1956, waar de index IT enkel wordt geschreven als men speciaal de aandacht wil vestigen op het onderscheid met de definitie van 1929 (waar de index ST werd gebruikt) :

$$1\ Btu_{IT} = 1\ Btu$$

De definities van 1956 betreffende de calorie en de kilocalorie luiden als volgt :

$$1\ cal_{IT(1956)} = 1\ cal = 4{,}1868\ J \quad \text{(exact)}$$

$$1\ kcal_{IT(1956)} = 1\ kcal = 4186{,}8\ J \quad \text{(exact)}$$

Hieruit volgt :

$$1\ J = \frac{1}{4{,}1868}\ cal_{IT(1956)} = 0{,}238\ 846\ cal_{IT(1956)} \text{ of cal}$$

$$1\ J = \frac{1}{4186{,}8}\ kcal_{IT(1956)} = 0{,}000\ 238\ 846\ kcal_{IT(1956)} \text{ of kcal}$$

In de voedingsleer werd de kilocalorie veelal "calorie" genoemd en soms ook "grote calorie". In beide gevallen gebruikte men ook dikwijls het symbool Cal (met hoofdletter), waarbij gold :

$$1\ Cal = 1\ kcal = 4186{,}8\ J$$

De definitie van 1956 van de Btu luidt als volgt :

$$1\ \frac{Btu_{IT}}{lb} = 2{,}326\ \frac{J}{g} \quad \text{(exact)}$$

In de laatste uitdrukking is het getal 2,326 gelijk aan het getal 4,1868 vermenigvuldigd met de eenhedenverhouding $\frac{°F}{°C}$, die gelijk is aan $\frac{5}{9}$:

$$1\ Btu_{IT} = 1\ Btu = 4{,}1868\ \frac{°F}{°C} \cdot \frac{lb}{g} \cdot J$$

$$= 4{,}1868 \cdot \frac{5}{9} \cdot \frac{lb}{g} \cdot J = 2{,}326\ \frac{lb}{g} \cdot J$$

Daar 1 pound (lb) thans gelijkgesteld is aan 0,453 592 37 kg, is de eenhedenverhouding $\frac{lb}{g}$ gelijk aan 453,592 37 en bekomt men :

$$1\ Btu_{IT} = 1\ Btu = 4{,}1868 \cdot \frac{5}{9} \cdot 453{,}592\ 37\ J$$

$$= 1055{,}056\ J$$

$$= \frac{1055{,}056}{4186{,}8}\ kcal_{IT(1956)}$$

$$= 0\ 251\ 996\ \text{kcal}_{IT(1956)}$$

$$\approx 0{,}252\ \text{kcal}_{IT(1956)}$$

Hieruit volgt :

$$1\ J = \frac{1}{1055{,}056}\ \text{Btu}_{IT} = 0{,}000\ 947\ 817\ \text{Btu}_{IT} \text{ of Btu}$$

Volgende uitdrukkingen geven het verband tussen $\text{cal}_{IT(1956)}$, $\text{kcal}_{IT(1956)}$ en Btu_{IT} enerzijds en hun "voorgangers" van 1929 en $\text{kcal}_{15°}$ anderzijds :

$$\frac{\text{kcal}_{IT(1956)}}{\text{kcal}_{IT(1929)}} = \frac{\text{kcal}_{IT}}{\text{kcal}_{IT(1929)}} = \frac{\text{kcal}}{\text{kcal}_{IT(1929)}} = \frac{4186{,}8}{4186{,}84} = 0{,}999\ 990\ 4 \quad \text{(afgerond)}$$

$$\frac{\text{kcal}_{IT(1956)}}{\text{kcal}_{15°}} = \frac{\text{kcal}_{IT}}{\text{kcal}_{15°}} = \frac{\text{kcal}}{\text{kcal}_{15°}} = \frac{4186{,}8}{4185{,}5} = 1{,}000\ 310\ 6 \quad \text{(afgerond)}$$

$$\frac{\text{Btu}_{IT}}{\text{Btu}_{ST}} = \frac{\text{Btu}}{\text{Btu}_{ST}} = \frac{1055{,}056}{1055{,}066} = 0{,}999\ 991 \quad \text{(afgerond)}$$

$$\frac{\text{Btu}_{IT}}{\text{kcal}_{15°}} = \frac{\text{Btu}}{\text{kcal}_{15°}} = \frac{1055{,}056}{4185{,}5} = 0{,}252\ 074 \quad \text{(afgerond)}$$

2.4. Verband tussen kilowatt uur en kilocalorie

Wat kilowatt uur betreft, ging het tussen 1908 en 1948 om de eenheid kW_{int} . h, en na 1948 om de eenheid kW . h (met $W_{int} \triangleq 1{,}000\ 19$ W).
Per definitie geldt : $1\ \text{kW}_{int}$. h = 860 $\text{kcal}_{IT(1929)}$ (exact)

Uit : $1\ \text{kW}_{int} \cdot \text{h} = 1000\ \frac{J_{int}}{s} \cdot 3600\ \text{s} = 3{,}6 \cdot 10^6\ J_{int}$

en $1\ J_{int} \triangleq 1{,}000\ 19\ J$

volgt :

$$1\ \text{kW}_{int} \cdot \text{h} = 3{,}6 \cdot 10^6\ J_{int} \cdot \frac{1}{4184{,}705}\ \frac{\text{kcal}_{15°}}{J_{int}}$$

$$= 860{,}276\ \text{kcal}_{15°}$$

$$1\ \text{kW}_{int} \cdot \text{h} \triangleq 1{,}000\ 19 \times 3{,}6 \cdot 10^6\ J$$

$$\triangleq 3{,}600\ 684 \cdot 10^6\ J$$

$$= 3{,}600\ 684 \cdot 10^6\ \text{J} \cdot \frac{1}{4186{,}8}\ \frac{\text{kcal}_{\text{IT(1956)}}}{\text{J}}$$

$$= 860{,}009\ \text{kcal}_{\text{IT(1956)}}\ \text{of kcal}$$

Uit 1 kW . h = 1000 $\frac{\text{J}}{\text{s}}$. 3600 s = 3,6 . 10^6 J volgt :

$$1\ \text{kW} \cdot \text{h} = 3{,}6 \cdot 10^6\ \text{J} \cdot \frac{1}{4185{,}5}\ \frac{\text{kcal}_{15°}}{\text{J}}$$

$$= 860{,}112\ \text{kcal}_{15°}$$

$$= 3{,}6 \cdot 10^6\ \text{J} \cdot \frac{1}{4186{,}84}\ \frac{\text{kcal}_{\text{IT(1929)}}}{\text{J}}$$

$$= 859{,}837\ \text{kcal}_{\text{IT(1929)}}$$

$$= 3{,}6 \cdot 10^6\ \text{J} \cdot \frac{1}{4186{,}8}\ \frac{\text{kcal}_{\text{IT(1956)}}}{\text{J}}$$

$$= 859{,}845\ \text{kcal}_{\text{IT(1956)}}\ \text{of kcal}$$

2.5. Verband tussen kilogram(kracht) meter en kilocalorie

Daar 1 kgf . m = 9,806 65 J, bekomt men (na afronding) :

$$1\ \text{kgf} \cdot \text{m} = 9{,}806\ 65\ \text{J} \cdot \frac{1}{4185{,}5}\ \frac{\text{kcal}_{15°}}{\text{J}} = 2{,}343\ 01 \cdot 10^{-3}\ \text{kcal}_{15°}$$

$$1\ \text{kgf} \cdot \text{m} = 9{,}806\ 65\ \text{J} \cdot \frac{1}{4186{,}84}\ \frac{\text{kcal}_{\text{IT(1929)}}}{\text{J}} = 2{,}342\ 26 \cdot 10^{-3}\ \text{kcal}_{\text{IT(1929)}}$$

$$1\ \text{kgf} \cdot \text{m} = 9{,}806\ 65\ \text{J} \cdot \frac{1}{4186{,}8}\ \frac{\text{kcal}_{\text{IT(1956)}}}{\text{J}} = 2{,}342\ 28 \cdot 10^{-3}\ \text{kcal}_{\text{IT(1956)}}\ \text{of kcal}$$

$$1\ \text{kcal}_{15°} = 4185{,}5\ \text{J} \cdot \frac{1}{9{,}806\ 65}\ \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{J}} = 426{,}802\ \text{kgf} \cdot \text{m}$$

$$1\ \text{kcal}_{\text{IT(1929)}} = 4186{,}84\ \text{J} \cdot \frac{1}{9{,}806\ 65}\ \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{J}} = 426{,}939\ \text{kgf} \cdot \text{m}$$

$$1\ \text{kcal}_{\text{IT(1956)}} = 1\ \text{kcal} = 4186{,}8\ \text{J} \cdot \frac{1}{9{,}806\ 65}\ \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{J}} = 426{,}935\ \text{kgf} \cdot \text{m}$$

2.6. Verband tussen Btu_{ST} en foot pound-force (ft . lbf) op basis van 1 pound = 0,453 592 3 kg, en Btu_{IT} en foot pound-force (ft . lbf) met thans als basis 1 pound = 0,453 592 37 kg

Hiervoor geldt :

$$\frac{Btu_{ST}}{ft\ .\ lbf} = \frac{\frac{0,453\ 592\ 3}{1,8}\ kcal_{IT(1929)}\ .\ 4186,84\ \frac{J}{kcal_{IT(1929)}}}{0,3048\ m\ .\ 0,453\ 592\ 3\ kg\ .\ 9,806\ 65\ \frac{m}{s^2}}$$

$$= \frac{1055,065\ 769\ J}{1,355\ 817\ 739\ J} = 778,177$$

$$\frac{Btu_{IT}}{ft\ .\ lbf} = \frac{\frac{0,453\ 592\ 37}{1,8}\ kcal_{IT(1956)}\ .\ 4186,8\ \frac{J}{kcal_{IT(1956)}}}{0,3048\ m\ .\ 0,453\ 592\ 37\ kg\ .\ 9,806\ 65\ \frac{m}{s^2}}$$

$$= \frac{1055,055\ 853\ J}{1,355\ 817\ 949\ J} = 778,169$$

2.7. Verband tussen paardekracht uur (pk . h) en kilocalorie

Daar 1 pk . h = $75\ \frac{kgf\ .\ m}{s}\ .\ 3600\ s = 270\ 000\ kgf\ .\ m$

$$= 270\ 000\ kgf\ .\ m \times 9,806\ 65\ \frac{J}{kgf\ .\ m} = 2\ 647\ 795,5\ J$$

bekomt men (na afronding) :

$$1\ pk\ .\ h = 2\ 647\ 795,5\ J\ .\ \frac{1}{4185,5}\ \frac{kcal_{15°}}{J} = 632,612\ kcal_{15°}$$

$$1\ pk\ .\ h = 2\ 647\ 795,5\ J\ .\ \frac{1}{4186,84}\ \frac{kcal_{IT(1929)}}{J} = 632,409\ kcal_{IT(1929)}$$

$$1\ pk\ .\ h = 2\ 647\ 795,5\ J\ .\ \frac{1}{4186,8}\ \frac{kcal_{IT(1956)}}{J} = 632,415\ kcal_{IT(1956)}$$

of kcal

2.8. De energie-eenheid liter atmosfeer (L . atm, l . atm)

In 1964 werd aan de inhoudsmaat liter een nieuwe definitie gegeven (namelijk 1 liter = 1 dm^3); voorheen gold : 1 liter = 1,000 028 dm^3.

Daar 1 atm = 101 325 Pa

$$= \frac{101\ 325}{9,806\ 65}\ \frac{kgf}{m^2} = 10\ 332,274\ 53\ \frac{kgf}{m^2}$$

bekomt men voor de (vroeger soms gebruikte) eenheid liter atmosfeer :

$$1\ \text{L . atm} = \frac{1{,}000\ 028}{1000}\ \text{m}^3\ .\ 10\ 332{,}274\ 53\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

$$= 10{,}332\ 563\ 83\ \text{kgf . m}$$

$$= \frac{1{,}000\ 028}{1000}\ \text{m}^3\ .\ 101\ 325\ \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$= 101{,}327\ 837\ \text{N . m} = 101{,}327\ 837\ \text{J}$$

$$\approx 101{,}328\ \text{J}$$

2.9. Eenheden van druk, vroeger soms gebruikt in de warmteleer

Wegens de gelijkheid van dimensie van energiedichtheid en druk, werd destijds dikwijls bij termodynamische processen waarin gassen betrokken waren, volgende eenheden als drukeenheden ("kalorische" drukeenheden) aangewend :

$$\frac{\text{kcal}_{\text{IT(1929)}}}{\text{m}^3} \qquad \frac{\text{cal}_{15°}}{\text{cm}^3} \qquad \frac{\text{Btu}_{\text{ST}}}{\text{cubic inch}} \qquad \frac{\text{CHU}_{\text{mean}}}{\text{cubic ft}}$$

Omrekening naar de SI-eenheid van druk (Pa) gebeurt als volgt :

$$1\ \frac{\text{kcal}_{\text{IT(1929)}}}{\text{m}^3} = \frac{4186{,}84\ \text{J}}{\text{m}^3} = 4186{,}84\ \frac{\frac{\text{kg . m}^2}{\text{s}^2}}{\text{m}^3} \qquad \left(\frac{\text{J}}{\text{m}^3} = \frac{\text{N . m}}{\text{m}^3} = \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = \text{Pa}\right)$$

$$= 4186{,}84\ \frac{\frac{\text{kg . m}}{\text{s}^2}}{\text{m}^2}$$

$$= 4186{,}84\ \text{Pa}$$

$$1\ \frac{\text{cal}_{15°}}{\text{cm}^3} = \frac{4{,}1855\ .\ 10^7\ \text{erg}}{\text{cm}^3} = 4{,}1855\ .\ 10^7\ \frac{\frac{\text{g . cm}^2}{\text{s}^2}}{\text{cm}^3} \qquad \left(\frac{\text{erg}}{\text{cm}^3} = \frac{\text{dyn . cm}}{\text{cm}^3} = \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2}\right)$$

$$= 4{,}1855\ .\ 10^7\ \frac{\frac{\text{g . cm}}{\text{s}^2}}{\text{cm}^2}$$

$$= 4{,}1855\ .\ 10^7\ \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2}$$

$$= 4{,}1855\ .\ 10^7\ \frac{10^{-5}\ \text{N}}{10^{-4}\ \text{m}^2}$$

$$= 4{,}1855\ .\ 10^6\ \text{Pa}$$

$$1\ \frac{\text{Btu}_{\text{ST}}}{\text{cubic inch}} = \frac{1055{,}1166\ \text{J}}{(0{,}0254)^3\ \text{m}^3} = 6{,}4384\ .\ 10^7\ \frac{\text{J}}{\text{m}^3} \qquad \left(\frac{\text{J}}{\text{m}^3} = \frac{\text{N . m}}{\text{m}^3} = \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = \text{Pa}\right)$$

$$= 6{,}4384\ .\ 10^7\ \text{Pa}$$

$$1\ \frac{CHU_{mean}}{\text{cubic ft}} = \frac{1900{,}42\ J}{(0{,}3048)^3\ m^3} = 67\ 112{,}7\ \frac{J}{m^3} \qquad \left(\frac{J}{m^3} = \frac{N \cdot m}{m^3} = \frac{N}{m^2} = Pa\right)$$

$$= 67\ 112{,}7\ Pa$$

2.10. Samenvatting van enkele van de voornaamste behandelde betrekkingen tussen warmte-eenheden

$1\ cal_{4°} = 4{,}2045\ J$

$1\ kcal_{4°} = 4204{,}5\ J$

$1\ cal_{15°} = 4{,}1855\ J$

$= 4{,}184\ 705\ J_{int}$

$1\ kcal_{15°} = 4185{,}5\ J$

$= 4184{,}705\ J_{int}$

$1\ cal_{20°} = 4{,}1816\ J$

$1\ kcal_{20°} = 4181{,}6\ J$

$1\ \overline{cal} = 4{,}189\ 71\ J$

$1\ \overline{kcal} = 4189{,}71\ J$

$1\ cal_{termoch} = 4{,}1833\ J_{int}$ (NBS) (vóór 1948)

$= 4{,}184\ J$ (exact, sinds 1948)

$1\ cal_{IT(1929)} = 4{,}186\ 84\ J$

$1\ kcal_{IT(1929)} = 4186{,}84\ J$

$1\ cal_{IT(1956)} = 1\ cal_{IT} = 1\ cal = 4{,}1868\ J$ (exact)

$1\ kcal_{IT(1956)} = 1\ kcal_{IT} = 1\ kcal = 4186{,}8\ J$ (exact)

$1\ J = 0{,}238\ 920\ cal_{15°}$

$= 0{,}000\ 238\ 920\ kcal_{15°}$

$= 0{,}238\ 844\ cal_{IT(1929)}$

$= 0{,}000\ 238\ 844\ kcal_{IT(1929)}$

$= 0{,}238\ 846\ cal_{IT(1956)}$ (of kortweg cal)

$= 0{,}000\ 238\ 846\ kcal_{IT(1956)}$ (of kortweg kcal)

$1\ J_{int} = 0{,}238\ 965\ cal_{15°}$

$= 0{,}000\ 238\ 965\ kcal_{15°}$

$1\ kcal_{15°} = 426{,}802\ kgf \cdot m$

$1\ kcal_{IT(1929)} = 426{,}939\ kgf \cdot m$

$1\ kcal_{IT(1956)} = 1\ kcal = 426{,}935\ kgf \cdot m$

$1\ Btu_{39,2\ °F} = 1059{,}52\ J$

$1\ Btu_{60,5\ °F} = 1054{,}54\ J$

$1\ Btu_{mean} = 1055{,}79\ J$

$1\ Btu_{ST} = 1055{,}066\ J$

$= 0{,}251\ 996\ kcal_{IT(1929)}$

$\approx 0{,}252\ kcal_{IT(1929)}$

$1\ Btu_{IT} = 1\ Btu = 1055{,}056\ J$

$= 0{,}251\ 996\ kcal_{IT(1956)}$ (of kortweg kcal)

$\approx 0{,}252\ kcal_{IT(1956)}$ (of kortweg kcal)

$1\ J = 0{,}000\ 943\ 824\ Btu_{39,2\ °F}$

$= 0{,}000\ 948\ 281\ Btu_{60,5\ °F}$

$= 0{,}000\ 947\ 158\ Btu_{mean}$

$= 0{,}000\ 947\ 808\ Btu_{ST}$

$= 0{,}000\ 947\ 817\ Btu_{IT}$ (of kortweg Btu)

$1\ CTU_{15\ °C} = 1898{,}51\ J$

$1\ CHU_{mean}$ 1900,42 J

$1\ J = 0{,}000\ 526\ 729\ CTU_{15\ °C}$

$= 0{,}000\ 526\ 199\ CHU_{mean}$

$1\ Btu_{ST} = 778{,}177\ ft \cdot lbf$ (op basis 1 lb = 0,453 592 3 kg)

$1\ Btu_{IT} = 1\ Btu = 778{,}169\ ft \cdot lbf$ (op basis 1 lb = 0,453 592 37 kg)

$1\ kW_{int} \cdot h = 3\ 600\ 000\ J_{int}$

$\triangleq 3\ 600\ 684\ J$

$= 860{,}276\ kcal_{15°}$

= 860 $kcal_{IT(1929)}$ (exact)

= 860,009 $kcal_{IT(1956)}$ (of kortweg kcal)

1 kW . h = 3 600 000 J = 3,6 MJ

= 860,112 $kcal_{15°}$

= 859,837 $kcal_{IT(1929)}$

= 859,845 $kcal_{IT(1956)}$ (of kortweg kcal)

1 pk . h = 2 647 795,5 J

= 632,612 $kcal_{15°}$

= 632,409 $kcal_{IT(1929)}$

= 632,415 $kcal_{IT(1956)}$ (of kortweg kcal)

1 L . atm = 101,328 J

HOOFDSTUK VI

DE EENHEID MOL VROEGER EN NU

1. Enkele gegevens uit de scheikunde

Een nuclide (of nucleïde) is een atoomspecies (atoomsoort) gekenmerkt door haar nucleonental of massagetal (dit getal geeft het aantal nucleonen in de kern weer, dit is de som van de protonen en de neutronen) en haar atoomnummer (dit getal geeft het aantal protonen weer, dit is het aantal positieve elementaire ladingen die de kern bezit). Nucliden met hetzelfde aantal protonen (dus met hetzelfde atoomnummer) doch een verschillend aantal nucleonen (dus een verschillend nucleonental of massagetal) zijn isotopen. Een element kan bestaan uit meerdere isotopen. De isotopen van een element hebben dezelfde chemische eigenschappen.

Het nucleonental of massagetal wordt weergegeven door een hoog geplaatste cijfer-index links van het symbool van de nuclide; het mag ook na het symbool geschreven worden; bijvoorbeeld : ^{235}U of U 235, ^{16}O of O 16.

Het protonental of atoomnummer (vroeger ook atoomgetal of ranggetal genoemd) wordt weergegeven door een laag geplaatste cijfer-index links van het symbool van de nuclide of van het element, bijvoorbeeld : de nuclide $^{12}_{6}C$, de nuclide $^{13}_{6}C$, het element $_{6}C$; de nuclide $^{16}_{8}O$, de nuclide $^{17}_{8}O$, de nuclide $^{18}_{8}O$, het element $_{8}O$.

2. De vroegere atoomgewichtsschalen

Oorspronkelijk stelde men het atoomgewicht (thans relatieve atoommassa genoemd) van een atoom waterstof (het lichtste element) gelijk aan 1. Later werd het atoomgewicht 16 toegekend aan een atoom zuurstof, waardoor een nieuwe atoomgewichtsschaal ontstond, die slechts in zeer geringe mate afweek van de vorige atoomgewichtsschaal.

De ontwikkeling van het isotopenonderzoek bracht echter met zich mede, dat men tot twee naast elkaar bestaande atoomgewichtsschalen kwam : enerzijds de *chemische* atoomgewichtsschaal, waarbij het atoomgewicht 16 werd toegekend aan het element O, dat gelijk is aan het "gemiddeld" zuurstofatoom $\bar{O}$ uit het zuurstofisotopenmengsel zoals het in de natuur voorkomt (en dat bestaat uit de isotopen ^{16}O, ^{17}O en ^{18}O), en anderzijds de *fysische* atoomgewichtsschaal, die rekening hield met het bestaan van isotopen en waarbij het atoomgewicht 16 werd toegekend aan het meest voorkomende zuurstofisotoop ^{16}O.

Heden gebruikt men niet meer de verouderde benamingen atoomgewicht A en molekuulgewicht M, doch wel de benamingen relatieve atoommassa A_r en relatieve molekuulmassa M_r. Gebruik makend van de nieuwe symbolen A_r en M_r ook voor de oude benamingen atoomgewicht en molekuulgewicht, kende men vroeger dus de volgende twee molekuulgewichten :

- het molekuulgewicht in de *chemische* atoomgewichtsschaal $M_{r,ch}$ met als basis $(A_{r,\bar{O}})_{ch} = 16$. In deze schaal was het atoomgewicht van het element waterstof gelijk aan 1,008 en het atoomgewicht van het element koolstof gelijk aan 12,011;
- het molekuulgewicht in de *fysische* atoomgewichtsschaal $M_{r,ph}$ met als basis $(A_{r,O\ 16})_{ph} = 16$. In deze schaal was het atoomgewicht van de zuurstofisotopen ^{16}O, ^{17}O en ^{18}O respektievelijk gelijk aan 16,000 000 (per definitie); 17,004 507 en 18,004 875. Het atoomgewicht van het element zuurstof (zuurstofisotopenmengsel zoals het in de natuur gemiddeld voorkomt) bedroeg in deze schaal : $(A_{r,\bar{O}})_{ph} = 16{,}004\ 465$.

Het begrip "zuurstofisotopenmengsel zoals het in de natuur gemiddeld voorkomt" is onvoldoende bepaald, omdat naargelang van de herkomst van de zuurstof, de onderlinge verhouding van de hoeveelheden van de verschillende isotopen veranderlijk is. Indien men atmosferische zuurstof in aanmerking neemt, gold volgende omrekeningsfaktor tussen beide atoomgewichtsschalen :

$$k_A = \frac{A_{r,ph}}{A_{r,ch}} = \frac{M_{r,ph}}{M_{r,ch}} = 1{,}000\ 279$$

Daar men, naargelang van de herkomst van de beschouwde zuurstof, andere waarden bekwam voor de omrekeningsfaktor, stelde de IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) de waarde 1,000 275 voor als konventionele gemiddelde waarde van de betrokken faktor, zodat men dan bekomt :

$$k_A = \frac{A_{r,ph}}{A_{r,ch}} = \frac{M_{r,ph}}{M_{r,ch}} = 1{,}000\ 275$$

3. De huidige schaal van de relatieve atoommassa's

Het bestaan van twee atoomgewichtsschalen en verschillende omrekeningsfaktoren leidde tot allerhande moeilijkheden en onnauwkeurigheden, en daarom werd in 1959-1960 door de IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) en de IUPAP (International Union of Pure and Applied Physics) besloten een nieuwe gemeenschappelijke schaal te definiëren, waarbij de onjuiste benamingen "atoomgewicht" en "molekuulgewicht" ook de plaats moesten ruimen voor de nauwkeuriger benamingen "relatieve atoommassa A_r" en "relatieve molekuulmassa M_r". In deze nieuwe schaal wordt het getal 12 aangenomen als de relatieve atoommassa van het koolstofisotoop ^{12}C.

Als omrekeningsfaktor tussen de (vroegere) *fysische* atoomgewichtsschaal met ^{16}O als standaardatoom, en de nieuwe (eveneens *fysische*) schaal der relatieve atoommassa's met ^{12}C als standaardatoom, geldt :

$$\frac{A_r\ (^{16}O = 16)}{A_r\ (^{12}C = 12)} = 1{,}000\ 317\ 917 \approx 1{,}000\ 318$$

Als omrekeningsfaktor tussen de (vroegere) *chemische* atoomgewichtsschaal en de nieuwe *fysische* schaal der relatieve atoommassa's met ^{12}C als standaardatoom geldt bij benadering :

$$\frac{A_r\ (O = 16)}{A_r\ (^{12}C = 12)} \approx \frac{1{,}000\ 318}{1{,}000\ 275} \approx 1{,}000\ 043$$

Ter verduidelijking dient nog aangestipt, dat met de nieuwe (enige) schaal der relatieve atoommassa's, zowel de relatieve atoommassa van een nuclide als van een element (isotopenmengsel) kan weergegeven worden. Koolstof komt bijvoorbeeld in de natuur voor als een mengsel van ^{12}C (98,89 %) en ^{13}C (1,11 %) met een relatieve atoommassa van respektievelijk

12,000 00 (per definitie) en 13,003 35. De relatieve atoommassa van het element koolstof als natuurlijk isotopenmengsel bedraagt :

$$(0{,}9889 \times 12) + (0{,}0111 \times 13{,}003\ 35) = 12{,}011$$

4. Vroegere definities van de eenheid mol

4.1. De eenheid mol als een chemische massagrootheid en als een fysische massagrootheid

Oorspronkelijk verstond men onder mol een "chemische massagrootheid" die voor ieder molekuulsoort een eigen individuele grootte bezat. Mol en kilomol werden ook gram-mol (g-mol) en kilogram-mol (kg-mol) genoemd. Ook de benamingen gram-atoom en gram-molekuul werden gebruikt als synoniem voor mol, respektievelijk bij éénatomige stoffen en twee- of meeratomige stoffen.

Een mol werd vroeger dus aangezien als een individuele chemische eenheid van massa, waarvan de grootte verschillend was naargelang van de beschouwde stof. De definitie van deze individuele chemische eenheid van massa was zodanig, dat de betrokken individuele eenheden telkens een gelijk aantal deeltjes (atomen, molekulen) bevatten.

Vertrekkend van de *chemische* atoomgewichtsschaal met als basis $(A_{r,O})_{ch} = 16$, bekwam men :

$$1\ \text{mol} = 1\ \text{mol}_{ch} = 1\ \text{g-mol}_{ch} = M_{r,ch}\ \text{g}$$

$$1\ \text{kmol} = 1\ \text{kmol}_{ch} = 1\ \text{kg-mol}_{ch} = M_{r,ch}\ \text{kg}$$

Voorbeeld : Met $M_{r,ch,Na} = 22{,}991\ (= A_{r,ch,Na})$

$M_{r,ch,Cl} = 35{,}457\ (= A_{r,ch,Cl})$

$M_{r,ch,NaCl} = 58{,}448$

bekwam men :

- voor natrium Na : $1\ \text{mol}_{ch} = 1\ \text{g-mol}_{ch} = 22{,}991$ g natrium

  $1\ \text{kmol}_{ch} = 1\ \text{kg-mol}_{ch} = 22{,}991$ kg natrium

- voor chloor Cl : $1\ \text{mol}_{ch} = 1\ \text{g-mol}_{ch} = 35{,}457$ g chloor

  $1\ \text{kmol}_{ch} = 1\ \text{kg-mol}_{ch} = 35{,}457$ kg chloor

- voor natriumchloride NaCl : 1 mol_{ch} = 1 $g\text{-}mol_{ch}$ = 58,448 g NaCl

1 $kmol_{ch}$ = 1 $kg\text{-}mol_{ch}$ = 58,448 kg NaCl

Onder konstante van Avogadro N_A verstond men (vroeger) in de *chemie* het aantal molekulen begrepen in een bepaalde hoeveelheid van een stof, gedeeld door de massa ervan uitgedrukt in $g\text{-}mol_{ch}$:

$$N_{A,ch} = N_A = \frac{6{,}0237 \cdot 10^{23}}{g\text{-}mol_{ch}}$$

Het molair normvolume V_{mn} (molair volume bij p = 101 325 Pa en T = 273,15 K) en de molaire gaskonstante $\mathcal{R}$ (algemene gaskonstante, universele gaskonstante) bedroegen op basis $(A_{r,o})_{ch}$ = 16 :

$$V_{mn} = 0{,}022\ 414\ 5\ \frac{m^3}{g\text{-}mol_{ch}}$$

$$= 22{,}4145\ \frac{m^3}{kg\text{-}mol_{ch}}$$

$$\mathcal{R} = 8{,}314\ 66\ \frac{J}{g\text{-}mol_{ch} \cdot K}$$

$$= 8314{,}66\ \frac{J}{kg\text{-}mol_{ch} \cdot K}$$

Met liter atmosfeer als energie-eenheid in plaats van joule bekomt men (met 1 L . atm = 101,327 837 J; zie Hoofdstuk V, onder 2.8.) :

$$\mathcal{R} = 0{,}082\ 057\ \frac{L \cdot atm}{g\text{-}mol_{ch} \cdot K}$$

$$= 82{,}057\ \frac{L \cdot atm}{kg\text{-}mol_{ch} \cdot K}$$

Toen naast de *chemische* atoomgewichtsschaal, met als basis $(A_{r,o})_{ch}$ = 16, er ook een *fysische* atoomgewichtsschaal met als basis $(A_{r,O\ 16})_{ph}$ = 16 ontstond, kon een mol ook worden aangezien als een "fysische massagrootheid" die voor ieder molekuulsoort een eigen individuele grootte bezat. De definitie van deze individuele fysische eenheid van massa was zodanig, dat de betrokken individuele eenheden telkens een gelijk aantal deeltjes (atome , molekulen) bevatten.

Men diende bijgevolg onderscheid te maken tussen enerzijds g-mol_{ch} en kg-mol_{ch}, en anderzijds g-mol_{ph} en kg-mol_{ph} :

$$1\ \text{mol}_{ch} = 1\ \text{g-mol}_{ch} = M_{r,ch}\ \text{g}$$

$$1\ \text{kmol}_{ch} = 1\ \text{kg-mol}_{ch} = M_{r,ch}\ \text{kg}$$

$$1\ \text{mol}_{ph} = 1\ \text{g-mol}_{ph} = M_{r,ph}\ \text{g}$$

$$1\ \text{kmol}_{ph} = 1\ \text{kg-mol}_{ph} = M_{r,ph}\ \text{kg}$$

De onderlinge verhouding wordt gegeven door :

$$k_A = \frac{A_{r,ph}}{A_{r,ch}} = \frac{M_{r,ph}}{M_{r,ch}} = \frac{\text{g-mol}_{ph}}{\text{g-mol}_{ch}} = \frac{\text{mol}_{ph}}{\text{mol}_{ch}} = 1{,}000\ 279$$

Onder konstante van Avogadro N_A verstond men (vroeger) in de *fysika* het aantal molekulen begrepen in een bepaalde hoeveelheid van een stof, gedeeld door de massa ervan uitgedrukt in g-mol_{ph} :

$$N_{A,ph} = N_A = \frac{1{,}000\ 279 \times 6{,}0237\ .\ 10^{23}}{\text{g-mol}_{ph}} = \frac{6{,}025\ .\ 10^{23}}{\text{g-mol}_{ph}}$$

Het molair normvolume V_{mn} (molair volume bij p = 101 325 Pa en T = 273,15 K) en de molaire gaskonstante $\mathfrak{R}$ (algemene gaskonstante, universele gaskonstante) bedroegen op basis $(A_{r,O\ 16})_{ph} = 16$:

$$V_{mn} = 0{,}022\ 414\ 5\ \frac{\text{m}^3}{\text{g-mol}_{ch}}\ .\ 1{,}000\ 279\ \frac{\text{g-mol}_{ch}}{\text{g-mol}_{ph}}$$

$$= 0{,}022\ 420\ 75\ \frac{\text{m}^3}{\text{g-mol}_{ph}}$$

$$= 22{,}420\ 75\ \frac{\text{m}^3}{\text{kg-mol}_{ph}}$$

$$\mathfrak{R} = 8{,}314\ 66\ \frac{\text{J}}{\text{g-mol}_{ch}\ .\ \text{K}}\ .\ 1{,}000\ 279\ \frac{\text{g-mol}_{ch}}{\text{g-mol}_{ph}}$$

$$= 8{,}316\ 98\ \frac{\text{J}}{\text{g-mol}_{ph}\ .\ \text{K}}$$

$$= 8316{,}98\ \frac{\text{J}}{\text{kg-mol}_{ph}\ .\ \text{K}}$$

Met liter atmosfeer als eenheid van energie in plaats van joule bekomt men (met 1 L . atm = 101,327 837 J; zie Hoofdstuk V, onder 2.8.) :

$$\mathcal{R} = 0{,}082\ 080\ \frac{\text{L . atm}}{\text{g-mol}_{ph} \cdot \text{K}}$$

$$= 82{,}080\ \frac{\text{L . atm}}{\text{kg-mol}_{ph} \cdot \text{K}}$$

Bij de *chemische* atoomgewichtsschaal op basis $(A_{r,\bar{o}})_{ch} = 16$ gaat het steeds om een isotopenmengsel zoals het in de natuur gemiddeld voorkomt, en dit is ook het geval bij mol_{ch} (of g-mol_{ch}). Een mol_{ch} (of g-mol_{ch}) atomaire zuurstof betekent steeds 16 g atomaire zuurstof in zijn natuurlijk isotopenmengsel, vermits $(A_{r,\bar{o}})_{ch} = 16$.

In tegenstelling hiermede, bood de *fysische* atoomgewichtsschaal (hier op basis $(A_{r,O\ 16})_{ph} = 16$) de mogelijkheid, een onderscheid te maken tussen de verschillende isotopen van eenzelfde element.

De aanduiding : "Een mol_{ph} (of g-mol_{ph}) atomaire zuurstof" diende nader bepaald te worden :

- ofwel als een mol_{ph} van zuurstofisotoop $^{16}O = 16{,}000\ 000$ g
- ofwel als een mol_{ph} van zuurstofisotoop $^{17}O = 17{,}004\ 507$ g
- ofwel als een mol_{ph} van zuurstofisotoop $^{18}O = 18{,}004\ 875$ g
- ofwel als een mol_{ph} van het gemiddeld voorkomend mengsel van de betrokken zuurstofisotopen = 16,004 465 g, vermits $(A_{r,\bar{o}})_{ph} = 16{,}004\ 465$.

4.2. De eenheid dalton en de massa-eenheid ME

De massa van één molekuul van een willekeurige homogene stof werd (vroeger) in de *chemie* gegeven door :

$$\frac{M_{r,ch}\ \text{g}}{6{,}0237 \cdot 10^{23}} = 1{,}6601 \cdot 10^{-24} \cdot M_{r,ch}\ \text{g}$$

$$= 1{,}6601 \cdot 10^{-27} \cdot M_{r,ch}\ \text{kg} = M_{r,ch}\ \text{dalton}$$

Vóór 1960 werd in de *chemie* aan de massa $1{,}6601 \cdot 10^{-27}$ kg de benaming dalton gegeven (in het Engels aangeduid met : atomic weight unit, awu). Een dalton is gelijk aan de massa van een hypotetisch atoom dat in de

chemische atoomgewichtsschaal, met als basis $(A_{r,O})_{ch} = 16$, een atoomgewicht zou hebben gelijk aan 1.

De massa van één molekuul van een willekeurige homogene stof werd (vroeger) in de *fysika* gegeven door :

$$\frac{M_{r,ph}\ g}{6,025\ .\ 10^{23}} = 1,6597\ .\ 10^{-24}\ .\ M_{r,ph}\ g$$

$$= 1,6597\ .\ 10^{-27}\ .\ M_{r,ph}\ kg = M_{r,ph}\ ME$$

Vóór 1960 werd in de *fysika* aan de massa $1,6597\ .\ 10^{-27}$ kg de benaming massa-eenheid ME gegeven (in het Engels aangeduid met atomic mass unit, amu). Een ME is gelijk aan de massa van een hypotetisch atoom dat in de *fysische* atoomgewichtsschaal, met als basis $(A_{r,O\ 16})_{ph} = 16$, een atoomgewicht zou hebben gelijk aan 1. Een ME is dus gelijk aan $\frac{1}{16}$ van de massa van een atoom ^{16}O.

4.3. De mol als eenheid van hoeveelheid stof (definitie van 1957)

In 1957 stelde de IUPAP (International Union of Pure and Applied Physics) voor, de eenheid "mol" niet meer te beschouwen als een individuele eenheid van massa, maar als "eenheid van hoeveelheid stof", met als definitie : Een mol is de hoeveelheid stof die evenveel deeltjes (molekulen, of atomen, of ionen of elektronen) bevat als er begrepen zijn in 16 gram zuivere zuurstof ^{16}O. "Hoeveelheid stof" werd aangezien als een nieuwe basisgrootheid, en "mol" als een nieuwe grondeenheid. De vroegere benamingen "gram-mol" (g-mol) en "kilogram-mol" (kg-mol) bleven voorbehouden aan de vroegere individuele massa-eenheid.

Als konstante van Avogadro (molair deeltjesaantal) werd in 1957 aangenomen :

$$N_{A,1957} = \frac{6,025\ 00\ .\ 10^{23}}{mol_{1957}} = 6,025\ .\ 10^{23}\ mol^{-1}_{1957}$$

Het molair normvolume V_{mn} (molair volume bij p = 101 325 Pa en T = 273,15 K) en de molaire gaskonstante $\mathcal{R}$ (algemene gaskonstante, universele gaskonstante) bedroegen op basis $(A_{r,O\ 16})_{ph} = 16$:

$$V_{mn} = 0{,}022\ 420\ 75 \frac{m^3}{mol}_{1957}$$

$$= 22{,}420\ 75 \frac{m^3}{kmol}_{1957}$$

$$R = 8{,}316\ 98 \frac{J}{mol}_{1957} \cdot K$$

$$= 8316{,}98 \frac{J}{kmol}_{1957} \cdot K$$

Met liter atmosfeer als eenheid van energie in plaats van joule bekomt men (met 1 L . atm = 101,327 837 J; zie Hoofdstuk V, onder 2.8.) :

$$R = 0{,}082\ 080 \frac{L \cdot atm}{mol}_{1957} \cdot K$$

$$= 82{,}080 \frac{L \cdot atm}{kmol}_{1957} \cdot K$$

5. Huidige definitie van de eenheid mol

Het CIPM heeft in 1967 een nieuwe definitie van de eenheid mol gegeven en heeft in 1969 deze nieuwe eenheid bevestigd als eenheid van hoeveelheid stof (E : amount of substance, D = Stoffmenge, F = quantité de matière). Een mol is thans per definitie gelijk aan de hoeveelheid stof van een stelsel dat evenveel elementaire entiteiten (deeltjes) bevat als er atomen zijn in 0,012 kilogram ^{12}C.

In 1971 neemt de 14de CGPM de aldus gedefinieerde mol aan als eenheid van hoeveelheid stof en verheft de betrokken eenheid tot zesde grondeenheid van het Internationale eenhedenstelsel (SI) terwijl de candela (eenheid van lichtsterkte) die voorheen de zesde grondeenheid was, een rang opschuift en de zevende grondeenheid wordt.

Op te merken valt dat de eenheid mol niet een volledig onafhankelijke grondeenheid is, vermits in de definitie van de mol ook de grondeenheid kilogram voorkomt.

De onderlinge verhouding tussen de mol van 1957 en de mol van 1971 wordt gegeven door :

$$\frac{A_r(^{16}O = 16)}{A_r(^{12}C = 12)} = \frac{\text{mol}\ (^{16}O = 16)}{\text{mol}\ (^{12}C = 12)} = \frac{\text{mol}_{1957}}{\text{mol}} = 1{,}000\ 317\ 917$$

Met behulp van deze faktor, bekomt men voor de konstante van Avogadro N_A, voor het molair normvolume V_{mn} (molair volume bij p = 101 325 Pa en T = 273,15 K) en voor de molaire gaskonstante $\mathcal{R}$ (algemene gaskonstante, universele gaskonstante), vertrekkend vanaf de waarden van 1957 :

$$N_A = \frac{6{,}025\ .\ 10^{23}}{\text{mol}_{1957}} \cdot \frac{1}{1{,}000\ 317\ 917}\ \frac{\text{mol}_{1957}}{\text{mol}}$$

$$= 6{,}023\ 09\ .\ 10^{23}\ \text{mol}^{-1}$$

$$V_{mn} = 0{,}022\ 420\ 75\ \frac{\text{m}^3}{\text{mol}_{1957}} \cdot \frac{1}{1{,}000\ 317\ 917}\ \frac{\text{mol}_{1957}}{\text{mol}}$$

$$= 0{,}022\ 413\ 6\ \frac{\text{m}^3}{\text{mol}}$$

$$= 22{,}4136\ \frac{\text{m}^3}{\text{kmol}}$$

$$\mathcal{R} = 8{,}316\ 98\ \frac{\text{J}}{\text{mol}_{1957}\ .\ \text{K}} \cdot \frac{1}{1{,}000\ 317\ 917}\ \frac{\text{mol}_{1957}}{\text{mol}}$$

$$= 8{,}314\ 34\ \frac{\text{J}}{\text{mol}\ .\ \text{K}}$$

$$= 8314{,}34\ \frac{\text{J}}{\text{kmol}\ .\ \text{K}}$$

Als meest recente waarden gelden echter voor het ogenblik (waarden overgenomen uit het CODATA-bulletin nr. 11 van december 1973 van de International Council of Scientific Unions) :

$$N_A = 6{,}022\ 045\ .\ 10^{23}\ \text{mol}^{-1}$$

$$V_{mn} = 0{,}022\ 413\ 83\ \frac{\text{m}^3}{\text{mol}} = 22{,}413\ 83\ \frac{\text{m}^3}{\text{kmol}}$$

$$\mathcal{R} = 8{,}314\ 41\ \frac{\text{J}}{\text{mol}\ .\ \text{K}} = 8314{,}41\ \frac{\text{J}}{\text{kmol}\ .\ \text{K}}$$

De waarde van $\mathcal{R}$ is afgeleid uit de algemene gaswet :

$$p \cdot V = n \cdot \mathcal{R} \cdot T$$

waaruit volgt :

$$p \cdot V_m = \mathcal{R} \cdot T$$

Wanneer de druk p gelijk is aan 101 325 Pa en T = 273,15 K, is V_m gelijk aan V_{mn}, waarvan de waarde bij een ideaal gas gelijk is aan 0,022 413 83 $\frac{m^3}{mol}$. Uit deze waarden kan $\mathcal{R}$ worden berekend :

$$\mathcal{R} = \frac{101\ 325\ \frac{N}{m^2} \cdot 0{,}022\ 413\ 83\ \frac{m^3}{mol}}{273{,}15\ K}$$

$$= 8{,}314\ 41\ \frac{J}{mol \cdot K} = 8314{,}41\ \frac{J}{kmol \cdot K}$$

6. Molaire massa M

De molaire massa M van een scheikundige stof is de massa m, gedeeld door de hoeveelheid stof n :

$$M = \frac{m}{n}$$

Als koherente SI-eenheid van molaire massa M bekomt men :

$$\frac{\text{SI-eenheid van massa}}{\text{SI-eenheid van hoeveelheid stof}} = \frac{[m]_{SI}}{[n]_{SI}} = \frac{kg}{mol}$$

Andere veel gebruikte eenheden van molaire massa zijn : $\frac{g}{mol}$ en $\frac{kg}{kmol}$.

Indien men, zoals in de praktijk veel gebeurt, de eenheden $\frac{g}{mol}$ en $\frac{kg}{kmol}$ gebruikt, is de betrokken getalwaarde gelijk aan de relatieve molekuulmassa M_r (die een onbenoemd getal is) :

$$M = M_r\ \frac{g}{mol} = M_r\ \frac{kg}{kmol}$$

Wanneer men echter de koherente SI-eenheid $\frac{kg}{mol}$ gebruikt, bekomt men :

$$M = \frac{M_r}{1000}\ \frac{kg}{mol}$$

De massa van 1 mol van een bepaalde scheikundige stof, is bijgevolg gelijk aan M_r g of $\frac{M_r}{1000}$ kg, terwijl de massa van 1 kmol van een bepaalde scheikundige stof gelijk is aan M_r kg.

De aandacht zij er op gevestigd, dat :

- "massa" m wordt uitgedrukt in eenheden van massa (kg, g, ...)
- "hoeveelheid stof" n wordt uitgedrukt in eenheden van hoeveelheid stof (mol, kmol, ...)
- "molaire massa" M wordt uitgedrukt in eenheden van molaire massa ($\frac{kg}{mol}$, $\frac{g}{mol}$, $\frac{kg}{kmol}$, ...).

Het zou onjuist zijn te schrijven : 1 mol = M_r g, omdat mol en g eenheden betreffen van verschillende grootheden. Een korrekte schrijfwijze is echter wel : 1 mol $\hat{=}$ M_r g, hetgeen betekent dat 1 mol van een bepaalde scheikundige stof overeenstemt met M_r g van dezelfde scheikundige stof.

7. Relatieve atoommassa A_r, relatieve molekuulmassa M_r

De relatieve atoommassa A_r van een element (dat een isotopenmengsel kan zijn) en de relatieve molekuulmassa M_r van een stof worden gedefinieerd als volgt :

$$A_r = \frac{\text{gemiddelde massa per atoom van het element}}{\frac{\text{massa van een atoom van de nuclide } {}^{12}C}{12}}$$

$$M_r = \frac{\text{gemiddelde massa per molekuul van de stof}}{\frac{\text{massa van een atoom van de nuclide } {}^{12}C}{12}}$$

8. Geünificeerde atoommassa-eenheid u (atomaire massa-eenheid u)

Het twaalfde deel van de rustmassa van een neutraal atoom van de nuclide ^{12}C in de grondtoestand wordt in de atoomfysika genoemd : (geünificeerde) atoommassakonstante, met als symbool m_u. Deze hoeveelheid is aangenomen als een (uiteraard niet-koherente) eenheid van massa, met de benaming : geünificeerde atoommassa-eenheid (unified atomic mass unit), met als symbool : u. Verder is de geünificeerde atoommassa-eenheid u ook gelijk aan het twaalfde deel van de molaire massa M van koolstof ^{12}C , gedeeld door de konstante van Avogadro N_A.

Uit het bovenstaande volgt :

$$\frac{1}{12}\, m\,(^{12}C) = m_u = 1\ u = \frac{\frac{1}{12} \cdot 12\ \frac{g}{mol}}{N_A} = \frac{1\ \frac{g}{mol}}{N_A} = \frac{1\ \frac{g}{mol}}{\frac{6{,}022\ 045\ .\ 10^{23}}{mol}} = \frac{1}{\{N_A\}_{mol^{-1}}}\ g$$

$$\approx 1{,}660\ 565\ 5\ .\ 10^{-24}\ g$$

$$\approx 1{,}660\ 565\ 5\ .\ 10^{-27}\ kg$$

De geünificeerde atoommassa-eenheid u is een wettelijke eenheid (zie Hoofdstuk X, onder 3.2.4.1.). De atoommassa-eenheid u is in zekere zin de opvolger van de eenheden dalton (atomic weight unit, awu) en de massa-eenheid ME (atomic mass unit, amu). De drie betrokken eenheden verschillen onderling zeer weinig (zie onderhavig hoofdstuk onder 4.2.).

Zowel de getalwaarde van de massa m van een atoom gemeten in u, als de getalwaarde van de molaire massa M van dezelfde atoomsoort gemeten in g/mol, zijn gelijk aan de relatieve atoommassa A_r (vroeger atoomgewicht A genoemd) :

$$\{m\}_u = \frac{m}{u} = A_r \qquad m = A_r\ u$$

$$\{M\}_{g/mol} = \frac{M}{g/mol} = A_r \qquad M = A_r\ \frac{g}{mol} = A_r\ \frac{kg}{kmol}$$

9. Koncentratie

9.1. Definitie van enkele koncentratieparameters

De koncentratie van komponent B geeft aan, hoeveel opgeloste stof van komponent B zich bevindt in een hoeveelheid oplosmiddel (index : OM) of in een hoeveelheid oplossing of mengsel (index : M).
Hierna worden enkele koncentratieparameters besproken.

A. Stofkoncentratie c_B (molaire koncentratie)

De stofkoncentratie c_B (molaire koncentratie) van komponent B in een oplossing is gedefinieerd als de hoeveelheid opgeloste stof n_B (van komponent B) per volume oplossing V_M :

$$c_B = \frac{\text{hoeveelheid opgeloste stof van komponent B}}{\text{volume van de oplossing}} = \frac{n_B}{V_M}$$

De SI-eenheid van stofkoncentratie is mol/m^3; in de praktijk komen de eenheden mol/L en kmol/m^3 veel voor :

$$1\ \frac{mol}{L} = 1\ \frac{kmol}{m^3} = 1000\ \frac{mol}{m^3}$$

Het resultaat van de getalwaardenvergelijking $\frac{\text{aantal mol opgeloste stof}}{\text{aantal liter oplossing}}$ wordt de "molariteit" van de betrokken oplossing genoemd. Een oplossing van natriumchloride NaCl (keukenzout) waarin deze stof een stofkoncentratie (molaire koncentratie) bezit van 0,1 mol/L = 0,1 kmol/m^3 noemt men een 0,1 molair natriumchlorideoplossing, aangegeven als 0,1 M NaCl (-oplossing), als resultaat van de getalwaardenvergelijking : $\frac{\text{aantal mol opgeloste stof}}{\text{aantal liter oplossing}}$; men zegt ook wel : de oplossing is 0,1 M (molair) aan NaCl.

Het begrip molariteit (gedefinieerd door een getalwaardenvergelijking) dient in de toekomst vermeden te worden. In de plaats ervan komt het meer algemeen begrip stofkoncentratie (gedefinieerd door een algemene groothedenvergelijking) : de stofkoncentratie van de hierboven besproken keukenzoutoplossing is gelijk aan 0,1 mol/L of 0,1 kmol/m^3 of 100 mol/m^3.

Op te merken valt, dat de definitievergelijking van de *p*H ("waterstofionenexponent") ook een getalwaardenvergelijking is :

$$pH = - \lg a_{H^+} \qquad \text{(VI,1)}$$

met a_{H^+} = getalwaarde van de aktiviteit van de waterstofionen behorend bij de eenheid mol/L (geen SI-eenheid; 1 mol/L = 1 kmol/m^3 = 1000 mol/m^3)

Indien men bij gebruik van de getalwaarde behorend bij de SI-eenheid mol/m^3, hetzelfde getal als *p*H-waarde zou willen bekomen, zou men een andere definitievergelijking (die eveneens een getalwaardenvergelijking is) moeten aannemen :

$$pH = - \lg (10^{-3} \cdot a_{H^+}) = - (-3) - \lg a_{H^+} = 3 - \lg a_{H^+} \qquad \text{(VI,2)}$$

met a_{H^+} = getalwaarde van de aktiviteit van de waterstofionen behorend bij de SI-eenheid mol/m^3

Voorbeeld :

$$a_{H^+} = 10^{-7}\ \text{mol/L} = 10^{-4}\ \text{mol/m}^3$$

Men bekomt :

- volgens (VI,1) : $pH = - \lg a_{H^+} = - \lg 10^{-7} = - (-7) = 7$
- volgens (VI,2) : $pH = 3 - \lg a_{H^+} = 3 - \lg 10^{-4} = 3 - (-4) = 7$

Op een analoge wijze zou ook het ionenprodukt van water $K_w = a_{H^+} \cdot a_{OH^-} = 10^{-14}$ (met a_{H^+} en a_{OH^-} = getalwaarde van de aktiviteit van de H^+-ionen en de OH^--ionen behorend bij de eenheid mol/L) anders gedefinieerd moeten worden. Indien men de waarde 10^{-14} zou willen behouden bij het gebruik van de getalwaarden van de aktiviteiten behorend bij de SI-eenheid mol/m^3, zou de betrokken getalwaardenvergelijking er uitzien als volgt :

$$K_w = 10^{-6} \cdot a_{H^+} \cdot a_{OH^-} = 10^{-14}$$

B. Normaliteit of titer

De normaliteit of titer is een in de analytische scheikunde nog veel gebruikte maat voor het aangeven van de koncentratie van een opgeloste stof in een oplossing, en wordt gedefinieerd door volgende getalwaardenvergelijking :

$$\text{normaliteit (of titer)} = \frac{\text{aantal gramekwivalent opgeloste stof}}{\text{aantal liter oplossing}}$$

Een oplossing van zwavelzuur H_2SO_4, waarin deze stof een normaliteit van bijvoorbeeld 0,1 bezit, heet een 0,1 normaal zwavelzuuroplossing, aangegeven als 0,1 N H_2SO_4 (= oplossing); men zegt ook wel : de oplossing is 0,1 N (normaal) aan zwavelzuur, of : de titer van de H_2SO_4-oplossing is 0,1.

De begrippen gramekwivalent (symbool : geq) en normaliteit zijn in de vorige eeuw ingevoerd, omdat daardoor de berekeningen bij titrimetrische bepalingen iets eenvoudiger werden dan bij het gebruik van de molariteit. Het verband tussen gramekwivalent en mol, en tussen molariteit en normaliteit (titer) hangt af van de beschouwde reaktie :

a) bij zuur-basereakties :

1 mol van een stof, gedeeld door het aantal (bij de beschouwde reaktie) vervangbare H^+-ionen of OH^--ionen, stemt overeen met 1 gramekwivalent van de betrokken stof.

Hieruit volgt :

1 N HCl = 1 M HCl (1 geq ≙ 1 mol)

1 N NaOH = 1 M NaOH (1 geq ≙ 1 mol)

1 N H_2SO_4 = $\frac{1}{2}$ M H_2SO_4 (1 geq ≙ $\frac{1}{2}$ mol)

1 N $Ba(OH)_2$ = $\frac{1}{2}$ M $Ba(OH)_2$ (1 geq ≙ $\frac{1}{2}$ mol)

1 N H_3PO_4 ($\rightarrow H_2PO_4^-$) = 1 M H_3PO_4 (1 geq ≙ 1 mol)

1 N H_3PO_4 ($\rightarrow HPO_4^{--}$) = $\frac{1}{2}$ M H_3PO_4 (1 geq ≙ $\frac{1}{2}$ mol)

1 N H_3PO_4 ($\rightarrow PO_4^{---}$) = $\frac{1}{3}$ M H_3PO_4 (1 geq ≙ $\frac{1}{3}$ mol)

b) bij redoxreakties :

Volgens de klassieke teorie geldt :

oxidatie = opnemen van zuurstof (afgegeven door het oxidatiemiddel)

reduktie = afgeven van zuurstof (opgenomen door het reduktiemiddel)

Volgens de meer recente elektronenteorie geldt :

oxidatie = afgeven van elektronen (opgenomen door het oxidatiemiddel)

reduktie = opnemen van elektronen (afgegeven door het reduktiemiddel)

Een oxidatie of reduktie gaat gepaard met een valentieverandering van het element (of ion), dit door afgave (oxidatie) of opname (reduktie) van elektronen. De term "valentie" wordt meestal vervangen door "oxidatiegetal", en "verandering van valentie" door "verandering van het oxidatiegetal".

Voorbeelden :

$Fe + O \rightarrow FeO$ $\qquad$ $2\ FeCl_2 + Cl_2 \rightarrow 2\ FeCl_3$

$Fe^\circ - 2\ e \rightarrow Fe^{++}$ (oxidatie) $\qquad$ $2\ Fe^{++} - 2\ e \rightarrow 2\ Fe^{+++}$ (oxidatie)

$O^\circ + 2\ e \rightarrow O^{--}$ (reduktie) $\qquad$ $Cl_2^\circ + 2\ e \rightarrow 2\ Cl^-$ (reduktie)

Bij de oxidatie van Fe wordt het oxidatiegetal meer positief, terwijl het oxidatiegetal van respektievelijk zuurstof en chloor meer negatief wordt.

$CuO + H_2 \rightarrow Cu + H_2O$

$Cu^{++} + 2\ e \rightarrow Cu$ (reduktie)

$H_2^\circ - 2\ e \rightarrow 2\ H^+$ (oxidatie)

Bij de reduktie van Cu^{++} wordt het oxidatiegetal minder positief, terwijl bij oxidatie van waterstof het oxidatiegetal meer positief wordt.

Uit bovenstaande voorbeelden blijkt dat in éénzelfde reaktie zowel oxidatie als reduktie voorkomen. Dergelijke reakties noemt men redoxreakties.
Het element, ion of molekuul in geoxideerde toestand noemt men oxidans of oxidatiemiddel : het kan "e" opnemen (afgegeven door het te oxideren element, ion of molekuul).
Het element, ion of molekuul in gereduceerde toestand noemt men reduktans of reduktiemiddel : het kan "e" afgeven (opgenomen door het te reduceren element, ion of molekuul).
Wat betreft redoxreacties, geldt volgend verband tussen gramekwivalent en mol :

1 gramekwivalent oxidatiemiddel stemt overeen met :

$$\frac{\text{1 mol oxidatiemiddel (oxidans)}}{\text{totaal aantal opgenomen elektronen per molekuul oxidatiemiddel}}$$

1 gramekwivalent reduktiemiddel stemt overeen met :

$$\frac{\text{1 mol reduktiemiddel (reduktans)}}{\text{totaal aantal afgegeven elektronen per molekuul reduktiemiddel}}$$

Hierna volgen de deelreakties van enkele oxidantia en reduktantia, met opgave voor de betrokken reaktie van het verband tussen gramekwivalent en mol :

☆ oxidantia

$KMnO_4$ (in sterk zuur midden) :

$MnO_4^- + 8\ H^+ + 5\ e \rightleftarrows Mn^{++} + 4\ H_2O$

$KMnO_4$ (in neutraal midden) :

$MnO_4^- + 4\ H^+ + 3\ e \rightleftarrows MnO_2 + 2\ H_2O$

Hieruit volgt :

1 N $KMnO_4$ ($\rightarrow Mn^{++}$) = $\frac{1}{5}$ M $KMnO_4$ (1 geq $\triangleq \frac{1}{5}$ mol)

1 N $KMnO_4$ ($\rightarrow MnO_2$) = $\frac{1}{3}$ M $KMnO_4$ (1 geq $\triangleq \frac{1}{3}$ mol)

en verder :

1 N $KMnO_4$ (in sterk zuur midden) = 0,6 N $KMnO_4$ (neutraal midden), vermits

$0{,}6 \times \frac{1}{3} = \frac{1}{5}$

$K_2Cr_2O_7$:

$Cr_2O_7^{--} + 14\ H^+ + 6\ e \rightleftarrows 2\ Cr^{+++} + 7\ H_2O$

1 N $K_2Cr_2O_7 = \frac{1}{6}$ M $K_2Cr_2O_7$ (1 geq $\hat{=}$ $\frac{1}{6}$ mol)

I_2 :

$I_2 + 2\ e \rightleftarrows 2\ I^-$

1 N $I_2 = \frac{1}{2}$ M I_2 (1 geq $\hat{=}$ $\frac{1}{2}$ mol)

H_2O_2 :

$H_2O_2 + 2\ H^+ + 2\ e \rightleftarrows 2\ H_2O$

1 N $H_2O_2 = \frac{1}{2}$ M H_2O_2 (1 geq $\hat{=}$ $\frac{1}{2}$ mol)

☆ reduktantia

$FeSO_4$:

$Fe^{++} - e \rightleftarrows Fe^{+++}$

1 N $FeSO_4$ = 1 M $FeSO_4$ (1 geq $\hat{=}$ 1 mol)

$Na_2S_2O_3$:

$2\ S_2O_3^{--} - 2\ e \rightleftarrows S_4O_6^{--}$

1 N $Na_2S_2O_3$ = 1 M $Na_2S_2O_3$ (1 geq $\hat{=}$ 1 mol)

KI :

$2\ I^- - 2\ e \rightleftarrows I_2$

1 N KI = 1 M KI (1 geq $\hat{=}$ 1 mol)

H_2O_2 :

$H_2O_2 - 2\ e \rightleftarrows 2\ H^+ + O_2$

1 N H_2O_2 = $\frac{1}{2}$ M H_2O_2 (1 geq $\hat{=}$ $\frac{1}{2}$ mol)

c. bij neerslagreakties :

1 gramekwivalent stemt overeen met het aantal mol dat in reaktie komt met 1 mol van een éénwaardig ion, bijvoorbeeld Ag^+.

Voorbeelden :

$NaCl$: 1 N $NaCl$ = 1 M $NaCl$ (1 geq ≙ 1 mol)

$BaCl_2$: 1 N $BaCl_2$ = $\frac{1}{2}$ M $BaCl_2$ (1 geq ≙ $\frac{1}{2}$ mol)

$AgNO_3$: 1 N $AgNO_3$ = 1 M $AgNO_3$ (1 geq ≙ 1 mol)

K_2SO_4 : 1 N K_2SO_4 = $\frac{1}{2}$ M K_2SO_4 (1 geq ≙ $\frac{1}{2}$ mol)

Bij elke reaktie geldt dat het aantal reagerende gramekwivalent van elk der stoffen gelijk is, zonder dat men rekening dient te houden met de in de reaktievergelijking voorkomende koëfficiënten (deze zijn verwerkt in het begrip gramekwivalent) :

- 1 gramekwivalent zuur reageert met 1 gramekwivalent base
- 1 gramekwivalent van een oxidans reageert met 1 gramekwivalent van een reduktans, enz.

Bij een zuur-basetitratie bijvoorbeeld geldt nu eenvoudig :

$$V_{base} \cdot t_{base} = V_{zuur} \cdot t_{zuur}$$

met V en t = volume en titer, respektievelijk van de gebruikte zuur- en base-oplossingen (aantal liter oplossing x titer = aantal gramekwivalent opgeloste stof).

Om het titratieresultaat om te rekenen in de massa van de te bepalen stof, moet men echter de waarde van een gramekwivalent kennen en dus toch weer terugvallen op de reaktievergelijking. Daarmee vervalt het voordeel van de normaliteit boven de molariteit weer voor een deel.

Het grootste bezwaar tegen de begrippen gramekwivalent en normaliteit is, dat zij niet in alle gevallen eenduidig zijn : zo kan de normaliteit van één en dezelfde oplossing bij een zuur-basetitratie een andere waarde hebben dan bij een redoxtitratie. Op grond hiervan dient men het gebruik van de normaliteit als konc[illegible]tratieaanduiding zonder meer in elk geval te vermijden, te meer daar dit gebruik geen enkel voordeel biedt boven het gebruik van de eenduidige grootheid stofkoncentratie (molaire koncentratie). Immers, zelfs bij titraties heeft het handhaven van gramekwivalent en normaliteit weinig zin, omdat, als de aard van de reagerende stoffen en de reaktievergelijking bekend zijn, het werken met de begrippen mol en stofkoncentratie (molaire koncentratie) de berekeningen niet veel gekompliceerder maakt, een mogelijke bron van verwarring uitschakelt en het voordeel

heeft slechts één eenduidige koncentratieparameter te vereisen. Alleen als de aard van de te bepalen stof onbekend is, kan men de hoeveelheid ervan (als resultaat van de titratie) slechts in gramekwivalent aangeven en niet in mol.

De benaming "gramekwivalent" werd afgekort tot "val" (analoog aan de afkorting van grammolekuul tot mol), met als symbool : val (= geq).
De eenheid "gramekwivalent" of kortweg "val" (die geen SI-eenheid is) kan worden aangezien als een eenheid van de grootheid "ekwivalente hoeveelheid stof n_{ekw}", gedefinieerd als volgt :

$$\{n\}_{mol} \times \text{mol} \triangleq \{n\}_{mol} \times z \times \text{geq} = \{n_{ekw}\}_{geq} \times \text{geq} = n_{ekw}$$

met z gelijk aan :

- bij zuur-basereakties : het aantal bij de beschouwde reaktie vervangbare H^+-ionen of OH^--ionen;
- bij redoxreakties : het aantal mol elektronen dat bij de beschouwde reaktie opgenomen of afgegeven wordt door 1 mol van de beschouwde stof of deeltjessoort;
- bij neerslagreakties : het aantal mol éénwaardige ionen (bijvoorbeeld Ag^+), dat in reaktie komt met 1 mol van de beschouwde stof of deeltjessoort.

Hieruit volgt :

1 mol $\triangleq z$ geq = z val	1 geq = 1 val $\triangleq \frac{1}{z}$ mol
1 kmol $\triangleq z$ keq = z kval	1 keq = 1 kval $\triangleq \frac{1}{z}$ kmol
1 mmol $\triangleq z$ meq = z mval	1 meq = 1 mval $\triangleq \frac{1}{z}$ mmol

De waarde van z (die steeds een geheel getal is, gelijk aan of groter dan 1) kan voor één en dezelfde stof verschillend zijn, afhankelijk van de beschouwde reaktie, en is met name voor ionen in redoxreakties meestal niet gelijk aan de valentie van de betrokken ionsoort. Gramekwivalent of val is dus een individuele eenheid van hoeveelheid stof, die niet alleen afhangt van de aard van de betrokken stof, doch ook van de beschouwde reaktie. Wegens het niet-eenduidig karakter van de eenheid gramekwivalent of val, verdient het aanbeveling het gebruik ervan zoveel mogelijk te vermijden en als eenheid van hoeveelheid stof slechts de mol (of veelvouden en delen ervan) te gebruiken. Het gebruik van de normaliteit (titer) als koncentratiepara-

meter dient dus om twee redenen vermeden te worden :
- de eenheid gramekwivalent is niet eenduidig;
- de normaliteit (titer) wordt gedefinieerd als een getalwaardenvergelijking, en niet als een algemene groothedenvergelijking.

Het verdient dus de voorkeur, steeds de stofkoncentratie (molaire koncentratie) in aanmerking te nemen en niet de normaliteit (titer).

C. Molaliteit b_B (de molaliteit wordt doorgaans voorgesteld door m_B; hierna wordt m_B echter gebruikt als symbool voor de massa van komponent B)

De molaliteit b_B (ook soms stofgehalte genoemd) van komponent B in een oplossing is gedefinieerd als de hoeveelheid opgeloste stof n_B per massa oplosmiddel m_{OM} :

$$b_B = \frac{n_B}{m_{OM}}$$

De SI-eenheid van molaliteit = $\frac{\text{mol}}{\text{kg}}$.

De molaliteit (stofgehalte) wordt vooral bij wetenschappelijk onderzoek van oplossingen gebruikt omdat de molaliteit, in tegenstelling met de stofkoncentratie, niet van de temperatuur afhangt. Het aangeven van de molaliteit (stofgehalte) in mol per kg oplosmiddel (en niet in mol per g oplosmiddel) was ook vóór de invoering van de SI-eenheden reeds gebruikelijk. De reden hiervoor was dat daardoor in verdunde oplossingen in water de getalwaarde van de molaliteit (stofgehalte) in mol/kg en die van de stofkoncentratie in mol/L (= molariteit) vrijwel gelijk waren. Om dit voordeel te handhaven wordt als eenheid van molaliteit (stofgehalte) mol/kg gehanteerd en niet kmol/kg, terwijl als eenheid van stofkoncentratie kmol/m^3 (= mol/L) wordt aangewend.

Een oplossing van natriumchloride NaCl (keukenzout) waarin deze stof een molaliteit van 0,1 mol/kg bezit, noemt men een 0,1 molaal natriumchlorideoplossing, aangegeven als 0,1 m NaCl(-oplossing).

D. Stoffraktie of molaire fraktie x_B

De stoffraktie of molaire fraktie x_B van komponent B in een mengsel (van twee of meer stoffen) is gelijk aan de in het mengsel aanwezige

hoeveelheid stof van komponent B gedeeld door de som van de hoeveelheden stof van alle komponenten in het mengsel aanwezig (oplosmiddel inbegrepen) :

$$x_B = \frac{n_B}{n_M}$$

De stoffraktie x_B is een dimensieloze grootheid, met een getalwaarde gelegen tussen 0 (geen komponent B aanwezig) en 1 (alleen stof B aanwezig). De som van de stoffrakties van alle in het mengsel aanwezige komponenten is gelijk aan 1.

E. Massakoncentratie ρ'_B

De massakoncentratie ρ'_B van komponent B in een oplossing is gelijk aan de massa m_B van de opgeloste stof, gedeeld door het volume van de oplossing V_M :

$$\rho'_B = \frac{m_B}{V_M}$$

De SI-eenheid van massakoncentratie is $\frac{kg}{m^3}$.
De massakoncentratie ρ'_B mag niet worden verward met de soortelijke massa (of dichtheid) van het produkt B, voorgesteld door ρ_B.

F. Massafraktie w_B

De massafraktie van komponent B in een mengsel (van twee of meer stoffen) is gelijk aan de verhouding van de in het mengsel aanwezige massa van komponent B tot de totale massa van het mengsel :

$$w_B = \frac{m_B}{m_M}$$

De massafraktie w_B is een dimensieloze grootheid, met een getalwaarde tussen 0 en 1. De som van de massafrakties van alle in het mengsel aanwezige komponenten, is gelijk aan 1

Voorbeeld :

Wanneer 25 g suiker opgelost wordt in 100 g water, bedraagt de massafraktie :

- van het suiker :

$$\frac{25\ g}{100\ g + 25\ g} = 0,2$$

- van het water :

$$\frac{100\ g}{100\ g + 25\ g} = 0,8$$

G. Volumefraktie (gassen)

De volumefraktie van komponent B in een mengsel van twee of meer gassen is gelijk aan de verhouding van het partieel volume van het betrokken gas tot het totaal volume van het mengsel. De volumefraktie is een dimensieloze grootheid, met een getalwaarde tussen 0 en 1. De som van de volumefrakties van alle in het mengsel aanwezige komponenten is gelijk aan 1.

H. Koncentratie weergegeven in "parts per million (ppm)" en "parts per billion (ppb)" : zie Hoofdstuk XV, onder 5.7.

9.2. Onderling verband tussen enkele koncentratieparameters

Het onderling verband tussen de grootheden :

- stofkoncentratie (molaire koncentratie) $c_B = \frac{n_B}{V_M}$ (SI-eenheid : mol/m^3)
- molaliteit (stofgehalte) $b_B = \frac{n_B}{m_{OM}}$ (SI-eenheid : mol/kg)
- stoffraktie (molaire fraktie) $x_B = \frac{n_B}{n_M}$ (dimensieloos)
- massakoncentratie $\rho'_B = \frac{m_B}{V_M}$ (SI-eenheid : kg/m^3)

wordt gegeven door de volgende algemene groothedenvergelijkingen (geldend voor een oplossing met een willekeurig aantal komponenten waaronder komponent B) :

$$b_B = \frac{n_M}{n_{OM} \cdot M_{OM}} \cdot x_B = \frac{n_M \cdot M_M}{\rho_M \cdot n_{OM} \cdot M_{OM}} \cdot c_B = \frac{n_M \cdot M_M}{\rho_M \cdot n_{OM} \cdot M_{OM} \cdot M_B} \cdot \rho'_B \quad \text{(VI,3)}$$

$$= \frac{n_M}{m_{OM}} \cdot x_B \qquad = \frac{V_M}{m_{OM}} \cdot c_B \qquad = \frac{V_M}{m_{OM} \cdot M_B} \cdot \rho'_B \quad \text{(VI, 4)}$$

met $n_M = \Sigma n$ = som van de hoeveelheden stof van alle bestanddelen waaruit het mengsel (oplosmiddel inbegrepen) samengesteld is

SI-eenheid : mol

n_{OM} = hoeveelheid stof van het oplosmiddel

SI-eenheid : mol

M_M = molaire massa van het mengsel (oplossing) = $\frac{m_M}{n_M}$

SI-eenheid : kg/mol

M_{OM} = molaire massa van het oplosmiddel = $\frac{m_{OM}}{n_{OM}}$

SI-eenheid : kg/mol

ρ_M = soortelijke massa van het mengsel (oplossing) = $\frac{m_M}{V_M}$

SI-eenheid : kg/m^3

M_B = molaire massa van komponent B = $\frac{m_B}{n_B}$

SI-eenheid : kg/mol

V_M = volume van het mengsel (oplossing)

SI-eenheid : m^3

Voor sterk verdunde oplossingen kunnen de algemene groothedenvergelijkingen (VI, 3) en (VI, 4) worden vereenvoudigd tot (met $n_M \approx n_{OM}$; $M_M \approx M_{OM}$; $m_M \approx m_{OM}$; $\rho_M \approx \rho_{OM}$) :

$$b_B = \frac{x_B}{M_{OM}} = \frac{c_B}{\rho_{OM}} = \frac{\rho'_B}{\rho_{OM} \cdot M_B} \qquad \text{(VI, 5)}$$

Voor een binaire oplossing (een oplossing van één enkele opgeloste stof in een oplosmiddel zodat $n_B + n_{OM} = n_M$ en $m_B + m_{OM} = m_M$) kunnen de grootheden-vergelijkingen (VI, 3) en (VI, 4) herleid worden tot volgende algemene groothedenvergelijkingen (waarin de grootheden hoeveelheid stof, massa en volume niet meer voorkomen) :

$$b_B = \frac{x_B}{M_{OM} \cdot (1 - x_B)} = \frac{c_B}{\rho_M - c_B \cdot M_B} = \frac{\rho'_B}{(\rho_M - \rho'_B) \cdot M_B} \qquad \text{(VI, 6)}$$

Teneinde c_B rechtstreeks te kunnen uitdrukken in de gebruikelijke eenheid mol/L (= 1000 mol/m^3 = 1 $kmol/m^3$), werden bovenstaande algemene groothedenvergelijkingen omgewerkt tot volgende getalwaardenvergelijkingen :

$$b_B = \frac{1000\ n_M}{n_{OM} \cdot M_{OM}} \cdot x_B = \frac{1000\ n_M \cdot M_M}{\rho_M \cdot n_{OM} \cdot M_{OM}} \cdot c_B = \frac{1000\ n_M \cdot M_M}{\rho_M \cdot n_{OM} \cdot M_{OM} \cdot M_B} \cdot \rho'_B \qquad \text{(VI,3')}$$

$$= \frac{1000\ n_M}{m_{OM}} \cdot x_B = \frac{1000\ V_M}{m_{OM}} \cdot c_B = \frac{1000\ V_M}{m_{OM} \cdot M_B} \cdot \rho'_B \qquad \text{(VI,4')}$$

$$b_B = \frac{1000\ x_B}{M_{OM}} = \frac{1000\ c_B}{\rho_{OM}} = \frac{1000\ \rho'_B}{\rho_{OM} \cdot M_B} \qquad \text{(VI,5')}$$

$$b_B = \frac{1000\ x_B}{M_{OM} \cdot (1 - x_B)} = \frac{1000\ c_B}{\rho_M - c_B \cdot M_B} = \frac{1000\ \rho'_B}{(\rho_M - \rho'_B) \cdot M_B} \qquad \text{(VI,6')}$$

met als bijhorende legende :

b_B in mol/kg (SI-eenheid)

c_B in mol/L (geen SI-eenheid; 1 mol/L = 1 kmol/m^3 = 1000 mol/m^3)

x_B = dimensieloos

ρ'_B in kg/m^3 (SI-eenheid)

ρ_M in kg/m^3 (SI-eenheid)

m_{OM}, m_B, m_M : in kg (SI-eenheid)

n_{OM}, n_B, n_M : in kmol (geen SI-eenheid; 1 kmol = 1000 mol)

M_{OM}, M_B, M_M : in kg/kmol (geen SI-eenheid; 1 $\frac{kg}{kmol}$ = 0,001 $\frac{kg}{mol}$)

V_M : in m^3 (SI-eenheid)

De getalwaardenvergelijkingen (VI, 3') en (VI, 4') zijn steeds geldig; de getalwaardenvergelijking (VI, 5') geldt enkel voor sterk verdunde oplossingen; de getalwaardenvergelijking (VI, 6') tenslotte is steeds geldig voor een binaire oplossing.

Voorbeeld :

Men wenst 20 liter zwavelzuuroplossing (V_M = 0,020 m^3) te bereiden (bestemd voor het vullen van akkumulatoren) met een soortelijke massa ρ_M = 1,280 kg/L = 1280 kg/m^3, hetgeen overeenstemt met een gewichtskoncentratie aan zwavelzuur van 37,36 %. Hiertoe beschikt men over gekoncentreerd zwavelzuur, met een gewichtskoncentratie aan zwavelzuur van 97,5 % en een soortelijke massa van 1,840 kg/L = 1840 kg/m^3.

Bereken de waarde van c_B, b_B, x_B en ρ'_B van de betrokken oplossing, en verifieer de algemene groothedenvergelijking (VI, 6) en de getalwaardenvergelijking (VI, 6').

Om de gewenste 20 liter zwavelzuuroplossing, met een gewicht (in de zin van massa) gelijk aan 25,6 kg te bereiden, is x kg gekoncentreerde zwavelzuuroplossing vereist, gegeven door :

$$\frac{(x \text{ kg} \times 0{,}975)}{25{,}6 \text{ kg}} = 0{,}3736 \qquad \text{waaruit volgt : } x = 9{,}809\ 394\ 872$$

De hoeveelheid water waaraan het gekoncentreerd zwavelzuur dient toegevoegd te worden, bedraagt :

$$25{,}6 \text{ kg} - 9{,}809\ 394\ 872 \text{ kg} = 15{,}790\ 605\ 13 \text{ kg}$$

In de bereide oplossing bedraagt het gewicht (massa) van het zwavelzuur en van het water uiteindelijk :

$m_{H_2SO_4} = m_B$ = 9,809 394 872 kg x 0,975 = 9,564 160 kg

$m_{H_2O} = m_{OM}$ = (9,809 394 872 kg x (1,025) + 15,790 605 13 kg = 16,035 840 kg

zodat men bekomt :

$m_M = m_B + m_{OM}$ = 9,564 160 kg + 16,035 840 kg = 25,6 kg

Met behulp van : $M_{H_2SO_4} = M_B = \frac{98,078 \text{ kg}}{1000 \text{ mol}} = 0,098\ 078 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$

$$M_{H_2O} = M_{OM} = \frac{18,015 \text{ kg}}{1000 \text{ mol}} = 0,018015 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$$

kan men berekenen :

$n_{H_2SO_4} = n_B = \frac{9,564\ 160}{0,098\ 078}$ mol = 97,515 854 73 mol

$n_{H_2O} = n_{OM} = \frac{16,035\ 840}{0,018\ 015}$ mol = 890,138 218 2 mol

$n_M = n_B + n_{OM}$ = 987,654 072 9 mol

$M_M = \frac{25,6 \text{ kg}}{987,654\ 072\ 9 \text{ mol}} = 0,025\ 920\ 006\ 51 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$

Thans beschikt men over alle gegevens om de gevraagde uitwerkingen door te voeren :

$b_B = \frac{n_B}{m_{OM}} = \frac{97,515\ 854\ 73 \text{ mol}}{16,035\ 840 \text{ kg}} = 6,081\ 119\ 214 \frac{\text{mol}}{\text{kg}}$

$x_B = \frac{n_B}{n_M} = \frac{97,515\ 854\ 73 \text{ mol}}{987,654\ 072\ 9 \text{ mol}} = 0,098\ 734\ 827\ 72$

$c_B = \frac{n_B}{V_M} = \frac{97,515\ 854\ 73 \text{ mol}}{0,020 \text{ m}^3} = 4875,792\ 737 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$

$= 4,875\ 792\ 737 \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3} = 4,875\ 792\ 737 \frac{\text{mol}}{\text{L}}$

$\rho'_B = \frac{m_B}{V_M} = \frac{9,564\ 160 \text{ kg}}{0,020 \text{ m}^3} = 478,208 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Verifikatie van de algemene groothedenvergelijking (VI, 6), geldend voor een binaire oplossing :

$$b_B = \frac{x_B}{M_{OM} \cdot (1 - x_B)} = \frac{0,098\ 734\ 827\ 72}{0,018\ 015 \text{ kg/mol} \cdot (1 - 0,098\ 734\ 827\ 72)}$$

$$= 6,081\ 119\ 213 \frac{\text{mol}}{\text{kg}}$$

$$b_B = \frac{c_B}{\rho_M - c_B \cdot M_B} = \frac{4875,792\ 737 \text{ mol/m}^3}{1280 \text{ kg/m}^3 - (4875,792\ 737 \text{ mol/m}^3 \cdot 0,098\ 078 \text{ kg/mol})}$$

$$= 6,081\ 119\ 215 \frac{\text{mol}}{\text{kg}}$$

$$b_B = \frac{\rho'_B}{(\rho_M - \rho'_B) \cdot M_B} = \frac{478{,}208\ \text{kg/m}^3}{(1280\ \text{kg/m}^3 - 478{,}208\ \text{kg/m}^3) \cdot 0{,}098\ 078\ \text{kg/mol}}$$

$$= 6{,}081\ 119\ 213\ \frac{\text{mol}}{\text{kg}}$$

Verifikatie van de getalwaardenvergelijking (VI, 6'), geldend voor een binaire oplossing :

$$b_B = \frac{1000\ x_B}{M_{OM} \cdot (1 - x_B)} = \frac{1000 \times 0{,}098\ 734\ 827\ 72}{18{,}015 \cdot (1 - 0{,}098\ 734\ 827\ 72)}$$

$$= 6{,}081\ 119\ 213\ \frac{\text{mol}}{\text{kg}}$$

$$= \frac{1000\ c_B}{\rho_M - c_B \cdot M_B} = \frac{1000 \times 4{,}875\ 792\ 737}{1280 - (4{,}875\ 792\ 737 \times 98{,}078)}$$

$$= 6{,}081\ 119\ 215\ \frac{\text{mol}}{\text{kg}}$$

$$= \frac{1000\ \rho'_B}{(\rho_M - \rho'_B) \cdot M_B} = \frac{1000 \times 478{,}208}{(1280 - 478{,}208) \cdot 98{,}078}$$

$$= 6{,}081\ 119\ 213\ \frac{\text{mol}}{\text{kg}}$$

Op te merken valt dat het volume van de bereide oplossing (20 L) niet gelijk is aan de som van het aangewend volume gekoncentreerd zwavelzuur en het aangewend volume water :
de betrokken hoeveelheid gekoncentreerd zwavelzuur (9,809 394 872 kg) heeft immers een volume gelijk aan $\frac{9{,}809\ 394\ 872\ \text{kg}}{1{,}840\ \text{kg/L}} = 5{,}331$ L, terwijl het volume van de aangewende hoeveelheid water (15,790 605 13 kg) gelijk is aan $\frac{15{,}790\ 605\ 13\ \text{kg}}{1\ \text{kg/L}} = 15{,}791$ L .

10. Molaire geleiding Λ_{mB} van een elektrolyt in een elektrolytoplossing

De molaire geleiding Λ_{mB} (vroeger genoemd molair geleidingsvermogen of molaire geleidbaarheid) van een elektrolyt B in een elektrolytoplossing die één of meer elektrolyten bevat, is de bijdrage σ_B (ook voorgesteld door κ_B) tot de soortelijke geleiding σ (ook voorgesteld door κ) van deze oplossing die door de betrokken elektrolyt wordt geleverd, gedeeld door de stofkoncentratie c_B (molaire koncentratie) van de betrokken elektrolyt :

$$\Lambda_{mB} = \frac{\sigma_B}{c_B} \qquad \text{(VI, 7)}$$

De SI-eenheid van soortelijke geleiding σ (vroeger genoemd : soortelijke of specifieke geleidbaarheid) is $\frac{1}{\Omega \cdot m} = \frac{S}{m}$; veel gebruikte eenheden zijn $\frac{mS}{cm}$ en vooral $\frac{\mu S}{cm}$:

$$1 \frac{mS}{cm} = 10^{-1} \frac{S}{m} \qquad 1 \frac{S}{m} = 10 \frac{mS}{cm}$$

$$1 \frac{\mu S}{cm} = 10^{-4} \frac{S}{m} \qquad 1 \frac{S}{m} = 10^{4} \frac{\mu S}{cm}$$

De SI-eenheid van stofkoncentratie (molaire koncentratie) c_B is $\frac{mol}{m^3}$. Bijgevolg bekomt men als SI-eenheid van molaire geleiding :

$$\frac{\frac{S}{m}}{\frac{mol}{m^3}} = \frac{S \cdot m^2}{mol} \qquad \text{(in SI-grondeenheden : } \frac{A^2 \cdot s^3}{kg \cdot mol}\text{)}$$

Een veel gebruikte eenheid van molaire geleiding is $\frac{S \cdot m^2}{kmol}$:

$$1 \frac{S \cdot m^2}{kmol} = 0{,}001 \frac{S \cdot m^2}{mol} = 1 \frac{mS \cdot m^2}{mol}$$

In een elektrolytoplossing die meer dan één elektrolyt bevat, levert elke elektrolyt in eerste benadering een bijdrage $\sigma_B = c_B \cdot \Lambda_{mB}$ tot de soortelijke geleiding σ van de betrokken oplossing.

Vroeger drukte men de koncentratie van een elektrolyt meestal uit in geq/L = keq/m^3 = kval/m^3, waarbij 1 keq overeenstemt met 1 kmol positieve, respektievelijk negatieve elementaire ladingen. Hieruit volgt dat 1 kmol van een binair elektrolyt (een elektrolyt bestaande uit slechts één soort positieve ionen en één soort negatieve ionen) met elektrochemische waardigheid z_e overeenstemt met z_e keq. De elektrochemische waardigheid z_e van een binair elektrolyt is het getal dat het totale aantal positieve, respektievelijk negatieve elementaire ladingen in één elektrolytmolekuul aangeeft; deze twee getallen zijn aan elkaar gelijk omdat het totale molekuul elektrisch neutraal is.

Voorbeelden :

$z_e = 1$ voor NaCl, HCl, KOH
$z_e = 2$ voor K_2SO_4, H_2SO_4, $CuSO_4$, $Ba(OH)_2$
$z_e = 6$ voor $Ca_3(PO_4)_2$

Men sprak vroeger dan ook niet van molaire geleiding Λ_{mB}, doch van ekwivalentgeleiding Λ_{eB} :

$$\Lambda_{eB} = \frac{\sigma_B}{c_{eB}} \qquad \text{(VI, 8)}$$

met c_{eB} = ekwivalentkoncentratie (indien de ekwivalentkoncentratie wordt uitgedrukt in geq/L, is de getalwaarde ervan gelijk aan de normaliteit).

Het verband tussen eenheden van ekwivalentkoncentratie en eenheden van stofkoncentratie volgt uit :

$$\left\{c_B\right\}_{\frac{kmol}{m^3}} \times \frac{kmol}{m^3} \triangleq \left\{c_B\right\}_{\frac{kmol}{m^3}} \times z_e \times \frac{keq}{m^3} = \left\{c_{eB}\right\}_{\frac{keq}{m^3}} \times \frac{keq}{m^3}$$

zodat men bekomt :

$$1\ \frac{geq}{L} = 1\ \frac{keq}{m^3} = 1\ \frac{kval}{m^3} \triangleq \frac{1}{z_e}\ \frac{kmol}{m^3} = \frac{1}{z_e}\ \frac{mol}{L}$$

$$1\ \frac{geq}{m^3} = 1\ \frac{val}{m^3} \triangleq \frac{1}{z_e}\ \frac{mol}{m^3}$$

$$1\ \frac{meq}{m^3} = 1\ \frac{mval}{m^3} \triangleq \frac{1}{z_e}\ \frac{mmol}{m^3}$$

Het verband tussen eenheden van ekwivalentgeleiding en eenheden van molaire geleiding volgt uit :

$$\left\{\Lambda_{mB}\right\}_{\frac{S.m^2}{kmol}} \cdot \frac{S \cdot m^2}{kmol} \triangleq \left\{\Lambda_{mB}\right\}_{\frac{S.m^2}{kmol}} \times \frac{1}{z_e} \times \frac{S \cdot m^2}{keq} = \left\{\Lambda_{eB}\right\}_{\frac{S.m^2}{keq}} \cdot \frac{S \cdot m^2}{keq}$$

zodat men bekomt :

$$\frac{S \cdot m^2}{kmol} \triangleq \frac{1}{z_e}\ \frac{S \cdot m^2}{keq} \qquad\qquad \frac{S \cdot m^2}{keq} \triangleq z_e\ \frac{S \cdot m^2}{kmol}$$

Verder kan men afleiden :

$$1\ \frac{S \cdot m^2}{keq} \triangleq 1\ \frac{S \cdot m^2}{kval} \triangleq z_e\ \frac{S \cdot m^2}{kmol} = 10^{-3}\ z_e\ \frac{S \cdot m^2}{mol}$$

$$1\ \frac{S \cdot cm^2}{geq} = 1\ \frac{S \cdot cm^2}{val} \triangleq z_e\ \frac{S \cdot cm^2}{mol} = 10^{-4}\ z_e\ \frac{S \cdot m^2}{mol}$$

$$\triangleq 10^{3}\ z_e\ \frac{S \cdot cm^2}{kmol} = 10^{-1}\ z_e\ \frac{S \cdot m^2}{kmol}$$

$$1\ \frac{mS \cdot cm^2}{meq} = 1\ \frac{mS \cdot cm^2}{mval} \triangleq z_e\ \frac{mS \cdot cm^2}{mmol} = 10^{-4}\ z_e\ \frac{S \cdot m^2}{mol}$$

$$\triangleq 10^{-1}\ z_e\ \frac{S \cdot m^2}{kmol}$$

$$1\ \frac{mS\ .\ cm^2}{geq} = 1\ \frac{mS\ .\ cm^2}{val} \triangleq z_e\ \frac{mS\ .\ cm^2}{mol} = 10^{-7}\ z_e\ \frac{S\ .\ m^2}{mol}$$

$$\triangleq 10^{-4}\ z_e\ \frac{S\ .\ m^2}{kmol}$$

$$1\ \frac{\mu S\ .\ cm^2}{meq} = 1\ \frac{\mu S\ .\ cm^2}{mval} \triangleq z_e\ \frac{\mu S\ .\ cm^2}{mmol} = 10^{-7}\ z_e\ \frac{S\ .\ m^2}{mol}$$

$$\triangleq 10^{-4}\ z_e\ \frac{S\ .\ m^2}{kmol}$$

Tussen de vijf hierboven behandelde (verouderde) eenheden van de (verouderde) grootheid ekwivalentgeleiding bestaat volgend verband :

$$1\ \frac{S\ .\ m^2}{keq} = 10\ \frac{S\ .\ cm^2}{geq} = 10\ \frac{mS\ .\ cm^2}{meq}$$

$$= 10^4\ \frac{mS\ .\ cm^2}{geq} = 10^4\ \frac{\mu S\ .\ cm^2}{meq}$$

$$1\ \frac{S\ .\ cm^2}{geq} = 1\ \frac{mS\ .\ cm^2}{meq} = 10^3\ \frac{mS\ .\ cm^2}{geq} = 10^3\ \frac{\mu S\ .\ cm^2}{meq}$$

$$= 10^{-1}\ \frac{S\ .\ m^2}{keq}$$

$$1\ \frac{mS\ .\ cm^2}{geq} = 1\ \frac{\mu S\ .\ cm^2}{meq} = 10^{-3}\ \frac{S\ .\ cm^2}{geq} = 10^{-3}\ \frac{mS\ .\ cm^2}{meq}$$

$$= 10^{-4}\ \frac{S\ .\ m^2}{keq}$$

Voorbeeld :

Een zwavelzuuroplossing is zeer verdund en bevat 9,8 mg H_2SO_4 ($M_r \approx 98$; $M \approx \frac{98}{1000}\ \frac{kg}{mol} = 98\ \frac{g}{mol}$) per liter oplossing. Voor H_2SO_4 geldt : $z_e = 2$.

1 val H_2SO_4 = 1 geq H_2SO_4 $\triangleq$ 49 g H_2SO_4

1 mol H_2SO_4 $\triangleq$ 98 g H_2SO_4

De normaliteit aan zwavelzuur bedraagt : $\frac{\frac{9,8\ .\ 10^{-3}}{49}\ geq}{L} = 2\ .\ 10^{-4}\ \frac{geq}{L}$

$= 0,0002\ N$

De ekwivalentkoncentratie c_{eB} is derhalve gelijk aan :

$$2\ .\ 10^{-4}\ \frac{geq}{L} = 2\ .\ 10^{-4}\ \frac{keq}{m^3}$$

De stofkoncentratie c_B bedraagt : $\frac{\frac{9,8\ .\ 10^{-3}}{98}\ mol}{L} = 10^{-4}\ \frac{mol}{L} = 10^{-4}\ \frac{kmol}{m^3}$

Gevraagd : bereken de ekwivalentgeleiding Λ_e en de molaire geleiding Λ_m, gegeven zijnde dat de soortelijke geleiding σ bij de heersende temperatuur gelijk is aan : $76,6\ .\ 10^{-4}\ \frac{S}{m}$ hetzij $76,6\ \frac{\mu S}{cm}$.

Men bekomt door toepassing van de uitdrukkingen (VI, 7) en (VI, 8) :

$$\Lambda_e = \frac{\sigma}{c_{eB}} = \frac{76{,}6\ \frac{\mu S}{cm}}{2 \times 10^{-4}\ \frac{geq}{L}} = \frac{76{,}6\ \frac{\mu S}{cm}}{2 \times 10^{-4}\ \frac{keq}{m^3}}$$

$$= \frac{76{,}6\ \frac{\mu S}{cm}}{2 \times 10^{-4}\ \frac{keq}{10^6\ cm^3}} = 383 \cdot 10^9\ \frac{\mu S \cdot cm^2}{keq}$$

$$= 383 \cdot 10^9\ \frac{10^{-6}\ S \cdot (10^{-2}\ m)^2}{keq}$$

$$= 38{,}3\ \frac{S \cdot m^2}{keq}$$

$$\Lambda_m = \frac{\sigma}{c_B} = \frac{76{,}6 \cdot 10^{-4}\ \frac{S}{m}}{10^{-4}\ \frac{kmol}{m^3}} = 76{,}6\ \frac{S \cdot m^2}{kmol}$$

Derhalve geldt voor het beschouwde geval (met $z_e = 2$) :

$\Lambda_e = 38{,}3\ \frac{S \cdot m^2}{keq}$	$\Lambda_m = 76{,}6\ \frac{S \cdot m^2}{kmol}$
$= 0{,}0383\ \frac{S \cdot m^2}{geq}$	$= 0{,}0766\ \frac{S \cdot m^2}{mol}$ (SI-eenheid)
$= 383\ \frac{S \cdot cm^2}{geq}$	$= 766\ \frac{S \cdot cm^2}{mol}$
$= 383\ \frac{mS \cdot cm^2}{meq}$	$= 766\ \frac{mS \cdot cm^2}{mmol}$
$= 383\ 000\ \frac{mS \cdot cm^2}{geq}$	$= 766\ 000\ \frac{mS \cdot cm^2}{mol}$
$= 383\ 000\ \frac{\mu S \cdot cm^2}{meq}$	$= 766\ 000\ \frac{\mu S \cdot cm^2}{mmol}$

11. Molaire grootheden

a) benaming van molaire grootheden : zie Hoofdstuk II, onder 14.

b) stofkoncentratie (molaire koncentratie) c_B, molaliteit (stofgehalte) b_B en stoffraktie (molaire fraktie) x_B : zie onderhavig hoofdstuk onder 9.

c) molaire geleiding Λ_m : zie onderhavig hoofdstuk onder 10.

d) molaire (of algemene of universele) gaskonstante $\mathcal{R}$ en molair volume V_m en molair normvolume V_{mn}, zie onderhavig hoofdstuk onder 4.1., 4.3. en 5.

e) molaire massa $M = \frac{m}{n}$, zie onderhavig hoofdstuk onder 6.
SI-eenheid : kg/mol; veel gebruikte eenheden : g/mol en kg/kmol

f) molaire entalpie $H_m = \frac{H}{n}$
SI-eenheid : J/mol; veel gebruikte eenheid : J/kmol

g) molaire entropie : $S_m = \frac{S}{n}$
SI-eenheid : $\frac{J}{mol \cdot K}$; veel gebruikte eenheid : $\frac{J}{kmol \cdot K}$

h) molaire inwendige energie $U_m = \frac{U}{n}$
SI-eenheid : J/mol, veel gebruikte eenheid : J/kmol

i) molaire warmtekapaciteit $C_m = \frac{C}{n}$
SI-eenheid : $\frac{J}{mol \cdot K}$; veel gebruikte eenheid : $\frac{J}{kmol \cdot K}$

12. Samenvatting van de geschiedenis van de mol

De eenheid mol werd eerst opgevat als een individuele massa-eenheid, in de chemie vertrekkend van de *chemische* atoomgewichtsschaal met als basis $(A_{r,O})_{ch} = 16$ en in de fysika vertrekkend van de *fysische* atoomgewichtsschaal met als basis $(A_{r,O\ 16})_{ph} = 16$.

In 1957 werd "hoeveelheid stof" aangenomen als basisgrootheid, met als grondeenheid de eenheid mol; de definitie van de mol luidde in 1957 als volgt : een mol is de hoeveelheid stof die evenveel elementaire deeltjes bevat als er begrepen zijn in 16 gram zuivere zuurstof ^{16}O.

Toen de atoomgewichtsschaal met ^{16}O als standaardatoom werd vervangen door de huidige schaal van de relatieve atoommassa's met ^{12}C als standaardatoom, was het logisch ook de definitie van de mol hieraan aan te passen; de nieuwe definitie (CIPM, 1967; 14de CGPM, 1971) luidt : de mol is de hoeveelheid stof van een systeem dat evenveel elementaire entiteiten (deeltjes) bevat als er atomen zijn in 0,012 kilogram ^{12}C.

Telkens als de definitie van de eenheid mol werd gewijzigd, veranderde uiteraard ook de waarde van de konstante van Avogadro N_A, het molair normvolume V_{mn} en de molaire gaskonstante $\mathcal{R}$ (zie onderhavig hoofdstuk onder 4.1., 4.3. en 5.).

HOOFDSTUK VII

GROOTHEDEN EN EENHEDEN IN VERBAND MET STRALING EN LICHT

1. Inleiding

1.1. Spektrum van de elektromagnetische golven

Het spektrum van de elektromagnetische golven die zich voortplanten (in het luchtledige) met een snelheid van 299,792 458 . 10^6 m/s (hetzij ongeveer 300 000 km/s), is zeer uitgebreid en bevat achtereenvolgens (van kleine naar grote golflengte, hetzij van hoge frekwentie naar lage frekwentie) de kosmische stralen, de gamma-stralen, de röntgenstralen of X-stralen, de ultraviolette stralen, het zichtbaar licht, de infrarode stralen, de mikrogolven, de ultrakorte golven, de korte golven, de middengolven en de lange golven.

De voortplantingssnelheid c is gelijk aan de golflengte λ, vermenigvuldigd met de frekwentie ν :

$$c = \lambda \cdot \nu$$

Bij het gebruik van SI-eenheden, wordt c uitgedrukt in m/s, λ in m en ν in Hz (= s^{-1}).

Langs de zijde van de kosmische straling is de uiterste grens van het spektrum gekenmerkt door golven met een golflengte λ van ongeveer 10 fm (10 fm = 10 . 10^{-15} m) en met een frekwentie ν van ongeveer 3 . 10^{22} Hz.

Langs de zijde van de lange golven is de uiterste grens van het spektrum gekenmerkt door golven met een golflengte λ van ongeveer 40 000 meter en met een frekwentie ν van ongeveer 7500 Hz.

1.2. Zonnestraling

Ook de zonnestraling maakt deel uit van het spektrum van de elektromagnetische golven.

Langs de zijde van de ultraviolette straling (waarvan de langere golflengten ook voorkomen in de zonnestraling) is de uiterste grens van de zon-

nestraling gekenmerkt door golven met een golflengte λ van ongeveer 0,3 µm, hetzij 300 nm (0,3 µm = 300 nm = $3 \cdot 10^{-7}$ m) en met een frekwentie ν van ongeveer 10^{15} Hz.

Langs de zijde van de infrarode straling (waarvan de kortere golflengten voorkomen in de zonnestraling) is de uiterste grens van de zonnestraling gekenmerkt door golven met een golflengte λ van ongeveer 10 µm hetzij 10 000 nm (10 µm = 10 000 nm = 10^{-5} m) en met een frekwentie ν van ongeveer $3 \cdot 10^{13}$ Hz.

1.3. Zichtbare straling

Het menselijk oog kan straling waarnemen waarvan de golflengte gelegen is tussen 380 nm (380 nm = 0,380 µm = $3{,}8 \cdot 10^{-7}$ m) en 780 nm (780 nm = 0,780 µm = $7{,}8 \cdot 10^{-7}$ m). De overeenstemmende frekwenties zijn respektievelijk gelijk aan (met $c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s) :

$$\frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{3{,}8 \cdot 10^{-7} \text{ m}} = 7{,}9 \cdot 10^{14} \text{ Hz} \quad \text{en} \quad \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{7{,}8 \cdot 10^{-7} \text{ m}} = 3{,}8 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

De grootste gevoeligheid van het menselijk oog komt voor bij golflengten in de omgeving van 555 nm, overeenstemmend met een frekwentie van

$$\frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{5{,}55 \cdot 10^{-7} \text{ m}} = 5{,}4 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

Onder "optische straling" verstaat men de ultraviolette straling (UV), de zichtbare straling (licht) en de infrarode straling (IR).

In de Duitse norm DIN 5031 Teil 7 (Januar 1984), wordt volgende onderverdeling gegeven van de optische straling waarvan de golflengten gelegen zijn tussen 100 nm en 1 000 000 nm (hier vereenvoudigd weergegeven):

benaming		golflengtebereik
ultraviolette straling :	UV-C	van 100 nm tot 280 nm
	UV-B	van 280 nm tot 315 nm
	UV-A	van 315 nm tot 380 nm
zichtbare straling (licht)		van 380 nm tot 780 nm
infrarode straling :	IR-A	van 780 nm tot 1400 nm
	IR-B	van 1400 nm tot 3000 nm
	IR-C	van 3000 nm tot 1 000 000 nm

De golflengte van het zichtbaar licht werd vroeger veel uitgedrukt in ångström (Å) :

$$1\ \text{Å} = 10^{-10}\ \text{m} = 0{,}1\ \text{nm} = 0{,}0001\ \mu\text{m}$$
$$1\ \text{nm} = 10^{-9}\ \text{m} = 10\ \text{Å} = 0{,}001\ \mu\text{m}$$
$$1\ \mu\text{m} = 10^{-6}\ \text{m} = 10\ 000\ \text{Å} = 1000\ \text{nm}$$

Aan de eenheid mikrometer (1 µm = 10^{-6} m) werd vroeger de benaming mikron (symbool µ) gegeven. Onder millimikron (symbool mµ) verstond men dan 10^{-3} mikron, hetzij 10^{-9} m. De eenheden mikron (symbool µ) en millimikron (symbool mµ) mogen thans niet meer gebruikt worden; de betrokken benamingen zijn vervangen respektievelijk door mikrometer en nanometer :

$$1\ \mu\ \text{(niet meer toegelaten)} = 10^{-6}\ \text{m} = 1\ \mu\text{m}$$
$$1\ \text{m}\mu\ \text{(niet meer toegelaten)} = 10^{-9}\ \text{m} = 1\ \text{nm}$$

1.4. Onderscheid tussen fysische stralingsgrootheden en fotometrische grootheden

Zowel wat betreft straling in het algemeen als straling met golflengten gelegen tussen 380 nm en 780 nm, kunnen fysische grootheden en eenheden worden bepaald, waarbij straling wordt behandeld als een zuiver fysisch verschijnsel van overdracht van energie door elektromagnetische golven.

De fotometrie daarentegen beoogt de studie van de zichtbare straling met betrekking tot de bij de mens verwekte helderheidsindruk, hetgeen een subjektief gegeven is.

Hier zal dus rekening moeten gehouden worden met de eigenschappen van het "gemiddeld menselijk oog" of "standaard-oog" precies zoals in de fonometrie rekening wordt gehouden met de eigenschappen van het "gemiddeld menselijk oor" of "standaard-oor".

Hierna zullen eerst enkele fysische stralingsgrootheden en de betrokken eenheden worden behandeld en daarna enkele fotometrische grootheden en eenheden in verband met de waarneembaarheid van bepaalde stralingen door het menselijk oog.

2. Enkele grootheden en eenheden uit de stralingsleer en de lichtleer

2.1. Straling als fysisch verschijnsel

2.1.1. Fysische grootheden en eenheden

Hierna worden de voornaamste fysische grootheden opgegeven, met hun definitievergelijking en de betrokken SI-eenheid. Tevens wordt een vereenvoudigde definitievergelijking gegeven, die enkel geldig is wanneer de stralingsstroom in de tijd konstant blijft en gelijkmatig verdeeld is over de beschouwde doorsnede en/of de beschouwde ruimtehoek. Aan de oppervlakten en hoeken, die tussenkomen in de definitie van grootheden die betrekking hebben met uitstraling, wordt index 1 toegekend. Aan de oppervlakten en hoeken, die tussenkomen in de definitie van grootheden die betrekking hebben met instraling (ontvangen straling), wordt index 2 toegekend. Van de betrokken grootheden wordt tenslotte de Franse, Engelse en Duitse vertaling gegeven.

De index e (van energetisch) die voorkomt bij het symbool van de fysische stralingsgrootheden, mag weggelaten worden wanneer er geen verwarring mogelijk is met het symbool van de overeenkomstige fotometrische grootheden.

a. Stralingsenergie (hoeveelheid stralingsenergie) Q_e : is de hoeveelheid energie die onder vorm van straling uitgezonden, overgedragen of ontvangen wordt.
SI-eenheid : J
Vertaling : F : Quantité d'énergie rayonnante
E : Quantity of radiant energy
D : Strahlungsenergie, Strahlungsmenge

b. Stralingsflux (stralingsenergiestroom) Φ_e : is het kotiënt van de stralingsenergie Q_e en de tijd
Definitievergelijkingen :

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt} \qquad \Phi_e = \frac{Q_e}{t}$$

SI-eenheid : W

Vertaling : F : Flux énergétique (puissance rayonnante)
E : Radiant flux (radiant power)
D : Strahlungsflusz (Strahlungsleistung)

c. Energetische exitantie M_e (vroeger stralingsemittantie genoemd) : is het kotiënt van de van een oppervlak uitgaande stralingsflux Φ_e en de oppervlakte A_1 van het betrokken oppervlak.
Definitievergelijkingen :

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dA_1} \qquad M_e = \frac{\Phi_e}{A_1}$$

SI-eenheid : W . m^{-2}
Vertaling : F : Exitance énergétique
E : Radiant exitance
D : Spezifische Ausstrahlung

d. Stralingssterkte (stralingsintensiteit) I_e : is het kotiënt van de door een stralingsbron afgegeven stralingsflux Φ_e in een ruimtehoek rond een bepaalde richting, en de betrokken ruimtehoek Ω_1.
Definitievergelijkingen :

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega_1} \qquad I_e = \frac{\Phi_e}{\Omega_1}$$

SI-eenheid : W . sr^{-1}
Vertaling : F : Intensité énergétique
E : Radiant intensity
D : Strahlstärke

e. Radiantie, energetische luminantie L_e : is het kotiënt van de stralingsflux Φ_e die gaat door een oppervlak (of terecht komt op een oppervlak) rond een gegeven punt, en het produkt van de doorstraalde ruimtehoek Ω met de oppervlakte van de ortogonale projektie (A . cos ϵ) van het betrokken oppervlak op een vlak dat loodrecht staat op de beschouwde richting.
Definitievergelijkingen :

$$L_e = \frac{d^2\Phi_e}{d\Omega_1 \cdot dA_1 \cdot \cos \epsilon_1} = \frac{d^2\Phi_e}{d\Omega_2 \cdot dA_2 \cdot \cos \epsilon_2}$$

$$L_e = \frac{\Phi_e}{\Omega_1 \cdot A_1 \cdot \cos \epsilon_1} = \frac{\Phi_e}{\Omega_2 \cdot A_2 \cdot \cos \epsilon_2}$$

SI-eenheid : $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$

Vertaling : F : Luminance énergétique, radiance

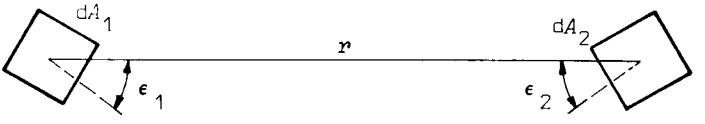
E : Radiance

D : Strahldichte (Strahlungsluminanz)

De basiswet in verband met de wijze waarop straling zich uitbreidt, luidt (met $\Omega_o = 1$ sr) :

$$d^2\Phi_e = L_e \cdot \frac{dA_1 \cdot \cos \epsilon_1 \cdot dA_2 \cdot \cos \epsilon_2}{r^2} \cdot \Omega_o$$

$$= L_e \cdot dA_1 \cdot \cos \epsilon_1 \cdot d\Omega_1$$



De betrokken wet geeft aan hoeveel de stralingsflux bedraagt, die door een oppervlakte-element dA_1 met een radiantie L_e onder de uitstralingshoek ϵ_1 (hoek tussen de stralingsrichting gegeven door r en de loodrechte op het vlak dA_1) wordt toegestraald aan een ander oppervlakte-element dA_2 onder de instralingshoek ϵ_2 (hoek tussen de stralingsrichting gegeven door r en de loodrechte op het vlak dA_2), met r als afstand tussen beide oppervlakken. De projekties van beide oppervlakken op een vlak loodrecht op de richting r, zijn respektievelijk gelijk aan $dA_1 \cdot \cos \epsilon_1$ en $dA_2 \cdot \cos \epsilon_2$ en worden de schijnbare oppervlakte genoemd.

Uit de symmetrische bouw van de formule volgt, dat een even grote stralingsflux wordt toegestraald in het geval dat dA_1 als straler en dA_2 als ontvanger werkt als in het geval dat dA_2 als straler en dA_1 als ont-

vanger werkt, in zover natuurlijk dat de radiantie in beide gevallen even groot is :

$$d^2\Phi_e = L_e \cdot \frac{dA_1 \cdot \cos \epsilon_1 \cdot dA_2 \cdot \cos \epsilon_2}{r^2} \cdot \Omega_o$$

$$= L_e \cdot dA_1 \cdot \cos \epsilon_1 \cdot d\Omega_1$$

$$= L_e \cdot dA_2 \cdot \cos \epsilon_2 \cdot d\Omega_2$$

f. Bestralingssterkte (irradiantie) E_e : is het kotiënt van de stralingsflux die op een oppervlak terecht komt en de oppervlakte van het betrokken oppervlak.

Definitievergelijkingen :

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA_2} \qquad E_e = \frac{\Phi_e}{A_2}$$

SI-eenheid : $W \cdot m^{-2}$

Vertalingen : F : Eclairement énergétique

E : Irradiance

D : Bestrahlungsstärke

Hierna volgen enkele omzettingen tussen enerzijds de volgende eenheden van bestralingssterkte :

$\frac{erg}{cm^2 \cdot s}$, $\frac{erg}{cm^2 \cdot min}$, $\frac{kcal}{cm^2 \cdot s}$, $\frac{kcal}{cm^2 \cdot min}$, $\frac{cal}{cm^2 \cdot s}$ en $\frac{cal}{cm^2 \cdot min}$

en anderzijds de koherente SI-eenheid $\frac{W}{m^2}$ en de eenheden $\frac{mW}{m^2}$, $\frac{W}{cm^2}$, $\frac{mW}{cm^2}$ en $\frac{\mu W}{cm^2}$.

$$1 \frac{erg}{cm^2 \cdot s} = \frac{10^{-7} J}{10^{-4} m^2 \cdot 1 s} = 0,001 \frac{W}{m^2}$$

$$= 1 \frac{mW}{m^2}$$

$$= \frac{10^{-7} J}{cm^2 \cdot s} = 0,000\ 000\ 1 \frac{W}{cm^2}$$

$$= 0,0001 \frac{mW}{cm^2}$$

$$= 0,1 \frac{\mu W}{cm^2}$$

$$1 \frac{erg}{cm^2 \cdot min} = \frac{10^{-7} J}{10^{-4} m^2 \cdot 60 s} = \frac{1}{60\ 000} \frac{W}{m^2} = 1,666\ 666\ 667 \cdot 10^{-5} \frac{W}{m^2}$$

$$= \frac{1}{60} \frac{mW}{m^2} = 1,666\ 666\ 667 \cdot 10^{-2} \frac{mW}{m^2}$$

$$= \frac{10^{-7}\ J}{1\ cm^2\ .\ 60\ s} = \frac{1}{600\ 000\ 000}\ \frac{W}{cm^2} = 1,666\ 666\ 667\ .\ 10^{-9}\ \frac{W}{cm^2}$$

$$= \frac{1}{600\ 000}\ \frac{mW}{cm^2} = 1,666\ 666\ 667\ .\ 10^{-6}\ \frac{mW}{cm^2}$$

$$= \frac{1}{600}\ \frac{\mu W}{cm^2} = 1,666\ 666\ 667\ .\ 10^{-3}\ \frac{\mu W}{cm^2}$$

$$1\ \frac{kcal}{cm^2\ .\ s} = \frac{4186,8\ J}{10^{-4}\ m^2\ .\ 1\ s} = 4,1868\ .\ 10^{7}\ \frac{W}{m^2}$$

$$= 4,1868\ .\ 10^{10}\ \frac{erg}{cm^2\ .\ s}\ \text{of}\ \frac{mW}{m^2}$$

$$= \frac{4186,8\ J}{cm^2\ .\ s} = 4186,8\ \frac{W}{cm^2}$$

$$= 4,1868\ .\ 10^{6}\ \frac{mW}{cm^2}$$

$$= 4,1868\ .\ 10^{9}\ \frac{\mu W}{cm^2}$$

$$1\ \frac{kcal}{cm^2\ .\ min} = \frac{4186,8\ J}{10^{-4}\ m^2\ .\ 60\ s} = 697\ 800\ \frac{W}{m^2}$$

$$= 6,978\ .\ 10^{8}\ \frac{erg}{cm^2\ .\ s}\ \text{of}\ \frac{mW}{m^2}$$

$$= \frac{4186,8\ J}{1\ cm^2\ .\ 60\ s} = 69,78\ \frac{W}{cm^2}$$

$$= 69\ 780\ \frac{mW}{cm^2}$$

$$= 6,978\ .\ 10^{7}\ \frac{\mu W}{cm^2}$$

$$1\ \frac{cal}{cm^2\ .\ s} = \frac{4,1868\ J}{10^{-4}\ m^2\ .\ 1\ s} = 41\ 868\ \frac{W}{m^2}$$

$$= 4,1868\ .\ 10^{7}\ \frac{erg}{cm^2\ .\ s}\ \text{of}\ \frac{mW}{m^2}$$

$$= \frac{4,1868\ J}{cm^2\ .\ s} = 4,1868\ \frac{W}{cm^2}$$

$$= 4186,8\ \frac{mW}{cm^2}$$

$$= 4,1868\ .\ 10^{6}\ \frac{\mu W}{cm^2}$$

$$1\ \frac{cal}{cm^2\ .\ min} = \frac{4,1868\ J}{10^{-4}\ m^2\ .\ 60\ s} = 697,8\ \frac{W}{m^2}$$

$$= 697\ 800\ \frac{erg}{cm^2\ .\ s}\ \text{of}\ \frac{mW}{m^2}$$

$$= \frac{4,1868\ J}{cm^2\ .\ 60\ s} = 0,069\ 78\ \frac{W}{cm^2}$$

$$= 69,78\ \frac{mW}{cm^2} = 69\ 780\ \frac{\mu W}{cm^2}$$

g. Bestralingsdosis H_e : is het produkt van de bestralingssterkte en de tijd.

Definitievergelijkingen :

$$H_e = \int E_e \cdot dt \qquad H_e = E_e \cdot t$$

SI-eenheid : J . m^{-2}

oude eenheid : langley (Ly) : 1 Ly = 1 cal/cm^2 = 41 868 J/m^2

Vertaling : F : Exposition énergétique

E : Radiant exposure

D : Bestrahlung

2.1.2. Spektrale fysische stralingsgrootheden (spektrale dichtheid van fysische stralingsgrootheden)

Zij X_e een willekeurige fysische grootheid in verband met straling, gegeven door :

$$X_e = \int X_{e\lambda} \cdot d\lambda$$

De spektrale fysische grootheid $X_{e\lambda}$ (of beter : de spektrale dichtheid van de betrokken fysische grootheid) wordt bekomen door het aandeel van de grootheid tussen λ en $d\lambda$ te delen door $d\lambda$:

$$X_{e\lambda} = \frac{dX_e}{d\lambda}$$

In het kleine golflengtebereik $\Delta\lambda$ wordt de betrokken fysische grootheid ΔX_e dan gegeven door :

$$\Delta X_e = X_{e\lambda} \cdot \Delta\lambda$$

Voorbeeld :

Spektrale dichtheid van de stralingsflux $\Phi_{e\lambda}$: is de limiet van het kotiënt van de stralingsflux in een interval rond een gegeven golflengte en dit interval wanneer het nadert tot nul.

Definitievergelijking :

$$\Phi_{e\lambda} = \frac{d\Phi_e}{d\lambda}$$

SI-eenheid : W . m^{-1} (veel gebruikte eenheid : W . nm^{-1})

Vertaling : F : Densité spectrale de flux énergétique

E : Spectral concentration of radiant flux

D : Spektrale Strahlungsfluszdichte

2.2. Straling als een door het menselijk oog waargenomen verschijnsel

2.2.1. Lichtwaarneming door het menselijk oog

Stralingen met bepaalde golflengten kunnen door het menselijk oog waargenomen worden. Een dergelijke straling wordt dan "zichtbare straling" genoemd. Men zegt ook dat de betrokken straling "licht" verwekt; hiermede wordt niets anders bedoeld dan het feit dat de betrokken straling kan waargenomen worden door het menselijk oog.

Het golflengtegebied van de zichtbare straling is gelegen tussen 380 en 780 nm. Een straling van een bepaalde golflengte wordt als een bepaalde kleur waargenomen. De hoofdkleuren zijn : bij 380 nm : violet; bij 470 nm : blauw; bij 520 nm : groen; bij 560 nm : geel; bij 610 nm : oranje; bij 780 nm : rood. Als er in de (zichtbare) straling slechts één enkele golflengte optreedt of enkel golflengten uit een beperkt golflengte-interval, spreekt men van monochromatisch licht. Bij gelijktijdig optreden van meerdere uiteengelegen golflengten treden mengkleuren op. Komen alle golflengten gelijktijdig en met gelijke energie in de lichtstraling voor, dan ontstaat de kleur wit (wit licht).

2.2.2. Konventies waarop het invoeren van de fotometrische grootheden is gesteund

De psycho-fysiologische gewaarwording verwekt door de zichtbare straling bestaat uit een helderheidsindruk en een kleurindruk.

De indruk die bij de mens verwekt wordt wanneer licht op het oog valt, is niet met meetinstrumenten rechtstreeks te meten. Toch zijn er metoden ontwikkeld om verschillende lichtindrukken met elkaar te vergelijken. Men noemt bijvoorbeeld twee verschillende lichtindrukken even helder, wanneer ze, in snelle afwisseling getoond, als niet flikkerend worden waargenomen.

Onder fotometrie verstaat men de meting van grootheden die betrekking hebben op straling, geschat naar haar verwekte helderheidsindruk en dit op basis van bepaalde konventies. Onder helderheidsindruk (helderheid) verstaat men de visuele sensatie waarbij een oppervlak min of meer helder

(lichtgevend) schijnt (vertaling : F : Luminosité, brillance subjective; E : Brightness; D : Helligkeit).

Wanneer de gelijkheid van helderheidsindrukken verwezenlijkt is voor twee velden die elk verlicht worden door een bron die een praktisch monochromatische straling uitzendt van dezelfde golflengte (en dus van dezelfde kleur) (straling waarvan de golflengten gelegen zijn in een klein golflengte-interval), stelt men vast dat de radiantie L_e van deze velden gelijk is.

Als de ene bron praktisch monochromatische straling van golflengte λ_1 uitzendt, en de andere bron eveneens praktisch monochromatische straling uitzendt doch van golflengte λ_2, stelt men vast dat, wanneer de gelijkheid van helderheidsindrukken verwezenlijkt is voor de twee velden, de radianties $L_{e\lambda_1} \cdot \Delta\lambda_1$ en $L_{e\lambda_2} \cdot \Delta\lambda_2$ van de twee velden thans verschillend zijn. De kleinste radiantie die vereist is om een gelijke helderheidsindruk (voor het "gemiddeld menselijk oog") te verwekken, komt voor bij straling met een golflengte van 555 nm, die voorgesteld wordt door λ_m. De ooggevoeligheid is dus het grootst (voor het "gemiddeld menselijk oog") voor straling met een golflengte gelijk aan 555 nm ($= \lambda_m$).

Men heeft experimenteel de verhouding $V(\lambda)$ bepaald tussen enerzijds de radianties $L_{e\lambda_m} \cdot \Delta\lambda_m$ en anderzijds elk van de radianties $L_{e\lambda_1} \cdot \Delta\lambda_1$, $L_{e\lambda_2} \cdot \Delta\lambda_2$, $L_{e\lambda_3} \cdot \Delta\lambda_3$, ... , die vereist zijn om bij straling in de verschillende stroken $\Delta\lambda_1$, $\Delta\lambda_2$, $\Delta\lambda_3$, ... , van het zichtbaar spektrum, een gelijke helderheidsindruk te verwekken voor het "gemiddeld menselijk oog". Men bekomt dus :

$$V(\lambda) = \frac{L_{e\lambda_m}}{L_{e\lambda}}$$

De hierboven besproken verhouding $V(\lambda)$ (met $\lambda_m = 555$ nm) geldt enkel wanneer het helderheidsniveau hoger is dan een bepaalde grens (het zien bij daglicht); dit noemt men het fotopisch gebied. De faktor $V(\lambda)$ wordt "fotopische" spektrale ooggevoeligheidsfaktor genoemd.

Wanneer het helderheidsniveau onder een andere lagere grens ligt (het zien bij nacht) spreekt men van het scotopisch gebied. Het "gemiddeld menselijk oog" is dan het gevoeligst voor de golflengten in de buurt van 507 nm, voorgesteld door λ'_m. De ooggevoeligheidsfaktor in dit gebied wordt gegeven door (met $V'(\lambda)$ = "skotopische" spektrale ooggevoeligheidsfaktor) :

$$V'(\lambda) = \frac{L_{e\lambda'_m}}{L_{e\lambda}}$$

Het gebied tussen het fotopisch gebied en het scotopisch gebied wordt mesopisch gebied genoemd; in dit gebied verandert de waarde van de ooggevoeligheidsfaktor met elk helderheidsniveau.

De waarden van $V(\lambda)$ en $V'(\lambda)$ zijn door de CIE vastgelegd respektievelijk in 1924 en 1951, en overgenomen door het CIPM respektievelijk in 1933 en 1976. Tabel VII.1. geeft een reeks waarden van $V(\lambda)$ en $V'(\lambda)$ in funktie van de golflengte λ.

In grafiek uitgezet, levert de verhouding $V(\lambda)$ en $V'(\lambda)$ in funktie van λ, twee curven op, die respektievelijk de fotopische ooggevoeligheidscurve en de scotopische ooggevoeligheidscurve worden genoemd. Deze curven vertonen een maximumwaarde gelijk aan 1 voor respektievelijk $\lambda = \lambda_m = 555$ nm en $\lambda = \lambda'_m = 507$ nm.

Verder werd ook experimenteel bewezen dat, als twee vlakken, die respektievelijk een totale radiantie uitzenden van $\int (L_{e\lambda})_1 \cdot d\lambda$ en $\int (L_{e\lambda})_2 \cdot d\lambda$ (met verschillende spektrale verdeling $(L_{e\lambda})_1$ en $(L_{e\lambda})_2$), een gelijke helderheidsindruk verwekken, het volgende geldt :

$$\int (L_{e\lambda})_1 \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda = \int (L_{e\lambda})_2 \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$$

De fotometrische grootheden werden ingevoerd, steunend op de volgende drie konventies :

1° Men definieert het "gemiddeld menselijk oog" waarvan de eigenschappen overeenstemmen met het gemiddelde van een groot aantal waarnemers met een normaal gezichtsvermogen. Met behulp van dit "gemiddelde menselijk oog" werd vastgesteld, dat $\lambda_m = 555$ nm en dat $\lambda'_m = 507$ nm, en werden de beide curven $V(\lambda)$ en $V'(\lambda)$ in funktie van λ, vastgelegd.

Tabel VII.1. *Spektrale ooggevoeligheidsfaktor $V(\lambda)$ en $V'(\lambda)$*

golflengte in nm	$V(\lambda)$	$V'(\lambda)$	golflengte in nm	$V(\lambda)$	$V'(\lambda)$
380	$3,900\,000 \cdot 10^{-5}$	$5,89 \cdot 10^{-4}$	580	0,870 000 0	$1,212 \cdot 10^{-1}$
385	$6,400\,000 \cdot 10^{-5}$	$1,108 \cdot 10^{-3}$	585	0,816 300 0	$8,99 \cdot 10^{-2}$
390	$1,200\,000 \cdot 10^{-4}$	$2,209 \cdot 10^{-3}$	590	0,757 000 0	$6,55 \cdot 10^{-2}$
395	$2,170\,000 \cdot 10^{-4}$	$4,53 \cdot 10^{-3}$	595	0,694 900 0	$4,69 \cdot 10^{-2}$
400	$3,960\,000 \cdot 10^{-4}$	$9,29 \cdot 10^{-3}$	600	0,631 000 0	$3,315 \cdot 10^{-2}$
405	$6,400\,000 \cdot 10^{-4}$	$1,852 \cdot 10^{-2}$	605	0,566 800 0	$2,312 \cdot 10^{-2}$
410	$1,210\,000 \cdot 10^{-3}$	$3,484 \cdot 10^{-2}$	610	0,503 000 0	$1,593 \cdot 10^{-2}$
415	$2,180\,000 \cdot 10^{-3}$	$6,04 \cdot 10^{-2}$	615	0,441 200 0	$1,088 \cdot 10^{-2}$
420	$4,000\,000 \cdot 10^{-3}$	$9,66 \cdot 10^{-2}$	620	0,381 000 0	$7,37 \cdot 10^{-3}$
425	$7,300\,000 \cdot 10^{-3}$	$1,436 \cdot 10^{-1}$	625	0,321 000 0	$4,97 \cdot 10^{-3}$
430	$1,160\,000 \cdot 10^{-2}$	0,1998	630	0,265 000 0	$3,335 \cdot 10^{-3}$
435	$1,684\,000 \cdot 10^{-2}$	0,2625	635	0,217 000 0	$2,235 \cdot 10^{-3}$
440	$2,300\,000 \cdot 10^{-2}$	0,3281	640	0,175 000 0	$1,497 \cdot 10^{-3}$
445	$2,980\,000 \cdot 10^{-2}$	0,3931	645	0,138 200 0	$1,005 \cdot 10^{-3}$
450	$3,800\,000 \cdot 10^{-2}$	0,455	650	0,107 000 0	$6,77 \cdot 10^{-4}$
455	$4,800\,000 \cdot 10^{-2}$	0,513	655	$8,160\,000 \cdot 10^{-2}$	$4,59 \cdot 10^{-4}$
460	$6,000\,000 \cdot 10^{-2}$	0,567	660	$6,100\,000 \cdot 10^{-2}$	$3,129 \cdot 10^{-4}$
465	$7,390\,000 \cdot 10^{-2}$	0,620	665	$4,458\,000 \cdot 10^{-2}$	$2,146 \cdot 10^{-4}$
470	$9,098\,000 \cdot 10^{-2}$	0,676	670	$3,200\,000 \cdot 10^{-2}$	$1,480 \cdot 10^{-4}$
475	0,112 600 0	0,734	675	$2,320\,000 \cdot 10^{-2}$	$1,026 \cdot 10^{-4}$
480	0,139 020 0	0,793	680	$1,700\,000 \cdot 10^{-2}$	$7,15 \cdot 10^{-5}$
485	0,169 300 0	0,851	685	$1,192\,000 \cdot 10^{-2}$	$5,01 \cdot 10^{-5}$
490	0,208 020 0	0,904	690	$8,210\,000 \cdot 10^{-3}$	$3,533 \cdot 10^{-5}$
495	0,258 600 0	0,949	695	$5,723\,000 \cdot 10^{-3}$	$2,501 \cdot 10^{-5}$
500	0,323 000 0	0,982	700	$4,102\,000 \cdot 10^{-3}$	$1,780 \cdot 10^{-5}$
505	0,407 300 0	0,998	705	$2,929\,000 \cdot 10^{-3}$	$1,273 \cdot 10^{-5}$
[507]	0,444 309 6	[1,000]	710	$2,091\,000 \cdot 10^{-3}$	$9,14 \cdot 10^{-6}$
510	0,503 000 0	0,997	715	$1,484\,000 \cdot 10^{-3}$	$6,60 \cdot 10^{-6}$
515	0,608 200 0	0,975	720	$1,047\,000 \cdot 10^{-3}$	$4,78 \cdot 10^{-6}$
520	0,710 000 0	0,935	725	$7,400\,000 \cdot 10^{-4}$	$3,482 \cdot 10^{-6}$
525	0,793 200 0	0,880	730	$5,200\,000 \cdot 10^{-4}$	$2,546 \cdot 10^{-6}$
530	0,862 000 0	0,811	735	$3,611\,000 \cdot 10^{-4}$	$1,870 \cdot 10^{-6}$
535	0,914 850 1	0,733	740	$2,492\,000 \cdot 10^{-4}$	$1,379 \cdot 10^{-6}$
540	0,954 000 0	0,650	745	$1,719\,000 \cdot 10^{-4}$	$1,022 \cdot 10^{-6}$
545	0,980 300 0	0,564	750	$1,200\,000 \cdot 10^{-4}$	$7,60 \cdot 10^{-7}$
550	0,994 950 1	0,481	755	$8,480\,000 \cdot 10^{-5}$	$5,67 \cdot 10^{-7}$
[555]	[1,000 000 0]	0,402	760	$6,000\,000 \cdot 10^{-5}$	$4,25 \cdot 10^{-7}$
560	0,995 000 0	0,3288	765	$4,240\,000 \cdot 10^{-5}$	$3,196 \cdot 10^{-7}$
565	0,978 600 0	0,2639	770	$3,000\,000 \cdot 10^{-5}$	$2,413 \cdot 10^{-7}$
570	0,952 000 0	0,2076	775	$2,120\,000 \cdot 10^{-5}$	$1,829 \cdot 10^{-7}$
575	0,915 400 0	0,1602	780	$1,499\,000 \cdot 10^{-5}$	$1,390 \cdot 10^{-7}$

2° Men definieert (wat betreft het fotopisch gebied) de fotometrische grootheid L_v (luminantie genoemd) als een grootheid die evenredig is met $\int L_{e\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$:

$$L_v = k \cdot \int L_{e\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$$

In plaats van een eenvoudig evenredig verband tussen L_v en $\int L_{e\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$ zou men ook een willekeurig ander verband kunnen gekozen hebben. De eenvoudige evenredigheid biedt het voordeel, wetten die geldig zijn voor de energetische grootheden (zuiver fysische grootheden), uit te breiden tot de fotometrische grootheden.

3° Men kiest een willekeurige eenheid voor het meten van één van de fotometrische grootheden, hetgeen volstaat om voor de andere fotometrische grootheden een koherente eenheid af te leiden. Deze keuze bepaalt de waarde K_m van de evenredigheidsfaktor k.

Deze drie konventies laten toe de uitdrukking van de luminantie (wat betreft het fotopisch gebied) weer te geven onder de definitieve vorm :

$$L_v = K_m \cdot \int L_{e\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$$

Tegenover ieder van de fysische grootheden in verband met straling kan een overeenkomstige fotometrische grootheid geplaatst worden. Het verband tussen de betrokken fysische stralingsgrootheid X_e en de overeenkomstige fotometrische grootheid X_v wordt gegeven door :

$$X_v = K_m \cdot \int X_{e\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$$

Deze uitdrukking, gesteund op de drie hogervernoemde konventies, vormt de "verbindingsbrug" die vertrekkend van de fysische stralingsgrootheden leidt naar de fotometrische grootheden.

De fotometrische grootheid waarvoor een willekeurige eenheid werd gekozen, is de lichtsterkte. De betrokken eenheid is de candela. In het internationale eenhedenstelsel is de lichtsterkte een basisgrootheid en de candela dus een grondeenheid.

In 1967 werd de candela gedefinieerd als volgt : de candela is de lichtsterkte in loodrechte richting van een oppervlak gelijk aan het 1/600 000 gedeelte van een vierkant met zijden van 1 meter van een inte-

grale straler bij de stollingstemperatuur van platina onder een druk van 101 325 newton per vierkante meter (13de CGPM, 1967, resolutie 3).

De betrokken eenheid was zodanig gedefinieerd, dat de luminantie van een zwarte straler bij de temperatuur van stollend platina gelijk is aan 600 000 cd . m^{-2}, hetzij 60 cd . cm^{-2}.

Hoewel de lichtsterkte als basisgrootheid werd aangenomen en niet de luminantie, heeft de luminantie van een zwarte straler bij de stollingstemperatuur van platina (2045 K), waaraan een waarde werd toegekend van 600 000 cd . m^{-2}, een doorslaggevende rol gespeeld bij de vastlegging van de eenheid van lichtsterkte.

De waarde van K_m was gelijk aan het kotiënt van de luminantie van een zwarte straler bij de stollingstemperatuur van platina (deze luminantie is gelijk aan 600 000 cd . m^{-2}) en de integraal $\int (L_{e\lambda})_z \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$ (tussen 380 nm en 780 nm) met $(L_{e\lambda})_z$ = de spektrale dichtheid van de radiantie van een zwarte straler bij de stollingstemperatuur van platina.

Dus :

$$K_m = \frac{600\ 000\ \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}}{\int_{380\ \text{nm}}^{780\ \text{nm}} (L_{e\lambda})_z \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}$$

De integraal in de noemer kan uitgewerkt worden met behulp van de stralingswet van Planck (die hier niet behandeld wordt). Hierbij bekwam men waarden van K_m die in de buurt lagen van 680 $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$.

In 1979 werd de definitie van de candela gewijzigd als volgt : De candela is de lichtsterkte, in een gegeven richting, van een bron die een monochromatische straling met een frekwentie van 540.10^{12} hertz uitzendt en waarvan de stralingssterkte in die richting 1/683 watt per steradiaal is (16de CGPM, 1979, resolutie 5). Deze definitie is een gevolg van het feit, dat de waarde van K_m in 1979 op konventionele wijze werd gelijkgesteld aan exact 683 $\frac{\text{lm}}{\text{W}}$.

Bemerk dat aan een frekwentie van 540.10^{12} Hz een golflengte beantwoordt van :

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{299,792\ 458\ .\ 10^{8}\ m/s}{540.10^{12}\ Hz} = 5,55\ \ldots\ .\ 10^{-7}\ m$$
$$= 555,\ldots\ nm$$

Voor de spektrale fotometrische grootheden geldt :

$$X_{v\lambda} = \frac{dX_v}{d\lambda} = K_m\ .\ V(\lambda)\ .\ X_{e\lambda} = K(\lambda)\ .\ X_{e\lambda}$$

De grootheid $K(\lambda) = K_m\ .\ V(\lambda) = \frac{X_{v\lambda}}{X_{e\lambda}}$ wordt fotometrisch stralingsekwivalent voor monochromatische straling genoemd; dikwijls treft men hiervoor de volgende definitie aan : het fotometrisch stralingsekwivalent is het kotiënt van de lichtflux $\Phi_{v\lambda}$ en de stralingsflux $\Phi_{e\lambda}$ bij monochromatische straling van de golflengte λ :

$$K(\lambda) = \frac{\Phi_{v\lambda}}{\Phi_{e\lambda}} = K_m\ .\ V(\lambda)$$

Men bekomt dus het fotometrisch stralingsekwivalent $K(\lambda)$ voor de golflengte λ, door de grootheid K_m (= 683 $\frac{lm}{W}$) te vermenigvuldigen met de ooggevoeligheidsfaktor $V(\lambda)$ (die een onbenoemd getal is); het fotometrisch stralingsekwivalent $K(\lambda)$ wordt dus ook uitgedrukt in $\frac{lm}{W}$. Het fotometrisch stralingsekwivalent $K(\lambda)$ bereikt zijn maximumwaarde voor $V(\lambda) = 1$ en is dan gelijk aan K_m. Dit betekent dat een stralingsstroom van één watt met een golflengte van 555 nm (monochromatische straling) gepaard gaat (in het fotopisch gebied) met een lichtstroom van 683 lumen. Voor elke andere monochromatische straling (dus met andere golflengte) is de lichtstroom bekomen bij één watt stralingsstroom, kleiner dan 683 lumen, en wel in dezelfde mate als de ooggevoeligheidsfaktor $V(\lambda)$ voor de betrokken golflengte kleiner is dan 1 (zijnde de ooggevoeligheidsfaktor voor een golflengte van 555 nm).

2.2.3. Fotometrische grootheden en eenheden

Hierna worden de voornaamste fotometrische grootheden opgegeven, met hun definitievergelijking en de betrokken SI-eenheid. Tevens wordt ook een vereenvoudigde definitievergelijking gegeven, die enkel geldig is wanneer de lichtflux in de tijd konstant blijft en gelijkmatig verdeeld is over de beschouwde doorsnede en/of de beschouwde ruimtehoek. Aan de oppervlakten en hoeken, die tussenkomen in de definitie van groot-

heden die betrekking hebben met uitstraling, wordt index 1 toegekend. Aan de oppervlakten en hoeken, die tussenkomen in de definitie van grootheden die betrekking hebben met instraling (ontvangen straling) wordt index 2 toegekend. Van de betrokken grootheden wordt tenslotte de Franse, Engelse en Duitse vertaling gegeven.

De index v (van visueel) die voorkomt bij het symbool van de fotometrische grootheden, mag weggelaten worden wanneer er geen verwarring mogelijk is met het symbool van de overeenkomstige fysische stralingsgrootheden.

a. Hoeveelheid licht Q_v : kenmerkende grootheid van stralingsenergie, waardoor de eigenschap van het verwekken van een lichtgewaarwording kwantitatief wordt uitgedrukt in funktie van de stralingsenergie en de internationale ooggevoeligheidsfaktor $V(\lambda)$.

Definitievergelijking :

$$Q_v = K_m \cdot \int Q_{e\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$$

SI-eenheid : lumen sekonde (lm . s)

Vertaling : F : Quantité de lumière

E : Quantity of light

D : Lichtmenge

b. Lichtflux (Lichtstroom) Φ_v : is het kotiënt van de lichthoeveelheid Q_v en de tijd.

Definitievergelijkingen :

$$\Phi_v = \frac{dQ_v}{dt} \qquad \Phi_v = \frac{Q_v}{t}$$

SI-eenheid : lumen (lm)

Vertaling : F : Flux lumineux

E : Luminous flux

D : Lichtstrom

c. Exitantie (lichtgevende exitantie) M_v (vroeger emittantie genoemd) : is het kotiënt van de door een oppervlak afgegeven lichtflux Φ_v en de oppervlakte van het betrokken oppervlak.

Definitievergelijkingen :

$$M_v = \frac{d\Phi_v}{dA_1} \qquad M_v = \frac{\Phi_v}{A_1}$$

SI-eenheid : lm . m^{-2}

Vertaling : F : Exitance (lumineuse)

E : (Luminous) exitance

D : Spezifische Lichtausstrahlung, Exitanz

d. Lichtsterkte (van een lichtbron in een richting) I_v : is het kotiënt van de lichtflux Φ_v in een ruimtehoek Ω_1 rond een bepaalde richting, en de waarde van de betrokken ruimtehoek.

Definitievergelijkingen :

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega_1} \qquad I = \frac{\Phi_v}{\Omega_1}$$

SI-eenheid : candela (cd)

Vertaling : F : Intensité lumineuse

E : Luminous intensity

D : Lichtstärke

e. Luminantie (lichtgevende luminantie) L_v : is het kotiënt van de lichtflux Φ_v die gaat door een oppervlak (of terecht komt op een oppervlak) rond een gegeven punt, en het produkt van de doorstraalde ruimtehoek Ω met de oppervlakte van de ortogonale projektie ($A \cdot \cos \epsilon$) van het betrokken oppervlak op een vlak dat loodrecht staat op de beschouwde richting.

Definitievergelijkingen :

$$L_v = \frac{d^2\Phi_v}{d\Omega_1 \cdot dA_1 \cdot \cos \epsilon_1} = \frac{d^2\Phi_v}{d\Omega_2 \cdot dA_2 \cdot \cos \epsilon_2}$$

$$L_v = \frac{\Phi_v}{\Omega_1 \cdot A_1 \cdot \cos \epsilon_1} = \frac{\Phi_v}{\Omega_2 \cdot A_2 \cdot \cos \epsilon_2}$$

SI-eenheid : cd . m^{-2}

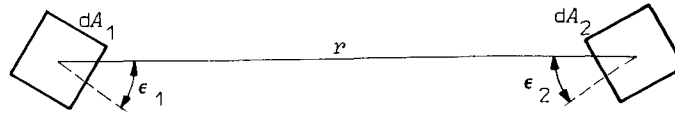
Vertaling : F : Luminance (lumineuse)

E : Luminance

D : Leuchtdichte (Luminanz)

De basiswet in verband met de wijze waarop licht zich uitbreidt, luidt (met $\Omega_0 = 1$ sr) :

$$d^2\Phi_v = L_v \cdot \frac{dA_1 \cdot \cos \epsilon_1 \cdot dA_2 \cdot \cos \epsilon_2}{r^2} \cdot \Omega_o = L_v \cdot dA_1 \cdot \cos \epsilon_1 \cdot d\Omega_1$$



De betrokken wet geeft aan hoeveel de lichtflux bedraagt, die door een oppervlakte-element dA_1 met een luminantie L_v onder de uitstralingshoek ϵ_1 (hoek tussen de stralingsrichting gegeven door r en de loodrechte op het oppervlak dA_1) wordt toegestraald aan een ander oppervlakte-element dA_2 onder de instralingshoek ϵ_2 (hoek tussen de stralingsrichting gegeven door r en de loodrechte op het vlak dA_2), met r als afstand tussen beide oppervlakken. De projekties van beide oppervlakken op een vlak loodrecht op de richting r zijn respektievelijk gelijk aan $dA_1 \cdot \cos \epsilon_1$ en $dA_2 \cdot \cos \epsilon_2$ en worden de schijnbare oppervlakte genoemd.

Uit de symmetrische bouw van de formule volgt, dat een even grote lichtflux wordt toegestraald in het geval dat dA_1 als straler en dA_2 als ontvanger werkt als in het geval dat dA_2 als straler en dA_1 als ontvanger werkt, in zover natuurlijk dat de luminantie in beide gevallen even groot is :

$$d^2\Phi_v = L_v \cdot \frac{dA_1 \cdot \cos \epsilon_1 \cdot dA_2 \cdot \cos \epsilon_2 \cdot \Omega_o}{r^2} = L_v \cdot dA_1 \cdot \cos \epsilon_1 \cdot d\Omega_1$$
$$= L_v \cdot dA_2 \cdot \cos \epsilon_2 \cdot d\Omega_2$$

f. Verlichtingssterkte E_v : is het kotiënt van de op een oppervlak invallende lichtflux Φ_v en de oppervlakte van het betrokken oppervlak.

Definitievergelijkingen :

$$E = \frac{d\Phi_v}{dA_2} \qquad E = \frac{\Phi_v}{A_2}$$

SI-eenheid : $lm \cdot m^{-2}$

De eenheid $\frac{lm}{m^2}$ als eenheid van verlichtingssterkte, wordt lux (lx) genoemd :

$\frac{lm}{m^2} = lx$

Vertaling : F : Eclairement lumineux

E : Illuminance, illumination

D : Beleuchtungsstärke

g. Belichtingsdosis H_v : is het produkt van de verlichtingssterkte E_v en de tijd.

Definitievergelijkingen :

$$H_v = \int E_v \cdot dt \qquad H_v = E_v \cdot t$$

SI-eenheid : lux sekonde ($lx \cdot s = lm \cdot m^{-2} \cdot s$)

Vertaling : F : Exposition lumineuse

E : Light exposure

D : Belichtung

2.2.4. Spektrale fotometrische grootheden

Zij X_v een willekeurige fotometrische grootheid gegeven door :

$$X_v = \int X_{v\lambda} \cdot d\lambda$$

De spektrale fotometrische grootheid $X_{v\lambda}$ (of beter : de spektrale dichtheid van de betrokken fotometrische grootheid) wordt bekomen door het aandeel van de fotometrische grootheid tussen λ en $d\lambda$ te delen door $d\lambda$:

$$X_{v\lambda} = \frac{dX_v}{d\lambda}$$

In het betrokken golflengtebereik $\Delta\lambda$ wordt de betrokken fotometrische grootheid ΔX_v dan gegeven door :

$$\Delta X_v = X_{v\lambda} \cdot \Delta\lambda$$

Tussen een willekeurige fotometrische grootheid X_v en de overeenkomstige fysische stralingsgrootheid X_e geldt het volgende verband :

$$X_v = K_m \cdot \int X_{e\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$$

$$\frac{dX_v}{d\lambda} = K_m \cdot V(\lambda) \cdot X_{e\lambda} = K(\lambda) \cdot X_{e\lambda}$$

Hieruit volgt :

$$X_{v\lambda} = \frac{dX_v}{d\lambda} = K_m \cdot V(\lambda) \cdot X_{e\lambda} = K(\lambda) \cdot X_{e\lambda} = K(\lambda) \cdot \frac{dX_e}{d\lambda}$$

De spektrale dichtheid van een fotometrische grootheid wordt dus bekomen door de overeenkomstige spektrale fysische stralingsgrootheid $X_{e\lambda}$ te vermenigvuldigen met $K(\lambda)$ (spektraal fotometrisch stralingsekwivalent).

Voorbeeld :

Spektrale dichtheid van de lichtflux $\Phi_{v\lambda}$: is de limiet van het kotiënt van de lichtflux in een interval rond een gegeven golflengte en dit interval wanneer het nadert tot nul.

Definitievergelijking :

$$\Phi_{v\lambda} = \frac{d\Phi_v}{d\lambda} = K_m \cdot V(\lambda) \cdot \Phi_{e\lambda} = K(\lambda) \cdot \Phi_{e\lambda} = K(\lambda) \cdot \frac{d\Phi_e}{d\lambda}$$

SI-eenheid : lm . m^{-1} (veel gebruikte eenheid : lm . nm^{-1})

Vertaling : F : Densité spectrale de flux lumineux

E : Spectral concentration of luminous flux

D : Spektrale Lichtstromdichte

2.2.5. Definitie van enkele koherente fotometrische SI-eenheden

a. Candela (cd), eenheid van lichtsterkte (I_v)

De candela is de lichtsterkte, in een gegeven richting van een bron die een monochromatische straling met een frekwentie van 540 . 10^{12} hertz uitzendt en waarvan de stralingssterkte in die richting 1/683 watt per steradiaal is (16de CGPM, 1979, resolutie 5).

b. lumen (lm), eenheid van lichtflux (Φ_v)

De SI-eenheid van lichtflux Φ_v stemt overeen met de lichtflux

uitgestraald in een ruimtehoek van één steradiaal door een puntvormige bron waarvan de gelijkmatige lichtsterkte één candela bedraagt.

De totale lichtflux van een puntvormige lichtbron met een gelijkmatige lichtsterkte van één candela is gelijk aan 4 π lumen = 12,56 ... lumen. De steradiaal (eenheid van ruimtehoek) is immers gelijk aan de ruimtehoek die, met als toppunt het middelpunt van een bol, op het boloppervlak een oppervlak insluit waarvan de oppervlakte even groot is als de oppervlakte van een vierkant waarvan de zijde dezelfde waarde heeft als de straal r van de bol. Daar de oppervlakte van een bol gelijk is aan $4 \pi . r^2$, gaat de totale boloppervlakte samen met een ruimtehoek van 4 π steradialen (12,56 ... sr).

c. Lumen per m^2 als eenheid van verlichtingssterkte (E_v) wordt genoemd : lux (lx)

De SI-eenheid van verlichtingssterkte E_v stemt overeen met de verlichtingssterkte van een oppervlak met een oppervlakte van één vierkante meter, die een gelijkmatig verdeelde lichtflux van één lumen ontvangt.

d. Lumen per m^2 als eenheid van (lichtgevende) exitantie (M_v)

De SI-eenheid van exitantie M_v stemt overeen met de exitantie van een oppervlak met een oppervlakte van één vierkante meter die een gelijkmatige lichtflux van 1 lumen uitstraalt.

e. Candela per m^2, eenheid van (lichtgevende) luminantie (L_v)

De SI-eenheid van luminantie L_v stemt overeen met de luminantie van een oppervlak (beschouwd als lichtbron) dat per m^2 schijnbare oppervlakte, een lichtsterkte van één candela bezit. Aan de eenheid cd . m^{-2} werd vroeger in sommige landen de benaming "nit" (nt) gegeven; deze benaming werd echter niet weerhouden als SI-benaming.

f. Lumen sekonde (lm . s), eenheid van hoeveelheid licht (Q_v)

De SI-eenheid van hoeveelheid licht Q_v stemt overeen met de hoeveel-

heid licht die bekomen wordt bij een lichtflux van één lumen die gedurende één sekonde uitgestraald wordt.

g. Lux sekonde (lx . s), eenheid van belichtingsdosis (H_v)

De SI-eenheid van belichtingsdosis H_v stemt overeen met de belichtingsdosis die een oppervlak van één vierkante meter ontvangt in één sekonde wanneer de verlichtingssterkte één lux bedraagt.

2.2.6. Onderlinge samenhang der behandelde fysische SI-stralingseenheden en fotometrische SI-eenheden

De candela is één van de zeven grondeenheden van het internationale eenhedenstelsel (SI-eenheden). Alle koherente fotometrische eenheden (afgeleid uit de definitievergelijking van de betrokken fotometrische grootheid) kunnen uiteraard in de grondeenheden worden uitgedrukt (zie tabel VII.2.1); hierbij wordt ook gebruik gemaakt van de aanvullende (of supplementaire) eenheid steradiaal (sr). De eenheid sr mag hier niet weggelaten worden, vermits er dan geen onderscheid meer zou zijn tussen bijvoorbeeld de eenheid van lichtflux (cd . sr = lm) en de eenheid van lichtsterkte (cd); zie ook Hoofdstuk VIII, onder 6.

De fotometrische eenheid lumen (lm) is de tegenhanger van de energetische stralingseenheid watt (W), hetgeen eveneens blijkt uit de gegevens vermeld in de tabel. De eenheid waarin een bepaalde energetische stralingsgrootheid wordt uitgedrukt, vermenigvuldigd met $\frac{lm}{W}$ (zijnde de eenheid waarin de grootheid K_m wordt uitgedrukt) is gelijk aan de eenheid waarin de overeenkomstige fotometrische grootheid wordt uitgedrukt, met dien verstande dat $\frac{lm}{sr} = cd$.

2.2.7. Rendementen

a. Stralingsrendement η_e van een stralingsbron in het golflengtebereik van λ_1 tot λ_2 (D : Strahlungsausbeute einer Strahlungsquelle im Wellenlängenbereich von λ_1 bis λ_2) : is de verhouding van de in dit bereik afgegeven stralingsflux en het vermogen P dat door de stralingsbron wordt opgenomen :

Tabel VII.2. *Overzicht van de voornaamste fysische SI-stralingseenheden en fotometrische SI-eenheden*

energetische stralingsgrootheid	SI-eenheid	overeenkomstige fotometrische grootheid	SI-eenheid
$Q_e = \int Q_{e\lambda} \cdot d\lambda$	W . s = J	$Q_v = K_m \cdot \int Q_{e\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$	lm . s = cd . sr . s
$\Phi_e = \int \Phi_{e\lambda} \cdot d\lambda$	W	$\Phi_v = K_m \cdot \int \Phi_{e\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$	lm = cd . sr
$M_e = \int M_{e\lambda} \cdot d\lambda$	$\frac{W}{m^2}$	$M_v = K_m \cdot \int M_{e\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$	$\frac{lm}{m^2} = \frac{cd \cdot sr}{m^2}$
$I_e = \int I_{e\lambda} \cdot d\lambda$	$\frac{W}{sr}$	$I_v = K_m \cdot \int I_{e\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$	$\frac{lm}{sr} = \boxed{cd}$
$L_e = \int L_{e\lambda} \cdot d\lambda$	$\frac{W}{m^2 \cdot sr}$	$L_v = K_m \cdot \int L_{e\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$	$\frac{lm}{m^2 \cdot sr} = \frac{cd}{m^2}$
$E_e = \int E_{e\lambda} \cdot d\lambda$	$\frac{W}{m^2}$	$E_v = K_m \cdot \int E_{e\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$	$\frac{lm}{m^2} = lx = \frac{cd \cdot sr}{m^2}$
$H_e = \int H_{e\lambda} \cdot d\lambda$	$\frac{W \cdot s}{m^2} = \frac{J}{m^2}$	$H_v = K_m \cdot \int H_{e\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$	$\frac{lm \cdot s}{m^2} = lx \cdot s = \frac{cd \cdot sr \cdot s}{m^2}$

$$\eta_e = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e\lambda} \cdot d\lambda}{P}$$

SI-eenheid : 1

b. Lichtrendement η_v van een lichtbron, ook genoemd specifieke lichtflux van een lichtbron (D : Lichtausbeute) : is het kotiënt van de uitgestraalde lichtflux en het vermogen P dat door de lichtbron wordt opgenomen :

$$\eta_v = \frac{K_m \cdot \int_{380\ nm}^{780\ nm} \Phi_{e\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}{P} = \frac{\Phi_v}{P}$$

SI-eenheid : $\frac{lm}{W}$

c. Optisch rendement O van een straling (D : Optischer Nutzeffekt) : is de verhouding van de stralingsflux tussen de golflengten 380 nm en 780 nm en de totale stralingsflux :

$$O = \frac{\int_{380\ nm}^{780\ nm} \Phi_{e\lambda} \cdot d\lambda}{\int_{0}^{\infty} \Phi_{e\lambda} \cdot d\lambda}$$

SI-eenheid : 1

d. Visuel rendement V van de totale straling (D : Visueller Nutzeffekt der Gesamtstrahlung) : is de verhouding van de integraal $\int_{380\ nm}^{780\ nm} \Phi_{e\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$ en de totale stralingsflux Φ_e :

$$V = \frac{\int_{380\ nm}^{780\ nm} \Phi_{e\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{0}^{\infty} \Phi_{e\lambda} \cdot d\lambda} = \frac{\frac{\Phi_v}{K_m}}{\Phi_e} = \frac{\Phi_v}{K_m \cdot \Phi_e}$$

SI-eenheid : 1

e. Visueel rendement V_z van de zichtbare straling (D : Visueller Nutzeffekt der sichtbaren Strahlung) : is de verhouding van de integraal $\int_{380\ nm}^{780\ nm} \Phi_{e\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$ en de stralingsflux in het zichtbare gebied :

$$V_z = \frac{\int_{380\ nm}^{780\ nm} \Phi_{e\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{380\ nm}^{780\ nm} \Phi_{e\lambda} \cdot d\lambda} = \frac{V}{O}$$

SI-eenheid : 1

f. Spektraal fotometrisch stralingsekwivalent $K(\lambda)$ (D : Spektrales photometrisches Strahlungsäquivalent) : is het kotiënt van de lichtflux en de stralingsflux voor monochromatische straling van golflengte λ, ook nog genoemd spektrale lichtefficiëntie :

$$K(\lambda) = \frac{\Phi_{v\lambda}}{\Phi_{e\lambda}} = K_m \cdot V(\lambda)$$

SI-eenheid : $\frac{lm}{W}$

g. Maximum waarde K_m van het fotometrisch stralingsekwivalent (D : Maximalwert des photometrischen Strahlungsäquivalentes), ook nog genoemd, maximale lichtefficiëntie.
Sinds 1979 wordt konventioneel aangenomen :

$$K_m = \frac{683\ lm/W}{V(\lambda = 555\ nm)} = 683\ lm/W \qquad \text{(exact)}$$

Vroegere definitie : zie onderhavig hoofdstuk onder 2.2.2.

h. Fotometrisch stralingsekwivalent K van de totale straling (D : Photometrisches Strahlungsäquivalent der Gesamtstrahlung), ook nog genoemd : lichtefficiëntie, is het kotiënt van de lichtflux Φ_v en de totale stralingsflux Φ_e :

$$K = \frac{K_m \cdot \int_{380\ nm}^{780\ nm} \Phi_{e\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{0}^{\infty} \Phi_{e\lambda} \cdot d\lambda} = \frac{\Phi_v}{\Phi_e} = K_m \cdot V = \frac{\eta_v}{\eta_e}$$

SI-eenheid : $\frac{lm}{W}$

2.2.8. Andere fotometrische eenheden dan de hierboven opgegeven koherente SI-eenheden

a. Hoeveelheid licht Q_v (SI-eenheid : lm . s)

1 lumen uur = 1 lm . h = 3600 lm . s

b. Luminantie L_v

De SI-eenheid van luminantie is : $\frac{cd}{m^2}$; deze eenheid werd vroeger in sommige landen nit (nt) genoemd; de benaming nit werd niet weerhouden als SI-benaming.

De eenheid $\frac{cd}{cm^2}$ is een decimaal deel van een SI-eenheid. Vroeger werd aan de eenheid $\frac{cd}{cm^2}$ de benaming stilb (sb) gegeven; deze benaming werd echter niet weerhouden als SI-benaming.

1 stilb = 1 sb = 1 $\frac{cd}{cm^2}$ = 10 000 $\frac{cd}{m^2}$

= 10 000 . π asb = 31 415,9 asb

= π L = 3,141 59 L

1 lambert = 1 L = $\frac{10\ 000}{\pi}\ \frac{cd}{m^2}$ = 3183,099 $\frac{cd}{m^2}$

= $\frac{1}{\pi}\ \frac{cd}{cm^2}$ = $\frac{1}{\pi}$ sb = 0,318 309 9 sb

= 10 000 asb

1 millilambert = 1 mL = $\frac{1}{1000}$ L = $\frac{10}{\pi}\ \frac{cd}{m^2}$ = 3,183 099 $\frac{cd}{m^2}$

= $\frac{1}{1000 \cdot \pi}\ \frac{cd}{cm^2}$ = $\frac{1}{1000 \cdot \pi}$ sb = 0,000 318 309 9 sb

= 10 asb

1 apostilb $= 1 \text{ asb} = \frac{1}{\pi}\frac{\text{cd}}{\text{m}^2} = 0{,}318\ 309\ 9\ \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$

$= 0{,}0001 \text{ L} = 0{,}1 \text{ mL}$

$= \frac{0{,}0001}{\pi}\frac{\text{cd}}{\text{cm}^2} = \frac{0{,}0001}{\pi} \text{ sb} = 0{,}000\ 031\ 830\ 99 \text{ sb}$

$1\ \frac{\text{candela}}{\text{square foot}} = 1\ \frac{\text{cd}}{\text{ft}^2} = \frac{1 \text{ cd}}{(0{,}3048)^2\ \text{m}^2} = 10{,}763\ 91\ \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$

$1 \text{ footlambert} = 1 \text{ fL} = \frac{1}{\pi}\frac{\text{cd}}{\text{ft}^2} = \frac{1 \text{ cd}}{\pi \cdot (0{,}3048)^2\ \text{m}^2} = 3{,}426\ 259\ \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$

$1\ \frac{\text{candela}}{\text{square inch}} = 1\ \frac{\text{cd}}{\text{in}^2} = \frac{1 \text{ cd}}{(0{,}0254)^2\ \text{m}^2} = 1550\ \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$

$1\ \frac{\text{cd}}{\text{m}^2} = 0{,}0001 \text{ sb}$

$= \frac{\pi}{10\ 000} \text{ L} = 0{,}000\ 314\ 159 \text{ L}$

$= \frac{\pi}{10} \text{ mL} = 0{,}314\ 159 \text{ mL}$

$= \pi \text{ asb} = 3{,}141\ 59 \text{ asb}$

$= \frac{1 \text{ cd}}{\left(\frac{1}{0{,}3048}\right)^2 \text{ft}^2} = 0{,}0929\ \frac{\text{cd}}{\text{ft}^2}$

$= \frac{\pi \text{ cd}}{\left(\frac{1}{0{,}3048}\right)^2 \cdot \pi\ \text{ft}^2} = 0{,}291\ 86\ \frac{\text{cd}}{\pi \cdot \text{ft}^2} = 0{,}291\ 86 \text{ fL}$

$= \frac{1 \text{ cd}}{\left(\frac{1}{0{,}0254}\right)^2 \text{in}^2} = 0{,}000\ 645\ \frac{\text{cd}}{\text{in}^2}$

c. (Lichtgevende) exitantie (vroeger : emittantie) M_v (SI-eenheid : $\frac{\text{lm}}{\text{m}^2}$)

1 phot $= 1 \text{ ph} = 1\ \frac{\text{lm}}{\text{cm}^2} = 10\ 000\ \frac{\text{lm}}{\text{m}^2}$

1 milliphot $= 1 \text{ mph} = \frac{1}{1000}\frac{\text{lm}}{\text{cm}^2} = 10\ \frac{\text{lm}}{\text{m}^2}$

$1\ \frac{\text{lm}}{\text{m}^2} = 0{,}0001 \text{ ph}$

$= 0{,}1 \text{ mph}$

d. Verlichtingssterkte E_v (SI-eenheid : $\frac{\text{lm}}{\text{m}^2} = \text{lx}$)

1 footcandle $= 1 \text{ fc} = 1\ \frac{\text{lm}}{\text{ft}^2} = \frac{1 \text{ lm}}{(0{,}3048)^2\ \text{m}^2} = 10{,}763\ 91\ \frac{\text{lm}}{\text{m}^2}$

$= 10{,}763\ 91 \text{ lx}$

$1 \text{ lx} = 1\ \frac{\text{lm}}{\text{m}^2} = \frac{1 \text{ lm}}{\left(\frac{1}{0{,}3048}\right)^2 \text{ft}^2} = 0{,}0929 \text{ fc}$

De eenheid "phot" was origineel bedoeld als eenheid van exitantie M_v, maar werd ook dikwijls gebruikt als eenheid van verlichtingssterkte E_v (zowel de exitantie als de verlichtingssterkte kunnen worden uitgedrukt in $\frac{lm}{cm^2}$). In deze optiek geldt dus ook :

$1\ ph = 1\ \frac{lm}{cm^2} = 10\ 000\ \frac{lm}{m^2} = 10\ 000\ lx$

$1\ mph = \frac{1}{1000}\ \frac{lm}{cm^2} = 10\ \frac{lm}{m^2} = 10\ lx$

$1\ lx = 1\ \frac{lm}{m^2} = 0{,}0001\ ph$

$= 0{,}1\ mph$

2.2.9. Geschiedenis van de candela

a. In de 19de eeuw kende men volgende eenheden van lichtsterkte :

- in Engeland : de "sperm candle" (vanaf 1860)
- in Frankrijk : de "carcel" (vanaf 1842)
- in Duitsland : de "Vereins-Paraffinkerze" (V.K.) (vanaf 1868)

b. Nieuwe eenheden bij de eeuwwisseling

1° Pentane candle

In Engeland kwam in 1898 de "pentane candle" in de plaats van de "sperm candle".

2° Hefner-Kerze

In Duitsland werd in 1896 de Hefner-Kerze (HK) wettelijk ingevoerd. De fotometrische eenheden die afgeleid zijn van de Hefner-kaars worden gekenmerkt door het plaatsen van de letter "H" vóór de betrokken eenheid : Hsb, Hlm, Hlx, Hph enz.

Tussen de overige eenheden van lichtsterkte en de Hefner-kaars werd het volgende verband vastgesteld :

1 sperm candle = 1,14 HK
1 pentane candle = 1,11 HK
1 carcel = 10,75 HK
1 V.K. = 1,20 HK

3° Violle-eenheid en decimale kaars (bougie décimale)

In Frankrijk werd in 1889 de Violle-eenheid aangenomen als eenheid van lichtsterkte. Ze werd gedefinieerd als de lichtsterkte van een oppervlak van 1 cm^2 van gloeiend platina bij de stollingstemperatuur. Het twintigste gedeelte van de Violle-eenheid werd "bougie décimale" genoemd (decimale kaars) : 1 bougie décimale = 1/20 Violle-eenheid. Tussen de carcel en de Violle-eenheid werd volgend verband vastgesteld :

1 Violle-eenheid : 2,08 carcel

waaruit volgt (met 1 carcel = 10,75 HK) :

1 Violle-eenheid ≈ 22,4 HK

Als verband tussen de "bougie décimale" (toegepast als eenheid van lichtsterkte tussen 1896 en 1909) en de Hefner-kaars bekwam men :

1 bougie décimale = 1,12 HK

c. International Candle Power (internationale kaars IK)

In 1909 werden in Engeland, de USA en Frankrijk, de "pentane candle" en de "bougie décimale" vervangen door de "internationale kaars", die verwezenlijkt werd met behulp van elektrische gloeilampen. Deze beslissing werd genomen door het "National Bureau of Standards" (USA), het "Laboratoire Central d'Electricité" (Frankrijk) en het "National Physical Laboratory" (Engeland).
Het verband tussen de internationale kaars en de Hefner-kaars werd in 1913 vastgesteld als volgt :

1 IK = 1,11 HK

In 1921 nam de CIE (Commission Internationale d'Eclairage) de "International Candle Power" van 1909 officieel aan als eenheid van lichtsterkte onder de naam "Bougie Internationale" of "International Candle". De fotometrische eenheden die afgeleid zijn van de Internationale kaars, worden gekenmerkt door het plaatsen van de letter "I" vóór de betrokken eenheid : Isb, Ilm, Ilx, Iph, enz.

In 1932 werd volgend verband vastgelegd tussen de Hefner-kaars en de internationale kaars :

1 HK = 0,8857 IK

d. Candela

In 1933 werd het CIPM door de 8ste CGPM er mede gelast, nieuwe lichteenheden te bepalen. In 1937 werd de "bougie nouvelle" als eenheid van lichtsterkte zo vastgelegd, dat de luminantie van een zwarte straler bij de temperatuur van stollend platina 60 lichtsterkte-eenheden per cm^2 bedraagt. Deze definitie werd in 1939 door de CIE (Commission Internationale d'Eclairage) overgenomen.

In 1948 werd de betrokken eenheid door de 9de CGPM bekrachtigd, en werd de benaming "candela" aangenomen als benaming voor de nieuwe eenheid van lichtsterkte. Aan de overige fotometrische eenheden, afgeleid van de candela, werden geen nieuwe namen gegeven; ze worden eenvoudig aangeduid met sb, lm, lx, ph enz.

In 1954 werd de candela door de 10de CGPM aangenomen als (fotometrische) grondeenheid in het internationaal eenhedenstelsel (SI).

Tussen de candela, de internationale kaars (IK) en de Hefner-kaars (HK) gelden volgende betrekkingen :

1 cd = 0,981 IK = 1,107 HK
1 IK = 1,019 cd = 1,128 HK
1 HK = 0,903 cd = 0,886 IK

De betrokken cijfers gelden ook voor de omzettingen van de drie klassen afgeleide fotometrische eenheden, respektievelijk afgeleid van de candela (cd), de internationale kaars (IK) en de Hefner-kaars (HK).
Voorbeeld :

1 lm = 0,981 Ilm = 1,107 Hlm
1 Ilm = 1,019 lm = 1,128 Hlm
1 Hlm = 0,903 lm = 0,886 Ilm

In 1967 werd de candela door de 13de CGPM (in resolutie 5) gedefinieerd als volgt :
"De candela is de lichtsterkte, in loodrechte richting, van een oppervlakte van 1/600 000 vierkante meter van een zwart lichaam bij de stollingstemperatuur van platina onder een druk van 101 325 newton per vierkante meter".

In 1979 tenslotte werd door de 16de CGPM (in resolutie 3) de volgende definitie van de candela aangenomen :
"De candela is de lichtsterkte, in een gegeven richting, van een bron die een monochromatische straling met een frekwentie van 540.10^{12} hertz uitzendt en waarvan de stralingssterkte in die richting 1/683 watt per steradiaal is".

2.3. Straling en fotosyntese

Door de fotosyntese wordt in de plant organisch materiaal opgebouwd uit anorganische verbindingen. Bij de fotosyntetische koolstofassimilatie is de koolstofbron het koolzuurgas (kooldioxyde) CO_2 uit de lucht, terwijl de vereiste waterstof ontnomen wordt aan water. Deze reaktie is maar mogelijk bij inwerking van straling met een golflengte tussen 400 nm en 700 nm, met tussenkomst van verscheidene assimilatiepigmenten (onder andere chlorofyl). Dit golflengtebereik valt binnen de zichtbare straling (zie onderhavig hoofdstuk onder 2.2.1.).

Voor het weergeven van de hoeveelheid straling die werkzaam is bij de fotosyntese, worden drie verschillende grootheden gebruikt.

Een eerste grootheid is de verlichtingssterkte E_v (hoeveelheid licht, gedeeld door oppervlakte en tijd; SI-eenheid : $\frac{lm}{m^2}$ = lux) waarbij de straling wordt gewaardeerd op dezelfde manier zoals straling wordt gewaardeerd door het "gemiddeld menselijk oog", namelijk als licht. Zowel de plant als het menselijk oog zijn weliswaar gevoelig voor ruwweg hetzelfde deel van het spektrum, maar het oog reageert het sterkst op straling met een golflengte in de buurt van 550 nm - 560 nm terwijl bij de fotosyntese straling met golflengten in de buurt van 450 nm en vooral 650 nm relatief een hogere invloed hebben dan straling bij andere golflengten. Het feit dat bij de studie van de fotosyntese, dikwijls de verlichtingssterkte gemeten wordt, vindt zijn oorzaak in het feit, dat de "lux-meter" sinds lang gemeengoed is. Dit is echter geen voldoende rechtvaardiging om een grootheid (verlichtingssterkte) te gebruiken die bij het onderzoek van de fotosyntese minder aangewezen is.

Een tweede grootheid die bij fotosyntese veel gemeten wordt, is de bestralingssterkte E_e (hoeveelheid stralingsenergie, gedeeld door oppervlakte en tijd; SI-eenheid : W/m^2), waarbij het golflengtegebied wordt begrensd tot het gebied tussen 400 nm en 700 nm. Deze grootheid is reeds beter aangepast aan het beschouwde proces.

Een derde grootheid is hoeveelheid stof (van fotonen), gedeeld door oppervlakte en tijd (SI-eenheid : $mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$). Een foton is de elementaire hoeveelheid stralingsenergie (kwantum) waarvan de waarde gelijk is aan het produkt van de konstante van Planck h en de frekwentie ν van de betrokken elektromagnetische straling. De betrokken grootheid die meestal "Photosynthetically active radiation" (PAR) wordt genoemd en ook soms (meer nauwkeurig) "Photosynthetic photon flux density" (PPFD), wordt gegeven door :

$$\int_{\lambda = 400\ nm}^{\lambda = 700\ nm} \frac{E_{e\lambda} \cdot d\lambda}{N_A \cdot h \cdot \nu} = \int_{\lambda = 400\ nm}^{\lambda = 700\ nm} \frac{\lambda \cdot E_{e\lambda} \cdot d\lambda}{N_A \cdot h \cdot c} \qquad \left(\text{SI-eenheid : } \frac{mol}{m^2 \cdot s}\right)$$

met $E_{e\lambda}$ = spektrale dichtheid van de bestralingssterkte

N_A = konstante van Avogadro = 602,2045 . 10^{21} mol^{-1}

h = konstante van Planck = 0,662 617 6 . 10^{-33} $\frac{J}{Hz}$

c = lichtsnelheid in vacuüm = 2,997 924 58 . 10^8 m/s $\approx$ 3 . 10^8 m/s

ν = frekwentie

λ = golflengte in vacuüm

Deze derde grootheid (PAR, PPFD) is bij de studie van de fotosyntese de meest aangewezen grootheid, daar het bij de fotosyntese gaat om een kwantumproces.

Vermits de energie van één foton (kwantum) gelijk is aan $h \cdot \nu$, wordt de energie per hoeveelheid stof (van fotonen) gegeven door het produkt $N_A \cdot h \cdot \nu$. De energie van één mol fotonen is dus afhankelijk van de frekwentie ν van de betrokken straling, en dus ook van de golflengte λ vermits $\lambda = \frac{c}{\nu}$. Hoe kleiner de golflengte λ, des te groter is het produkt $N_A \cdot h \cdot \nu$.

Voorbeeld :

Met ν = 7,5 . 10^{14} Hz (overeenstemmend met λ = 400 nm = 4 . 10^{-7} m)

en ν = 4,286 . 10^{14} Hz (overeenstemmend met λ = 700 nm = 7 . 10^{-7} m)

bekomt men respektievelijk :

$$N_A \cdot h \cdot \nu = 602{,}2045 \cdot 10^{21}\ mol^{-1} \cdot 0{,}662\ 617\ 6 \cdot 10^{-33}\ \frac{J}{Hz} \times 7{,}5 \cdot 10^{14}\ Hz$$

$$= 299\ 273\ \frac{J}{mol} \approx 299\ \frac{kJ}{mol}$$

$$N_A \cdot h \cdot \nu = 602{,}2045 \cdot 10^{21}\ mol^{-1} \times 0{,}662\ 617\ 6 \cdot 10^{-33}\ \frac{J}{Hz} \times 4{,}286 \cdot 10^{14}\ Hz$$

$$= 171\ 025\ \frac{J}{mol} \approx 171\ \frac{kJ}{mol}$$

Hieruit volgt dat bij een energiemeting (meting van de bestralingssterkte E_e) de kortere golflengten (blauw licht) te hoog gewaardeerd worden ten opzichte van de langere golflengten (rood licht).

In de plantenfysiologie werd één mol fotonen einstein (symbool E) genoemd. Derhalve geldt :

1 einstein $\neq$ 1 mol

1 einstein = 1 mol fotonen

De benaming einstein (E) voor één mol fotonen, is niet erkend in het SI. In het SI kent men enkel de eenheid mol waarbij dan verder dient gespecificeerd te worden om welke deeltjes het gaat in het betrokken geval (atomen, molekulen, ionen, elektronen, fotonen, ...). Het aantal fotonen begrepen in 1 E en 1 µE wordt berekend als volgt :

1 E = 1 mol fotonen $\hat{=}$ 1 mol x N_A fotonen

$\hat{=}$ 1 mol x $602{,}2045 \cdot 10^{21}\ mol^{-1}$ fotonen

$\hat{=}$ $602{,}2045 \cdot 10^{21}$ fotonen

1 µE = 1 µmol fotonen $\hat{=}$ 10^{-6} mol x N_A fotonen

$\hat{=}$ 10^{-6} mol x $602{,}2045 \cdot 10^{21}\ mol^{-1}$ fotonen

$\hat{=}$ $602{,}2045 \cdot 10^{15}$ fotonen

Het verband tussen de verouderde en de nieuwe eenheden waarin de PAR (of de PPFD) wordt uitgedrukt, wordt gegeven door :

$$1\ \frac{E}{m^2 \cdot s} \hat{=} 1\ \frac{mol}{m^2 \cdot s}$$

$$1\ \frac{\mu E}{m^2 \cdot s} \hat{=} 1\ \frac{\mu mol}{m^2 \cdot s}$$

HOOFDSTUK VIII

EENHEDEN VAN VLAKKE HOEK EN VAN RUIMTEHOEK

1. Inleiding

Naast 7 grondeenheden (m, kg, s, A, K, mol, cd), kent het SI 2 aanvullende (of supplementaire) eenheden. Het betreft de eenheid radiaal (rad) als eenheid van vlakke hoek en de eenheid steradiaal (sr) als eenheid van ruimtehoek. Daarnaast bestaan er ook nog een aantal hoekeenheden, die niet tot het SI behoren.

2. Eenheden van vlakke hoek

2.1. SI-eenheid van vlakke hoek : de radiaal (rad)

De vlakke hoek (α), waarvan men het hoekpunt laat samenvallen met het middelpunt van een willekeurige cirkel die in hetzelfde vlak ligt, is evenredig met de verhouding van de lengte b van de boog die door de betrokken hoek op de cirkelomtrek wordt uitgesneden, tot de straal r van de betrokken cirkel :

$$\alpha \sim \frac{b}{r}$$

Het is dus logisch, dat de grootheid vlakke hoek (symbool α) wordt gedefinieerd als :

$$\alpha = \frac{b}{r}$$

De definitie van de eenheid radiaal (rad) luidt dan als volgt : de radiaal is de vlakke hoek tussen twee stralen van een cirkel, die op de omtrek een boog afsnijden waarvan de lengte gelijk is aan de lengte van de straal.

Een andere hiermee overeenstemmende definitie luidt : de radiaal is de vlakke hoek, die gevormd wordt door twee stralen vertrekkende uit het middelpunt van een cirkel met als straal r = 1 m, die op de betrokken cirkelomtrek een boog afsnijden waarvan de lengte gelijk is aan 1 m.

Uit deze definities volgt dat de radiaal eigenlijk een koherente afgeleide eenheid is :

$$[\alpha] = \text{rad} = \frac{\text{m}}{\text{m}} = 1$$

De benaming radiaal voor deze dimensieloze eenheid werd ingevoerd om aan te geven dat men met de grootheid vlakke hoek te maken heeft. Omwille van zijn speciale aard, wordt de radiaal niet beschouwd als een gewone afgeleide eenheid, doch werd, samen met de eenheid van ruimtehoek, in het SI gerangschikt onder de benaming "aanvullende eenheden" (supplementaire eenheden, bijkomende eenheden).

De radiaal wordt ook "eenheid van boogmaat" genoemd, omdat een vlakke hoek gelijk aan 1 radiaal, van een cirkelomtrek met willekeurige straal een boog afsnijdt waarvan de lengte gelijk is aan de straal.

De betrekking rad = 1 maakt het mogelijk, bij het uitwerken van grootheden vergelijkingen (waarbij de voorkomende grootheden vervangen worden door hun getalwaarde maal eenheid), de eenheid radiaal ofwel weg te laten ofwel bij te voegen. In veel gevallen is dit nodig zoals in onderhavig hoofdstuk onder 5. zal aangetoond worden.

2.2. Niet-koherente eenheden van vlakke hoek

2.2.1. Volle hoek

De vlakke hoek die overeenstemt met de volledige cirkelomtrek wordt volle hoek genoemd en is gelijk aan 2 π rad, vermits geldt :

$$\frac{\text{cirkelomtrek}}{\text{straal}} = \frac{2\,\pi\,.\,r}{r} = 2\,\pi = 6{,}283\,185\,308$$

Een symbool voor volle hoek is internationaal nog niet vastgelegd; in de engelstalige landen werd voorgesteld hiervoor r of rev te gebruiken (van het Engelse "revolution" of het Latijnse "revolutio") en in de franstalige landen werd tr voorgesteld (van het Franse "tour"). In de Duitse norm DIN 1315 van maart 1974 beveelt men het symbool pla aan (van het Latijnse "plenus angelus" = volle hoek). In de uitgave van augustus 1982 van dezelfde norm komt deze aanbeveling niet meer voor.

Bij het gebruik van deze internationaal nog niet erkende symbolen geldt dus :

$$1 \text{ rev} = 1 \text{ pla} = 2\,\pi \text{ rad}$$
$$\triangleq 360°$$
$$\triangleq 400 \text{ gon}$$
$$1 \text{ rad} = 0{,}159\,154\,943\,1 \text{ pla} = 0{,}159\,154\,943\,1 \text{ rev}$$
$$1° \triangleq \frac{1}{360} \text{ pla} = \frac{1}{360} \text{ rev} = \frac{\pi}{180} \text{ rad}$$
$$1 \text{ gon} \triangleq \frac{1}{400} \text{ pla} = \frac{1}{400} \text{ rev} = \frac{\pi}{200} \text{ rad}$$

2.2.2. De graad, de minuut en de sekonde

Veel gebruikte, niet-koherente eenheden van vlakke hoek zijn : de graad (°), de minuut (') en de sekonde (").

De vlakke hoek die overeenstemt met een volledige cirkelomtrek, is per definitie gelijk aan 360°, en verder geldt dat 1° = 60' en 1 ' = 60", zodat 1° = 3600".

Bij graad, minuut en sekonde worden geen voorvoegsels gebruikt waarmede decimale veelvouden of delen zouden kunnen aangegeven worden.

Hierna volgen enkele omrekeningen tussen graden, minuten en sekonden enerzijds en radialen anderzijds.

$360° \triangleq 2\,\pi \text{ rad}$

$$1° \triangleq \frac{2\,\pi}{360} \text{ rad} = \frac{\pi}{180} \text{ rad} = 0{,}017\,453\,292\,52 \text{ rad}$$
$$= 17{,}453\,292\,52 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$$

$$1' \triangleq \frac{2\,\pi}{360 \times 60} \text{ rad} = \frac{\pi}{10\,800} \text{ rad} = 0{,}000\,290\,888\,208\,7 \text{ rad}$$
$$= 290{,}888\,208\,7 \cdot 10^{-6} \text{ rad}$$

$$1'' \triangleq \frac{2\,\pi}{360 \times 3600} \text{ rad} = \frac{\pi}{648\,000} \text{ rad} = 0{,}000\,004\,848\,136\,812 \text{ rad}$$
$$= 4{,}848\,136\,812 \cdot 10^{-6} \text{ rad}$$

$$45° \triangleq \frac{\pi}{4} \text{ rad} = 0{,}785\,398\,163\,5 \text{ rad}$$

$$90° \triangleq \frac{\pi}{2} \text{ rad} = 1{,}570\,796\,327 \text{ rad}$$

$$135° \triangleq \frac{3\,\pi}{4} \text{ rad} = 2{,}356\,194\,491 \text{ rad}$$

$180° \triangleq \pi \text{ rad} = 3{,}141\ 592\ 654 \text{ rad}$

$225° \triangleq \frac{5\pi}{4} \text{ rad} = 3{,}926\ 990\ 818 \text{ rad}$

$270° \triangleq \frac{3\pi}{2} \text{ rad} = 4{,}712\ 388\ 981 \text{ rad}$

$315° \triangleq \frac{7\pi}{4} \text{ rad} = 5{,}497\ 787\ 145 \text{ rad}$

$360° \triangleq 2\pi \text{ rad} = 6{,}283\ 185\ 308 \text{ rad}$

$1 \text{ rad} \triangleq 57{,}295\ 779\ 51°$

$\triangleq 57° 17' 44{,}81" \approx 57° 17' 45"$

$\triangleq 3437{,}746\ 771'$

$\triangleq 206\ 264{,}81"$

Het niet-decimale verband tussen graden, minuten en sekonden onderling bemoeilijkt in belangrijke mate de berekeningen, zoals blijkt uit volgende voorbeelden.

$$\begin{aligned}
27° 36' 43" + 16° 29' 48" &= 27° + 16° + 36' + 29' + 43" + 48" \\
&= 43° + 65' + 91" \\
&= 43° + 1° + 5' + 1' + 31" \\
&= 44° + 6' + 31" \\
&= 44° 6' 31" \\
&= \left(44 + \frac{6}{60} + \frac{31}{3600}\right)° \\
&= 44{,}108\ 611\ 11° \\
&\triangleq \frac{44{,}108\ 611\ 11}{57{,}295\ 779\ 51} \text{ rad} \\
&\triangleq 0{,}769\ 840\ 492\ 4 \text{ rad}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
1{,}365\ 742\ 968 \text{ rad} &\triangleq (1{,}365\ 742\ 968 \times 57{,}295\ 779\ 51)° \\
&\triangleq 78{,}251\ 307\ 96° \\
&\triangleq 78° + (60 \times 0{,}251\ 307\ 96)' \\
&\triangleq 78° + 15{,}078\ 477\ 6' \\
&\triangleq 78° + 15' + (60 \times 0{,}078\ 477\ 6)" \\
&\triangleq 78° + 15' + 4{,}708\ 656" \\
&\triangleq 78° 15' 4{,}71" \approx 78° 15' 5"
\end{aligned}$$

Bij het weergeven van een hoek kan men ook uitsluitend gebruik maken hetzij van de graad alleen, hetzij van de minuut alleen, hetzij van de

sekonde alleen, zonder gebruik te maken van de andere eenheden. De hoek wordt dan decimaal uitgedrukt, hetgeen de berekeningen (optellen, aftrekken, vermenigvuldigen en delen), in grote mate vergemakkelijkt.

Voorbeeld : $41°17'32,24" = 41° + \left(\frac{17}{60}\right)° + \left(\frac{32,24}{3600}\right)°$

$= 41° + 0,283\ 333\ 333\ 3° + 0,008\ 955\ 555\ 6°$

$= 41,292\ 288\ 888\ 9°$

De omgekeerde omzetting gebeurt als volgt :

$41,292\ 288\ 888\ 9° = 41° + (0,292\ 288\ 888\ 9 \times 60)'$

$= 41° + 17,537\ 333\ 33'$

$= 41° + 17' + (0,537\ 333\ 33 \times 60)"$

$= 41° + 17' + 32,24"$

$= 41°17'32,24"$

2.2.3. De decimale graad of gon, de decimale minuut en de decimale sekonde

De definitie van de eenheid decimale graad of gon luidt als volgt : de decimale graad of gon (symbool : ^{g} of gon) is de vlakke hoek tussen twee stralen van een cirkel die op de omtrek een boog afsnijden waarvan de lengte gelijk is aan één vierhonderdste van de omtrek. De volledige cirkelomtrek stemt dus overeen met een hoek van 400 gon, en een rechte hoek met 100 gon.

Het symbool ^{g} voor de eenheid decimale graad is vervallen op 31 december 1985.

In tegenstelling met hetgeen geldt voor graad, minuut en sekonde, kunnen bij de gon wel decimale voorvoegsels worden aangewend voor het aangeven van decimale veelvouden of delen; de meest gebruikelijke zijn :

1 decigon = 1 dgon = 0,1 gon $\triangleq \frac{\pi}{2000}$ rad

1 centigon = 1 cgon = 0,01 gon $\triangleq \frac{\pi}{20\ 000}$ rad

1 milligon = 1 mgon = 0,001 gon $\triangleq \frac{\pi}{200\ 000}$ rad

De decimale (hoek)minuut (symbool ^{c}) is gelijk aan $\frac{1}{100}$ gon :

1 decimale minuut = 1^{c} = 0,01 gon = 1 cgon = 10 mgon
(1 centigraad)

In Frankrijk gelden volgende benamingen :

decimale graad = grade (= gon)

1^c = 1 centigrade = $\frac{1}{100}$ grade (= 1 cgon)

$1°$ = 1 degré = $\frac{1}{0,9}$ grade (= $\frac{1}{0,9}$ gon)

De decimale sekonde (symbool ^{cc}) is gelijk aan $\frac{1}{100}$ decimale minuut :

1 decimale sekonde = 1^{cc} = $0,01^c$ = 0,0001 gon = 0,01 cgon = 0,1 mgon

De eenheden gon (decimale graad), decimale minuut en decimale sekonde zijn gebruikelijk in de geodesie (aardmeetkunde). Wellicht ware het konsekwenter geweest, milligon (mgon) te gebruiken in plaats van decimale minuut en decimale sekonde (die overigens niet meer erkend zijn).

In Duitsland was de benaming voor decimale graad, decimale minuut en decimale sekonde respektievelijk "Neugrad", "Neuminute" en "Neusekonde", met als symbool respektievelijk ^{g}, ^{c} en ^{cc} : 1^g = 100^c = $10\,000^{cc}$.

De berekeningen met gon, decimale minuut en decimale sekonde zijn gemakkelijker dan de berekeningen met graad, minuut en sekonde, daar er een decimaal verband bestaat tussen gon, decimale minuut en decimale sekonde :

23,489 436 gon + 45,732 457 gon = 69,221 893 gon

= 69 gon + 0,22 gon + 0,001 893 gon

= 69 gon + 22^c + $18,93^{cc}$

Tussen de eenheden decimale graad of gon (gon), decimale minuut (^{c}) en decimale sekonde (^{cc}) enerzijds en de eenheden radiaal (rad), graad (°), minuut (') en sekonde (") anderzijds bestaat volgend verband :

1 gon $\triangleq$ $\frac{2\,\pi}{400}$ rad = $\frac{\pi}{200}$ rad = 0,015 707 963 27 rad

= $15,707\,963\,27 \cdot 10^{-3}$ rad

1^c $\triangleq$ $\frac{2\,\pi}{40\,000}$ rad = $\frac{\pi}{20\,000}$ rad = 0,000 157 079 632 7 rad

= $0,157\,079\,632\,7 \cdot 10^{-3}$ rad

1^{cc} $\triangleq$ $\frac{2\,\pi}{4\,000\,000}$ rad = $\frac{\pi}{2\,000\,000}$ rad = 0,000 001 570 796 327 rad

= $1,570\,796\,327 \cdot 10^{-6}$ rad

1 rad $\triangleq$ $\frac{400}{2\,\pi}$ gon = 63,661 977 23 gon

= 636,619 772 3 dgon

$= 6366,197\ 723^{c} = 6366,197\ 723$ cgon

$= 63\ 661,977\ 23$ mgon

$= 636\ 619,7723^{cc}$

$1\ \text{gon} = \left(\frac{360}{400}\right)^{\circ} = \left(\frac{90}{100}\right)^{\circ} = 0,9^{\circ} = 54' = 3240''$

$1^{c} = \left(\frac{54}{100}\right)' = 0,54' = 32,4'' = 0,01\ \text{gon} = 1\ \text{cgon} = 10\ \text{mgon}$

$1^{cc} = \left(\frac{32,4}{100}\right)'' = 0,324'' = 0,0001\ \text{gon} = 0,01\ \text{cgon} = 0,1\ \text{mgon}$

$1^{\circ} = \frac{1}{0,9}\ \text{gon} = 1,111\ 111\ 111\ \text{gon}$

$1' = \left(\frac{1}{0,54}\right)^{c} = 1,851\ 851\ 852^{c} = 18,518\ 518\ 52\ \text{mgon}$

$1'' = \left(\frac{1}{0,324}\right)^{cc} = 3,086\ 419\ 753^{cc} = 0,308\ 641\ 975\ 3\ \text{mgon}$

3. Eenheden van ruimtehoek

3.1. SI-eenheid van ruimtehoek : de steradiaal (sr)

De ruimtehoek (Ω), waarvan men het hoekpunt laat samenvallen met het middelpunt van een willekeurige bol, is evenredig met de oppervlakte A die door de betrokken hoek op het boloppervlak wordt uitgesneden, tot het kwadraat van de straal van de bol :

$$\Omega \sim \frac{A}{r^2}$$

Het is dus logisch dat de grootheid ruimtehoek (symbool Ω) wordt gedefinieerd als :

$$\Omega = \frac{A}{r^2}$$

De definitie van de steradiaal (sr) luidt dan als volgt : de steradiaal is de ruimtehoek binnen een kegeloppervlak, die op een bol waarvan het middelpunt samenvalt met de top van de kegel, een oppervlakte uitsnijdt die gelijk is aan die van een vierkant waarvan de zijde even lang is als de straal van de bol.

Een andere hiermede overeenstemmende definitie luidt : de steradiaal is de ruimtehoek, die begrensd is tussen al de stralen die de omtrek van

een willekeurige oppervlakte van 1 m^2 op het oppervlak van een bol met een straal r = 1 m, verbinden met het middelpunt van de betrokken bol.

Uit deze definities volgt dat de steradiaal eigenlijk een koherente afgeleide eenheid is :

$$[\Omega] = \text{sr} = \frac{m^2}{m^2} = 1$$

De ruimtehoek die overeenstemt met het ganse boloppervlak is gelijk aan 4 π sr, vermits geldt (met r = straal van een bol) :

$$\frac{\text{boloppervlak}}{r^2} = \frac{4\ \pi\ .\ r^2}{r^2} = 4\ \pi = 12{,}566...$$

De benaming steradiaal voor deze dimensieloze eenheid werd ingevoerd om aan te geven dat men met de grootheid ruimtehoek te maken heeft. Omwille van zijn speciale aard, wordt de steradiaal niet beschouwd als een gewone afgeleide eenheid, doch werd, samen met de eenheid van vlakke hoek, in het SI gerangschikt onder de benaming "aanvullende eenheden" (supplementaire eenheden, bijkomende eenheden).

3.2. Niet-koherente eenheden van ruimtehoek

3.2.1. De kwadraatgraad □°

Deze verouderde eenheid van ruimtehoek die in sommige landen werd toegepast, werd gedefinieerd als volgt :

$$1\ \square^\circ \triangleq \left(\frac{\pi}{180}\right)^2 \text{ sr} = 0{,}000\ 304\ 617\ 419\ 8 \text{ sr}$$

$$= 304{,}617\ 419\ 8\ .\ 10^{-6} \text{ sr}$$

Hieruit volgt :

$$1 \text{ sr} \triangleq 3282{,}806\ 350\ \square^\circ$$

De kwadraatgraad is gelijk aan het kwadraat van de eenheid graad, die overeenstemt met $\frac{\pi}{180}$ rad, en waarbij rad (= 1) vervangen wordt door sr (= 1).

3.2.2. De kwadraatgon $\square^g$

Deze eveneens verouderde eenheid van ruimtehoek die in sommige landen werd toegepast, werd gedefinieerd als volgt :

$$1\ \square^g \triangleq \left(\frac{\pi}{200}\right)^2 \text{ sr} = 0{,}000\ 246\ 740\ 110\ 1 \text{ sr}$$
$$= 246{,}740\ 110\ 1 \cdot 10^{-6} \text{ sr}$$

Hieruit volgt :

$$1 \text{ sr} \triangleq 4052{,}847\ 344\ \square^g$$

De kwadraatgon is gelijk aan het kwadraat van de eenheid gon, die overeenstemt met $\frac{\pi}{200}$ rad, en waarbij rad (= 1) vervangen wordt door sr (= 1).

Tussen kwadraatgraad en kwadraatgon bestaat volgend verband :

$$1\ \square^g = 1{,}234\ 567\ 901\ \square^\circ$$
$$= (1{,}111\ 111\ 111)^2\ \square^\circ$$
$$1\ \square^\circ = 0{,}81\ \square^g$$
$$= (0{,}9)^2\ \square^g$$

4. De grootheden toerental of rotatiefrekwentie n, hoeksnelheid ω, frekwentie f en pulsatie of hoekfrekwentie of cirkelfrekwentie ω, en hun respektieve SI-eenheden

4.1. De cirkelbeweging.

De cirkelbeweging is de beweging van een punt of een lichaam langs een cirkelomtrek. Is de snelheid konstant, dan spreekt men van een eenparige cirkelbeweging. Onder omlooptijd of periode T verstaat men de tijd (SI-eenheid : s) waarin één volledige cirkel beschreven wordt. Onder hoeksnelheid ω verstaat men de beschreven hoek gedeeld door de tijd:

$$\omega = \frac{\text{afgelegde hoek}}{\text{tijd}} \qquad \left(\text{SI-eenheid} : \frac{\text{rad}}{\text{s}}\right)$$

Gedurende de tijd T wordt een hoek afgelegd van $2\ \pi$ rad; men bekomt dus :

$$\omega = \frac{2\ \pi\ \text{rad}}{T}$$

Men kan het toerental of rotatiefrekwentie (symbool n) definiëren als volgt : het toerental (rotatiefrekwentie) is gelijk aan de afgelegde weg, gedeeld door de cirkelomtrek en de tijd, of ook nog : het toerental is gelijk aan de afgelegde hoek, gedeeld door de volle hoek en de tijd :

$$n = \frac{\text{afgelegde weg}}{\text{cirkelomtrek} \times \text{tijd}} = \frac{\text{omtreksnelheid}}{\text{cirkelomtrek}} = \frac{\text{omtreksnelheid}}{2\,\pi\,.\,r}$$

$$= \frac{\text{afgelegde hoek}}{\text{volle hoek} \times \text{tijd}} = \frac{\text{hoeksnelheid}}{\text{volle hoek}} = \frac{\text{hoeksnelheid}}{2\,\pi\ \text{rad}} = \frac{\omega}{2\,\pi\ \text{rad}}$$

Gedurende de tijd $t = T = 1$ s, is de afgelegde weg gelijk aan de cirkelomtrek, en dus geldt ook :

$$n = \frac{\text{cirkelomtrek}}{\text{cirkelomtrek} \times T} = \frac{1}{T}$$

Volgens de gegeven definitie geeft het toerental n weer, het aantal keren dat een volledige cirkel wordt beschreven, gedeeld door de tijd. De SI-eenheid van toerental (volgens de gegeven definitie) is dus gelijk aan s^{-1}. Velen zijn er voorstander van, hier ook de speciale benaming hertz (Hz) te aanvaarden voor s^{-1} als SI-eenheid van toerental, vermits het toerental zoals hierboven gedefinieerd, kan beschouwd worden als "omloopfrekwentie" of "rotatiefrekwentie", en in feite toch weergeeft hoeveel maal een periodiek verschijnsel (de beschrijving van een volledige cirkelomtrek) zich herhaalt, gedeeld door de tijd.

In verband met de cirkelbeweging gelden dus volgende uitdrukkingen :

$$\omega = \frac{2\,\pi\ \text{rad}}{T} = n\ .\ 2\,\pi\ \text{rad} \qquad\qquad n = \frac{1}{T}$$

en ook (met rad = 1) : $\omega = \frac{2\,\pi}{T} = 2\,\pi\ .\ n$

De SI-eenheid van toerental (rotatiefrekwentie) is s^{-1} (of Hz) en niet $\frac{\text{omwenteling}}{s}$ ($\frac{\text{omw}}{s}$, $\frac{\text{rev}}{s}$) of $\frac{\text{toer}}{s}$ ($\frac{\text{tr}}{s}$).

De eenheden $\frac{\text{omw}}{s}$ of $\frac{\text{rev}}{s}$ of $\frac{\text{tr}}{s}$ (of de meer gebruikelijke $\frac{\text{omw}}{\text{min}}$ of $\frac{\text{rev}}{\text{min}}$ of $\frac{\text{tr}}{\text{min}}$) dienen vermeden te worden, omdat men ze zou kunnen aanzien enerzijds als eenheid van toerental n en anderzijds als eenheid van hoeksnelheid ω.

Wanneer men omwenteling of toer aanwendt bij het weergeven van het toerental of de rotatiefrekwentie n, is omwenteling of toer gelijk aan 1; voorbeeld :

$$n = 50\ \frac{\text{omw}}{\text{s}} = 50\ \frac{\text{tr}}{\text{s}} = 50\ \frac{1}{\text{s}} = 50\ \text{s}^{-1}\ (= 50\ \text{Hz})$$

Wanneer men omwenteling of toer aanwendt bij het weergeven van de hoeksnelheid ω, is omwenteling of toer gelijk aan 2 π rad; voorbeeld :

$$\omega = 50\ \frac{\text{omw}}{\text{s}} = 50\ \frac{2\ \pi\ \text{rad}}{\text{s}} = 100\ \pi\ \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 314{,}159\ \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

De eenheden $\frac{\text{omw}}{\text{s}}$ of $\frac{\text{rev}}{\text{s}}$ of $\frac{\text{tr}}{\text{s}}$ en $\frac{\text{omw}}{\text{min}}$ of $\frac{\text{rev}}{\text{min}}$ of $\frac{\text{tr}}{\text{min}}$ (waarvan het gebruik in de toekomst af te raden is), werden vroeger meestal beschouwd als eenheden van hoeksnelheid, met :

$$1\ \frac{\text{omw}}{\text{s}}\ \left(\text{of } 1\ \frac{\text{rev}}{\text{s}}\ \text{of } 1\ \frac{\text{tr}}{\text{s}}\right) = \frac{2\ \pi\ \text{rad}}{\text{s}} = 6{,}283\ 185\ 308\ \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$1\ \frac{\text{omw}}{\text{min}}\ \left(\text{of } 1\ \frac{\text{rev}}{\text{s}}\ \text{of } 1\ \frac{\text{tr}}{\text{min}}\right) = \frac{2\ \pi\ \text{rad}}{60\ \text{s}} = 0{,}104\ 719\ 755\ 1\ \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

In deze gedachtengang was omwenteling een hoekeenheid, waarvan de grootte gelijk is aan een volle hoek hetzij 2 π rad.

Anderzijds was er verwarring mogelijk tussen het toerental n en de hoeksnelheid ω gemeten in $\frac{\text{omw}}{\text{s}}$ of $\frac{\text{rev}}{\text{s}}$ of $\frac{\text{tr}}{\text{s}}$ en $\frac{\text{omw}}{\text{min}}$ of $\frac{\text{rev}}{\text{min}}$ of $\frac{\text{tr}}{\text{min}}$, vermits de getalwaarden gelijk zijn :

$$\{n\}_{1/\text{s}} = \{\omega\}_{\text{omw/s}}$$

$$\{n\}_{1/\text{min}} = \{\omega\}_{\text{omw/min}}$$

Dat omwenteling inderdaad in twee betekenissen werd opgevat, moge ook blijken uit volgende tegenstrijdige definities.

In de uitgave van augustus 1938 van de Duitse norm DIN 1315 stond het volgende (met U = Umdrehung = omwenteling) : U kann als Abkürzung für den Vollwinkel 2 π rad aufgefaszt werden".

In het boek "Einheiten und Gröszenarten der Naturwissenschaften" (1976) van Dr. phil. Erna Padelt und Dr. rer. nat. Hansgeorg Laporte,

staat op blz. 253 opgegeven als verouderde eenheid van "Drehzahl und Umlauffrequenz" :

1 U/s = 1 rev/s = 6,283 185 rad/s ≙ 1 Hz

en op blz. 123 treft men verder aan :

Drehzahl : Formelzeichen n, technische Kenngröße, Quotient aus Anzahl N der Umdrehungen eines umlaufenden Körpers und der Zeit t. SI-Einheit ist Umdrehung je Sekunde (U/s = 2 π rad/s).

Opmerking : in beide gevallen wordt U ten onrechte gelijkgesteld aan 2 π rad; vermits het hier niet gaat om de hoeksnelheid ω, doch wel om het toerental of de rotatiefrekwentie n, is in beide gevallen U gelijk aan 1 :

$$1\ \text{U/s} = \frac{1}{\text{s}} = 1\ \text{s}^{-1}\ (= 1\ \text{Hz})$$

In de franstalige uitgave van de "Internationale norm ISO 1000" van 1981, getiteld : "Unités SI et recommandations pour l'emploi de leurs multiples et de certaines autres unités", staat vermeld dat de SI-eenheid van rotatiefrekwentie ("fréquence de rotation") gelijk is aan s^{-1}; in de kolom getiteld "Remarques et renseignements concernant les unités utilisées dans les domaines spéciaux" staat : "Les appellations "tours par minute" (r/min ou tr/min) et "tours par seconde" (r/s ou tr/s) sont largement utilisées pour la fréquence de rotation dans les spécifications des machines tournantes".

In de 2de uitgave (dec. 1974) van de Belgische norm NBN X02-001 stond ook toer vermeld als eenheid van vlakke hoek; als opmerking bij toer werd gegeven : 1 tr = 2 π rad. In een voetnota stond verder : ISO 1000 geeft voor de omwenteling per minuut en per sekonde de symbolen r/min en r/s. In de 3de uitgave (jan. 1986) komt de eenheid toer niet meer voor.

In het "Einheitenlexikon" von Dr. Alfred Sacklowski unter Mitarbeit von Prof. Emanuel Röhrl (uitgave 1972), staat op blz. 230 - 231 bij het trefwoord "Umdrehung" het volgende :

Umdrehung : ein Hinweiswort mit der Abk. U, die zur Kennzeichnung von Umdrehungen verwendet wird. Es steht für die Einheit "Eins"; es ist also U = 1, jedoch nicht in jedem Falle umgekehrt. SI-Einheit ist reziproke Sekunde. Man sagt also : Eine Welle hat die Drehzahl (Umdrehungsfrequenz):

$$n = 50\ \frac{\text{U}}{\text{s}} = \frac{50}{\text{s}} = 50\ \text{s}^{-1}$$

Hetzelfde treffen we aan in "Einheiten, Grösszen, Gleichungen und ihre praktische Anwendung" (1976) von Dipl.-Ing. Hans Förster, waarin op blz. 120 vermeld staat :

Die Umlauffrequenz n wird in der Technik als Drehzahl bezeichnet. Bij Angabe von Umlauffrequenzen darf die Einheit Hertz (Hz)

$$1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$$

auch als Umdrehung/Sekunde (U/s) bezeichnet werden. Ferner dürfen mit den inkohärenten Zeiteinheiten Minute und Stunde auch die Einheiten U/min und U/h gebildet werden. Es ist aber dem Anwender frei gestellt, das Zeichen U für Umdrehung wegen

$$1 \text{ Umdrehung} = 1 \text{ U} = 1$$

wegzulassen, wo das erforderlich sein sollte, und für die Umlauffrequenzen die Einheiten

$$1/\text{s} \; ; \; 1/\text{min} \; ; \; 1/\text{h}$$

zu benutzen.

Bovenstaande uiteenzetting leidt tot volgende konklusie : hoewel het *woord* omwenteling of toer bestaansreden heeft, dient het niet als *eenheid* voor te komen in de eenheid van toerental (of rotatiefrekwentie) n of in de eenheid van hoeksnelheid ω, vermits het daar een overbodige en verwarringstichtende eenheid is, waarvan in de literatuur tegenstrijdige definities worden aangetroffen.

Om de snelheid van een cirkelbeweging weer te geven, volstaan immers de volgende grootheden en SI-eenheden :

- toerental (of rotatiefrekwentie) n, SI-eenheid : s^{-1}; er bestaat een strekking, om hier aan de eenheid s^{-1} ook de speciale benaming hertz (symbool Hz) toe te kennen;
- de hoeksnelheid ω, met $\omega = n \cdot 2\,\pi \text{ rad} = \frac{2\,\pi \text{ rad}}{T}$, SI-eenheid : $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$;
- de omtreksnelheid v, SI-eenheid : $\frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Wanneer bijvoorbeeld een as gedurende 1 sekonde 50 omwentelingen (toeren) maakt, worden met toerental (of rotatiefrekwentie) n en de hoeksnelheid ω als volgt weergegeven :,

$$n = 50 \text{ s}^{-1} \; (= 50 \text{ Hz}) = 3000 \text{ min}^{-1}$$

$$\omega = 50 \times 2\,\pi \text{ rad/s} = 314{,}159 \text{ rad/s}$$

4.2. De harmonische beweging (trillende beweging, slingerbeweging)

Een harmonische beweging langs een rechte lijn kan men gelijkstellen met de beweging van de projektie van een punt P dat met een konstante snelheid over de omtrek van een cirkel beweegt (eenparige cirkelbeweging), op een middellijn van die cirkel. Voor de wiskundige weergave van de betrokken beweging (zie figuur VIII.1.) beschouwen we enerzijds de projektie P' van het betrokken punt P op de vertikale middellijn (beschouwd als y-as) en anderzijds de projektie P" van hetzelfde punt P op de horizontale middellijn (beschouwd als x-as). Het nulpunt van beide assen valt samen met het middelpunt van de cirkel die door het punt P beschreven wordt.

Op het ogenblik $t = t_0 = 0$, bevindt het punt P zich in P_0, zodat de voerstraal naar het punt P een hoek φ met de positieve x-as maakt. Op het ogenblik $t = t_1$, is de voerstraal naar het punt P, dat zich thans in P_1 bevindt, over een hoek $\omega.t_1$ gedraaid. De hoek met de x-as is dan gelijk aan $\omega.t_1 + \varphi$.

De plaats van de projektie P' op de y-as (uitwijking) wordt gegeven door :

$$y = r \,.\, \sin(\omega.t + \varphi)$$
$$= A \,.\, \sin(\omega.t + \varphi)$$

met $A = r$ = amplitude = grootste uitwijking

De snelheid van het punt P' wordt gegeven door :

$$v' = \frac{dy}{dt} = A \,.\, \omega \,.\, \cos(\omega.t + \varphi)$$

De versnelling van het punt P' wordt gegeven door :

$$a' = \frac{dv'}{dt} = \frac{d^2y}{dt^2} = -A \,.\, \omega^2 \,.\, \sin(\omega.t + \varphi)$$
$$= -y \,.\, \omega^2$$

De plaats van de projektie P" op de x-as (uitwijking) wordt gegeven door :

$$x = r \,.\, \cos(\omega.t + \varphi)$$
$$= A \,.\, \cos(\omega.t + \varphi)$$

met $A = r$ = amplitude = grootste uitwijking

De snelheid van het punt P" op de x-as wordt gegeven door :

$$v'' = \frac{dx}{dt} = -A \,.\, \omega \,.\, \sin(\omega.t + \varphi)$$

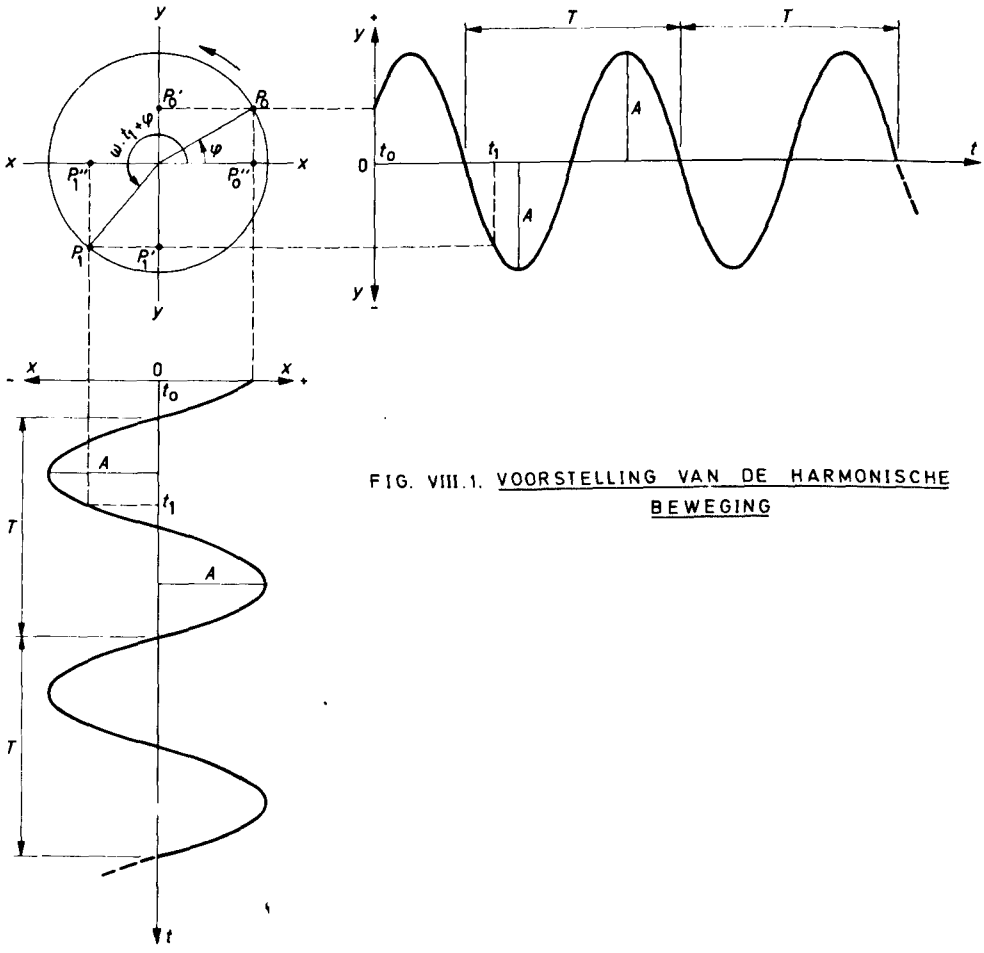


FIG. VIII.1. VOORSTELLING VAN DE HARMONISCHE BEWEGING

De versnelling van het punt P" wordt gegeven door :

$$a'' = \frac{dv''}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = - A \,.\, \omega^2 \,.\, \cos(\omega.t + \varphi)$$
$$= - x \,.\, \omega^2$$

De punten P' en P" voeren een trillende beweging. De duur van één volledige heen- en weergaande beweging van het punt P' of het punt P" (overeenkomend met één omwenteling van het punt P) wordt periode T (SI-eenheid : s) genoemd.

Onder frekwentie f verstaat men de grootheid $\frac{1}{T}$ (SI-eenheid : s^{-1}, met hertz, symbool Hz, als speciale benaming hier voor s^{-1}). De frekwentie f geeft weer, hoeveel maal een periodiek verschijnsel zich herhaalt, gedeeld door de tijd.

Vertrekkend vanaf een willekeurige plaats van het punt P op de cirkelomtrek op een willekeurig ogenblik t, bevindt het punt P zich opnieuw op dezelfde plaats telkens nadat de voerstraal een hoek van 2 π radialen zal beschreven hebben, hetgeen gebeurt in de tijdsduur $\frac{2\pi}{\omega}$:

$$y = A \,.\, \sin(\omega.t + \varphi) = A \,.\, \sin\left[\omega.\left(t + \frac{2\pi}{\omega}\right) + \varphi\right]$$
$$= A \,.\, \sin(\omega.t + 2\pi + \varphi)$$
$$x = A \,.\, \cos(\omega.t + \varphi) = A \,.\, \cos\left[\omega.\left(t + \frac{2\pi}{\omega}\right) + \varphi\right]$$
$$= A \,.\, \cos(\omega.t + 2\pi + \varphi)$$

Derhalve geldt : $\frac{2\pi}{\omega} = T = \frac{1}{f}$

waaruit volgt : $f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$

$$\omega = 2\pi \,.\, f = \frac{2\pi}{T}$$

Een nagenoeg zuivere harmonische trilling wordt uitgevoerd door de benen van een stemvork, en door een slinger die een beweging uitvoert waarvan de amplitude klein is ten opzichte van de lengte van de slinger.

De grootheid ω, die genoemd wordt pulsatie of hoekfrekwentie of cirkelfrekwentie, is dus gelijk aan het 2 π-voudige van de frekwentie f.

De SI-eenheid van pulsatie ω (hoekfrekwentie, cirkelfrekwentie) is s^{-1}; hier mag de speciale benaming hertz (Hz) die wordt gegeven aan de SI-eenheid van frekwentie s^{-1}, niet worden gebruikt, noch de eenheid $\frac{rad}{s}$.

De keuze van ω als symbool voor pulsatie (hoekfrekwentie, cirkelfrekwentie), zijnde eveneens het symbool voor hoeksnelheid, berust op de gegeven voorstelling van een harmonische beweging : de getalwaarde van de pulsatie (hoekfrekwentie, cirkelfrekwentie) van het punt P' of P", uitgedrukt in s^{-1}, is gelijk aan de getalwaarde van de hoeksnelheid van het punt P, uitgedrukt in $\frac{rad}{s}$.

De hoek φ wordt wel uitgedrukt in radialen. Nochtans dient opgemerkt dat in de uitdrukkingen sin $(\omega.t + \varphi)$ en cos $(\omega.t + \varphi)$, bij het weergeven van de grootheid φ, rad dient gelijkgesteld te worden aan 1. Als eenheid voor het produkt $\omega.t$ volgens de hierboven uiteengezette regels bekomt men eveneens 1 als eenheid : $\frac{1}{s} \cdot s = 1$. De operatie sin $(\omega.t + \varphi)$ en cos $(\omega.t + \varphi)$ is slechts zinvol als $\omega.t + \varphi$ een getal is (zie Hoofdstuk II, onder 3.).

Samengevat, geldt voor de harmonische beweging :

- de periode T is de tijdsduur van een volledige heen- en weergaande beweging; de SI-eenheid is s
- de frekwentie f (met $f = \frac{1}{T}$) geeft weer, hoeveel maal een periodiek verschijnsel zich herhaalt gedeeld door de tijd; de SI-eenheid is s^{-1}, met hier als speciale benaming hertz (symbool Hz)
- de pulsatie ω (of hoekfrekwentie of cirkelfrekwentie), met $\omega = 2\pi \cdot f = \frac{2\pi}{T}$. wordt uitgedrukt in s^{-1} (en niet in Hz of $\frac{rad}{s}$).

4.3. Wisselstroom : wisselspanning en stroomsterkte

Bij de studie van de (sinusvormige) wisselstroom treft men analoge begrippen aan als bij de harmonische beweging.

Men noemt periode T (SI-eenheid : s) van een wisselstroom de tijd tussen twee opeenvolgende toestanden, waarbij de stroom en de spanning in toestand 2 voor het eerst opnieuw dezelfde waarde en dezelfde zin hebben als in toestand 1.

Onder frekwentie f van de wisselstroom verstaat men hoeveel keren een periode voorkomt gedeeld door de tijd; de frekwentie is dus gelijk aan de omgekeerde waarde van de periode : $f = \frac{1}{T}$.
De SI-eenheid van frekwentie is s^{-1}, met hier als speciale benaming hertz (symbool Hz).

In Europa is de frekwentie van de wisselstroom doorgaans 50 Hz, in de USA daarentegen 60 Hz.
Voor het bekomen van een frekwentie f = 50 Hz, is het vereist toerental (rotatiefrekwentie) n en de hoeksnelheid ω van de rotor van de alternator (wisselstroomgenerator) afhankelijk van het aantal poolparen p in de alternator :

$$\text{rotatiefrekwentie } n = \frac{f}{p}$$

$$\text{hoeksnelheid } \omega = n \,.\, 2\,\pi \text{ rad} = \frac{f}{p} \,.\, 2\,\pi \text{ rad}$$

of (met rad = 1) $$\text{hoeksnelheid } \omega = 2\,\pi \,.\, n = \frac{2\,\pi \,.\, f}{p}$$

Aldus bekomt men voor het toerental (rotatiefrekwentie) n en de hoeksnelheid ω van de rotor van de alternator :

bij 1 poolpaar : $n = 50\ s^{-1}$ (= 50 Hz) = 3000 min^{-1}
: $\omega = 100\,\pi$ rad . s^{-1} = 314,159 rad . s^{-1}
bij 2 poolparen : $n = 25\ s^{-1}$ (= 25 Hz) = 1500 min^{-1}
: $\omega = 50\,\pi$ rad . s^{-1} = 157,080 rad . s^{-1}
bij 3 poolparen : $n = 16{,}67\ s^{-1}$ (= 16,67 Hz) = 1000 min^{-1}
: $\omega = 33{,}33\,\pi$ rad . s^{-1} = 104,720 rad . s^{-1}
bij 4 poolparen : $n = 12{,}5\ s^{-1}$ (= 12,5 Hz) = 750 min^{-1}
: $\omega = 25\,\pi$ rad . s^{-1} = 78,540 rad . s^{-1}

De ogenblikkelijke waarde van de wisselspanning u wordt gegeven door (met u_m = maximale ogenblikkelijke spanning en ω = pulsatie) :

$$u = u_m \,.\, \sin(\omega.t)$$

De ogenblikkelijke waarde van de stroom i wordt gegeven door (met i_m = maximale ogenblikkelijke stroom en ω = pulsatie) :
$i = i_m \,.\, \sin(\omega.t)$ (wanneer de stroom in fase is met de spanning)
$i = i_m \,.\, \sin(\omega.t - \varphi)$ (wanneer de stroom naijlt op de spanning)
$i = i_m \,.\, \sin(\omega.t + \varphi)$ (wanneer de stroom vóórijlt op de spanning)

Zoals aangetoond bij de behandeling van de harmonische beweging, is de tijdsduur voor het beschrijven van een volledige cyclus, gelijk aan $\frac{2\pi}{\omega}$; deze tijdsduur wordt periode T genoemd.

Derhalve geldt : $$\frac{2\pi}{\omega} = T = \frac{1}{f}$$

waaruit volgt : $$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$$

$$\omega = 2\pi \cdot f = \frac{2\pi}{T}$$

De grootheid ω, die genoemd wordt pulsatie of hoekfrekwentie of cirkelfrekwentie, is dus gelijk aan het 2 π-voudige van de frekwentie f. De SI-eenheid van pulsatie ω (hoekfrekwentie, cirkelfrekwentie) is s^{-1}; hier mag de speciale benaming hertz (met symbool Hz) die wordt gegeven aan de SI-eenheid van frekwentie s^{-1}, niet worden gebruikt, noch de eenheid $\frac{rad}{s}$.

De grootheid φ wordt faseverschuiving genoemd en, naar analogie met de harmonische beweging, uitgedrukt in radialen. Nochtans dient opgemerkt dat in de uitdrukkingen sin $(\omega.t - \varphi)$ en sin $(\omega.t + \varphi)$, bij het weergeven van de grootheid φ, rad dient gelijkgesteld te worden aan 1. Voor het produkt $\omega.t$ bekomt men eveneens 1 als eenheid : $\frac{1}{s} \cdot s = 1$. De operatie sin $(\omega.t - \varphi)$ en sin $(\omega.t + \varphi)$ is slechts zinvol als $\omega.t - \varphi$ en $\omega.t + \varphi$ een getal is (zie Hoofdstuk II, onder 3.).

Als de frekwentie f van de opgewekte wisselspanning gelijk is aan 50 Hz, wordt de pulsatie ω (hoekfrekwentie, cirkelfrekwentie) bekomen als volgt : $\omega = 2\pi \cdot f = 314{,}159\ s^{-1}$.

Men bekomt ook de hoeksnelheid ω van de rotor van de alternator, door de pulsatie ω (hoekfrekwentie, cirkelfrekwentie) te delen door het aantal poolparen p van de alternator :

$$\text{hoeksnelheid } \omega = \frac{\text{pulsatie } \omega}{p}$$

De effektieve spanning U is gelijk aan de vierkantswortel uit de gemiddelde waarde van het kwadraat van de ogenblikkelijke spanning u gedurende een periode T.

De effektieve stroom I is gelijk aan de vierkantswortel uit de gemiddelde waarde van het kwadraat van de ogenblikkelijke stroom i gedurende een periode T.

De effektieve waarde van een wisselspanning en van een wisselstroom worden dus gegeven respektievelijk door :

$$U = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u^2 \, dt}$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2 \, dt}$$

Wanneer de wisselspanning en de wisselstroom een sinusvormig verloop kennen, bekomt men bij de uitwerking van bovenstaande uitdrukkingen :

$$U = \frac{u_m}{\sqrt{2}}$$

$$I = \frac{i_m}{\sqrt{2}}$$

Bij de betrokken uitwerking dient $\int \sin^2 (\omega.t) \, dt$ opgelost te worden, hetgeen gebeurt als volgt :

$$\int \sin^2 (\omega.t) \, dt = \frac{1}{\omega} \int \sin^2 (\omega.t) \, d(\omega.t) = \frac{1}{\omega} \left[-\frac{1}{4} \sin (2\,\omega.t) + \frac{\omega.t}{2} \right]$$

met $\omega = \frac{2\,\pi}{T}$ (pulsatie)

4.4. Samenvatting

Wat betreft de cirkelbeweging, de harmonische beweging en de wisselstroom, geeft tabel VIII.1. aan, waar de grootheden toerental of rotatiefrekwentie n, hoeksnelheid ω, frekwentie f en pulsatie ω (of cirkelfrekwentie of hoekfrekwentie) voorkomen en welke de respektieve SI-eenheden zijn.

Tabel VIII.1. *SI-eenheden voor de grootheden toerental of rotatiefrekwentie n, hoeksnelheid ω, frekwentie f en pulsatie ω*

	toerental of rotatie-frekwentie n	hoek-snelheid $\omega = 2\ \pi\ .\ n$	frekwentie f	pulsatie of hoekfrekwentie of cirkelfrekwentie $\omega = 2\ \pi\ .\ f$
cirkelbeweging (bijvoorbeeld: rotor van een alternator)	s^{-1} (= Hz)	rad . s^{-1}	-	-
harmonische beweging	-	-	s^{-1} = Hz	s^{-1} (en niet : Hz of rad . s^{-1})
wisselstroom	-	-	s^{-1} = Hz	s^{-1} (en niet : Hz of rad . s^{-1})

5. De eenheid radiaal en het uitwerken van algemene groothedenvergelijkingen

5.1. Cirkelbeweging en hoeksnelheid

De eenhedenproef betreffende de algemene groothedenvergelijking $\omega = n\ .\ 2\ \pi$ rad (cirkelbeweging) levert op :

$$\frac{\text{rad}}{\text{s}} = \frac{1}{\text{s}}\ .\ \text{rad}$$

Als eenheid bekomt men voor beide termen : $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$

De hoeksnelheid ω kan ook als volgt weergegeven worden :

$$\omega = \frac{\text{afgelegde hoek}}{\text{tijd}} = \frac{2\ \pi\ \text{rad}}{T}$$

De eenhedenproef levert hier op : $\frac{\text{rad}}{\text{s}} = \frac{\text{rad}}{\text{s}}$

Ook hier bekomt men als eenheid voor beide termen : $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$

Tenslotte kan de hoeksnelheid ook als volgt weergegeven worden (met v = omtreksnelheid) :

uit $v = \frac{2\ \pi\ .\ r}{T} = 2\ \pi\ .\ r\ .\ n$ en $v = \omega\ .\ r$

volgt : $\omega = \frac{v}{r} = \frac{2\ \pi}{T} = 2\ \pi\ .\ n$

Als eenheid van ω bekomt men hier niet $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$ doch telkens $\frac{1}{\text{s}}$:

$$\frac{[v]}{[r]} = \frac{\frac{\text{m}}{\text{s}}}{\text{m}} = \frac{1}{\text{s}} \qquad \frac{1}{[T]} = \frac{1}{\text{s}} \qquad [n] = \frac{1}{\text{s}}$$

Nochtans dient ω uitgedrukt te worden in $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$. Hier dient men dus de bekomen eenheid $\left(\frac{1}{\text{s}}\right)$ te vermenigvuldigen met rad, hetgeen toegelaten is vermits rad = 1.

Indien men echter de omtreksnelheid wenst te berekenen uit de hoeksnelheid en de straal, met behulp van de algemene groothedenvergelijking $v = \omega . r$, bekomt men wanneer ω in $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$ en r in m wordt uitgedrukt, als eenheid van snelheid de ongewone eenheid $\frac{\text{m . rad}}{\text{s}}$. Het is duidelijk dat de eenheid rad hier dient weggelaten te worden, hetgeen toegelaten is vermits rad = 1.

Dit verklaart ook, waarom volgende twee schrijfwijzen in verband met de hoeksnelheid ω bij een cirkelbeweging naast elkaar aangetroffen worden :

$$\omega = n \ . \ 2 \ \pi \ \text{rad} = \frac{2 \ \pi \ \text{rad}}{T}$$

en

$$\omega = 2 \ \pi \ . \ n = \frac{2 \ \pi}{T}$$

Daar bij de harmonische beweging de eenheid radiaal niet voorkomt, komt er slechts één schrijfwijze voor in verband met de pulsatie ω (hoekfrekwentie, cirkelfrekwentie) :

$$\omega = 2 \ \pi \ . \ f = \frac{2 \ \pi}{T}$$

met T = periode = duur van één volledige heen- en weergaande beweging.

Hoger werd beschreven, dat een harmonische beweging kan worden opgevat als de beweging van de projektie van een punt P dat met een konstante snelheid over de omtrek van een cirkel beweegt, op een middellijn van die cirkel. De beweging van het punt P zelf is echter een cirkelbeweging, waarvan de hoeksnelheid ω volgens twee schrijfwijzen kan weergegeven worden :

$$\omega = n \cdot 2\ \pi\ \text{rad} = \frac{2\ \pi\ \text{rad}}{T}$$

en

$$\omega = 2\ \pi \cdot n = \frac{2\ \pi}{T}$$

met T = periode = omlooptijd = de tijd waarin een volledige cirkel beschreven wordt.

5.2. Middelpuntvliedende kracht en hoeksnelheid

De middelpuntvliedende kracht wordt gegeven door volgende algemene grootheden vergelijking :

$$F = \frac{m \cdot v^2}{r} = m \cdot r \cdot \omega^2$$

Wanneer m, r en ω in SI-eenheden worden uitgedrukt, bekomt men als eenheid van kracht bij het uitwerken van de eenheden van de grootheden van het laatste lid :

$$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \frac{\text{rad}^2}{\text{s}^2} = \text{N} \cdot \text{rad}^2$$

Het is duidelijk dat de eenheid rad hier dient weggelaten te worden (hetgeen toegelaten is vermits rad = 1) vermits de eenheid van kracht newton (N) is.

5.3. In beweging brengen van een roterend systeem (bijvoorbeeld een vliegwiel)

Het aanvangs-draaimoment M wordt gegeven door :

$$M = J \cdot \alpha$$

met J = massatraagheidsmoment

α = hoekversnelling

De uitwerking van de eenheden van de grootheden van het rechter lid levert op :

$$\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}$$

$$= \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}$$

Daar een moment wordt uitgedrukt in N . m, is het duidelijk dat de eenheid rad hier dient weggelaten te worden, hetgeen toegelaten is vermits rad = 1.

5.4. Besluit

Bij het uitwerken van grootheden vergelijkingen blijkt uit de eenhedenproef, wanneer de eenheid rad dient bijgevoegd of weggelaten te worden.

6. De eenheid sr in samengestelde eenheden

Hoewel de eenheid sr gelijk is aan 1 dient de aanduiding sr behouden te blijven in samengestelde eenheden. Dit blijkt bijvoorbeeld uit tabel VIII.2. betreffende de eenheden van sommige energetische stralingsgrootheden en sommige fotometrische grootheden, waar, bij het weglaten van de eenheid sr, er geen onderscheid meer zou zijn tussen W en $\frac{W}{sr}$, $\frac{W}{m^2}$ en $\frac{W}{m^2 \cdot sr}$, lm en $\frac{lm}{sr}$, $\frac{lm}{m^2}$ en $\frac{lm}{m^2 \cdot sr}$, cd en cd . sr, $\frac{cd}{m^2}$ en $\frac{cd \cdot sr}{m^2}$.
In deze gevallen heeft de eenheid sr het karakter van een grondeenheid (zonder bij de grondeenheden gerekend te worden).

Tabel VIII.2. *Enkele stralingseenheden en fotometrische eenheden die aantonen dat het symbool* sr *in bepaalde samengestelde eenheden dient behouden te blijven*

energetische stralingsgrootheid	symbool	SI-eenheid	overeenkomstige fotometrische grootheid	symbool	SI-eenheid
stralingsflux	Φ_e	W	lichtflux	Φ_v	lm = cd . sr
stralingssterkte	I_e	$\frac{W}{sr}$	lichtsterkte	I_v	$\frac{lm}{sr}$ = cd
energetische exitantie	M_e	$\frac{W}{m^2}$	exitantie	M_v	$\frac{lm}{m^2} = \frac{cd \cdot sr}{m^2}$
radiantie	L_e	$\frac{W}{m^2 \cdot sr}$	luminantie	L_v	$\frac{lm}{m^2 \cdot sr} = \frac{cd}{m^2}$

HOOFDSTUK IX

GROOTHEDEN EN EENHEDEN IN DE GELUIDSLEER

1. Niveau of peil van een energiegrootheid of van een veldgrootheid

1.1. Energiegrootheden en veldgrootheden, en hun onderling verband

De grootheden die hier in aanmerking komen zijn enerzijds "energiegrootheden" (energie E, vermogen P, ...) en anderzijds "veldgrootheden" (elektrische spanning U, elektrische stroom I, geluidsdruk p, snelheid v van de trillende deeltjes van een geluidsgolf, ...).

Tussen een energiegrootheid (meestal gaat het om een vermogen P) en een er mee gepaard gaande veldgrootheid (hier voorgesteld door X), bestaat de betrekking, dat het kwadraat van de veldgrootheid evenredig is met het vermogen P :

$$X^2 \sim P$$

Beschouwen we een voorbeeld uit de elektriciteitsleer, waar in een kringloop met alleen ohmse weerstand het vermogen gegeven wordt door :

$$P = U \cdot I$$

Vermits verder ook geldt : $U = R \cdot I$ en $I = \frac{U}{R}$, kan het vermogen P ook als volgt weergegeven worden :

$$P = R \cdot I^2 \quad \text{en} \quad P = \frac{U^2}{R}$$

Hieruit blijkt dat de energiegrootheid P evenredig is zowel met het kwadraat van de veldgrootheid I, als met het kwadraat van de veldgrootheid U.

1.2. Logaritme van een getal

Onder Briggse logaritme (voorgesteld door lg) van een (positief) getal verstaat men de (positieve of negatieve) exponent waartoe het getal 10 (grondtal van het Briggse logaritmenstelsel) dient verheven te worden om een waarde te bekomen gelijk aan het getal waarvan men de (Briggse) logaritme neemt :

Voorbeeld : lg 100 = 2,000 000 000 daar $10^{2,000\ 000\ 000} = 100$

lg 200 = 2,301 029 996 daar $10^{2,301\ 029\ 996} = 200$

$\lg 1000 = 3{,}000\ 000\ 000$ daar $10^{3{,}000\ 000\ 000} = 1000$

$\lg 5000 = 3{,}698\ 970\ 004$ daar $10^{3{,}698\ 970\ 004} = 5000$

Onder neperiaanse logaritme (ook genoemd natuurlijke logaritme en voorgesteld door ln) van een (positief) getal verstaat men de (positieve of negatieve) exponent waartoe het getal e (= 2,718 281 828 = grondtal van het neperiaanse logaritmenstelsel) dient verheven te worden om een waarde te bekomen gelijk aan het getal waarvan men de (neperiaanse of natuurlijke) logaritme neemt :

Voorbeeld : $\ln 100 = 4{,}605\ 170\ 186$ daar $e^{4{,}605\ 170\ 186} = 100$

$\ln 200 = 5{,}298\ 317\ 367$ daar $e^{5{,}298\ 317\ 367} = 200$

$\ln 1000 = 6{,}907\ 755\ 279$ daar $e^{6{,}907\ 755\ 279} = 1000$

$\ln 5000 = 8{,}517\ 193\ 191$ daar $e^{8{,}517\ 193\ 191} = 5000$

Als neperiaanse logaritme van 10 (zijnde het grondtal in het Briggse logaritmenstelsel) en als Briggse logaritme van 2,718 281 828 (= e = het grondtal van het neperiaanse logaritmenstelsel) bekomt men :

$\ln 10 = 2{,}302\ 585\ 093$ daar $e^{2{,}302\ 585\ 093} = 10$

$\lg e = 0{,}434\ 294\ 481\ 8$ daar $10^{0{,}434\ 294\ 481\ 8} = e$

Wanneer $\lg G$ wordt voorgesteld door x en $\ln G$ door y, geldt verder :

$$G = 10^{x} = e^{2{,}302\ 585\ 093\ x} = e^{\frac{x}{0{,}434\ 294\ 481\ 8}}$$

$$= e^{y} = 10^{0{,}434\ 294\ 481\ 8\ y} = 10^{\frac{y}{2{,}302\ 585\ 093}}$$

Hieruit volgt :

$$\lg G = x = 0{,}434\ 294\ 481\ 8\ y = y \cdot \lg e = \ln G \cdot \lg e$$

$$= \frac{y}{2{,}302\ 585\ 093} = \frac{y}{\ln 10} = \frac{\ln G}{\ln 10}$$

$$\ln G = y = 2{,}302\ 585\ 093\ x = x \cdot \ln 10 = \lg G \cdot \ln 10$$

$$= \frac{x}{0{,}434\ 294\ 481\ 8} = \frac{x}{\lg e} = \frac{\lg G}{\lg e}$$

Verder bekomt men :

$$\frac{\lg G}{\ln G} = \lg e = \frac{1}{\ln 10} = 0{,}434\ 294\ 481\ 8$$

$$\frac{\ln G}{\lg G} = \ln 10 = \frac{1}{\lg e} = 2{,}302\ 585\ 093$$

1.3. Logaritme van de verhouding van twee energiegrootheden of van twee veldgrootheden (telkens van dezelfde aard)

De logaritme van de verhouding van twee grootheden van dezelfde aard is een onbenoemd getal, dus dimensieloos (of van dimensie 1). Teneinde echter aan te duiden of het gaat om een Briggse logaritme dan wel om een neperiaanse logaritme, heeft men een benaming toegevoegd aan dat getal, respektievelijk bel (B) en neper (Np). Hoewel "bel" en "neper" helemaal geen eenheden zijn (en dus uiteraard ook geen SI-eenheden), is men ze toch gaan beschouwen en behandelen als eenheden.

De benaming "bel" wordt praktisch niet gebruikt, wel echter de benaming "decibel" (dB). Decibel is een benaming die men toevoegt aan het getal dat men bekomt wanneer de Briggse logaritme van de verhouding van twee grootheden van dezelfde aard, vermenigvuldigd wordt met 10.

De benaming "decibel" wordt vooral gebruikt wanneer het gaat om energiegrootheden, terwijl de benaming "neper" vooral wordt toegepast voor veldgrootheden.

Het aantal decibel en het aantal neper is een maat voor het verschil in grootte tussen respektievelijk twee energiegrootheden onderling en twee veldgrootheden onderling.

Hierna stelt x het getal voor, dat het aantal decibel weergeeft (in verband met energiegrootheden), terwijl y het getal voorstelt, dat het aantal neper weergeeft (in verband met veldgrootheden).
Aldus geldt bijvoorbeeld voor de energiegrootheid vermogen P :

$$\lg \frac{P_1}{P_0} \text{ bel} = \lg \frac{P_1}{P_0} \text{ B}$$

$$10 \lg \frac{P_1}{P_0} \text{ decibel} = 10 \lg \frac{P_1}{P_0} \text{ dB} = x \text{ dB}$$

Wegens de betrekking $X^2 \sim P$ geldt ook :

$$10 \lg \frac{P_1}{P_0} \text{ dB} = 10 \lg \frac{X_1^2}{X_0^2} \text{ dB} = 20 \lg \frac{X_1}{X_0} \text{ dB} = x \text{ dB}$$

Voor veldgrootheden X bekomt men :

$$\ln \frac{X_1}{X_o} \text{ neper} = \ln \frac{X_1}{X_o} \text{ Np} = y \text{ Np}$$

Wegens de betrekking $X^2 \sim P$ hetzij $X \sim P^{1/2}$, geldt ook :

$$\ln \frac{X_1}{X_o} \text{ Np} = \ln \left(\frac{P_1}{P_o}\right)^{1/2} \text{ Np} = \frac{1}{2} \ln \frac{P_1}{P_o} \text{ Np} = y \text{ Np}$$

Besluit :

$$10 \lg \frac{P_1}{P_o} \text{ dB} = 20 \lg \frac{X_1}{X_o} \text{ dB} = x \text{ dB}$$

$$\ln \frac{X_1}{X_o} \text{ Np} = \frac{1}{2} \ln \frac{P_1}{P_o} \text{ Np} = y \text{ Np}$$

1.4. Verband tussen het aantal decibel en het aantal neper in verband met energiegrootheden enerzijds, en de er mee gepaard gaande veldgrootheden anderzijds

Uit $10 \lg \frac{P_1}{P_o} \text{ dB} \triangleq \frac{1}{2} \ln \frac{P_1}{P_o} \text{ Np}$ leidt men af :

$$1 \text{ dB} \triangleq \frac{\frac{1}{2} \ln \frac{P_1}{P_o}}{10 \lg \frac{P_1}{P_o}} \text{ Np}$$

$$\triangleq \frac{1}{20} \ln 10 \text{ Np}$$

$$\triangleq \frac{1}{20 \lg e} \text{ Np}$$

$$\triangleq \frac{1}{20} \times 2{,}302\ 585\ 093 \text{ Np}$$

$$\triangleq 0{,}115\ 129\ 254\ 7 \text{ Np}$$

Uit $\ln \frac{X_1}{X_o} \text{ Np} \triangleq 20 \lg \frac{X_1}{X_o} \text{ dB}$ leidt men af :

$$1 \text{ Np} \triangleq \frac{20 \lg \frac{X_1}{X_o}}{\ln \frac{X_1}{X_o}} \text{ dB}$$

$$\triangleq 20 \lg e \text{ dB}$$

$$\triangleq \frac{20}{\ln 10} \text{ dB}$$

$$\triangleq 20 \times 0{,}434\,294\,481\,9 \text{ dB}$$

$$\triangleq 8{,}685\,889\,638 \text{ dB}$$

Voorbeeld : zij $\frac{P_1}{P_o} = 10\,000$

Dan geldt ook : $\frac{X_1}{X_o} = \sqrt{\frac{P_1}{P_o}} = \sqrt{10\,000} = 100$

Men bekomt :

$$10 \lg \frac{P_1}{P_o} \text{ dB} = 10 \lg 10\,000 \text{ dB} = 40 \text{ dB}$$

$$20 \lg \frac{X_1}{X_o} \text{ dB} = 20 \lg 100 \text{ dB} = 40 \text{ dB}$$

$$\ln \frac{X_1}{X_o} \text{ Np} = \ln 100 \text{ Np} = 4{,}605\,170\,186 \text{ Np}$$

$$\frac{1}{2} \ln \frac{P_1}{P_o} \text{ Np} = \frac{1}{2} \ln 10\,000 \text{ Np} = 4{,}605\,170\,186 \text{ Np}$$

Het verband tussen het aantal decibel en het aantal neper kan ook op een andere wijze worden afgeleid. Wanneer het getal dat het aantal decibel weergeeft betreffende de verhouding van twee energiegrootheden gelijk is aan x en het getal dat het aantal neper weergeeft betreffende de verhouding van de er mee gepaard gaande veldgrootheden gelijk is aan y, bestaat tussen beide getallen de volgende verhouding :

$$\frac{x}{y} = \frac{10 \lg \frac{P_1}{P_o}}{\frac{1}{2} \ln \frac{P_1}{P_o}} = 20 \lg e = \frac{20}{\ln 10} = 8{,}685\,889\,638$$

$$= \frac{20 \lg \frac{X_1}{X_o}}{\ln \frac{X_1}{X_o}} = 20 \lg e = \frac{20}{\ln 10} = 8{,}685\,889\,638$$

$$\frac{y}{x} = \frac{\frac{1}{2} \ln \frac{P_1}{P_o}}{10 \lg \frac{P_1}{P_o}} = \frac{\ln 10}{20} = \frac{1}{20 \lg e} = 0{,}115\ 129\ 254\ 7$$

$$= \frac{\ln \frac{X_1}{X_o}}{20 \lg \frac{X_1}{X_o}} = \frac{\ln 10}{20} = \frac{1}{20 \lg e} = 0{,}115\ 129\ 254\ 7$$

Besluit : $x = 8{,}685\ 889\ 638\ y$

$y = 0{,}115\ 129\ 254\ 7\ x$

waaruit volgt : x dB = $8{,}685\ 889\ 638\ y$ dB $\hat{=}$ y Np = $0{,}115\ 129\ 254\ 7\ x$ Np

1 dB $\hat{=}$ 0,115 129 254 7 Np

1 Np $\hat{=}$ 8,685 889 638 dB

Hoewel neper en decibel eigenlijk geen eenheden zijn, worden ze soms wel als dusdanig beschouwd en behandeld. In het algemeen geldt (met G = een getal) :

$$\frac{\ln G}{20 \lg G} = \frac{\frac{1}{2} \ln G}{10 \lg G} = 0{,}115\ 129\ 254\ 7$$

$$\frac{20 \lg G}{\ln G} = \frac{10 \lg G}{\frac{1}{2} \ln G} = 8{,}685\ 889\ 638$$

Het onderling verband tussen neper en decibel wordt dan gevonden als volgt : in dezelfde mate als de getalwaarde van ln G kleiner is dan de getalwaarde van 20 lg G, is de (zogezegde) eenheid neper groter dan de (zogezegde) eenheid decibel; derhalve geldt :

1 dB $\hat{=}$ 0,115 129 254 7 Np

1 Np $\hat{=}$ 8,685 889 638 dB

1.5. Niveau of peil van een energiegrootheid of van een veldgrootheid

Onder niveau of peil van een vermogen, verstaat men het aantal decibel, gegeven door :

$$10 \lg \frac{P_1}{P_o} \text{ dB} = 20 \lg \frac{X_1}{X_o} \text{ dB}$$

met P_o = een welbepaalde (door overeenkomst vastgelegde) waarde. Het vermogen P_o geldt als referentiegrootheid en wordt ook soms nulniveau genoemd.

Onder niveau of peil van een veldgrootheid, verstaat men het aantal neper, gegeven door :

$$\ln \frac{X_1}{X_o} N_p = \frac{1}{2} \ln \frac{P_1}{P_o} N_p$$

met X_o = een welbepaalde (door overeenkomst vastgelegde) waarde. De veldgrootheid X_o geldt als referentiegrootheid en wordt ook soms nulniveau genoemd.

In de telekommunikatie drukt men het niveau van een elektrisch vermogen uit in decibel; als referentiegrootheid geldt hier $P_o = 1\ mW = 10^{-3}\ W$. Teneinde ook een referentiegrootheid te kunnen opgeven voor de twee veldgrootheden spanning U_o en stroom I_o, neemt men aan dat het vermogen van 1 mW geleverd wordt over een weerstand van 600 Ω. Aldus bekomt men uit $P_o = \frac{U_o^2}{R} = R \cdot I_o^2 = 0{,}001\ W$:

$$U_o = \sqrt{600\ \Omega \cdot 0{,}001\ W} \approx 0{,}775\ V$$

$$I_o = \sqrt{\frac{0{,}001\ W}{600\ \Omega}} \approx 0{,}001\ 29\ A$$

$$\approx 1{,}29\ mA$$

Teneinde negatieve waarden te vermijden voor het niveau van een energiegrootheid of een veldgrootheid (de logaritme van een positief getal kleiner dan 1 is immers negatief), neemt men als referentiegrootheid de kleinste voorkomende waarde aan.

Vroeger volstond het, als referentiegrootheid van vermogen 1 mW te nemen. Mettertijd werd het echter noodzakelijk, voor het vermogen een tweede (kleinere) referentiegrootheid vast te leggen, namelijk :

$$P_o = 1\ pW = 10^{-12}\ W$$

Uiteraard dient men, wanneer vergissing mogelijk is, op te geven ten opzichte van welke referentiegrootheid (1 mW of 1 pW) het niveau van een vermogen opgegeven wordt.

2. Enkele grootheden en eenheden uit de geluidsleer

2.1. Inleiding

Het geluid wordt veroorzaakt door een geluidsbron die trillingen uitvoert, waardoor in de omgevende elastische middenstof longitudinale drukgolven ontstaan. Longitudinale golven verplaatsen zich volgens de bewegingsrichting van de trillende deeltjes. Geluidsenergie is mechanische energie die door de trillende geluidsbron wordt overgedragen aan de omgevende middenstof.

Onder frequentie f verstaat men het aantal trillingen gedeeld door de tijd. De tijdsduur van één trilling noemt men periode T. De golflengte λ is de afstand waarover de golfbeweging zich voortplant gedurende één periode van de trillingsbeweging van de bron.

Tussen de voortplantingssnelheid c van het geluid, de golflengte λ, de frekwentie f en de periode T bestaat volgend verband :

$$\lambda = \frac{c}{f} = c \cdot T$$

Bij het gebruik van SI-eenheden, wordt c uitgedrukt in $\frac{m}{s}$, λ in m, f in s^{-1} (= Hz) en T in s.

Hierna wordt het geluid eerst behandeld als een zuiver fysisch verschijnsel, en daarna als een door het menselijk gehoor waargenomen verschijnsel (geluidsindruk).

2.2. Het geluid als fysisch verschijnsel

2.2.1. Energiegrootheden

a. Vermogen P van een geluidsbron

Het vermogen P van een geluidsbron is de hoeveelheid energie die door de trillende geluidsbron aan de middenstof wordt overgedragen, gedeeld door de tijd. Indien de middenstof geen energie opslorpt, zal al de energie die bij sferische golven gaat door de opeenvolgende koncentrische

boloppervlakken (met steeds groter wordende boloppervlakte A) rondom de geluidsbron, konstant blijven.
De SI-eenheid van vermogen P van een geluidsbron is watt (W).

b. Geluidsvermogen P

Onder geluidsvermogen P verstaat men de hoeveelheid energie die door een vlak (van willekeurige grootte, op een willekeurige afstand van de geluidsbron) ontvangen wordt of doorheen het betrokken vlak gaat, gedeeld door de tijd. Het geluidsvermogen P is enkel gelijk aan het vermogen P van de geluidsbron, wanneer het betrokken vlak de geluidsbron volledig omhult en de middenstof geen energie opslorpt; in alle andere gevallen is het geluidsvermogen P uiteraard kleiner dan het vermogen P van de geluidsbron.
De SI-eenheid van geluidsvermogen P is watt (W).

c. Geluidsintensiteit I

De geluidsintensiteit I in een punt is gelijk aan het geluidsvermogen dat een vlak treft dat zich in dat punt bevindt loodrecht op de voortplantingsrichting, gedeeld door de oppervlakte van het betrokken vlak :

$$I = \frac{P}{A}$$

De SI-eenheid van geluidsintensiteit I is $\frac{W}{m^2}$.
Veel gebruikte eenheden van geluidsintensiteit zijn $\frac{\mu W}{cm^2}$ en $\frac{pW}{m^2}$
Omzettingen :

$$1\ \frac{\mu W}{cm^2} = \frac{10^6\ pW}{10^{-4}\ m^2} = 10^{10}\ \frac{pW}{m^2}$$

$$= \frac{10^{-6}\ W}{10^{-4}\ m^2} = 10^{-2}\ \frac{W}{m^2} = 0{,}01\ \frac{W}{m^2}$$

$$1\ \frac{pW}{m^2} = \frac{10^{-6}\ \mu W}{10^{4}\ cm^2} = 10^{-10}\ \frac{\mu W}{cm^2}$$

$$= 10^{-12}\ \frac{W}{m^2}$$

$$1\ \frac{W}{m^2} = \frac{10^6\ \mu W}{10^4\ cm^2} = 10^2\ \frac{\mu W}{cm^2} = 100\ \frac{\mu W}{cm^2}$$

$$= 10^{12}\ \frac{pW}{m^2}$$

d. Geluidsenergiedichtheid w

De geluidsenergie W die gedurende de tijd t door een oppervlak met oppervlakte A gaat, wordt gegeven door : $W = I \cdot A \cdot t$.

De afstand l die door het geluid met snelheid c in de tijd t wordt afgelegd, is gelijk aan : $l = c \cdot t$.
Het volume V waarin het geluid zich na zijn doorgang door het vlak A gedurende de tijd t voortplant is gelijk aan : $V = A \cdot l$.
Onder geluidsenergiedichtheid w verstaat men de geluidsenergie per volume :

$$w = \frac{W}{V} = \frac{I \cdot A \cdot t}{A \cdot l} = \frac{I \cdot t}{l} = \frac{I}{c}$$

Als SI-eenheid van geluidsenergiedichtheid bekomt men :

$$\frac{\frac{W}{m^2}}{\frac{m}{s}} = \frac{W \cdot s}{m^3} = \frac{J}{m^3} = \frac{N \cdot m}{m^3} = \frac{N}{m^2} = Pa$$

2.2.2. Veldgrootheden

a. Geluidsdruk p

De geluidsdruk p is de drukschommeling (wisseldruk) die zich voordoet in de geluidsgolf die zich in de middenstof voortplant.
De SI-eenheid van geluidsdruk p is pascal (1 Pa = 1 $\frac{N}{m^2}$). Een veel gebruikte eenheid van geluidsdruk is mikrobar (µbar).
Omzettingen :

$$1\ \mu bar = 10^{-6}\ bar = 10^{-6} \times 10^5\ \frac{N}{m^2} = \frac{1}{10}\ \frac{N}{m^2} = \frac{1}{10}\ Pa$$

$$= \frac{1}{10} \cdot \frac{10^5\ dyn}{10^4\ cm^2} = 1\ \frac{dyn}{cm^2} = 1\ CGS\text{-eenheid van druk}$$

$$1\ Pa = 1\ \frac{N}{m^2} = 10^{-5}\ bar = 10^{-5} \times 10^6\ \mu bar = 10\ \mu bar = 10\ \frac{dyn}{cm^2}$$

b. Snelheid v van een trillend deeltje

De snelheid v van een trillend deeltje van de middenstof is de snelheid waarmee het betrokken deeltje zich beweegt om zijn evenwichtstoestand.
Deze snelheid v van een trillend deeltje mag niet verward worden met de voortplantingssnelheid c van de geluidsgolf in de betrokken middenstof.
De SI-eenheid van snelheid is $\frac{m}{s}$.

2.2.3. Voortplantingssnelheid van het geluid in lucht

De voortplantingssnelheid van het geluid (de afstand die de geluidsgolf aflegt gedeeld door de tijd) in een ideaal gas wordt gegeven door

volgende algemene groothedenvergelijking :

$$c = \sqrt{\frac{\kappa \cdot p}{\rho}} = \sqrt{\kappa \cdot p \cdot v} = \sqrt{\kappa \cdot R \cdot T}$$

met $\kappa = \frac{c_p}{c_v}$ (verhouding van de soortelijke warmtekapaciteit van het betrokken gas onder konstante druk tot de soortelijke warmtekapaciteit onder konstant volume)

p = luchtdruk (niet te verwarren met de geluidsdruk die ook voorgesteld wordt door p)

ρ = soortelijke massa (volumieke massa) = $\frac{1}{v}$

v = soortelijk volume = $\frac{1}{\rho}$

R = specifieke gaskonstante van het betrokken gas

T = termodynamische temperatuur (absolute temperatuur)

Als voortplantingssnelheid van het geluid in (droge)lucht van 20 °C (T = 293,15 K) bekomt men (met κ = 1,4 en R = 287,2 $\frac{J}{kg \cdot K}$) :

$$c = \sqrt{1{,}4 \times 287{,}2 \frac{J}{kg \cdot K} \times 293{,}15\ K} = 343{,}3 \frac{m}{s}$$

2.2.4. Enkele wetten uit de geluidsleer

In de geluidsleer gelden volgende algemene groothedenvergelijkingen :

$$v = \frac{p}{\rho \cdot c}$$

$$p = v \cdot \rho \cdot c$$

$$I = p \cdot v = \frac{p^2}{\rho \cdot c} = v^2 \cdot \rho \cdot c = \frac{P}{A}$$

met v = effektieve snelheid van een trillend deeltje van de middenstof; SI-eenheid : m/s (de effektieve snelheid is gelijk aan het kwadratisch gemiddelde van de ogenblikkelijke snelheid)

p = effektieve geluidsdruk (niet te verwarren met de luchtdruk); SI-eenheid : Pa (de effektieve geluidsdruk is gelijk aan het kwadratisch gemiddelde van de ogenblikkelijke geluidsdruk)

ρ = soortelijke massa van de middenstof; SI-eenheid : kg/m^3

c = voortplantingssnelheid van het geluid in de betrokken middenstof; SI-eenheid : m/s

I = geluidsintensiteit; SI-eenheid : W/m^2

P = geluidsvermogen; SI-eenheid : W

A = oppervlakte (loodrecht op de richting van het geluid) waardoor het geluid gaat; SI-eenheid : m^2.

De oppervlakte A is in een "akoestisch vrij veld" gelijk aan de oppervlakte van een bol, waarbij de geluidsbron zich in het centrum bevindt zodat de straal r gelijk is aan de afstand van het meetpunt tot de geluidsbron : $A = 4 \pi r^2$.

Indien men aanneemt dat de middenstof geen energie opneemt, zal al de energie die gaat doorheen de opeenvolgende koncentrische boloppervlakken (met steeds groter wordende boloppervlakte A) rondom de geluidsbron, konstant blijven. Bijgevolg geldt dan bij 2 (willekeurige) afstanden r_1 en r_2 (met $A_1 = 4 \pi r_1^2$ en $A_2 = 4 \pi r_2^2$) :

$$P = I_1 \cdot 4 \pi r_1^2 = \frac{p_1^2}{\rho \cdot c} \cdot 4 \pi r_1^2 = v_1^2 \cdot \rho \cdot c \cdot 4 \pi r_1^2$$

$$= I_2 \cdot 4 \pi r_2^2 = \frac{p_2^2}{\rho \cdot c} \cdot 4 \pi r_2^2 = v_2^2 \cdot \rho \cdot c \cdot 4 \pi r_2^2$$

Hieruit volgt :

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{r_1^2}{r_2^2}$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{r_1}{r_2}$$

Hetzelfde resultaat wordt bekomen wanneer de oppervlakte A gelijk is aan de oppervlakte van een halve bol die rust op een horizontaal vlak, waarbij de geluidsbron zich in het centrum bevindt zodat de straal r gelijk is aan de afstand van het meetpunt tot de geluidsbron (met $A = 2 \pi r^2$).

De geluidsintensiteit I is dus omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand, terwijl de geluidsdruk p en de snelheid v van een trillend deeltje van de middenstof, *omgekeerd evenredig zijn met de afstand* tussen meetpunt en trillingsbron.

2.2.5. Specifieke akoestische impedantie

Uit de hoger gegeven uitdrukking in verband met de voortplantingssnelheid c van het geluid (met lucht als middenstof) leidt men af :

$$\rho \cdot c = \sqrt{\rho \cdot \kappa \cdot p} = \sqrt{\frac{\kappa \cdot p}{v}} = \sqrt{\frac{\kappa \cdot p^2}{p \cdot v}} = \sqrt{\frac{\kappa \cdot p^2}{R \cdot T}} = p \cdot \sqrt{\frac{\kappa}{R \cdot T}}$$

met $$\kappa = \frac{c_p}{c_v} = 1{,}4 \quad \text{(voor lucht)}$$

p = luchtdruk (niet te verwarren met de geluidsdruk)

R = specifieke gaskonstante van lucht = $287{,}2 \ \frac{J}{kg \cdot K}$

T = termodynamische temperatuur (absolute temperatuur)

Het produkt $\rho \cdot c$ wordt specifieke akoestische impedantie genoemd. Bij het gebruik van SI-eenheden, wordt het produkt $\rho \cdot c$ uitgedrukt in :

$\frac{kg}{m^3} \cdot \frac{m}{s} = \frac{kg}{m^2 \cdot s} = \frac{N \cdot s}{m^3} = \frac{Pa \cdot s}{m}$ = SI-eenheid van specifieke akoestische impedantie.

Het produkt $\rho \cdot c$ wordt (met als middenstof lucht, onder een druk die weinig afwijkt van de normale atmosferische druk en bij een temperatuur gelijk aan de omgevingstemperatuur) eenvoudigheidshalve (en met voldoende nauwkeurigheid) gelijkgesteld aan 400 SI-eenheden.

De specifieke akoestische impedantie is exact gelijk aan 400 SI-eenheden, wanneer aan volgende uitdrukking voldaan is :

$$p \cdot \sqrt{\frac{\kappa}{R \cdot T}} = 400 \ \frac{kg}{m^2 \cdot s}$$

hetzij $$p = 400 \ \frac{kg}{m^2 \cdot s} \cdot \sqrt{\frac{R}{\kappa}} \cdot \sqrt{T} = 400 \ \frac{kg}{m^2 \cdot s} \cdot \sqrt{\frac{287{,}2 \ \frac{J}{kg \cdot K}}{1{,}4}} \cdot \sqrt{T}$$

Indien men enkel de getalwaarden beschouwt (behorend bij de SI-eenheden), dient aan volgende voorwaarden voldaan te worden :

$$\{p\} = 5729{,}12 \sqrt{\{T\}}$$

$$\{T\} = \frac{\{p\}^2}{(5729{,}12)^2}$$

Opdat, bij het gebruik van SI-eenheden, het produkt $\rho \cdot c$ (met lucht als middenstof) zou gelijk zijn aan 400 $\frac{kg}{m^2 \cdot s}$,

- dient, bij normale atmosferische druk (p = 101 325 Pa), de temperatuur T gelijk te zijn aan :

$$T = \frac{(101\ 325)^2}{(5729{,}12)^2} \ K = 312{,}79 \ K \quad \text{hetzij} \quad t = 39{,}64 \ °C$$

- dient bij een druk p = 100 000 Pa, de temperatuur T gelijk te zijn aan :

$$T = \frac{(100\ 000)^2}{(5729,12)^2}\ \text{K} = 304,67\ \text{K} \quad \text{hetzij} \quad t = 31,52\ ^\circ\text{C}$$

- dient bij een temperatuur t = 0 °C (T = 273,15 K), de luchtdruk p gelijk te zijn aan :

$$p = 5729,12 \cdot \sqrt{273,15}\ \text{Pa}$$
$$= 94\ 687\ \text{Pa}$$

- dient bij een temperatuur t = 20 °C (T = 293,15 K), de luchtdruk p gelijk te zijn aan :

$$p = 5729,12 \cdot \sqrt{293,15}\ \text{Pa}$$
$$= 98\ 092\ \text{Pa}$$

Bij het gebruik van CGS-eenheden, wordt het produkt $\rho \cdot c$ gelijkgesteld aan 40 CGS-eenheden (die gelijk zijn aan 400 SI-eenheden) :

$$400\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} = 400 \cdot \frac{1000\ \text{g}}{10\ 000\ \text{cm}^2 \cdot 1\text{s}} = 40\ \frac{\text{g}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} = 40\ \frac{\text{g} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}}{\text{cm}^3 \cdot \text{s}^2}$$
$$= 40\ \frac{\text{dyn} \cdot \text{s}}{\text{cm}^3} = 40\ \frac{\mu\text{bar} \cdot \text{s}}{\text{cm}}$$

De eenheid $\frac{\text{g}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$ kreeg in het CGS-stelsel een speciale benaming, namelijk rayl (symbool Rayl) :

$$1\ \text{Rayl} = 1\ \frac{\text{g}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} = 1\ \frac{\text{dyn} \cdot \text{s}}{\text{cm}^3} = 1\ \frac{\mu\text{bar} \cdot \text{s}}{\text{cm}}$$

$$1\ \text{Rayl} = 10\ \frac{\text{Pa} \cdot \text{s}}{\text{m}}$$

Bij zeer nauwkeurige berekeningen dient men er rekening mede te houden dat het produkt $\rho \cdot c$ afhankelijk is van temperatuur en druk. Bij een temperatuur van 20 °C (= 293,15 K) en een luchtdruk van 101 325 Pa (= normale atmosferische druk = 1013,25 mbar) en van 100 000 Pa (= 1000 mbar), bekomt men respektievelijk :

$$\rho \cdot c = p \cdot \sqrt{\frac{\kappa}{R \cdot T}} = 101\ 325 \cdot \sqrt{\frac{1,4}{287,2 \times 293,15}}\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} = 413,2\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

$$\rho \cdot c = p \cdot \sqrt{\frac{\kappa}{R \cdot T}} = 100\ 000 \cdot \sqrt{\frac{1,4}{287,2 \times 293,15}}\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} = 407,8\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

2.2.6. Niveau (of peil) van een geluidsdruk p, van een snelheid v van een trillend deeltje van de middenstof, van een geluidsintensiteit I en van een vermogen P van een geluidsbron

In de geluidsleer stelt men enkel belang in de Briggse logaritme van de verhouding van energiegrootheden (I, P) en niet in de neperiaanse logaritme van de verhouding van veldgrootheden (p, v). De neperiaanse logaritme van de verhouding van veldgrootheden is hier dus niet gebruikelijk. De logaritme van de verhouding van energiegrootheden kan men echter ook berekenen, vertrekkend vanaf de veldgrootheden. In dit geval spreekt men (ten onrechte) van het niveau van de betrokken veldgrootheid, daar het niveau van de overeenstemmende energiegrootheid bedoeld wordt (uitgedrukt in dB).

In de geluidsleer onderscheidt men derhalve volgende niveaus (telkens voorgesteld door L met aangepaste index), die een maat zijn voor de fysische sterkte van het geluid :

a. Niveau L_p van een geluidsdruk p

Dit wordt gegeven door :

$$L_p = 10 \lg \frac{p^2}{p_o^2} \text{ dB} = 20 \lg \frac{p}{p_o} \text{ dB}$$

met p = effektieve geluidsdruk

p_o = referentie-geluidsdruk

Met lucht als middenstof geldt :

$$p_o = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$$

$$= 2 \cdot 10^{-5} \times 10^{6} \text{ µPa} = 20 \text{ µPa}$$

$$= \frac{2 \cdot 10^{-5}}{10^{5}} \text{ bar} = 2 \cdot 10^{-10} \text{ bar}$$

$$= 2 \cdot 10^{-10} \times 10^{6} \text{ µbar} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ µbar} = 2 \cdot 10^{-4} \frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2}$$

b. Niveau L_v van een snelheid v van een trillend deeltje van de middenstof

Dit wordt gegeven door :

$$L_v = 10 \lg \frac{v^2}{v_o^2} \text{ dB} = 20 \lg \frac{v}{v_o} \text{ dB}$$

met v = effektieve snelheid van een trillend deeltje van de middenstof

v_o = referentie-snelheid

Met lucht als middenstof geldt :

$$v_o = 5 \cdot 10^{-8} \frac{m}{s}$$

$$= 50 \cdot 10^{-9} \frac{m}{s}$$

$$= 50 \frac{nm}{s}$$

c. Niveau L_I van een geluidsintensiteit I

Dit wordt gegeven door :

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_o} \text{ dB}$$

met I = geluidsintensiteit

I_o = referentie-geluidsintensiteit

Met lucht als middenstof geldt :

$$I_o = 10^{-12} \frac{W}{m^2} = 1 \frac{pW}{m^2}$$

$$= 10^{-12} \cdot \frac{10^6 \mu W}{10^4 cm^2} = 10^{-10} \frac{\mu W}{cm^2}$$

$$= 10^{-12} \frac{J}{m^2 \cdot s} = 10^{-12} \cdot \frac{10^7 erg}{10^4 cm^2 \cdot s} = 10^{-9} \frac{erg}{cm^2 \cdot s}$$

d. Niveau L_P van een vermogen P van een geluidsbron

Dit wordt gegeven door :

$$L_P = 10 \lg \frac{P}{P_o} \text{ dB}$$

met P = vermogen van een geluidsbron

P_o = referentie-vermogen

Met lucht als middenstof geldt :

$$P_o = 10^{-12} W = 10^{-6} \mu W = 1 pW$$

$$= 10^{-12} \frac{J}{s} = 10^{-12} \cdot \frac{10^7 erg}{s} = 10^{-5} \frac{erg}{s}$$

2.2.7. Verband tussen p, v, I, P, L_p, L_v, L_I, L_P

In het algemeen geldt voor een geluidsveld bestaande uit lopende vlakke golven (vlakke golven zijn golven waarbij alle veldgrootheden in ieder vlak loodrecht op de voortplantingsrichting, konstant zijn) of uit

bolvormige golven :

$$I = p \cdot v = \frac{p^2}{\rho \cdot c} = v^2 \cdot \rho \cdot c = \frac{P}{A}$$

Wanneer het produkt $\rho \cdot c$ gelijkgesteld wordt aan 400 SI-eenheden of 40 CGS-eenheden (hetgeen aanvaardbaar is voor lucht onder nagenoeg normale atmosferische druk en bij normale omgevingstemperatuur), gelden volgende betrekkingen :

$$\{I\}_{W/m^2} = \frac{\{p\}^2_{Pa}}{400} = 400\ \{v\}^2_{m/s} \qquad \text{(overal SI-eenheden)}$$

$$\{I\}_{erg.cm^{-2}.s^{-1}} = \frac{\{p\}^2_{\mu bar}}{40} = 40\ \{v\}^2_{cm/s} \qquad \text{(overal CGS-eenheden)}$$

Verder geldt ook :

$$\{I\}_{pW/m^2} = \frac{\{p\}^2_{\mu Pa}}{400} = 400\ \{v\}^2_{\mu m/s}$$

$$\{I\}_{\mu W/cm^2} = \frac{\{p\}^2_{\mu bar}}{400} = 4\ \{v\}^2_{cm/s}$$

De referentiegrootheden I_o, P_o, p_o en v_o werden zo gekozen dat ze voldoen aan :

$$I_o = p_o \cdot v_o = \frac{p_o^2}{(\rho \cdot c)_o} = v_o^2 \cdot (\rho \cdot c)_o = \frac{P_o}{A_o}$$

waarin $A_o = 1\ m^2$ en het produkt $(\rho \cdot c)_o$ gelijk is respektievelijk aan :

$$400 \text{ SI-eenheden} \left(\frac{kg}{m^2 \cdot s} = \frac{N \cdot s}{m^3} = \frac{Pa \cdot s}{m} \right)$$

of $$40 \text{ CGS-eenheden} \left(\frac{g}{cm^2 \cdot s} = \frac{dyn \cdot s}{cm^3} = \frac{\mu bar \cdot s}{cm} \right)$$

Uit bovenstaande uitdrukkingen leidt men verder af :

$$\frac{I}{I_o} = \frac{\dfrac{p^2}{\rho \cdot c}}{\dfrac{p_o^2}{(\rho \cdot c)_o}} = \frac{p^2}{p_o^2} \cdot \frac{(\rho \cdot c)_o}{\rho \cdot c}$$

$$= \frac{v^2 \cdot \rho \cdot c}{v_o^2 \cdot (\rho \cdot c)_o}$$

$$= \frac{\dfrac{P}{A}}{\dfrac{P_o}{A_o}} = \frac{P}{P_o} \cdot \frac{A_o}{A}$$

Wanneer $\rho \cdot c$ gelijkgesteld wordt aan $(\rho \cdot c)_o$ (enkel toelaatbaar bij lucht als middenstof), geldt verder :

$$\frac{I}{I_o} = \frac{p^2}{p_o^2} = \frac{v^2}{v_o^2} = \frac{\frac{P}{P_o}}{\frac{A}{A_o}}$$

waaruit volgt : $10 \lg \frac{I}{I_o} = 20 \lg \frac{p}{p_o} = 20 \lg \frac{v}{v_o} = 10 \lg \frac{P}{P_o} - 10 \lg \frac{A}{A_o}$

$$L_I = L_p = L_v = L_P - 10 \lg \frac{A}{A_o} \text{ dB}$$

Normaal wordt alleen het geluidsdrukniveau L_p rechtstreeks gemeten, en wordt het vermogensniveau L_P berekend als volgt :

$$L_P = L_p + 10 \lg \frac{A}{A_o} \text{ dB}$$

Wanneer de oppervlakken A en A_o koncentrische boloppervlakken rondom de geluidsbron voorstellen in een akoestisch vrij veld, en de middenstof geen energie opslorpt, is het geluidsvermogen P dat doorheen elk van deze boloppervlakken gaat, gelijk aan het vermogen P van de geluidsbron. Wanneer het meetpunt zich op het boloppervlak met oppervlakte A bevindt, is de afstand van de geluidsbron tot het meetpunt gelijk aan de straal r van de betrokken bol. Voor een boloppervlakte $A_o = 1$ m^2, is de straal r_o gelijk aan 0,282 m.

Wanneer de oppervlakken A (met straal r) en A_o (met straal r_o) koncentrische boloppervlakken voorstellen, geldt (met $A_o = 1$ m^2) :

$$L_P = L_p + 10 \lg 4 \pi r^2 \text{ dB}$$

Wanneer de oppervlakken A en A_o koncentrische halve boloppervlakken voorstellen rustend op een horizontaal geluidsweerkaatsend vlak (waarbij de geluidsbron zich bevindt in het middelpunt van de cirkel die door de halve boloppervlakken wordt afgetekend op het horizontaal vlak), is het geluidsvermogen P dat door elk van deze halve boloppervlakken gaat, gelijk aan het vermogen P van de geluidsbron. Wanneer het meetpunt zich op het halve boloppervlak met oppervlakte A bevindt, is de afstand van de geluids-

Tabel IX.1. *Overeenstemmende waarden van I, p, v, L_p, L_v en L_I*

I				p			v			L_p, L_v, L_I	bij f = 1000 Hz	
$\frac{W}{m^2}$ (SI-eenheid)	$\frac{erg}{cm^2 \cdot s}$ (CGS-eenheid)	$\frac{\mu W}{cm^2}$	$\frac{pW}{m^2}$	Pa (SI-eenheid)	$\frac{dyn}{cm^2}$ = µbar (CGS-eenheid)	µPa	$\frac{m}{s}$ (SI-eenheid)	$\frac{cm}{s}$ (CGS-eenheid)	$\frac{nm}{s}$	dB	m (SI-eenheid)	cm (CGS-eenheid)
10^{1}	10^{4}	10^{3}	10^{13}	$2.10^{1,5}$	$2.10^{2,5}$	$2.10^{7,5}$	$5.10^{-1,5}$	$5.10^{0,5}$	$5.10^{7,5}$	130	$2,52.10^{-5}$	$2,52.10^{-3}$
1	10^{3}	10^{2}	10^{12}	2.10^{1}	2.10^{2}	2.10^{7}	5.10^{-2}	5	5.10^{7}	120	$7,96.10^{-6}$	$7,96.10^{-4}$
10^{-1}	10^{2}	10^{1}	10^{11}	$2.10^{0,5}$	$2.10^{1,5}$	$2.10^{6,5}$	$5.10^{-2,5}$	$5.10^{-0,5}$	$5.10^{6,5}$	110	$2,52.10^{-6}$	$2,52.10^{-4}$
10^{-2}	10^{1}	1	10^{10}	2	2.10^{1}	2.10^{6}	5.10^{-3}	5.10^{-1}	5.10^{6}	100	$7,96.10^{-7}$	$7,96.10^{-5}$
10^{-3}	1	10^{-1}	10^{9}	$2.10^{-0,5}$	$2.10^{0,5}$	$2.10^{5,5}$	$5.10^{-3,5}$	$5.10^{-1,5}$	$5.10^{5,5}$	90	$2,52.10^{-7}$	$2,52.10^{-5}$
10^{-4}	10^{-1}	10^{-2}	10^{8}	2.10^{-1}	2	2.10^{5}	5.10^{-4}	5.10^{-2}	5.10^{5}	80	$7,96.10^{-8}$	$7,96.10^{-6}$
10^{-5}	10^{-2}	10^{-3}	10^{7}	$2.10^{-1,5}$	$2.10^{-0,5}$	$2.10^{4,5}$	$5.10^{-4,5}$	$5.10^{-2,5}$	$5.10^{4,5}$	70	$2,52.10^{-8}$	$2,52.10^{-6}$
10^{-6}	10^{-3}	10^{-4}	10^{6}	2.10^{-2}	2.10^{-1}	2.10^{4}	5.10^{-5}	5.10^{-3}	5.10^{4}	60	$7,96.10^{-9}$	$7,96.10^{-7}$
10^{-7}	10^{-4}	10^{-5}	10^{5}	$2.10^{-2,5}$	$2.10^{-1,5}$	$2.10^{3,5}$	$5.10^{-5,5}$	$5.10^{-3,5}$	$5.10^{3,5}$	50	$2,52.10^{-9}$	$2,52.10^{-7}$
10^{-8}	10^{-5}	10^{-6}	10^{4}	2.10^{-3}	2.10^{-2}	2.10^{3}	5.10^{-6}	5.10^{-4}	5.10^{3}	40	$7,96.10^{-10}$	$7,96.10^{-8}$
10^{-9}	10^{-6}	10^{-7}	10^{3}	$2.10^{-3,5}$	$2.10^{-2,5}$	$2.10^{2,5}$	$5.10^{-6,5}$	$5.10^{-4,5}$	$5.10^{2,5}$	30	$2,52.10^{-10}$	$2,52.10^{-8}$
10^{-10}	10^{-7}	10^{-8}	10^{2}	2.10^{-4}	2.10^{-3}	2.10^{2}	5.10^{-7}	5.10^{-5}	5.10^{2}	20	$7,96.10^{-11}$	$7,96.10^{-9}$
10^{-11}	10^{-8}	10^{-9}	10^{1}	$2.10^{-4,5}$	$2.10^{-3,5}$	$2.10^{1,5}$	$5.10^{-7,5}$	$5.10^{-5,5}$	$5.10^{1,5}$	10	$2,52.10^{-11}$	$2,52.10^{-9}$
10^{-12}	10^{-9}	10^{-10}	1	2.10^{-5}	2.10^{-4}	2.10^{1}	5.10^{-8}	5.10^{-6}	5.10^{1}	0	$7,96.10^{-12}$	$7,96.10^{-10}$

I_o				p_o			v_o		
$\frac{W}{m^2}$ (SI-eenheid)	$\frac{erg}{cm^2 \cdot s}$ (CGS-eenheid)	$\frac{\mu W}{cm^2}$	$\frac{pW}{m^2}$	Pa (SI-eenheid)	$\frac{dyn}{cm^2}$ = µbar (CGS-eenheid)	µPa	$\frac{m}{s}$ (SI-eenheid)	$\frac{cm}{s}$ (CGS-eenheid)	$\frac{nm}{s}$
10^{-12}	10^{-9}	10^{-10}	1	2.10^{-5}	2.10^{-4}	20	5.10^{-9}	5.10^{-6}	50

Tabel IX.2. *Overeenstemmende waarden van I, , v, L_p, L_v en L_I*

I				p			v			L_p, L_v, L_I	a bij f = 1000 Hz	
$\frac{W}{m^2}$ (SI-eenheid)	$\frac{erg}{cm^2 \cdot s}$ (CGS-eenheid)	$\frac{\mu W}{cm^2}$	$\frac{pW}{m^2}$	Pa (SI-eenheid)	$\frac{dyn}{cm^2}$ = µbar (CGS-eenheid)	µPa	$\frac{m}{s}$ (SI-eenheid)	$\frac{cm}{s}$ (CGS-eenheid)	$\frac{nm}{s}$	dB	m (SI-eenheid)	cm (CGS-eenheid)
$2,5.10^{1}$	$2,5.10^{4}$	$2,5.10^{3}$	$2,5.10^{13}$	10^{2}	10^{3}	10^{8}	$2,5.10^{-1}$	$2,5.10^{1}$	$2,5.10^{8}$	134,98	$3,98.10^{-5}$	$3,98.10^{-3}$
$2,5.10^{-1}$	$2,5.10^{2}$	$2,5.10^{1}$	$2,5.10^{11}$	10^{1}	10^{2}	10^{7}	$2,5.10^{-2}$	2,5	$2,5.10^{7}$	113,98	$3,98.10^{-6}$	$3,98.10^{-4}$
$2,5.10^{-3}$	2,5	$2,5.10^{-1}$	$2,5.10^{9}$	1	10^{1}	10^{6}	$2,5.10^{-3}$	$2,5.10^{-1}$	$2,5.10^{6}$	93,98	$3,98.10^{-7}$	$3,98.10^{-5}$
$2,5.10^{-5}$	$2,5.10^{-2}$	$2,5.10^{-3}$	$2,5.10^{7}$	10^{-1}	1	10^{5}	$2,5.10^{-4}$	$2,5.10^{-2}$	$2,5.10^{5}$	73,98	$3,98.10^{-8}$	$3,98.10^{-6}$
$2,5.10^{-7}$	$2,5.10^{-4}$	$2,5.10^{-5}$	$2,5.10^{5}$	10^{-2}	10^{-1}	10^{4}	$2,5.10^{-5}$	$2,5.10^{-3}$	$2,5.10^{4}$	53,98	$3,98.10^{-9}$	$3,98.10^{-7}$
$2,5.10^{-9}$	$2,5.10^{-6}$	$2,5.10^{-7}$	$2,5.10^{3}$	10^{-3}	10^{-2}	10^{3}	$2,5.10^{-6}$	$2,5.10^{-4}$	$2,5.10^{3}$	33,98	$3,98.10^{-10}$	$3,98.10^{-8}$
$2,5.10^{-11}$	$2,5.10^{-8}$	$2,5.10^{-9}$	$2,5.10^{1}$	10^{-4}	10^{-3}	10^{2}	$2,5.10^{-7}$	$2,5.10^{-5}$	$2,5.10^{2}$	13,98	$3,98.10^{-11}$	$3,98.10^{-9}$

I_o				p_o			v_o		
$\frac{W}{m^2}$ (SI-eenheid)	$\frac{erg}{cm^2 \cdot s}$ (CGS-eenheid)	$\frac{\mu W}{cm^2}$	$\frac{pW}{m^2}$	Pa (SI-eenheid)	$\frac{dyn}{cm^2}$ = µbar (CGS-eenheid)	µPa	$\frac{m}{s}$ (SI-eenheid)	$\frac{cm}{s}$ (CGS-eenheid)	$\frac{nm}{s}$
10^{-12}	10^{-9}	10^{-10}	1	2.10^{-5}	2.10^{-4}	20	5.10^{-8}	5.10^{-6}	50

bron tot het meetpunt gelijk aan de straal r van het betrokken halve boloppervlak. Voor een oppervlakte van een half boloppervlak $A_o = 1\ m^2$, is de straal r_o gelijk aan 0,399 m ($\approx$ 0,4 m).

Wanneer de oppervlakken A (met straal r) en A_o (met straal r_o) halve boloppervlakken voorstellen, geldt (met $A_o = 1\ m^2$) :

$$L_P = L_p + 10 \lg 2 \pi r^2 \text{ dB}$$

In een gesloten ruimte gelden de voorstellingen van een bolvormig geluidsveld of een half bolvormig geluidsveld uiteraard niet meer, en dienen andere uitdrukkingen afgeleid te worden.

Voor de beschouwde gevallen is het niveau L_P van het vermogen van de geluidsbron uiteraard gelijk aan het niveau L_P van het geluidsvermogen dat doorheen elk van de beschouwde boloppervlakken (of halve boloppervlakken) gaat. Daar L_P dus in het beschouwde geval konstant is, kan men uit de uitdrukking $L_I = L_p = L_v = L_P - 10 \lg \frac{A}{A_o}$ dB afleiden, dat L_I, L_p en L_v kleiner worden naarmate A groter wordt, dus naarmate de afstand r tussen de geluidsbron en het meetpunt groter wordt. Wanneer de afstand bijvoorbeeld verdubbeld wordt, wordt de beschouwde oppervlakte 4-maal zo groot, waardoor L_I, L_p en L_v 6 dB kleiner worden (- 10 lg 4 = - 6,02). Daarom is een opgave van de waarde van L_I, L_p en L_v waardeloos indien niet aangegeven wordt hoeveel de afstand r bedraagt tussen de geluidsbron en het meetpunt.

In tabel IX.1. staan overeenstemmende waarden aangegeven van I, p, v, L_p, L_v, L_I voor geluidsintensiteiten gaande van $10\ \frac{W}{m^2}$ tot $10^{-12}\ \frac{W}{m^2}$ (waarbij iedere beschouwde waarde gelijk is aan één tiende van de voorgaande waarde). In tabel IX.2. staan overeenstemmende waarden van dezelfde grootheden vermeld voor geluidsdrukken gaande van 10^{-4} Pa tot 10^2 Pa (waarbij iedere beschouwde waarde gelijk is aan tien maal de voorgaande waarde).

Bij beide tabellen wordt aangenomen, dat $\rho \cdot c = (\rho \cdot c)_o = 400$ SI-eenheden of 40 CGS-eenheden (waardoor $L_p = L_v = L_I$).

Wanneer de waarde van de akoestische impedantie $\rho \cdot c$ slechts in geringe mate afwijkt van de referentiewaarde $(\rho \cdot c)_o$, hetgeen het geval is met lucht als middenstof, is het onderscheid tussen L_p, L_v en L_I te ver-

waarlozen. Voorbeeld : met p = 1 Pa en $\rho \cdot c$ = 413,2 $\frac{Pa \cdot s}{m}$ (lucht bij een temperatuur van 20 °C en onder normale atmosferische druk) bekomt men :

$$L_p = 10 \lg \frac{p^2}{p_o^2} \text{ dB} = 10 \lg \left(\frac{1}{2 \cdot 10^{-5}}\right)^2 \text{ dB} = 93{,}98 \text{ dB} \approx 94 \text{ dB}$$

$$L_v = 10 \lg \frac{v^2}{v_o^2} \text{ dB} = 10 \lg \left(\frac{p^2}{p_o^2} \cdot \frac{(\rho \cdot c)_o^2}{(\rho \cdot c)^2}\right) = 93{,}70 \text{ dB} \approx 94 \text{ dB}$$

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_o} \text{ dB} = 10 \lg \left(\frac{p^2}{p_o^2} \cdot \frac{(\rho \cdot c)_o}{\rho \cdot c}\right) = 93{,}84 \text{ dB} \approx 94 \text{ dB}$$

In de laatste kolom van beide tabellen is ook de overeenstemmende waarde van de (effektieve) amplitudo a aangegeven voor een toon met f = 1000 Hz). De waarde van a (voor een toon met f = 1000 Hz) is berekend met behulp van volgende uitdrukking (geldig voor een harmonische of sinusvormige trilling) :

$$a = \frac{v}{2 \pi f} = \frac{p}{2 \pi f \cdot \rho \cdot c}$$

met a = (effektieve) amplitudo van de trilling

v = (effektieve) snelheid van een trillend deeltje van de middenstof

f = frekwentie van de trilling

p = (effektieve) geluidsdruk (niet te verwarren met de luchtdruk)

ρ = soortelijke massa van de middenstof (lucht)

c = voortplantingssnelheid van het geluid in de betrokken middenstof (lucht)

2.2.8. Geluid voortkomend van verschillende geluidsbronnen

Bij een samengesteld geluid, afkomstig van verschillende geluidsbronnen, is de totale geluidsintensiteit I_{tot} gelijk aan de som van de afzonderlijke geluidsintensiteiten I_1, I_2, I_3 ... :

$$I_{tot} = I_1 + I_2 + I_3 + \ldots$$

Wanneer de afzonderlijke geluidsintensiteit van elke geluidsbron dezelfde is, geldt voor n geluidsbronnen :

$$L_{I\,tot} = 10 \lg \frac{I_{tot}}{I_o} = 10 \lg \frac{n \cdot I}{I_o}$$

$$= 10 \lg \frac{I}{I_o} + 10 \lg n = L_I + 10 \lg n$$

Het niveau van de totale geluidsintensiteit is dan gelijk aan het niveau van de geluidsintensiteit van één enkele geluidsbron, vermeerderd met 10 lg n.

Voorbeeld : gegeven : $L_I = 10 \lg \frac{I}{I_o} = 60$ dB

n = respektievelijk gelijk aan 2, 10, 100

Voor $L_{I\ tot}$ bekomt men :

bij $n = 2$ $\quad L_{I\ tot} = (60 + 10 \lg 2)$ dB = 63 dB

bij $n = 10$ $\quad L_{I\ tot} = (60 + 10 \lg 10)$ dB = 70 dB

bij $n = 100$ $\quad L_{I\ tot} = (60 + 10 \lg 100)$ dB = 80 dB

Wanneer de geluidsintensiteiten onderling verschillend zijn, geldt :

$$L_{I\ tot} = 10 \lg \left(\frac{I_1 + I_2 + I_3 + \ldots}{I_o} \right)$$

Uit $L_{I1} = 10 \lg \frac{I_1}{I_o}$ volgt :

$$\lg \frac{I_1}{I_o} = 0{,}1\ L_{I1}$$

$$\frac{I_1}{I_o} = 10^{0{,}1\ L_{I1}}$$

Derhalve bekomt men :

$$L_{I\ tot} = 10 \lg \left(\frac{I_1}{I_o} + \frac{I_2}{I_o} + \frac{I_3}{I_o} + \ldots \right)$$

$$= 10 \lg \left(10^{0{,}1\ L_{I1}} + 10^{0{,}1\ L_{I2}} + 10^{0{,}1\ L_{I3}} + \ldots \right)$$

Voorbeeld :

$L_{I1} = 90$ dB $\qquad L_{I2} = 91$ dB $\qquad L_{I3} = 93$ dB

$L_{I\ tot} = 10 \lg (10^9 + 10^{9{,}1} + 10^{9{,}3})$ dB = 96,29 dB

Wanneer het verschil in geluidsniveau tussen het grootste geluidsniveau en de overige 10 dB en meer bedraagt, is het totale geluidsniveau praktisch gelijk aan het grootste afzonderlijke geluidsniveau.

Voorbeeld :

$$L_{I1} = 60 \text{ dB} \quad L_{I2} = 70 \text{ dB} \quad L_{I3} = 80 \text{ dB}$$

$$L_{I\ tot} = 10 \lg (10^6 + 10^7 + 10^8) \text{ dB} = 80{,}45 \text{ dB}$$

2.3. Het geluid als een door het menselijk gehoor waargenomen verschijnsel (geluidsindruk)

2.3.1. Inleiding

Hier verstaat men onder geluid de zintuiglijke waarneming (geluidsindruk) die ontstaat wanneer trillende luchtdeeltjes het trommelvlies van het oor in trilling brengen. Deze zintuiglijke waarneming verschilt van persoon tot persoon en wordt dus ook anders beoordeeld van persoon tot persoon. Opdat een geluid door het menselijk oor zou kunnen waargenomen worden, dient de frekwentie ervan binnen bepaalde grenzen te liggen. De onderste grens bedraagt ongeveer 16 Hz, de bovenste grens is sterk afhankelijk van de leeftijd en varieert tussen 20 000 Hz (kinderen) en 12 000 Hz (oudere mensen). De gemiddelde bovenste grens is bij volwassenen 16 000 Hz. Het oor is het gevoeligst voor tonen met een frekwentie van 3000 Hz. De geluidstrillingen waarvan de frekwenties beneden 16 Hz liggen, worden infratonen genoemd; deze waarvan de frekwenties boven 20 000 Hz liggen dragen de naam van ultratonen.

Het menselijk gehoor interpreteert een toon met weinig trillingen per sekonde (dus met lage frekwentie) als een lage toon, en een toon met veel trillingen per sekonde (dus met hoge frekwentie) als een hoge toon. Een toon is des te hoger naarmate zijn frekwentie groter is.

Een toon wordt des te sterker waargenomen naarmate de geluidsdruk en de geluidsintensiteit (die evenredig is met het kwadraat van de geluidsdruk) groter zijn.

Men spreekt van een "zuivere toon" wanneer het geluid dat we horen, afkomstig is van een harmonisch trillende geluidsbron (zuiver sinusvormige trilling zonder vervorming) en van een "klank" wanneer naast de grondtoon, er nog andere tonen (boventonen) voorkomen waarvan de frekwentie

gehele veelvouden zijn van de grondtoon. Het "timbre" of "klankkleur" wordt bepaald door het aantal en de onderlinge sterkte van de boventonen.

"Geruis" en "lawaai" zijn op te vatten als een min of meer kontinu spektrum waarin alle frekwenties in meerdere of mindere mate aanwezig zijn.

Opdat een geluid zou kunnen waargenomen worden, dient vooreerst de frekwentie tussen de genoemde onderste en bovenste grens van de betrokken persoon te vallen. Daarbij moet de geluidsintensiteit (of de geluidsdruk) een minimumwaarde bereiken. De grootte van deze minimumwaarde is afhankelijk van de frekwentie en verschilt ook nog van persoon tot persoon. Er bestaat geen wetmatige verhouding tussen de fysisch meetbare grootheden in verband met het geluid, en de door het menselijk oor subjektief waargenomen sterkte van het geluid.

Maten voor de sterkte van de subjektieve waarneming van een geluid zijn : het luidheidsniveau of luidheidspeil L_S (uitgedrukt in foon) en de luidheid S (uitgedrukt in soon). De eenheden foon en soon, fonometrische eenheden genoemd, behoren niet tot het SI.

2.3.2. De (subjektieve) grootheid luidheidsniveau of luidheidspeil L_S (uitgedrukt in foon)

Als standaardtoon werd een zuivere toon met een frekwentie van 1000 Hz aangenomen.

De laagste geluidsdruk waarbij de standaardtoon (f = 1000 Hz) door het "gemiddeld menselijk oor" nog wordt waargenomen, bedraagt $2 \cdot 10^{-5}$ Pa ($= 20 \frac{\mu N}{m^2} = 20$ µPa $= 2 \cdot 10^{-4}$ µbar $= 2 \cdot 10^{-4} \frac{dyn}{cm^2}$).

De hoogste geluidsdruk waarbij de standaardtoon (f = 1000 Hz) door het "gemiddeld menselijk oor" nog verdragen wordt zonder een gevoel van pijn te veroorzaken (pijngrens bij f = 1000 Hz), is gelijk aan 1 000 000 maal de laagste geluidsdruk, en bedraagt 20 Pa ($= 20 \frac{N}{m^2} = 200$ µbar $= 200 \frac{dyn}{cm^2}$).

Het niveau van de laagste geluidsdruk waarbij de standaardtoon nog wordt waargenomen (gehoordrempel of hoorgrens bij f = 1000 Hz) is gelijk aan 0 dB, vermits :

$$20 \lg \frac{p}{p_o} = 20 \lg \frac{2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}}{2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}} = 20 \lg 1 = 0$$

Het niveau van de hoogste geluidsdruk waarbij de standaardtoon nog verdragen wordt zonder een gevoel van pijn te veroorzaken (pijngrens bij f = 1000 Hz), bedraagt 120 dB, vermits :

$$20 \lg \frac{p}{p_o} = 20 \lg \frac{20 \text{ Pa}}{2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}} = 20 \lg 10^6 = 120$$

Wat betreft de sterkte van de waarneming door het menselijk oor van de standaardtoon (f = 1000 Hz), wordt aan de hoorgrens (met geluidsdruk = $2 \cdot 10^{-5}$ Pa) een luidheidsniveau van 0 foon toegekend (overeenstemmend met een geluidsdrukniveau van 0 decibel bij f = 1000 Hz) en aan de pijngrens (met geluidsdruk = 20 Pa) een luidheidsniveau van 120 foon (overeenstemmend met een geluidsdrukniveau van 120 decibel bij f = 1000 Hz). Voor de tussenliggende waarden geldt voor de standaardtoon (f = 1000 Hz) verder dat het aantal foon (luidheidsniveau) steeds overeenstemt met het aantal decibel (geluidsdrukniveau). Bij f = 1000 Hz is het getal dat het aantal foon aangeeft gelijk aan het getal dat het aantal decibel aangeeft.

Het luidheidsniveau (uitgedrukt in foon) van een toon met een andere frekwentie dan de frekwentie van de standaardtoon (1000 Hz) wordt als volgt bepaald. Wanneer de betrokken toon door normaalhorende personen "even luid" beoordeeld wordt als de standaardtoon (f = 1000 Hz) met een niveau van geluidsdruk van n decibel, kent men aan het betrokken geluid een luidheidsniveau toe van n foon. Anders uitgedrukt, kan men zeggen dat het aantal foon gelijk is aan het aantal decibel dat het geluidsdrukniveau weergeeft van de voor het "gemiddeld menselijk oor" even luid klinkende standaardtoon (f = 1000 Hz).

Hieruit volgt dat het luidheidsniveau van een geluid op de hoorgrens, voor om het even welke frekwentie, gelijk is aan 0 foon. Evenzo geldt dat het luidheidsniveau van een geluid op de pijngrens, voor om het even welke frekwentie, gelijk is aan 120 foon.

Er is gebleken dat wanneer een geluid met een andere frekwentie dan 1000 Hz door het "gemiddeld menselijk oor" even luid beoordeeld wordt als een zuivere toon met een frekwentie van 1000 Hz, beide geluidsdrukken en bijgevolg ook beide geluidsdrukniveaus onderling sterk van elkaar kunnen verschillen. In deze gevallen zijn de luidheidsniveaus onderling gelijk (evenveel foon in beide gevallen), doch de geluidsdrukniveaus zijn onderling verschillend (een verschillend aantal decibel). Alleen als het gaat om de standaardtoon (f = 1000 Hz), stemt het aantal decibel steeds overeen met het aantal foon.

In figuur IX.1. geven de curven van gelijk luidheidsniveau (isofonen) in afhankelijkheid van de frekwentie, de geluidsdruk (of het geluidsdrukniveau) aan waarbij men de indruk krijgt van een even sterke geluidswaarneming.

Uitgaande van de standaardtoon van 1000 Hz met een bepaald geluidsdrukniveau, werd dus bepaald hoe groot de geluidsdruk (of het geluidsdrukniveau) van tonen met andere frekwenties moet zijn opdat die tonen als "even luid" zouden waargenomen worden. De betrokken curven (isofonen) gelden voor normaalhorende personen tussen 18 en 25 jaar. Uit de figuur blijkt dat voor tonen met frekwenties die merkelijk lager zijn dan 1000 Hz, een merkelijk grotere geluidsdruk vereist is dan bij de standaardtoon, opdat beide tonen als "even luid" zouden waargenomen worden door het "gemiddeld menselijk oor".

Nemen we als voorbeeld een toon met f = 100 Hz en de volgende overeenstemmende waarden van geluidsdruk p, snelheid v (van een trillend deeltje) en geluidsintensiteit I :

$p = 2 \cdot 10^{-3,5}$ Pa $\approx 6{,}325 \cdot 10^{-4}$ Pa

$v = 5 \cdot 10^{-6,5}$ m/s $\approx 1{,}581 \cdot 10^{-6}$ m/s

$I = 10^{-9}$ W/m^2

Indien $\rho \cdot c$ gelijkgesteld wordt aan $(\rho \cdot c)_o$; is $L_p = L_v = L_I = 30$ dB. Uit figuur IX.1. blijkt, dat hiermede een luidheid overeenstemt van 10 foon. Dit betekent dat de betrokken toon even sterk wordt waargenomen als een toon met f = 1000 Hz en de volgende overeenstemmende waarden van geluidsdruk p, snelheid v (van een trillend deeltje) en geluidsintensiteit I :

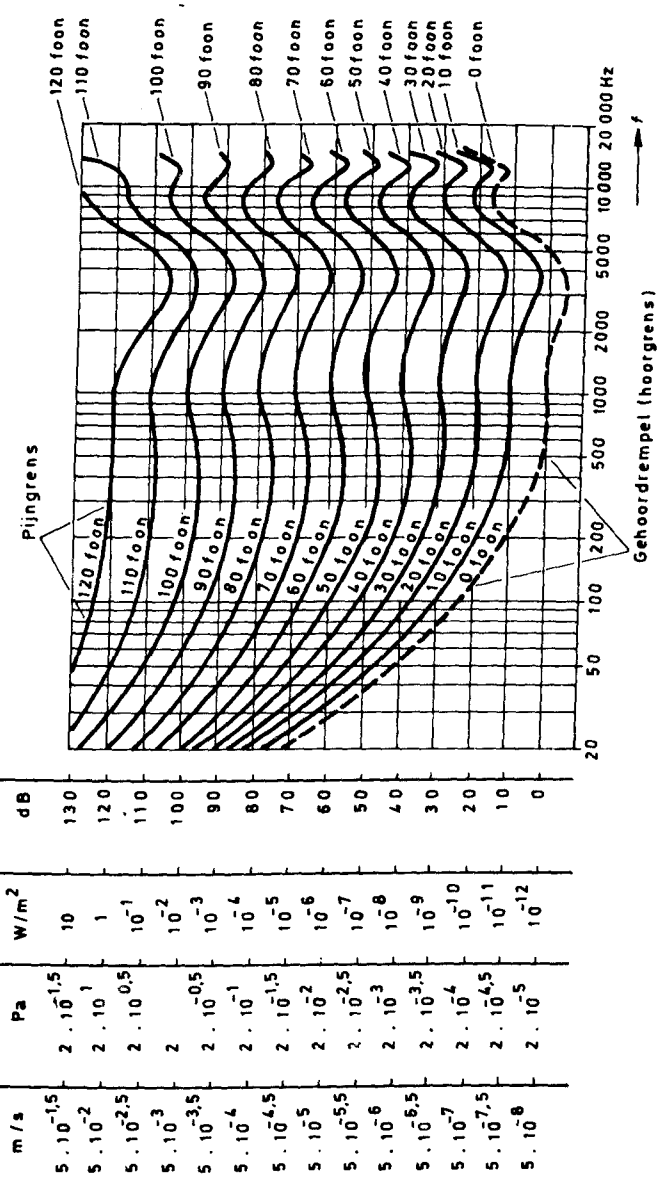


FIG. IX.1. LIJNEN VAN GELIJKE LUIDHEID (ISOFONEN)

$p = 2 \cdot 10^{-4,5}$ Pa $\approx 6,325 \cdot 10^{-5}$ Pa
$v = 5 \cdot 10^{-7,5}$ m/s $\approx 1,581 \cdot 10^{-7}$ m/s
$I = 10^{-11}$ W/m^2

Een verschil in luidheidsniveau van 1 foon is nauwelijks nog waarneembaar door het menselijk oor; derhalve is het onnodig, breukdelen (decimalen) op te geven.

In het algemeen geldt dat voor alle frekwenties die niet gelijk zijn aan 1000 Hz, het aantal foon (luidheidsniveau) en het aantal decibel (geluidsdrukniveau) betreffende eenzelfde geluid, niet aan elkaar gelijk zijn. Uit de geluidsdruk (uitgedrukt bijvoorbeeld in Pa) of het geluidsdrukniveau (uitgedrukt in dB) kan men nog niet het luidheidsniveau (uitgedrukt in foon) bepalen, tenzij ook de frekwentie van het betrokken geluid gekend is.

Zelfs al is de geluidsdruk (uitgedrukt bijvoorbeeld in Pa) of het geluidsdrukniveau (uitgedrukt in dB) van een geluid met een bepaalde frekwentie even groot als de geluidsdruk of het geluidsdrukniveau van een geluid met een andere frekwentie, toch neemt het menselijk oor beide geluiden niet als even luid waar.

Wanneer men het luidheidsniveau wil bepalen, niet van een toon met een bepaalde frekwentie doch van een geluid waarin verschillende frekwenties voorkomen, gaat men te werk op een analoge wijze als bij het bepalen van het luidheidsniveau van een toon. Wanneer het betrokken geluid door normaalhorende personen "even luid" beoordeeld wordt als de standaardtoon (f = 1000 Hz) met een geluidsdrukniveau van n decibel, kent men aan het betrokken geluid een luidheidsniveau toe van n foon.

2.3.3. De subjektieve grootheid luidheid S (uitgedrukt in soon)

Het luidheidsniveau blijkt nog niet voldoende om verschillen in luidheid aan te geven. Daarom werd de subjektieve grootheid luidheid S ingevoerd.

De luidheid S is evenredig met de sterkte van de waarneming van een normaal horende persoon. De luidheid wordt uitgedrukt in soon. De luidheid is per definitie gelijk aan 1 soon wanneer het luidheidsniveau 40 foon bedraagt. Aan een geluid dat als "dubbel zo luid" waargenomen wordt, kent men een luidheid toe van 2 soon.

Een verdubbeling van de luidheid stemt ongeveer overeen met een verhoging van het luidheidsniveau met 10 foon. Dus bij een luidheidsniveau van 50 en 60 foon, zal de luidheid gelijk zijn aan respektievelijk 2 en 4 soon.

In het algemeen geldt als benaderende uitdrukking (met S = luidheid in soon, en L_S = luidheidsniveau in foon) :

$$S = 2^{0,1\ (L_S - 40)}$$

waaruit :

$$\lg S = 0,1\ (L_S - 40)\ \lg 2$$

$$= 0,030\ 103\ .\ (L_S - 40)$$

In tabel IX.3. vindt men enkele overeenstemmende waarden van luidheidsniveau L_S in foon en luidheid S in soon, afgeleid uit bovenstaande uitdrukking.

Onder een luidheidsniveau van 40 foon stemt bovenstaande uitdrukking minder goed overeen met de subjektieve waarneming. Eigenlijk zou het verband tussen het luidheidsniveau in foon en de luidheid in soon, experimenteel moeten bepaald worden. Het resultaat van een dergelijke experimentele bepaling vindt men in figuur IX.2., waarvan de onderlinge overeenstemmende waarden weinig afwijken van de waarden uit tabel IX.3.

3. Geluidsmeting in de praktijk met behulp van geluidspeilmeters (geluidsniveaumeters)

Het is niet mogelijk een toestel voor geluidsmeting te ontwerpen dat, voor alle soorten van geluid, resultaten zou geven die volkomen vergelijkbaar zijn met de resultaten bekomen door rechtstreekse subjektieve metoden. Dit is te wijten aan de ingewikkelde werking van het menselijk

Tabel IX.3. *Verband tussen luidheid S (uitgedrukt in soon) en luidheidsniveau L_S (uitgedrukt in foon) volgens de uitdrukking :*

$S = 2^{0,1(L_S-40)}$

luidheidsniveau L_S (foon)	luidheid S (soon)
20	0,250
25	0,354
30	0,500
35	0,707
40	1,00
45	1,41
50	2,00
55	2,83
60	4,00
65	5,66
70	8,00
75	11,3
80	16,0
85	22,6
90	32,0
95	45,3
100	64,0
105	90,5
110	128
115	181
120	256
125	362
130	512

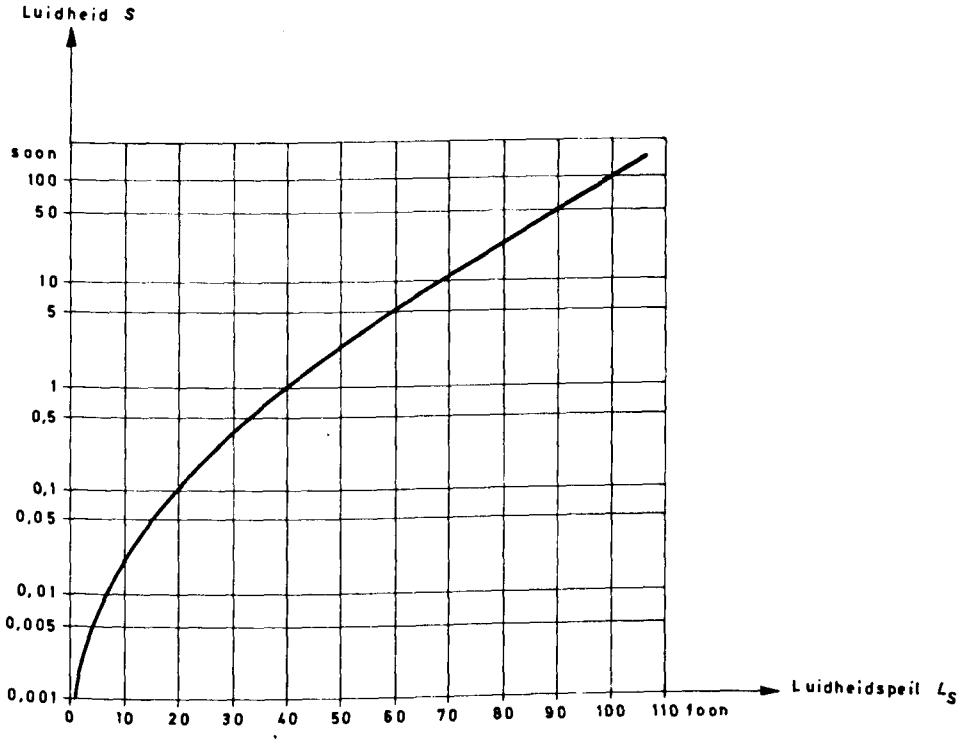


FIG. IX 2. VERBAND (EXPERIMENTEEL BEPAALD) TUSSEN HET LUIDHEIDSPEIL (IN FOON) EN DE LUIDHEID (IN SOON)

oor en aan de moeilijkheid een gewaarwording (geluidsindruk) kwantitatief met behulp van een meettoestel (zonder tussenkomst van het menselijk oor) te meten.

Toch is het noodzakelijk over een toestel te beschikken dat toelaat metingen te verrichten onder bepaalde voorwaarden, zodanig dat de bekomen resultaten steeds rechtstreeks vergelijkbaar zijn. Een dergelijk toestel wordt geluidspeilmeter genoemd; een toestel dat bestemd is voor laboratoriummetingen en voor precisiemetingen wordt precisiegeluidspeilmeter genoemd.

Een geluidspeilmeter bestaat meestal uit een mikrofoon, een versterker, bepaalde filternetten (wegingsnetten) en een aanwijzend of registrerend meetinstrument. De mikrofoon heeft tot taak de trillingen van de lucht, die het oor als geluid waarneemt en die zich aan de mikrofoon als drukvariaties manifesteren, om te zetten in een elektrisch signaal. Met behulp van de filternetten tracht men de metingen enigermate aan te passen aan de eigenschappen van het menselijk oor. Vaak is men immers vooral geïnteresseerd in de indruk, die de mens van het betrokken geluid heeft. Een probleem vormt daarbij echter, nog afgezien van de subjektieve en dus onmeetbare waardering van ieder mens voor een bepaald geluid, de sterk niet-lineaire karakteristiek van het menselijk oor : het oor is niet voor alle frekwenties in het hoorbare gebied (van 16 Hz tot ongeveer 20 000 Hz) even gevoelig en bovendien hangt het verschil in gevoeligheid voor uiteenlopende frekwenties af van het geluidsdrukniveau. Om het resultaat van de meting in ieder geval enigszins hieraan tegemoet te laten komen, neemt men in het meetsysteem filternetwerken op, waarvan de doorlaatkarakteristiek in meerdere of mindere mate de grafiek benadert die voor een geluid van een bepaald geluidsdrukniveau de gevoeligheid van het oor in funktie van de frekwentie weergeeft. Een aantal van deze karakteristieken zijn internationaal genormaliseerd. Aldus onderscheidt men de referentiecurven A, B en C. De betrokken curven geven weer, welke wegingsfaktor (korrektiefaktor) toegekend is aan elke sinusvormige komponent van de geluidsdruk in funktie van de frekwentie. Hoewel de curven A, B en C rekening houden met sommige eigenschappen van het oor, moeten zij als louter konventioneel worden beschouwd.

De grootheid gemeten met een geluidspeilmeter wordt geluidspeil of geluidsniveau genoemd en voorgesteld door L.

Om aan te duiden volgens welke wegingscurve de meting gebeurd is, wordt na de aanduiding dB tussen haakjes respektievelijk de letter A, B of C geplaatst; aldus onderscheidt men dB (A), dB (B) en dB (C). Ook kan men de letter A, B of C plaatsen als index bij het symbool L.

Voorbeelden : L = 50 dB (A)

L_A = 50 dB

De wegingscurve A wordt het meest gebruikt; ze komt het best overeen met de gevoeligheidscurve van het menselijk oor bij lage geluidsdrukniveaus.

In tabel IX.4. staat de relatieve gevoeligheid voor verschillende frekwenties aangegeven van een precisiegeluidspeilmeter, metend met inachtname van respektievelijk de wegingscurven A, B en C. Elk van de opgegeven frekwenties duidt eigenlijk een smalle band van frekwenties aan waarin de betrokken frekwentie gelegen is.

Een voorbeeld zal duidelijk maken waaruit de relatieve gevoeligheid eigenlijk bestaat, zie tabel IX.5. Nemen we een geluid dat slechts de opgegeven banden bevat (1ste lijn), met per band een werkelijk geluidsdrukniveau zoals aangegeven (2de lijn). In de 3de lijn wordt de uitgevoerde korrektie volgens curve A opgegeven. In de 4de lijn bekomt men dan per band het volgens curve A gekorrigeerd geluidsdrukniveau (geluidspeil of geluidsniveau genoemd).

Een geluidspeilmeter zonder korrektie zou (afgerond) 61,5 dB aanduiden; dit kan men als volgt berekenen :

$L = 10 \lg (10^{5,02} + 10^{5,61} + 10^{5,77} + 10^{5,22} + 10^{4,9} + 10^{4,68} + 10^{4,1} + 10^{3,01})$

$= 61,49$ dB

Het resultaat van een geluidsmeting zonder korrektie wordt "lineair" geluidspeil genoemd.

Een geluidspeilmeter werkend volgens de wegingscurve A zou (afgerond) 55,2 dB (A) aanduiden; dit kan men berekenen als volgt :

$L_A = 10 \lg (10^{2,4} + 10^{4,0} + 10^{4,91} + 10^{4,9} + 10^{4,9} + 10^{4,8} + 10^{4,2} + 10^{2,9})$

$= 55,19$ dB

Anders voorgesteld : $L = 55,19$ dB (A)

Tabel IX.4. *Relatieve gevoeligheid in vrij geluidsveld*

frekwentie Hz	curve A dB	curve B dB	curve C dB
10	- 70,4	- 38,2	- 14,3
12,5	- 63,4	- 33,2	- 11,2
16	- 56,7	- 28,5	- 8,5
20	- 50,5	- 24,2	- 6,2
25	- 44,7	- 20,4	- 4,4
31,5	- 39,4	- 17,1	- 3,0
40	- 34,6	- 14,2	- 2,0
50	- 30,2	- 11,6	- 1,3
63	- 26,2	- 9,3	- 0,8
80	- 22,5	- 7,4	- 0,5
100	- 19,1	- 5,6	- 0,3
125	- 16,1	- 4,2	- 0,2
160	- 13,4	- 3,0	- 0,1
200	- 10,9	- 2,0	0
250	- 8,6	- 1,3	0
315	- 6,6	- 0,8	0
400	- 4,8	- 0,5	0
500	- 3,2	- 0,3	0
630	- 1,9	- 0,1	0
800	- 0,8	0	0
1 000	0	0	0
1 250	0,6	0	0
1 600	1,0	0	- 0,1
2 000	1,2	- 0,1	- 0,2
2 500	1,3	- 0,2	- 0,3
3 150	1,2	- 0,4	- 0,5
4 000	1,0	- 0,7	- 0,8
5 000	0,5	- 1,2	- 1,3
6 300	- 0,1	- 1,9	- 2,0
8 000	- 1,1	- 2,9	- 3,0
10 000	- 2,5	- 4,3	- 4,4
12 500	- 4,3	- 6,1	- 6,2
16 000	- 6,6	- 8,4	- 8,5
20 000	- 9,3	- 11,1	- 11,2

Tabel IX.5. *Voorbeeld van berekening van een volgens curve* A *gekorrigeerd geluidsdrukniveau*

band	Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
werkelijk geluidsdrukniveau per band	dB	50,2	56,1	57,7	52,2	49,0	46,8	41,0	30,1
A-korrektie	dB	-26,2	-16,1	-8,6	-3,2	0,0	+1,2	+1,0	-1,1
gekorrigeerd geluidsdrukniveau	dB	24,0	40,0	49,1	49,0	49,0	48,0	42,0	29,0

Op overeenstemmende wijze kan men verder berekenen (rekening houdend met de korrekties opgegeven in tabel IX.4.) :

$L_B = 10 \lg (10^{4,09} + 10^{5,19} + 10^{5,64} + 10^{5,19} + 10^{4,9} + 10^{4,67} + 10^{4,03} + 10^{2,72})$

$= 59,52$ dB

Anders voorgesteld : $L = 59,52$ dB (B)

$L_C = 10 \lg (10^{4,94} + 10^{5,59} + 10^{5,77} + 10^{5,22} + 10^{4,9} + 10^{4,66} + 10^{4,02} + 10^{2,71})$

$= 61,36$ dB

Anders voorgesteld : $L = 61,36$ dB (C)

Sommige geluidspeilmeters zijn zodanig uitgerust, dat ze zowel het lineair geluidspeil als het geluidspeil gekorrigeerd respektievelijk volgens de wegingscurve A, B en C kunnen weergeven.

HOOFDSTUK X

WETTELIJKE EENHEDEN : SI-EENHEDEN EN ANDERE BLIJVEND ERKENDE EENHEDEN

1. Inleiding

In 1960 werd door de 11de CGPM de benaming "Internationaal Eenhedenstelsel" met als internationaal aanvaard symbool SI (Système International d'Unités) toegekend aan een eenhedenstelsel dat op dat tijdstip 6 grondeenheden bevatte, namelijk : m, kg, s, A, °K (sinds 1968 : K), cd; in 1971 wordt door de 14de CGPM ook de eenheid mol als grondeenheid aangenomen.

De eenheden van het betrokken eenhedenstelsel worden SI-eenheden (F : Unités SI; E : SI Units; D : SI-Einheiten) genoemd. Gezien de oorsprong en betekenis van het symbool SI, spreekt men niet van het "SI-eenhedenstelsel" doch wel van het SI (S = Système (F) = stelsel).

Krachtens Richtlijn 80/181/EEG van 20 december 1979 inzake de onderlinge aanpassing van de wetgevingen van de lidstaten van de Europese Ekonomische Gemeenschap op het gebied van de meeteenheden, gewijzigd door Richtlijn 85/1/EEG van 18 december 1984, dienen al de lidstaten van de Europese Ekonomische Gemeenschap (EEG) hun wetgevingen in volgende zin aan te passen :

- moet verplicht worden gesteld, het uitsluitend gebruik van de SI-eenheden en hun decimale veelvouden en delen, alsook van enkele andere blijvend erkende eenheden die niet tot het SI behoren; deze verplichting heeft betrekking (volgens Richtlijn 80/181/EEG) op de meetmiddelen die worden gebruikt, op de metingen die worden verricht en op de aanduidingen van in eenheden uitgedrukte grootheden in het ekonomische verkeer en op de gebieden van volksgezondheid en veiligheid, alsmede op handelingen van bestuursrechtelijke aard;
- een aantal eenheden die tijdelijk worden erkend, vervallen uiterlijk op 31 december 1985 (door de lidstaten kan hiervoor eventueel een vroegere datum worden vastgelegd);

- een aantal Angelsaksische eenheden blijven tijdelijk erkend in die lidstaten waarin deze eenheden op 21 april 1973 waren toegestaan, en zulks tot een door de lidstaten vast te stellen datum; deze datum mag een door de Raad vóór 31 december 1989 op basis van artikel 100 van het Verdrag van Rome vastgestelde einddatum niet overschrijden.

Hoewel de betrokken EEG-richtlijnen in de nationale wetgeving van de EEG-lidstaten dienen opgenomen te worden, komen er in de respektieve nationale wetgevingen toch nog kleine verschillen voor wat betreft de naast het SI erkende eenheden. Een opsomming van de wetten en besluiten die de betrokken nationale wetgeving uitmaken in België en Nederland, wordt gegeven in Hoofdstuk I, respektievelijk onder 2.1.1. en 2.2.1.

De betrokken EEG-richtlijnen stemmen ook niet helemaal overeen met de aanbevelingen van enerzijds de CGPM, het CIPM, het BIPM en anderzijds de ISO (steeds wat betreft de naast het SI erkende eenheden).

De EEG-richtlijn 80/181/EEG van 20 december 1979 laat onverlet het gebruik op het gebied van de scheepvaart, de luchtvaart en het spoorwegverkeer van andere dan de verplicht gestelde eenheden, wanneer deze (andere) eenheden zijn vastgesteld bij voor de Gemeenschap of de lidstaten bindende internationale overeenkomsten of verdragen.

In onderhavig hoofdstuk worden de SI-eenheden en hun decimale veelvouden en delen behandeld alsook de blijvend erkende eenheden die niet tot het SI behoren.

De eenheden die vervallen zijn respektievelijk op 31 december 1977, 31 december 1979 en 31 december 1985, de in bepaalde landen tijdelijk erkende Angelsaksische eenheden en een aantal internationaal verspreide doch door de EEG niet erkende eenheden, worden behandeld in Hoofdstuk XII.

2. SI-eenheden en hun decimale veelvouden en delen

2.1. SI-grondeenheden en aanvullende eenheden, definities

Het SI heeft als grondslag 7 basisgrootheden, waarvan de eenheden grondeenheden genoemd worden :

basisgrootheid	grondeenheid	
	benaming	symbool
lengte	meter	m
massa	kilogram	kg
tijd	sekonde	s
elektrische stroom	ampère	A
termodynamische temperatuur	kelvin (vóór 1968 : graad Kelvin)	K (vóór 1968 : °K)
hoeveelheid stof	mol	mol
lichtsterkte	candela	cd

Daarnaast bevat het SI 2 aanvullende (of supplementaire) eenheden (11de CGPM - 1960 - resolutie 12) :

- de radiaal (rad) als eenheid van vlakke hoek
- de steradiaal (sr) als eenheid van ruimtehoek

De definities van de SI-grondeenheden en van de aanvullende (of supplementaire) SI-eenheden luiden als volgt :

☆ *Eenheid van lengte* : m

De meter is gelijk aan de lengte van de weg die het licht in vacuüm aflegt in een tijd van $\frac{1}{299\ 792\ 458}$ sekonde.
(17de CGPM - 1983 - resolutie 1)

☆ *Eenheid van massa* : kg

Het kilogram is de eenheid van massa; het is gelijk aan de massa van het internationale prototype van het kilogram.
(3de CGPM - 1901 - blz. 70 van de acta)

☆ *Eenheid van tijd* : s

De sekonde is de tijdsduur van 9 192 631 770 perioden van de straling overeenkomend met de overgang tussen de twee hyperfijnniveaus van de grondtoestand van het atoom cesium 133.
(13de CGPM - 1967 - resolutie 1)

☆ *Eenheid van elektrische stroom* : A

De ampère is de konstante stroom die, indien hij wordt onderhouden in twee evenwijdige, rechtlijnige en oneindig lange geleiders van te verwaarlozen cirkelvormige doorsnede, welke geplaatst zijn in het luchtledige op een onderlinge afstand van 1 meter, tussen deze twee geleiders een kracht veroorzaakt gelijk aan 2×10^{-7} newton voor iedere meter lengte.

(CIPM - 1946 - resolutie 2, goedgekeurd door de 9de CGPM - 1948)

☆ *Eenheid van termodynamische temperatuur* : K

De kelvin, eenheid van termodynamische temperatuur, is het 1/273,16 gedeelte van de termodynamische temperatuur van het tripelpunt van water.

(13de CGPM - 1967 - resolutie 4)

☆ *Eenheid van hoeveelheid stof* : mol

De mol is de hoeveelheid stof van een systeem dat evenveel elementaire entiteiten bevat als er atomen zijn in 0,012 kilogram koolstof 12. Bij gebruikmaking van de mol moeten de elementaire entiteiten worden gespecificeerd; deze kunnen atomen, molekulen, ionen, elektronen, andere deeltjes of bepaalde groeperingen van dergelijke deeltjes zijn.

(14de CGPM - 1971 - resolutie 3)

☆ *Eenheid van lichtsterkte* : cd

De candela is de lichtsterkte, in een gegeven richting, van een bron die een monochromatische straling met een frekwentie van 540.10^{12} hertz uitzendt en waarvan de stralingssterkte in die richting 1/683 watt per steradiaal is.

(16de CGPM - 1979 - resolutie 3)

☆ *Eenheid van vlakke hoek* : rad

De radiaal is de vlakke hoek tussen twee stralen van een cirkel, die op de omtrek een boog afsnijden waarvan de lengte gelijk is aan die van de straal.

(ISO 31/1 - 1978)

☆ *Eenheid van ruimtehoek* : sr

De steradiaal is de ruimtehoek die, wanneer zijn top samenvalt met het

middelpunt van een bol, op die bol een oppervlakte uitsnijdt gelijk aan die van een vierkant met de straal van de bol als zijde.
(ISO 31/1 - 1978)

Wat betreft de aanvullende eenheden radiaal en steradiaal, komt op blz. 42 van de 5de uitgave (1985) van de brochure "Le Système International d'Unités (SI)" (uitgegeven door het BIPM te Sèvres bij Parijs) volgende tekst voor :

CIPM, 1980

Unités SI supplémentaires (radian et stéradian)

Le Comité International des Poids et Mesures,

considérant

- *que les unités radian et stéradian sont introduites usuellement dans des expressions des unités pour des besoins de clarification, notamment en photométrie où le stéradian joue un rôle important pour distinguer les unités correspondant aux diverses grandeurs,*
- *que dans les équations utilisées on exprime généralement l'angle plan comme le rapport entre deux longueurs et l'angle solide comme le rapport entre une aire et le carré d'une longueur, et que par conséquent ces grandeurs sont traitées comme des grandeurs sans dimension,*
- *que l'étude des formalismes en usage dans le domaine scientifique montre qu'il n'en existe aucun qui soit à la fois cohérent et convenable, et dans lequel les grandeurs angle plan et angle solide soient considérées comme des grandeurs de base,*

considérant aussi

- *que l'interprétation donnée par le Comité International des Poids et Mesures (CIPM) en 1969 pour la classe des unités supplémentaires introduite dans la Résolution 12 de la 11e Conférence Générale des Poids et Mesures en 1960 laisse la liberté de traiter le radian et le stéradian comme unités de base dans le Système International,*
- *qu'une telle possibilité compromet la cohérence interne du Système International fondé sur sept unités de base seulement,*

décide d'interpréter la classe des unités supplémentaires dans le Système International comme une classe d'unités dérivées sans dimension pour lesquelles la Conférence Générale des Poids et Mesures laisse la liberté de les utiliser ou non dans les expressions des unités dérivées du Système International.

De herkomst, geschiedenis en definitie van de opgesomde 7 SI-grondeenheden werden hoger (samen met vele andere niet tot het SI behorende eenheden) reeds uitvoerig behandeld :

- meter, kilogram en sekonde : zie Hoofdstuk III, onder :
  2.1. Oorsprong van de meter en het kilogram en hun verdere ontwikkeling
  3.1. De middelbare zonnedag en een eerste definitie van de sekonde
  3.6. Een tweede definitie van de sekonde; efemeridentijd
  3.7. Een derde definitie van de sekonde; atoomtijd en internationale atoomtijd
- ampère : zie Hoofdstuk IV, onder :
  1. "Absolute praktische elektrische eenheden" (1881), kwadrantstelsel (KS)
  2. "Internationale" elektrische eenheden (1908)
  3. "Absolute" elektrische eenheden (1948); Giorgi- of MKSA-stelsel
  4. Geschiedenis van de ampère
- kelvin : zie Hoofdstuk V, onder :
  1.5. Termodynamische temperatuur
- mol : zie Hoofdstuk VI, onder :
  4.1. De eenheid mol als een chemische massagrootheid en als een fysische massagrootheid
  4.3. De mol als eenheid van hoeveelheid stof (definitie van 1957)
  5. Huidige definitie van de eenheid mol
  12. Samenvatting van de geschiedenis van de mol
- candela : zie Hoofdstuk VII, onder :
  2.2.2. Konventies waarop het invoeren van de fotometrische grootheden is gesteund
  2.2.9. Geschiedenis van de candela

De aanvullende SI-eenheden radiaal en steradiaal werden (samen met vele andere niet tot het SI behorende eenheden van vlakke hoek en van ruimte-

hoek) hoger ook reeds uitvoerig behandeld, zie Hoofdstuk VIII, onder :
2.1. SI-eenheid van vlakke hoek : de radiaal (rad)
3.1. SI-eenheid van ruimtehoek : de steradiaal (sr)

2.2. Afgeleide SI-eenheden

2.2.1. Wijze waarop afgeleide SI-eenheden worden bekomen

De afgeleide eenheden van het SI worden uit de definities van de afgeleide grootheden (zie Hoofdstuk II,onder 4.) verkregen als produkten van (positieve en negatieve) machten van grondeenheden (en eventueel ook van aanvullende eenheden). Ze vormen samen met de grondeenheden en de aanvullende eenheden, een koherent stelsel met betrekking tot de vergelijkingen die aan het stelsel ten grondslag liggen. Dit zijn in hoofdzaak :
- de vergelijkingen van de meetkunde
- de vergelijkingen van de kinematika
- de vergelijkingen van de mechanika
- de vergelijkingen van de termodynamika
- de gerationaliseerde vergelijkingen van de elektriciteitsleer
- de vergelijkingen van de fysische chemie en van de molekulaire fysika
- de vergelijkingen van de fotometrie, waarvan de grootheden via de internationale ooggevoeligheidscurve samenhangen met de korresponderende stralingsgrootheden.

Het begrip "koherente eenheden", en het nut van het gebruik van algemene groothedenvergelijkingen en een koherent eenhedenstelsel zijn uiteengezet in Hoofdstuk II, respektievelijk onder 5. en 8.

De opbouw van het SI werd behandeld in Hoofdstuk II, onder 9.

2.2.2. Afgeleide SI-eenheden met een eigen benaming

Een aantal koherente afgeleide eenheden kregen een eigen naam en een eigen symbool. Men kan deze namen gebruiken in plaats van de overeenstemmende samenstelling van namen van grondeenheden. Hetzelfde geldt voor de symbolen. Hierna volgt een overzicht van de afgeleide SI-eenheden waaraan een eigen benaming werd toegekend.

grootheid	eigen naam en eigen symbool van de eenheid		weergave in andere SI-eenheden	weergave in SI-grond-eenheden en aanvullende SI-eenheden
	naam	symbool		
frekwentie	hertz	Hz		$\frac{1}{s} = s^{-1}$
kracht	newton	N		$\frac{kg \cdot m}{s^2}$
druk, spanning	pascal	Pa	$\frac{N}{m^2}$	$\frac{kg}{m \cdot s^2}$
energie (arbeid, warmte)	joule	J	$N \cdot m$	$\frac{kg \cdot m^2}{s^2}$
vermogen, energieflux	watt	W	$\frac{J}{s}$	$\frac{kg \cdot m^2}{s^3}$
hoeveelheid elektriciteit elektrische lading	coulomb	C		$A \cdot s$
elektrische spanning elektrische potentiaal	volt	V	$\frac{W}{A}$	$\frac{kg \cdot m^2}{A \cdot s^3}$
elektrische weerstand	ohm	Ω	$\frac{V}{A}$	$\frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^3}$
elektrische geleiding	siemens	S	$\frac{A}{V}$	$\frac{A^2 \cdot s^3}{kg \cdot m^2}$
elektrische kapaciteit	farad	F	$\frac{C}{V}$	$\frac{A^2 \cdot s^4}{kg \cdot m^2}$
magnetische flux	weber	Wb	$V \cdot s$	$\frac{kg \cdot m^2}{A \cdot s^2}$
magnetische induktie · magnetische fluxdichtheid	tesla	T	$\frac{Wb}{m^2}$	$\frac{kg}{A \cdot s^2}$
elektrische induktantie	henry	H	$\frac{Wb}{A}$	$\frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^2}$
lichtflux	lumen	lm		$cd \cdot sr$
verlichtingssterkte	lux	lx	$\frac{lm}{m^2}$	$\frac{cd \cdot sr}{m^2}$
aktiviteit (ioniserende straling)	becquerel	Bq		$\frac{1}{s} = s^{-1}$
geabsorbeerde dosis, soortelijke energieoverdracht, kerma, index van geabsorbeerde dosis	gray	Gy	$\frac{J}{kg}$	$\frac{m^2}{s^2}$
dosisekwivalent	sievert	Sv	$\frac{J}{kg}$	$\frac{m^2}{s^2}$

Opmerkingen

☆ Wat betreft de eenheid graad Celsius (°C) als SI-eenheid van (termodynamische) celsiustemperatuur, zie Hoofdstuk V, onder 1.6.

☆ In de elektriciteitsleer komen volgende eigen namen voor van de eenheid van vermogen :

- volt ampère, symbool V . A (meestal geschreven als VA), voor het uitdrukken van het schijnbaar vermogen van elektrische wisselstroom (1 VA = 1 V . 1 A = 1 W);
- var, symbool eveneens var, voor het uitdrukken van het reaktief vermogen (1 var = 1 V . 1 A = 1 W). De benaming "var" komt niet voor in de CGPM-resoluties.

☆ Op de keper beschouwd zijn vierkante meter en kubieke meter ook eigen benamingen respektievelijk voor de eenheden "meter-kwadraat" en "meter tot de derde"; aan deze eigen benamingen werd echter geen eigen symbool toegekend.

☆ Afgeleide eenheden die geen eigen benaming hebben gekregen, kunnen worden uitgedrukt :

- ofwel uitsluitend in SI-grondeenheden en aanvullende SI-eenheden;
- ofwel eventueel door het gemengd gebruik van SI-eenheden, aanvullende SI-eenheden en afgeleide SI-eenheden met een eigen benaming.

Voorbeeld : de SI-eenheid van dynamische viskositeit kan worden uitgedrukt in :

$$\frac{kg}{m \cdot s} \quad \text{of} \quad \frac{N \cdot s}{m^2} \quad \text{of Pa . s}$$

2.3. Overzicht van enkele (niet-elektrische) grootheden en hun respektieve SI-eenheden

grootheid	symbool	SI-eenheid
lengte	l, (L)	m
breedte	b	m
hoogte	h	m
dikte	d, δ	m
straal	r	m
diameter	d	m
weglengte	s	m

massa	m	kg
tijd	t	s
oppervlakte	A, (S)	m^2
volume, inhoud	V	m^3
soortelijke massa, volumieke massa	ρ	$\frac{kg}{m^3}$
soortelijk volume	v	$\frac{m^3}{kg}$
snelheid	u, v, w, c	$\frac{m}{s}$
versnelling	a	$\frac{m}{s^2}$
versnelling van de vrije val, zwaarteveldsterkte	g	$\frac{m}{s^2}$, $\frac{N}{kg}$
(vlakke) hoek	α , β, γ, ...	rad
ruimtehoek	Ω, ω	sr
hoeksnelheid	ω	$\frac{rad}{s}$
hoekversnelling	α	$\frac{rad}{s^2}$
rotatiefrekwentie	n	s^{-1} (= Hz)
golflengte	λ	m
periode(duur), trillingstijd	T	s
frekwentie	f, ν	s^{-1} = Hz
pulsatie, cirkelfrekwentie	ω	s^{-1}
kracht	F	N
druk, spanning	p	Pa
moment van een kracht	M	N . m
moment van een koppel	T	N . m
massatraagheidsmoment	I, J	kg . m^2
hoeveelheid beweging	p	$\frac{kg \cdot m}{s}$
volumestroom	q_v	$\frac{m^3}{s}$
massastroom	q_m	$\frac{kg}{s}$
dynamische viskositeit	η	Pa . s
kinematische viskositeit	ν	$\frac{m^2}{s}$
energie	E, (W)	J

arbeid	W, (A)	J
potentiële energie	E_p	J
kinetische energie	E_k	J
hoeveelheid warmte	Q	J
warmtestroom	Φ	W
termodynamische temperatuur	T	K
celsiustemperatuur	t, θ, ϑ	°C
warmtegeleidingskoëfficiënt	λ	$\frac{W}{m \cdot K}$
warmteoverdrachtskoëfficiënt	α, h	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
warmtedoorgangskoëfficiënt	k, K	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
temperatuurvereffeningskoëfficiënt (temperatuurgeleidingskoëfficiënt)	a	$\frac{m^2}{s}$
warmtekapaciteit	C	$\frac{J}{K}$
soortelijke warmtekapaciteit	c	$\frac{J}{kg \cdot K}$
entropie	S	$\frac{J}{K}$
soortelijke entropie	s	$\frac{J}{kg \cdot K}$
inwendige energie	U, E	J
soortelijke inwendige energie	u, e	$\frac{J}{kg}$
entalpie	H	J
soortelijke entalpie	h	$\frac{J}{kg}$
relatieve atoommassa (van een element)	A_r	dimensieloos
relatieve molekuulmassa (van een stof)	M_r	dimensieloos
aantal molekulen of deeltjes	N	dimensieloos
hoeveelheid stof	n	mol
molaire massa	M	$\frac{kg}{mol}$
molair volume	V_m	$\frac{m^3}{mol}$
molaire warmtekapaciteit	C_m	$\frac{J}{mol \cdot K}$
molaire koncentratie van komponent B (stofkoncentratie)	c_B	$\frac{mol}{m^3}$

stralingsenergie	Q, Q_e	J
stralingsflux	Φ, Φ_e	W
energetische exitantie	M, M_e	$\frac{W}{m^2}$
stralingssterkte, stralingsintensiteit	I, I_e	$\frac{W}{sr}$
radiantie, energetische luminantie	L, L_e	$\frac{W}{m^2 \cdot sr}$
bestralingssterkte	E, E_e	$\frac{W}{m^2}$
bestraling, bestralingsdosis	H, H_e	$\frac{J}{m^2}$
hoeveelheid licht	Q, Q_v	lm . s
lichtflux	Φ, Φ_v	lm
exitantie (lichtgevende exitantie)	M, M_v	$\frac{lm}{m^2}$
lichtsterkte	I, I_v	cd
luminantie (lichtgevende luminantie)	L, L_v	$\frac{cd}{m^2}$
verlichtingssterkte	E, E_v	lx
belichting, belichtingsdosis	H, H_v	lx . s
fotometrisch stralingsekwivalent, lichtefficiëntie	K	$\frac{lm}{W}$
aktiviteit (ioniserende straling)	A	s^{-1} = Bq
exposie (röntgen- of gammastraling)	X	$\frac{C}{kg}$
geabsorbeerde dosis.	D	Gy
dosisekwivalent	H	Sv

2.4. Overzicht van de voornaamste elektrische en (elektro)magnetische grootheden en hun respektieve SI-eenheden

grootheid en symbool		SI-eenheid	weergave in SI-grondeenheden
elektrische stroom	I	A	A
momentele stroom	i	A	A
stroomdichtheid	J	$\frac{A}{m^2}$	$\frac{A}{m^2}$
elektrische lading	Q	C	A . s

elektrische potentiaal	V	$V = \frac{W}{A}$	$\frac{kg \cdot m^2}{A \cdot s^3}$
elektrische spanning	U	V	$\frac{kg \cdot m^2}{A \cdot s^3}$
momentele spanning	u	V	$\frac{kg \cdot m^2}{A \cdot s^3}$
elektrische weerstand	R	$\Omega = \frac{V}{A}$	$\frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^3}$
soortelijke weerstand (resistiviteit)	ρ	$\Omega \cdot m$	$\frac{kg \cdot m^3}{A^2 \cdot s^3}$
vermogen	P	$W = \frac{J}{s}$	$\frac{kg \cdot m^2}{s^3}$
elektrische geleiding (konduktantie)	G	$S = \frac{A}{V} = \Omega^{-1}$	$\frac{A^2 \cdot s^3}{kg \cdot m^2}$
soortelijke geleiding (konduktiviteit)	σ	$\frac{S}{m}$	$\frac{A^2 \cdot s^3}{kg \cdot m^3}$
elektrische kapaciteit	C	$F = \frac{C}{V}$	$\frac{A^2 \cdot s^4}{kg \cdot m^2}$
elektrische veldsterkte	E	$\frac{V}{m} = \frac{N}{C}$	$\frac{kg \cdot m}{A \cdot s^3}$
elektrische fluxdichtheid (elektrische induktie of elektrische verplaatsing)	D	$\frac{C}{m^2}$	$\frac{A \cdot s}{m^2}$
elektrische flux	Ψ	C	A . s
elektrische polarisatie	P, D_i	$\frac{C}{m^2}$	$\frac{A \cdot s}{m^2}$
elektrisch dipoolmoment	p	C . m	A . m . s
elektrische induktantie (zelfinduktie L, wederzijdse induktie M)	L, M	$H = \frac{V \cdot s}{A}$	$\frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^2}$
magnetische spanning	U_m	A	A
magnetische veldsterkte	H	$\frac{A}{m} = \frac{N}{Wb}$	$\frac{A}{m}$
magnetische fluxdichtheid (magnetische induktie)	B	$T = \frac{Wb}{m^2}$	$\frac{kg}{A \cdot s^2}$
magnetische flux	Φ	Wb = V . s	$\frac{kg \cdot m^2}{A \cdot s^2}$
permeantie	Λ	$H = \frac{V \cdot s}{A}$	$\frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^2}$
magnetische polarisatie	J, B_i	$T = \frac{Wb}{m^2}$	$\frac{kg}{A \cdot s^2}$
magnetisatie	M, H_i	$\frac{A}{m}$	$\frac{A}{m}$

(elektro)magnetisch moment	m	$A \cdot m^2$	$A \cdot m^2$
magnetisch dipoolmoment	j	$Wb \cdot m = \frac{N \cdot m^2}{A}$	$\frac{kg \cdot m^3}{A \cdot s^2}$
magnetische poolsterkte	p, M	Wb	$\frac{kg \cdot m^2}{A \cdot s^2}$
aantal windingen	N	(dimensieloos)	-
aantal poolparen	p	(dimensieloos)	-

2.5. Waarde in het SI van de permeabiliteit μ_o en de permittiviteit ϵ_o van vacuüm

Uit de definitie van de ampère en de gerationaliseerde vergelijking

$$F = \frac{\mu_o \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot l}{2 \pi r}$$

leidt men voor vacuüm af :

$$2 \cdot 10^{-7}\ N = \frac{\mu_o \cdot 1A \cdot 1A \cdot 1\ m}{2 \pi \cdot 1\ m}$$

waaruit volgt :

$$\mu_o = 4 \pi \cdot 10^{-7} \frac{N}{A^2} \qquad \left(\frac{N}{A^2} = \frac{kg \cdot m}{A^2 \cdot s^2}\right)$$

$$= 4 \pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m} \qquad \left(\frac{H}{m} = \frac{kg \cdot m}{A^2 \cdot s^2}\right)$$

Met behulp van de betrekking

$$\epsilon_o \cdot \mu_o \cdot c_o^2 = 1$$

vindt men voor de waarde van de permittiviteit van vacuüm ϵ_o :

$$\epsilon_o = \frac{1}{\mu_o \cdot c_o^2} = \frac{1}{4 \pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}} \cdot \frac{1}{(2{,}997\ 924\ 58 \cdot 10^8 \frac{m}{s})^2}$$

$$= 8{,}85\ 187\ 816 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}$$

$$\approx \frac{1}{4 \pi \cdot 9 \cdot 10^9} \frac{F}{m} \qquad \left(\frac{F}{m} = \frac{A^2 \cdot s^4}{kg \cdot m^3}\right)$$

2.6. Voorvoegsels voor het aanduiden van decimale veelvouden en delen van eenheden

2.6.1. Voorvoegsels en de overeenstemmende vermenigvuldigingsfaktor

Met behulp van voorvoegsels kunnen naar behoefte decimale veelvouden

en delen van SI-eenheden worden gevormd. De op deze wijze gevormde eenheden zijn toegelaten, doch ze mogen niet worden bestempeld als SI-eenheden en ze behoren uiteraard niet tot het koherent stelsel van SI-eenheden. Te noteren valt echter dat de koherente SI-eenheid van massa, het kilogram is (gram voorafgegaan door het voorvoegsel kilo) en niet het gram.

voor-voegsel	symbool	faktor waarmede de eenheid wordt vermenigvuldigd
exa	E	10^{18} = 1 000 000 000 000 000 000
peta	P	10^{15} = 1 000 000 000 000 000
tera	T	10^{12} = 1 000 000 000 000
giga	G	10^{9} = 1 000 000 000
mega	M	10^{6} = 1 000 000
kilo	k	10^{3} = 1 000
hekto	h	10^{2} = 100
deka	da	10^{1} = 10
deci	d	10^{-1} = 0,1
centi	c	10^{-2} = 0,01
milli	m	10^{-3} = 0,001
mikro	μ	10^{-6} = 0,000 001
nano	n	10^{-9} = 0,000 000 001
piko	p	10^{-12} = 0,000 000 000 001
femto	f	10^{-15} = 0,000 000 000 000 001
atto	a	10^{-18} = 0,000 000 000 000 000 001

Opmerkingen

☆ Teneinde verwarring te voorkomen met het voorvoegsel mikro (symbool μ), heeft de CGPM in 1967 het voordien toegestane gebruik van de benaming "mikron" met symbool μ voor 10^{-6} m afgewezen; thans geldt :

$$10^{-6}\ m = 1\ \mu m$$

☆ Het valt te betreuren dat in de SI-grondeenheid van massa (kilogram) reeds een voorvoegsel voorkomt (namelijk kilo).
De namen en symbolen van de decimale veelvouden en delen van de eenheid van massa (zijnde kilogram) worden gevormd door toevoeging van voorvoeg-

sels aan het woord "gram" en de symbolen van de betrokken voorvoegsels aan het symbool "g".

Voorbeelden :

1 milligram = $\frac{1}{1\ 000\ 000}$ -ste van de SI-eenheid van massa

1 millimeter = $\frac{1}{1000}$ -ste van de SI-eenheid van lengte

1 kilogram = 1 - maal de SI-eenheid van massa

1 kilometer = 1000-maal de SI-eenheid van lengte

1 megagram = 1000-maal de SI-eenheid van massa

1 megapascal = 1 000 000-maal de SI-eenheid van druk

Samengestelde voorvoegsels, zoals bijvoorbeeld mega + kilo in megakilogram, zijn niet toegelaten; derhalve is 10^6 kg niet gelijk aan 1 megakilogram, doch wel gelijk aan 1 gigagram (Gg) en is 10^{-6} kg niet gelijk aan 1 mikrokilogram doch wel gelijk aan 1 milligram (mg).

2.6.2. Algemene richtlijnen betreffende het gebruik van voorvoegsels voor het aanduiden van decimale veelvouden en delen van eenheden

In verband met het gebruik van de opgegeven voorvoegsels voor het aanduiden van veelvouden en delen van eenheden gelden volgende richtlijnen :

a. het symbool van het voorvoegsel en het symbool van de eenheid worden steeds aan elkaar geschreven (dus zonder spatie of punt tussenin); hetzelfde geldt voor de voluit geschreven benaming.
   Schrijf dus bijvoorbeeld niet, als symbool voor millimeter : m/m (hetgeen meter per meter betekent), maar wel : mm
b. het voorvoegsel wordt bij voorkeur zodanig gekozen dat de getalwaarde begrepen is tussen 0,1 en 1000
   Voorbeelden
   12 000 N → 12 kN
   0,003 94 m → 3,94 mm
   1500 Pa → 1,5 kPa
   $3{,}1 \cdot 10^{-8}$ s → 31 ns

In bepaalde gevallen is het aangewezen van deze aanbeveling af te wijken, bijvoorbeeld in tabellen. Om de waarden onderling beter te kunnen vergelijken, is het dan aangewezen overal hetzelfde voorvoegsel (of eventueel geen voorvoegsel) te gebruiken.

c. Bij het uitwerken van vergelijkingen is het aangewezen alle grootheden uit te drukken in (koherente) SI-eenheden (en niet in veelvouden en delen ervan); eventuele voorvoegsels worden hierbij vervangen door de overeenstemmende positieve of negatieve macht van 10. Bij veelvouden en delen van gram dient men er echter rekening mede te houden dat de SI-eenheid van massa niet het gram, doch wel het kilogram is, zodat men bij de betrokken omzetting 3 dient af te trekken van de macht van 10 die overeenstemt met het voorvoegsel dat voorkomt bij gram.
Voorbeelden :

mikro = 10^{-6} 1 µm = 10^{-6} m
1 µg = 10^{-6} g = 10^{-9} kg

milli = 10^{-3} 1 mm = 10^{-3} m
1 mg = 10^{-3} g = 10^{-6} kg

kilo = 10^{3} 1 km = 10^{3} m
1 kg = 10^{3} g = 10^{0} kg = 1 kg

mega = 10^{6} 1 Mm = 10^{6} m
1 Mg = 10^{6} g = 10^{3} kg

giga = 10^{9} 1 Gm = 10^{9} m
1 Gg = 10^{9} g = 10^{6} kg

d. Het kombineren van voorvoegsels is niet toegestaan
Voorbeelden :
10^{7} J ≠ 1 daMJ, doch wel : 10^{7} J = 10 MJ
10^{-12} F ≠ µµF, doch wel : 10^{-12} F = 1 pF
10^{-9} m ≠ 1 mµm, doch wel : 10^{-9} m = 1 nm

e. Een voorvoegsel (respektievelijk het symbool ervan) kan alleen worden gevoegd bij een eenheid (respektievelijk het symbool ervan) die drager is van een exponent gelijk aan 1 (een exponent gelijk aan 1 wordt normaal weggelaten). Voorvoegsel + eenheid vormen dan een nieuwe eenheid, die op zijn geheel wel drager kan zijn van een exponent (een geheel of gebroken getal, positief of negatief). Het symbool van een

voorvoegsel vormt dus één geheel met het symbool van de eenheid waaraan het is toegevoegd. Aldus ontstaat het symbool van een nieuwe eenheid, die op zijn geheel tot een positieve of negatieve macht kan worden verheven. De betrokken macht slaat dus niet alleen op het gedeelte van het symbool dat de eenheid aanduidt maar op het geheel van het symbool (voorvoegsel inbegrepen). Wat betreft de eenheid Hertz (Hz) valt te noteren dat eventuele voorvoegsels kunnen toegevoegd worden aan de eenheid Hz, doch niet aan de eenheid s^{-1}, hoewel Hz = 1 s^{-1}.

Voorbeelden :

1 $cm^3 = (10^{-2}\ m)^3 = 10^{-6}\ m^3$

1 $cm^3 \neq$ 1 centikubiekemeter

1 $mm^2 = (10^{-3}\ m)^2 = 10^{-6}\ m^2$

1 $mm^2 \neq$ 1 millivierkantemeter

1 MHz = $10^6\ s^{-1} = \frac{1}{10^{-6}\ s} = \frac{1}{\mu s} = 1\ \mu s^{-1} = (10^{-6}\ s)^{-1}$

$\neq 10^{-6}\ s^{-1}$ $(10^{-6}\ s^{-1} = \mu Hz)$

f. Om een samengestelde eenheid waarin eenheden voorkomen die een decimaal veelvoud of een decimaal deel zijn van een SI-eenheid, om te zetten in een samengestelde eenheid die uitsluitend bestaat uit SI-eenheden, dient men de betrokken voorvoegsels te vervangen door hun cijferwaarde. Hierbij dient men er rekening mede te houden dat eventuele exponenten ook betrekking hebben op het voorvoegsel. Uitwerking van alle cijferwaarden tot één enkele cijferwaarde kan aanleiding geven tot een nieuw voorvoegsel in het geval dat de samengestelde eenheid (thans uitsluitend bestaande uit SI-eenheden) een speciale benaming heeft.

Voorbeeld :

Farad (F) is de eigen benaming voor de afgeleide eenheid $\frac{A^2 \cdot s^4}{kg \cdot m^2}$ (eenheid van elektrische kapaciteit).

De eenheden $\frac{kA^2 \cdot ms^4}{kg \cdot m^2}$ en $\frac{mA^2 \cdot s^4}{kg \cdot m^2}$ kunnen als volgt uitgewerkt worden :

$$1\ \frac{kA^2 \cdot ms^4}{kg \cdot m^2} = \frac{(10^3)^2 \cdot A^2 \cdot (10^{-3})^4 \cdot s^4}{kg \cdot m^2} = 10^{-6}\ \frac{A^2 \cdot s^4}{kg \cdot m^2}$$

$$= 10^{-6}\ F = 1\ \mu F$$

$$1\ \frac{mA^2 \cdot s^4}{kg \cdot m^2} = \frac{(10^{-3})^2 \cdot A^2 \cdot s^4}{kg \cdot m^2} = 10^{-6}\ \frac{A^2 \cdot s^4}{kg \cdot m^2}$$

$$= 10^{-6}\ F = 1\ \mu F$$

3. Blijvend erkende eenheden die niet tot het SI behoren

3.1. Opsomming van de betrokken eenheden

De EEG-richtlijn 80/181/EEG van 20 december 1979 (gewijzigd door EEG-richtlijn 85/1/EEG van 18 december 1984) vermeldt onder deze rubriek de volgende 19 eenheden :

- liter (l of L)
- ton (t)
- bar (bar)
- are (a)
- barn (b)
- tex (tex)
- metriekkaraat (hiervoor bestaat geen internationaal aanvaard symbool)
- dioptrie (hiervoor bestaat geen internationaal aanvaard symbool)
- volle hoek (hiervoor bestaat geen internationaal aanvaard symbool)
- decimale graad of gon (gon)
- graad (°)
- minuut (')
- sekonde (")
- minuut (min)
- uur (h)
- dag (d)
- atoommassa-eenheid (u)
- elektronvolt (eV)
- millimeter kwik (mmHg)

Van de hierboven opgesomde 19 eenheden :

☆ komen de volgende 5 eenheden niet voor op de door de CGPM, het CIPM of het BIPM opgestelde lijsten :

- tex
- dioptrie
- volle hoek
- decimale graad of gon
- millimeter kwik

(de benaming torr komt er wel voor onder de rubriek "af te raden eenheden"; wat betreft het onderscheid tussen millimeter kwik en torr, zie Hoofdstuk XI, onder 6.3.);

☆ zijn de volgende 8 eenheden slechts toegelaten voor bijzondere toepassingsgebieden :

- are
- barn
- tex
- metriekkaraat
- dioptrie
- atoommassa-eenheid
- elektronvolt
- millimeter kwik

3.2. Indeling van de betrokken eenheden in bepaalde groepen

3.2.1. Toegelaten eigen namen en eigen symbolen van decimale veelvouden en delen van SI-eenheden

3.2.1.1. *Eigen namen en symbolen van decimale veelvouden en delen van SI-eenheden die zonder beperking kunnen gebruikt worden*

grootheid	eenheid		
	naam	symbool	verband
volume	liter	l of L	1 l = 1 dm^3 = 10^{-3} m^3
massa	ton	t	1 t = 1 Mg = 10^3 kg
druk en spanning	bar	bar	1 bar = 10^5 Pa

Opmerkingen

☆ Wat betreft het symbool voor liter, bestaat er soms mogelijkheid tot verwarring tussen de letter l en het cijfer 1. In 1976 stelde het CIPM voor, in voorkomend geval het woord liter voluit te schrijven ofwel de afkorting "ltr." te gebruiken. In 1979 besliste de 16de CGPM (resolutie 5) dat voor het aanduiden van de eenheid liter, twee symbolen mogen gebruikt worden, namelijk l of L (zie ook Hoofdstuk III, onder 2.2.2.). Nochtans zal het CIPM, vóór de 18de CGPM, een rondvraag doen over de ontwikkeling van het gebruik van de twee symbolen, teneinde vast te stellen of één van beide symbolen mag worden geschrapt (16de CGPM - 1979 - Resolutie 6).

☆ Sommigen ijveren er voor, de eenheid bar (en zijn decimale veelvouden en delen) te laten verbieden, vermits de SI-eenheid van druk, namelijk Pa, met zijn decimale veelvouden en delen, ruimschoots volstaat voor het weergeven van om het even welke druk of spanning. Het gebruik van de eenheid bar (en zijn decimale veelvouden en delen) kan trouwens aanleiding geven tot fouten en vergissingen. De eenheid bar, die eigenlijk afkomstig is uit het CGS-stelsel (1 bar = 10^6 dyn/cm^2), komt voor in Resolutie 7 van de 9de CGPM (1948). De verspreiding van de eenheid bar werd bevorderd door het feit dat de getalwaarde van een druk weergegeven in bar, op 2 % na gelijk is aan de getalwaarde van een druk weergegeven in technische atmosfeer at (zijnde de eenheid die vroeger in de techniek alom verspreid was; 1 at = 1 kgf/cm^2, zie Hoofdstuk XI, onder 7.) :

1 bar ≈ 1,02 at 1 at ≈ 0,98 bar

Aldus bleef de bar gehandhaafd als eenheid van druk (naast de pascal) in die EEG-landen waar reeds vroeger het Technisch stelsel ingeburgerd was. Vooral van Duitse en Franse zijde werd er op aangedrongen, de bar als eenheid van druk blijvend toe te laten.

In de EEG-richtlijnen van 1971, 1976 en 1979 in verband met meeteenheden, wordt gesteld dat de bar, alsmede de decimale veelvouden en delen ervan, zijn toegelaten en wel als eenheid van druk en spanning. In de laatstgenoemde EEG-richtlijn echter (Richtlijn 80/181/EEG van 20 december 1979) verwijst men bij de eenheid bar naar een voetnota waarin het volgende vermeld staat : "Eenheid die is opgenomen in de brochure van het Internationale Bureau voor maten en gewichten als tijdelijk erkende eenheid". In de Oostblok-landen is de bar gerangschikt onder de eenheden die slechts tijdelijk erkend worden.

In de tweede uitgave (1981) van de "Norme Internationale ISO 1000 : Unités SI et recommandations pour l'emploi de leurs multiples et de certaines autres unités", staat de bar op volgende wijze gerangschikt bij de "unités non SI qui peuvent être utilisées avec les unités SI et leurs multiples" :

Grandeur	Nom de l'unité	Symbole de l'unité	Définition
pression de fluide	bar	bar	1 bar = 10^5 Pa

Als voetnota staat er opgegeven : "Le bar n'est pas mentionné par le CIPM dans ce groupe d'unités (unités non SI, qui peuvent être utilisées avec les unités SI et leurs multiples). Cependant, dans plusieurs pays, cette unité correspond à des exigences particulières".
Volgens de genoemde norm ISO 1000 van 1981 mag de bar dus uitsluitend aangewend worden voor het weergeven van gas- en vloeistofdrukken en niet voor het weergeven van een mechanische spanning.

In de vijfde uitgave (1985) van de brochure "Le Système International d'Unités (SI)", uitgegeven door het BIPM te Sèvres bij Parijs, staat de bar gerangschikt bij de "Unités maintenues temporairement avec le Système International".

3.2.1.2. *Eigen namen en symbolen van decimale veelvouden en delen van SI-eenheden waarvan het gebruik is voorbehouden voor bijzondere toepassingsgebieden*

grootheid	eenheid		
	naam	symbool	waarde
oppervlakte van grond	are	a	1 a = 100 m^2
werkzame doorsnede (kernfysika)	barn	b	1 b = 10^{-28} m^2 = 100 fm^2
lineïeke massa (lengte per massa) van textiele vezels en garens	tex	tex	1 tex = 10^{-6} $\frac{kg}{m}$ = 1 $\frac{g}{km}$ = 1 $\frac{mg}{m}$

Opmerking

In de EEG-richtlijn 76/770/EEG van 27 juli 1976 was bepaald dat de barn uitsluitend mocht gebruikt worden voor het weergeven van de werkzame doorsnede (bij kernreakties) en dit uiterlijk tot 31 december 1979. In de EEG-richtlijn 85/1/EEG van 18 december 1984 werd dit herzien met volgende motivering : "Overwegende dat de barn een universeel gebruikte eenheid is voor het meten van de werkzame doorsnede bij kernreakties; dat de ervaring

leert dat deze specifieke eenheid slechts met veel bezwaar vervangen kan worden door een SI-eenheid; dat het derhalve noodzakelijk is het gebruik van de barn op nucleair gebied toe te staan; ...).

3.2.2. Eenheid (metriekkaraat) en eigen benaming (dioptrie) van een SI-eenheid (m^{-1}) die slechts zijn toegelaten voor bijzondere toepassingen en waaraan internationaal nog geen symbool is toegekend

grootheid	eenheid	
	naam	waarde
massa van parels en edelstenen	metriekkaraat	1 metriekkaraat = $2 \cdot 10^{-4}$ kg = 0,2 g = 200 mg
sterkte van optische systemen	dioptrie	1 dioptrie = 1 m^{-1}

Opmerkingen

☆ De eenheid van massa "metriekkaraat" of ook kortweg "karaat" mag niet verward worden met het woord "karaat" dat gebruikt wordt ter aanduiding van het gehalte aan goud in een legering met behulp van een 24-delige schaal; een goudlegering van bijvoorbeeld 18 karaat is een legering waarvan het gehalte aan goud gelijk is aan $\frac{18}{24}$ (= 0,75 = 75 %).
Het "metriekkaraat" werd door de 4de CGPM in 1907 aanbevolen ter vervanging van de verschillende karaateenheden die toentertijd gebruikelijk waren in de handel van diamanten en edelstenen.

☆ De dioptrie is de sterkte van een optisch systeem met een brandpuntsafstand van 1 meter in een midden waarvan de brekingsindex gelijk is aan 1.

3.2.3. Eenheden die geen decimale veelvouden of delen van SI-eenheden zijn doch wel op basis van SI-eenheden gedefinieerd worden

Het betreft hier de volgende eenheden van vlakke hoek en van tijd, die zonder beperking kunnen gebruikt worden :

grootheid	eenheid		
	naam	symbool	verband
vlakke hoek	volle hoek	-	1 volle hoek = 2 π rad
	decimale graad of gon (in het Frans : grade décimal)	gon	1 gon $\hat{=} \frac{\pi}{200}$ rad $\hat{=} \frac{1}{400}$ volle hoek
	graad (in het Frans : degré)	°	1° $\hat{=} \frac{\pi}{180}$ rad $\hat{=} \frac{1}{360}$ volle hoek
	minuut	'	1' $\hat{=} \frac{\pi}{10\ 800}$ rad
	sekonde	"	1" $\hat{=} \frac{\pi}{648\ 000}$ rad
tijd	minuut	min	1 min = 60 s
	uur	h	1 h = 3600 s
	dag	d	1 d = 86 400 s

Opmerkingen

☆ De Belgische wetgeving vermeldt niet de benaming "volle hoek", maar wel de benaming "omwenteling" met als symbool tr, voor de vlakke hoek tussen twee stralen van een cirkel die op de omtrek een boog afsnijden waarvan de lengte gelijk is aan die van de omtrek (zie Koninklijk Besluit van 4 oktober 1977 betreffende eenheden, Belgisch Staatsblad van 20 oktober 1977).

☆ In Nederland werd door het Besluit van 8 maart 1974, houdende wijziging van het (toenmalig in voege zijnde) "Eenhedenbesluit 1968", de benaming omwenteling (met symbool tr; 1 tr = 2 π rad) geschrapt en vervangen door volle hoek (zonder opgave van symbool; 1 volle hoek = 2 π rad). In het "Eenhedenbesluit 1981" is de benaming volle hoek behouden, eveneens zonder opgave van een symbool.

3.2.4. Onafhankelijk van de zeven SI-grondeenheden gedefinieerde eenheden

3.2.4.1. *Eenheden die uitsluitend worden gebruikt in de atoom- en kernfysika en waarvan de waarde experimenteel dient bepaald te worden*

grootheid	eenheid		
	naam	symbool	waarde
massa	atoommassa-eenheid	u	1 u ≈ 1,660 565 5 . 10^{-27} kg
energie	elektronvolt	eV	1 eV ≈ 1,602 189 2 . 10^{-19} J

Opmerkingen

☆ De eenheden atoommassa-eenheid en elektronvolt hebben een nauwkeurige definitie; de waarde echter van de betrokken eenheden, uitgedrukt in SI-eenheden, dient experimenteel bepaald te worden. De gegeven waarden zijn overgenomen uit CODATA-bulletin nr. 11 van december 1973 van de International Council of Scientific Unions (CODATA = Committee on Data for Science and Technology).

☆ De atoommassa-eenheid is $\frac{1}{12}$ van de rustmassa van een neutraal atoom van de nuclide ^{12}C in de grondtoestand (zie Hoofdstuk VI, onder 8.).

☆ De elektronvolt is de kinetische energie verkregen door een elektron dat in het luchtledige een potentiaalverschil van 1 volt doorloopt :

1 eV = lading van een elektron x 1 volt

3.2.4.2. *Eenheid die uitsluitend mag worden gebruikt voor het weergeven van de bloeddruk en de druk van andere lichaamsvloeistoffen*

grootheid	eenheid		
	naam	symbool	waarde
bloeddruk of druk van andere lichaamsvloeistoffen	millimeter kwik	mmHg	1 mmHg ≈ 133,322 Pa

Opmerkingen

☆ In de EEG-richtlijn 80/181/EEG van 20 december 1979 was bepaald dat de millimeter kwik (mmHg) uitsluitend mocht gebruikt worden voor het weergeven van een bloeddruk, en dit uiterlijk tot 31 december 1985. In de EEG-richtlijn 85/1/EEG van 18 december 1984 werd dit herzien met volgende motivering : "Overwegende dat de Wereldgezondheidsorganisatie in een aanbeveling van 22 mei 1981 heeft verzocht de eenheid millimeter kwik naast de eenheid kilopascal te handhaven voor het meten van de bloeddruk en de druk van andere lichaamsvloeistoffen; dat het voor de hand ligt dat de Gemeenschap deze aanbeveling volgt; ...".

☆ Wat betreft de definitie van de eenheid millimeter kwik (mmHg), zie Hoofdstuk XI, onder 6.3.

3.3. Indeling van de betrokken 19 eenheden volgens de grootheid waartoe ze behoren

grootheid	eenheid	symbool	omzetting in SI-eenheden
massa	ton	t	1 t = 1000 kg
	metriekkaraat	-	1 metriekkaraat = $2 \cdot 10^{-4}$ kg
	atoommassa-eenheid	u	1 u ≈ 1,660 565 5 . 10^{-27} kg
lineïeke massa	tex	tex	1 tex = 10^{-6} kg/m
tijd	minuut	min	1 min = 60 s
	uur	h	1 h = 3600 s
	dag	d	1 d = 86 400 s
vlakke hoek	volle hoek	-	1 volle hoek = 2 π rad
	decimale graad of gon	gon	1 gon $\hat{=} \frac{\pi}{200}$ rad
	graad	°	$1° \hat{=} \frac{\pi}{180}$ rad
	minuut	'	$1' \hat{=} \frac{\pi}{10\,800}$ rad
	sekonde	"	$1" \hat{=} \frac{\pi}{648\,000}$ rad

oppervlakte	are barn	a b	1 a = 100 m^2 1 b = 10^{-28} m^2
volume, inhoud	liter	l, L	1 L = 0,001 m^3 (sinds 1964) voorheen : 1 L = 0,001 000 028 m^3
druk	bar millimeter kwik	bar mmHg	1 bar = 10^5 Pa 1 mmHg ≈ 133,322 Pa
energie	elektronvolt	eV	1 eV ≈ 1,602 189 2 . 10^{-19} J
sterkte van optische systemen	dioptrie	-	1 dioptrie = 1 m^{-1}

3.4. Het gebruik van voorvoegsels voor het aanduiden van decimale veelvouden en delen van de hierboven behandelde blijvend erkende eenheden (die niet tot het SI behoren)

In overeenstemming met de Richtlijnen 80/181/EEG van 20 december 1979 en 85/1/EEG van 18 december 1984, gelden volgende voorschriften.
De in onderhavig hoofdstuk onder 2.6. behandelde voorvoegsels mogen niet worden toegepast bij de volgende 8 eenheden :

- de hoekeenheden volle hoek, graad (°), minuut ('), sekonde (")
- de tijdeenheden minuut (min), uur (h), dag (d)
- millimeter kwik (mmHg)

Ze mogen wel worden toegepast bij de volgende 11 eenheden :

- liter (l of L)
- ton (t); bij ton zijn enkel voorvoegsels voor het vormen van veelvouden toegelaten (en niet voor het vormen van delen)
- bar (bar)
- are (a); als decimale veelvouden en delen van de are zijn enkel erkend de hektare (ha) en de centiare (ca)
- barn (b)
- tex (tex)
- metriekkaraat
- dioptrie
- decimale graad of gon (gon)

- atoommassa-eenheid (u)
- elektronvolt (eV)

Hierna volgt een overzicht van de meest voorkomende veelvouden en delen van de betrokken erkende eenheden :

liter (l of L) : 1 l = 10^{-3} m^3 = 1 dm^3

1 hl = 10^{-1} m^3 = 100 dm^3

1 dl = 10^{-4} m^3 = 0,1 dm^3 = 100 cm^3

1 cl = 10^{-5} m^3 = 0,01 dm^3 = 10 cm^3

1 ml = 10^{-6} m^3 = 0,001 dm^3 = 1 cm^3

ton (t) : 1 t = 10^3 kg = 10^6 g = 1 Mg

1 kt = 10^3 t = 10^6 kg = 10^9 g = 1 Gg

1 Mt = 10^6 t = 10^9 kg = 10^{12} g = 1 Tg

1 Gt = 10^9 t = 10^{12} kg = 10^{15} g = 1 Pg

1 Tt = 10^{12} t = 10^{15} kg = 10^{18} g = 1 Eg

bar (bar) : 1 bar = 10^5 Pa

1 mbar = 100 Pa = 1 hPa

1 µbar = 0,1 Pa

barn (b) : 1 b = 10^{-28} m^2 = 100 fm^2

1 mb = 10^{-3} b = 10^{-31} m^2 = 0,1 fm^2

are (a) : 1 a = 100 m^2

1 ha = 10 000 m^2

1 ca = 1 m^2

tex (tex) : 1 tex = 10^{-6} $\frac{kg}{m}$ = 1 $\frac{g}{km}$ = 1 $\frac{mg}{m}$

1 mtex = 10^{-9} $\frac{kg}{m}$ = 0,001 $\frac{mg}{m}$ = 1 $\frac{\mu g}{m}$

1 ktex = 10^{-3} $\frac{kg}{m}$ = 1 $\frac{g}{m}$

(decimale) graad : 1 (decimale) graad $\hat{=}$ $\frac{\pi}{200}$ rad

= 1 gon

De eenheden decimale minuut (= 0,01 decimale graad) en decimale sekonde (= 0,01 decimale minuut) zijn geen erkende eenheden (zie ook Hoofdstuk VIII, onder 2.2.3.).

gon (gon) : 1 gon $\hat{=} \frac{\pi}{200}$ rad (1 gon = 1 decimale graad)

1 dgon $\hat{=} \frac{\pi}{2000}$ rad

1 cgon $\hat{=} \frac{\pi}{20\ 000}$ rad

1 mgon $\hat{=} \frac{\pi}{200\ 000}$ rad

atoommassa-eenheid (u) : 1 u $\approx 1{,}660\ 565\ 5 \cdot 10^{-27}$ kg

1 mu = 10^{-3} u $\approx 1{,}660\ 565\ 5 \cdot 10^{-30}$ kg

elektronvolt (eV) : 1 eV $\approx 1{,}602\ 189\ 2 \cdot 10^{-19}$ J

1 keV = 10^{3} eV $\approx 1{,}602\ 189\ 2 \cdot 10^{-16}$ J

1 MeV = 10^{6} eV $\approx 1{,}602\ 189\ 2 \cdot 10^{-13}$ J

1 GeV = 10^{9} eV $\approx 1{,}602\ 189\ 2 \cdot 10^{-10}$ J

3.5. Eenheden samengesteld uit een SI-eenheid en een erkende eenheid die niet tot het SI behoort

In overeenstemming met de Richtlijn 80/181/EEG van 20 december 1979 en de Richtlijn 85/1/EEG van 18 december 1984, kunnen samengestelde eenheden worden gevormd door kombinatie van wettelijke eenheden (zijnde de SI-eenheden en de 19 erkende eenheden die niet tot het SI behoren).

Het vormen van een samengestelde eenheid, bestaande uit een SI-eenheid en een erkende eenheid die niet tot het SI behoort, is echter af te raden omdat de 19 erkende eenheden die niet tot het SI behoren, niet koherent zijn met de SI-eenheden. Een samengestelde eenheid waarin een "niet SI-eenheid" voorkomt, past dus ook niet in het koherent eenhedenstelsel dat gevormd wordt door de SI-eenheden. Bij het gebruik van dergelijke samengestelde eenheden, gaan de grote voordelen van de koherentie verloren. (zie Hoofdstuk II, onder 5. en 8.).

De meest voorkomende samengestelde eenheden bestaande uit een SI-eenheid en een erkende "niet SI-eenheid", zijn de volgende eenheden (waarin de eenheid uur voorkomt) : watt uur, ampère uur, lumen uur.

De grootheid waartoe ze behoren, en de waarde ervan uitgedrukt in SI-eenheden, is weergegeven in volgende tabel :

grootheid	eenheid		
	naam	symbool	verband
energie	watt uur	W . h	1 W . h = 3600 J = 3,6 kJ
lading	ampère uur	A . h	1 A . h = 3600 C
hoeveelheid licht	lumen uur	lm . h	1 lm . h = 3600 lm . s

De eenheid kilowatt uur (1 kW.h = 1000 W.h) is de eenheid van energie die steeds gebruikt wordt bij het meten en faktureren van de geleverde elektrische energie. De betrokken eenheid is samengesteld uit een decimaal veelvoud (kilo) van een SI-eenheid (watt) en een niet-decimaal veelvoud van de sekonde, namelijk uur (die hoewel geen SI-eenheid toch een erkende eenheid is).

Uit de algemene groothedenvergelijking :

$$\text{vermogen} = \frac{\text{energie}}{\text{tijd}}$$

volgt ook :

$$\text{vermogen} \times \text{tijd} = \text{energie}$$

Wanneer het vermogen wordt uitgedrukt in kW en de tijd in h, bekomt men kW . h als eenheid van energie :

$$kW \times h = kW \cdot h$$

Wanneer het vermogen wordt uitgedrukt in de SI-eenheid W en de tijd in de SI-eenheid s, bekomt men als eenheid van energie uiteraard de SI-eenheid van energie J :

$$W \times s = \frac{J}{s} \times s = J$$

Veel voorkomende veelvouden van W.h zijn :

$1\ kW \cdot h = 10^3\ W \cdot h = 3{,}6 \cdot 10^6\ J = 3{,}6\ MJ$

$1\ MW \cdot h = 10^6\ W \cdot h = 3{,}6 \cdot 10^9\ J = 3{,}6\ GJ$

$1\ GW \cdot h = 10^9\ W \cdot h = 3{,}6 \cdot 10^{12}\ J = 3{,}6\ TJ$

$1\ TW \cdot h = 10^{12}\ W \cdot h = 3{,}6 \cdot 10^{15}\ J = 3{,}6\ PJ$

Het vervangen van de eenheid kilowatt uur (kW.h) door de SI-eenheid joule (J) of een decimaal veelvoud ervan, bijvoorbeeld de megajoule (MJ), als eenheid voor het meten van het elektriciteitsverbruik, stuit op praktische moeilijkheden. Tot op heden zijn immers alle meters die de verbruikte elektrische energie meten, geijkt in kW.h. Het vervangen van de vele miljoenen dergelijke meters door meters die geijkt zijn in J of MJ, zou met zulke enorme kosten gepaard gaan, dat men er voor terugschrikt. Voor het overige dient het gebruik van de eenheid watt uur (met zijn veelvouden en delen) vermeden te worden.
Het vervangen van de eenheden ampère uur en lumen uur door SI-eenheden biedt geen praktische problemen :

$$1\ A\ .\ h = 1\ A\ .\ 3600\ s = 3600\ A\ .\ s = 3600\ C$$
$$1\ lm\ .\ h = 1\ lm\ .\ 3600\ s = 3600\ lm\ .\ s$$

4. De benamingen neper (Np) en decibel (dB)

De benamingen neper en decibel werden uitvoerig behandeld in Hoofdstuk IX, onder 1.3. en 1.4.

In het algemeen wordt een verschil in amplitudeniveau L_A (met A = amplitude) en een verschil in vermogensniveau L_P (met P = vermogen) gegeven door :

$$L_A = \ln \frac{A_1}{A_2}\ Np$$

$$= 20\ \lg \frac{A_1}{A_2}\ dB$$

$$L_P = 10\ \lg \frac{P_1}{P_2}\ dB$$

$$= \frac{1}{2} \ln \frac{P_1}{P_2}\ Np$$

De benaming neper (Np) duidt enkel aan, dat het gaat om de neperiaanse logaritme (eventueel vermenigvuldigd met 1/2) van de verhouding van twee grootheden van dezelfde aard.

De benaming decibel (dB) duidt enkel aan, dat het gaat om de Briggse logaritme (vermenigvuldigd met 10 of 20) van de verhouding van twee grootheden van dezelfde aard.

Neper en decibel zijn helemaal geen eenheden, en dus uiteraard ook geen SI-eenheden; het zijn alleen maar benamingen die ook in het SI gebruikelijk zijn.

Als $\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2$, hebben L_A en L_P dezelfde getalwaarde wanneer ze beide uitgedrukt worden in dezelfde (zogezegde) eenheid (hetzij Np hetzij dB). Gewoonlijk wordt L_A uitgedrukt in neper, en L_P in decibel. In de geluidsleer echter wordt enkel gebruik gemaakt van de (zogezegde) eenheid decibel, zowel voor het weergeven van een amplitudeniveau (zoals het geluidsdrukniveau L_p) als van een vermogensniveau L_P (zie Hoofdstuk IX, onder 1.3. en 2.2.6.) :

$$L_p = 20 \lg \frac{p}{p_o} \text{ dB}$$

$$L_P = 10 \lg \frac{P}{P_o} \text{ dB}$$

Voorbeeld :
Bij volgende overeenstemmende waarden (zie Hoofdstuk IX, tabel IX.1.) :

$$p = 2 \cdot 10^{-1} \text{ Pa} \quad \text{en} \quad I = 10^{-4} \text{ W/m}^2$$
$$p_o = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \quad \text{en} \quad I_o = 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

bekomt men :

$L_p = \ln \frac{p}{p_o} = 9{,}210 \ldots$ Np (niet gebruikelijk in de geluidsleer)

$L_p = 10 \lg \frac{p^2}{p_o^2}$ dB $\quad 20 \lg \frac{p}{p_o}$ dB = 80 dB

$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_o}$ dB = 80 dB

5. Natuurkonstanten in het SI

De opbouw van het gekozen eenhedenstelsel bepaalt welke natuurkonstanten er voorkomen en wat de waarde ervan is. Dit moge blijken uit :

- Hoofdstuk II, onder 2. : Basisgroothedensoorten en afgeleide groothedensoorten
- Hoofdstuk III, onder 5.9. : Waarde van de permittiviteit van vacuüm ϵ_o en de permeabiliteit van vacuüm μ_o in de CGS-stelsels, het niet-gerationaliseerd MKSA-stelsel en het gerationaliseerd MKSA-stelsel (dat overeenstemt met het SI); ...
- Hoofdstuk IV, onder 3.4. : De permeabiliteit van vacuüm in het gerationaliseerd MKSA-stelsel
  onder 3.5. : De permittiviteit van vacuüm in het gerationaliseerd MKSA-stelsel
- Hoofdstuk V, onder 1.10.3. : De natuurkonstanten R (molaire of algemene of universele gaskonstante) en k (konstante van Boltzmann)
- Hoofdstuk VI, onder 4.1. : De eenheid mol als een chemische massagrootheid en als een fysische massagrootheid
  onder 4.3. : De mol als eenheid van hoeveelheid stof (definitie van 1957)
  onder 5. : Huidige definitie van de mol

  Naargelang van de definitie van de eenheid mol, werden andere waarden bekomen voor volgende natuurkonstanten : getal van Avogadro N_A, het molair normvolume V_{mn}, de molaire (of algemene of universele) gaskonstante R, de konstante van Boltzmann k ($= R/N_A$) en de konstante van Faraday F ($= N_A \cdot e$).
- Hoofdstuk X, onder 2.5. : Waarde in het SI van de permeabiliteit μ_o en de permittiviteit ϵ_o van vacuüm
- Hoofdstuk XIII, onder 3.3. : Relatieve betekenis van de gravitatiekonstante.

De waarde van de in tabel X.1. opgegeven natuurkonstanten (die voorkomen in het SI) zijn overgenomen uit het Bulletin nummer 11 "Recommended consistent values of the fundamental physical constants" van december 1973, van het Committee on Data for Science and Technology (CODATA) van de International Council of Scientific Unions (ICSU).

Tabel X.1. *Natuurkonstanten*

symbool	naam	toelichting	waarde
c_o	lichtsnelheid in vacuüm	definitie van de meter	299 792 458 m/s (exact)
μ_o	permeabiliteit in vacuüm	$\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m	1,256 637 061 . 10^{-6} H/m
ϵ_o	permittiviteit in vacuüm	$\epsilon_o = \frac{1}{\mu_o \cdot c_o^2}$	8,854 187 82 . 10^{-12} F/m
$G, (k)$	gravitatiekonstante	$F = \frac{G \cdot m_1 \cdot m_2}{r^2}$	66,720 . 10^{-12} N . m^2/kg^2
V_{mn}	molair normvolume van een ideaal gas	molair volume bij T = 273,15 K en p = 101 325 Pa	22,413 83 . 10^{-3} m^3/mol
R	molaire gaskonstante	$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$ voor een ideaal gas	8,314 41 J/(mol . K)
N_A	konstante van Avogadro	molair deeltjesaantal, aantal per hoeveelheid stof	602,2045 . 10^{21} mol^{-1}
k	konstante van Boltzmann	$k = \frac{R}{N_A}$	13,806 62 . 10^{-24} J/K
h	konstante van Planck	de grootte van een lichtkwantum is $h \cdot \nu$	0,662 617 6 . 10^{-33} J/Hz
$\hbar$	konstante van Dirac	$\hbar = \frac{h}{2\pi}$	0,105 458 87 . 10^{-33} J . s
σ	konstante van Stefan-Boltzmann	$\sigma = \frac{2\pi^5 \cdot k^4}{15 c_o^2 \cdot \hbar^3}$ $M_e = \sigma \cdot T^4$ (voor een zwart lichaam)	56,7032 . 10^{-9} W/(K^4 . m^2)
c_1	eerste stralingskonstante	$c_1 = 2\pi \cdot h \cdot c_o^2$	0,374 183 2 . 10^{-15} W . m^2
c_2	tweede stralingskonstante	$c_2 = \frac{h \cdot c_o}{k}$	14,387 86 . 10^{-3} K . m
e	elementaire lading	lading van een proton	0,160 218 92 . 10^{-18} C
F	konstante van Faraday	$F = N_A \cdot e$	96,484 56 . 10^3 C/mol
m_e	(rust)massa van een elektron		0,910 953 4 . 10^{-30} kg
m_p	(rust)massa van een proton		1,672 648 5 . 10^{-27} kg
m_n	(rust)massa van een neutron		1,674 954 3 . 10^{-27} kg
m_u	(geünificeerde) atoommassa-konstante (zie Hoofdstuk VI, onder 8.)	$m_u = \frac{1}{12} m(^{12}C)$ m_u = 1 u = atoommassa-eenheid	1,660 565 5 . 10^{-27} kg

HOOFDSTUK XI

HET TECHNISCH (EENHEDEN)STELSEL (TS)

1. Basisgrootheden en grondeenheden

Het TS heeft als grondslag 3 basisgrootheden, waarvan de eenheden grondeenheden genoemd worden :

basisgrootheid	grondeenheid
lengte	meter
kracht	kilogramkracht
tijd	sekonde

Als symbool voor kilogramkracht komt voor :
- kgf, afgeleid van het Franse woord kilogramme-force;
- kp, afgeleid van het Zweedse en het Duitse woord Kilopond.

Het technisch stelsel (TS) is een "statisch" eenhedenstelsel omdat het zijn oorsprong vindt in de studie van de statika waar uitsluitend beschouwingen over krachten worden gehouden en het begrip massa geen rol speelt.

De benaming "technisch stelsel" betekent helemaal niet, dat het betrokken stelsel meer geschikt zou zijn voor gebruik in de techniek dan andere eenhedenstelsels; de betrokken benaming duidt er alleen op dat dit stelsel vooral in de techniek veel werd gebruikt.

2. Definitie van de eenheid "kilogramkracht"

Oorspronkelijk was de kilogramkracht gedefinieerd als het gewicht (op aarde) van het standaardkilogram. Het gewicht van het standaardkilogram, waarvan de massa gelijk is aan 1 kg, bedroeg per definitie 1 kilogramkracht.

In onderhavig hoofdstuk wordt met de grootheid "gewicht" steeds een kracht bedoeld; dat dit anders niet steeds het geval is moge blijken uit Hoofdstuk XIII.

Hoewel de massa van een lichaam niet afhankelijk is van de plaats op aarde, is dit wel het geval voor het gewicht van dat lichaam. Immers, het aardse zwaarteveld-varieert naargelang van de breedteligging, en de hoogte boven de zeespiegel.

Op de aarde wordt de versnelling van de zwaartekracht (zwaarteveldsterkte) ter hoogte van de zeespiegel gegeven door volgende uitdrukking (internationaal aangenomen in 1967) :

$$g = g_{evenaar} \cdot (1 + 0{,}005\ 302\ 4 \sin^2 \varphi - 0{,}000\ 005\ 9 \sin^2 2\varphi)$$

met $g_{evenaar} = 9{,}780\ 318 \frac{m}{s^2}$

φ = breedtegraad

Door toepassing van bovenstaande uitdrukking bekomt men :

- aan de evenaar (0° breedte) : $g = 9{,}780\ 318 \frac{m}{s^2}$
- op een breedte van 45° : $g = 9{,}806\ 190 \frac{m}{s^2}$
- op een breedte van 51° (breedtecirkel die door België loopt) : $g = 9{,}811\ 583 \frac{m}{s^2}$
- aan de polen (90° breedte) : $g = 9{,}832\ 177 \frac{m}{s^2}$

Op de maan is de versnelling van de zwaartekracht (zwaarteveldsterkte) gelijk aan 1,62 m/s^2 (ongeveer één zesde van de versnelling van de zwaartekracht op aarde).

Indien men zich zou beperkt hebben tot de definitie : 1 kilogrammassa weegt 1 kilogramkracht (zowel aan de evenaar als aan de polen), dan zou dat tot gevolg gehad hebben dat de grootte van de éénheid van kracht afhankelijk zou geweest zijn van de plaats op aarde. Dit komt duidelijk tot uiting wanneer men de betrokken kracht (1 kgf) uitdrukt in SI-eenheden met behulp van de algemene groothedenvergelijking :

kracht = massa x versnelling

met massa = 1 kg

versnelling = plaatselijke versnelling van de zwaartekracht (plaatselijke zwaarteveldsterkte)

Men zou dan bekomen hebben (met $\frac{m}{s^2} = \frac{kg \cdot \frac{m}{s^2}}{kg} = \frac{N}{kg}$) :

- aan de evenaar :

  1 kgf = 1 kg . 9,780 318 N/kg = 9,780 318 N

- op een breedte van 45° :

  1 kgf = 1 kg . 9,806 190 N/kg = 9,806 190 N

- aan de polen :

  1 kgf = 1 kg . 9,832 177 N/kg = 9,832 177 N

Teneinde deze moeilijkheid te omzeilen, en te komen in het TS tot een krachteenheid met onveranderlijke grootte, heeft de 3de CGPM in 1901 een normversnelling aangenomen, en deze vastgesteld op :

$$g_n = 9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2} \quad \left(= 9{,}806\ 65\ \frac{N}{kg}\right)$$

Te dien tijde had men de bedoeling als normversnelling de waarde te nemen van g op een breedte van 45° ter hoogte van de zeespiegel. Achteraf bleek dat bedoelde g iets kleiner was dan de waarde die werd aangenomen als normversnelling. Per definitie werd de waarde 9,806 65 m/s^2 behouden. Deze waarde is een konstante, onafhankelijk van de plaatselijke sterkte van het aardse zwaarteveld. Trouwens, ook buiten de aarde, bijvoorbeeld op de maan of een ander hemellichaam, blijft g_n dezelfde konstante waarde behouden.

De kilogramkracht (kgf) werd dan gedefinieerd als het werkelijk gewicht van het standaardkilogram bij een versnelling gelijk aan de normversnelling. Derhalve bekomt men als eenhedenvergelijking tussen de TS-eenheid van kracht en de SI-eenheid van kracht :

$$1\ kgf = 1\ kg \cdot g_n = 1\ kg \cdot 9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2} = 9{,}806\ 65\ N$$

3. Normgewicht G_n en werkelijk gewicht G

3.1. Normgewicht G_n

Door het aannemen van het begrip "normversnelling" komt men ook tot het begrip "normgewicht" voorgesteld door het symbool G_n . Het normgewicht G_n is gelijk aan het werkelijk gewicht bij een versnelling (zwaarteveldsterkte) gelijk aan de normversnelling. Het normgewicht G_n van een lichaam

is een stofeigenschap, onafhankelijk van de plaatselijke zwaarteveldsterkte. Niet alleen de massa van een lichaam is onveranderlijk, doch ook het normgewicht. Dit geldt ook bijvoorbeeld voor een lichaam op de maan, waar de sterkte van het zwaarteveld ongeveer één zesde bedraagt van de sterkte van het zwaarteveld op de aarde.

In het TS is men door een kunstmatige ingreep (het invoeren van de normversnelling g_n) gekomen tot de definitie van "normgewicht" waarvan de getalwaarde bij het gebruik van de TS-eenheid kgf, gelijk is aan de getalwaarde van de massa bij het gebruik van de SI-eenheid kg. Het getal dat in het SI de massa m van een lichaam weergeeft in kg, is dus steeds gelijk aan het getal dat in het TS het normgewicht G_n weergeeft in kgf :

$$\{m\}_{SI} = \{G_n\}_{TS}$$

Vertrekkend vanaf de massa m (uit het toenmalige MKS-stelsel, thans SI) uitgedrukt in de SI-eenheid kg, komt men in het TS tot het normgewicht G_n uitgedrukt in kgf door het invoeren van de normversnelling g_n. In het SI doet men beroep op de grootheid massa om een hoeveelheid aan te duiden; in het TS echter doet men hiervoor geen beroep op de grootheid massa, maar wel op de grootheid normgewicht. Wanneer men dan in het TS toch de grootheid massa van doen had, bekwam men deze door het delen van G_n door g_n.

Bij het gebruik van SI-eenheden dient deze omweg niet gemaakt te worden vermits massa er een basisgrootheid is, en men voor het weergeven van een hoeveelheid, rechtstreeks beroep kan doen op de voorhanden zijnde grootheid massa. In het SI komen de grootheden "normversnelling" en "normgewicht" dan ook niet voor.

Tot na de tweede wereldoorlog werden zowel de eenheid van *massa* uit het MKS-stelsel (thans SI) als de eenheid van *kracht* uit het TS kilogram genoemd, met symbool kg. Men achtte deze gelijkheid van naam voor twee dimensioneel verschillende eenheden geen bezwaar. Onder g en kg verstond men ofwel grammassa en kilogrammassa ofwel gramkracht en kilogramkracht;

uit de kontekst en de aard van de zaak moest blijken waarover het ging. Dit gaf uiteraard aanleiding tot misverstanden en vergissingen. Om hieraan te verhelpen werd het symbool kgf (of kp in sommige landen) ingevoerd voor kilogramkracht, terwijl het symbool kg werd behouden voor kilogrammassa, met als benaming : kilogram.

3.2. Werkelijk gewicht G

De tweede wet van Newton luidt :

kracht = massa x versnelling

waaruit volgt : gewicht = massa x zwaarteveldsterkte

In het SI wordt dit voorgesteld als volgt :

$$F = m \cdot a$$

$$G = m \cdot g$$

In het TS bestaat er geen eigen symbool voor de grootheid massa, en is de voorstelling als volgt :

$$F = \frac{G_n}{g_n} \cdot a$$

$$G = \frac{G_n}{g_n} \cdot g = G_n \cdot \frac{g}{g_n}$$

Hoe groot is nu, nauwkeurig uitgedrukt, de kracht uitgeoefend door het plaatselijk zwaarteveld, op een massa gelijk aan 1 kg, op de aarde ter hoogte van de zeespiegel respektievelijk aan de evenaar, op een breedte van 45° en aan de polen, en op de maan ?

Men bekomt :

- aan de evenaar :

$$G = G_n \cdot \frac{g}{g_n} = 1 \text{ kgf} \cdot \frac{9{,}780\ 318 \text{ m/s}^2}{9{,}806\ 65 \text{ m/s}^2} = 0{,}997\ 315 \text{ kgf} \qquad \text{(TS)}$$

$$G = m \cdot g = 1 \text{ kg} \cdot 9{,}780\ 318 \frac{\text{N}}{\text{kg}} = 9{,}780\ 318 \text{ N} \qquad \text{(SI)}$$

- op een breedte van 45° :

$$G = G_n \cdot \frac{g}{g_n} = 1 \text{ kgf} \cdot \frac{9{,}806\ 190 \text{ m/s}^2}{9{,}806\ 65 \text{ m/s}^2} = 0{,}999\ 953 \text{ kgf} \qquad \text{(TS)}$$

$$G = m \cdot g = 1 \text{ kg} \cdot 9{,}806\ 190 \frac{\text{N}}{\text{kg}} = 9{,}806\ 190 \text{ N} \qquad \text{(SI)}$$

- op een breedte van 51° :

$$G = G_n \cdot \frac{g}{g_n} = 1 \text{ kgf} \cdot \frac{9{,}811\ 583 \text{ m/s}^2}{9{,}806\ 65 \text{ m/s}^2} = 1{,}000\ 503 \text{ kgf} \qquad \text{(TS)}$$

$$G = m \cdot g = 1 \text{ kg} \cdot 9{,}811\ 583 \frac{\text{N}}{\text{kg}} = 9{,}811\ 583 \text{ N} \qquad \text{(SI)}$$

- aan de polen :

$$G = G_n \cdot \frac{g}{g_n} = 1 \text{ kgf} \cdot \frac{9{,}832\ 177 \text{ m/s}^2}{9{,}806\ 65 \text{ m/s}^2} = 1{,}002\ 603 \text{ kgf} \qquad \text{(TS)}$$

$$G = m \cdot g = 1 \text{ kg} \cdot 9{,}832\ 177 \frac{\text{N}}{\text{kg}} = 9{,}832\ 177 \text{ N} \qquad \text{(SI)}$$

- op de maan :

$$G = G_n \cdot \frac{g}{g_n} = 1 \text{ kgf} \cdot \frac{1{,}62 \text{ m/s}^2}{9{,}806\ 65 \text{ m/s}^2} = 0{,}165\ 194 \text{ kgf} \qquad \text{(TS)}$$

$$G = m \cdot g = 1 \text{ kg} \cdot 1{,}62 \frac{\text{N}}{\text{kg}} = 1{,}62 \text{ N} \qquad \text{(SI)}$$

3.3. Het gebruik in de praktijk van de symbolen G_n, G, g_n en g, en de weerslag hiervan op de schrijfwijze van groothedenvergelijkingen in het TS

Door het feit dat op aarde, in de nabijheid van het aardoppervlak, de waarde van g slechts weinig varieert, werd in de praktijk geen rekening gehouden met deze variatie. Ook de waarde van g_n lag tussen de uiterste grenzen die men op aarde aantreft voor g, daar g_n immers bij benadering gelijk is aan de versnelling van de zwaartekracht op aarde op een breedte van 45° ter hoogte van de zeespiegel. Men rekende eenvoudig met de afgeronde waarde $g = g_n = 9{,}81 \text{ m/s}^2$; het symbool g_n werd meestal zelfs niet gebruikt, en het symbool g kon zowel de werkelijke versnelling als de normversnelling voorstellen.

Ook tussen G en G_n werd geen onderscheid gemaakt en men gebruikte het symbool G zowel voor het werkelijk gewicht als voor het normgewicht. De getalwaarde die men in aanmerking nam voor G, uitgedrukt in de TS-eenheid kgf, was gelijk aan de getalwaarde van de massa m, uitgedrukt in de SI-eenheid kg. In feite gebruikte men dus de waarde van G_n, echter voorgesteld door het symbool G. Een dergelijke vereenvoudiging kan toelaatbaar worden geacht (tenzij voor heel nauwkeurige berekeningen) voor verschijnselen op aarde, waar men bij benadering kan aannemen dat $g = g_n = 9{,}81 \text{ m/s}^2$.

Zolang men dus problemen behandelt die zich voordoen op aarde of in de nabijheid van het aardoppervlak, is het van minder belang dat men geen onderscheid maakt tussen het werkelijk gewicht G en het normgewicht G_n, omdat op aarde G en G_n slechts weinig van elkaar verschillen.

Dit gaat echter helemaal niet meer op voor verschijnselen die zich voordoen op een plaats waar de plaatselijke versnelling van de zwaartekracht (zwaarteveldsterkte) veel verschilt van de normversnelling g_n, die overal (dus ook op de maan bijvoorbeeld) gelijk is aan 9,806 65 m/s^2. Op een dergelijke plaats dient men dus wel het onderscheid te maken tussen G_n en G, en tussen g_n en g. Op de maan bijvoorbeeld bedraagt het werkelijk gewicht G slechts één zesde van het normgewicht G_n.

Het feit dat men, voor de verschijnselen op aarde, geen onderscheid maakte tussen g en g_n, had ook zijn invloed op de wijze waarop de groothedenvergelijkingen werden geschreven. Wanneer bij een nauwkeurige schrijfwijze, bijvoorbeeld in de teller g zou voorgekomen zijn en g_n in de noemer (ofwel g_n in de teller en g in de noemer), werden bij de gebruikelijke schrijfwijze zowel g als g_n weggelaten, zodat de grootheid g niet meer voorkwam in de uitdrukking, hoewel het ging om een verschijnsel waarin de versnelling van de zwaartekracht (zwaarteveldsterkte) betrokken was. Dat bracht mee dat de betrokken vergelijkingen enkel geldig waren op aarde (waar, met een goede benadering, g_n en de plaatselijke g aan elkaar kunnen gelijkgesteld worden), doch niet op een ander hemellichaam. Op de maan bijvoorbeeld blijft g_n gelijk aan 9,806 65 m/s^2, doch de waarde van g bedraagt er slechts ongeveer één zesde van de waarde van g op aarde.

Anderzijds kon het symbool g bij de gebruikelijke schrijfwijze wel voorkomen in een groothedenvergelijking betreffende een verschijnsel waarin de versnelling van de zwaartekracht (zwaarteveldsterkte) niet te pas komt. In deze gevallen ging het dan echter om g_n (die een konstante is), doch men schreef niet het symbool g_n doch wel g.

Het hoeft geen betoog, dat de gebruikelijke schrijfwijze van de groothedenvergelijkingen die gericht waren op het gebruik van het TS, aanleiding heeft gegeven tot veel verwarringen en fouten. Men had dit kunnen vermij-

den, indien men steeds konsekwent het onderscheid had gemaakt tussen G_n en G, en tussen g_n en g.

4. De koherente afgeleide eenheid van massa en voorstelling van de grootheid massa in het TS

4.1. Definitie van de afgeleide eenheid van massa in het TS

De definitie van een kilogramkracht luidt, dat de kilogramkracht gelijk is aan het werkelijk gewicht van het standaardkilogram bij een versnelling gelijk aan de normversnelling. De massa van het standaardkilogram is gelijk aan de eenheid van massa in het SI (en is ook gelijk aan het duizendvoud van de eenheid van massa in het CGS-stelsel), doch vormt niet de eenheid van massa in het TS.

Daar in het TS niet de massa, doch wel de kracht tot de basisgrootheden behoort, is de eenheid van massa in het TS een afgeleide eenheid. De logisch afgeleide, koherente eenheid van massa is gelijk aan die massa die onder invloed van een kracht gelijk aan 1 kgf, een versnelling krijgt van 1 m/s^2 :

$$\text{eenheid van massa in het TS} = \frac{1\ \text{kgf}}{1\ \text{m/s}^2} = 1\ \frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}$$

Hoe groot is nu deze massa, vergeleken met de massa van het standaardkilogram ?
Het standaardkilogram krijgt, onder invloed van een kracht van 1 kgf (= 9,806 65 N), een versnelling van 9,806 65 m/s^2.
Wanneer de massa 9,806 65 maal groter wordt genomen (dus gelijk aan 9,806 65 kg), zal onder invloed van dezelfde kracht, de versnelling 9,806 65 maal kleiner worden (dus gelijk zijn aan 1 m/s^2).

Hieruit leidt men het verband af tussen de TS-eenheid van massa $\left(\frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}\right)$ en de SI-eenheid van massa (kg) :

$$1\ \frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}} = 9{,}806\ 65\ \text{kg}$$

De TS-eenheid van massa $\left(\frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}\right)$ werd in het Nederlandse taalgebied soms (grote) massaal genoemd, in Duitsland Kilohyl (khyl).

Voor het definiëren van de eenheid van kracht kgf in het TS werd beroep gedaan op de eenheid van massa kg (uit het toenmalig MKS-stelsel waaruit later het SI ontstond) en de normversnelling g_n; deze definitie luidt : de eenheid van kracht kgf is gelijk aan het werkelijk gewicht van het standaardkilogram bij een versnelling gelijk aan de normversnelling.

Een andere definitie zou kunnen geweest zijn : de eenheid van kracht kgf is gelijk aan de kracht die aan een massa van 9,806 65 kg (= 1 massaal of Kilohyl) een versnelling geeft van 1 m/s^2 :

$$1 \text{ kgf} = 9{,}806\ 65 \text{ kg} \cdot 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 9{,}806\ 65 \text{ N}$$

$$= 1 \frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}} \cdot 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$= 1 \text{ khyl} \cdot 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Eenmaal dat de eenheid van massa in het TS vastgelegd is, kan men de vergelijking 1 kgf = 1 kg . g_n ook voorstellen als volgt :

$$1 \text{ kgf} = 1 \text{ kg} \cdot g_n$$

$$= \frac{1}{9{,}806\ 65} \frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}} \cdot g_n$$

$$= \frac{1}{9{,}806\ 65} \frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}} \cdot 9{,}806\ 65 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

4.2. Voorstelling van de grootheid massa in het TS

Men bekomt de massa, uitgedrukt in $\frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}$, door het normgewicht G_n (uitgedrukt in kgf) te delen door de normversnelling g_n (uitgedrukt in m/s^2) ofwel door het werkelijk gewicht G (uitgedrukt in kgf) te delen door de werkelijke plaatselijke versnelling van de zwaartekracht g (uitgedrukt in m/s^2).

In het TS wordt een massa niet voorgesteld door het symbool m zoals in het SI, maar wel door $\frac{G_n}{g_n}$ (bij een nauwkeurige en korrekte schrijfwijze).

Voorbeelden :

- tweede wet van Newton : kracht = massa x versnelling :

TS : $F = \frac{G_n}{g_n} \cdot a$ SI : $F = m \cdot a$

- gewicht G :

TS : $G = \frac{G_n}{g_n} \cdot g$ SI : $G = m \cdot g$

- centripetale kracht F_{cp} en centrifugale kracht F_{cf} bij een cirkelvormige beweging :

TS : $F_{cp} = F_{cf} = \frac{G_n}{g_n} \cdot \omega^2 \cdot r = \frac{G_n}{g_n} \cdot \frac{v^2}{r} = \frac{G_n}{g_n} \cdot \frac{4\pi^2 \cdot r}{T^2}$

SI : $F_{cp} = F_{cf} = m \cdot \omega^2 \cdot r = \frac{m \cdot v^2}{r} = \frac{4\pi^2 \cdot m \cdot r}{T^2}$

Er weze nogmaals eraan herinnerd dat g_n = 9,806 65 m/s^2, en dat de getalwaarde van het normgewicht G_n, uitgedrukt in kgf, gelijk is aan de getalwaarde van de massa m, uitgedrukt in kg :

$$\{G_n\}_{kgf} = \{m\}_{kg}$$

Bij de gebruikelijke schrijfwijze echter werd de index n achterwege gelaten, en werd de massa voorgesteld door $\frac{G}{g}$.

Voor de getalwaarde van de grootheid G (uitgedrukt in kgf) gebruikte men echter dezelfde getalwaarde als voor de massa van het betrokken lichaam, uitgedrukt in kg. Dus maakte men eigenlijk gebruik van de grootheid G_n, doch stelde deze grootheid voor door het symbool G. Derhalve diende men voor g, ook de waarde van g_n te gebruiken. Voor het berekenen van de massa van een lichaam op aarde was dit onderscheid van minder belang (tenzij voor nauwkeurige berekeningen), omdat men voor praktisch gebruik zowel g (om het even waar op aarde) als g_n gelijkstelde aan 9,81 m/s^2.

Voor het berekenen van de massa van een lichaam op de maan liggen de zaken helemaal anders; indien men daar de gebruikelijke (doch minder nauwkeurige) uitdrukking $\frac{G}{g}$ toepast, dient men er zich bewust van te zijn dat, daar met G eigenlijk G_n bedoeld is, g niet de versnelling van de zwaartekracht op de maan voorstelt doch wel de normversnelling g_n.
Voorbeeld :

Een lichaam met als massa m = 20 kg (kg = eenheid van massa in het

SI), heeft in het TS als normgewicht : G_n = 20 kgf. Uitgedrukt in $\frac{\text{kgf . s}^2}{\text{m}}$ bedraagt de massa :

$$\frac{G_n}{g_n} = \frac{20 \text{ kgf}}{9{,}806\ 65 \text{ m/s}^2} = 2{,}039\ 432 \frac{\text{kgf . s}^2}{\text{m}}$$

De gebruikelijke schrijfwijze in het TS was :

$$\frac{G}{g} = \frac{20 \text{ kgf}}{9{,}806\ 65 \text{ m/s}^2} = 2{,}039\ 432 \frac{\text{kgf . s}^2}{\text{m}}$$

$$\approx \frac{20 \text{ kgf}}{9{,}81 \text{ m/s}^2} \approx 2{,}039 \frac{\text{kgf . s}^2}{\text{m}}$$

Wanneer men nu aan de hand van de gebruikelijke schrijfwijze, de massa van eenzelfde lichaam op de maan wil berekenen, dient men te werk te gaan als volgt :

$$\frac{G}{g} = \frac{20 \text{ kgf}}{9{,}806\ 65 \text{ m/s}^2}$$

Het zou *foutief* zijn te schrijven (gebruik makend van de versnelling van de zwaartekracht op de maan die gelijk is aan 1,62 m/s^2) :

$$\frac{G}{g} = \frac{20 \text{ kgf}}{1{,}62 \text{ m/s}^2}$$

Het (werkelijk) gewicht van hetzelfde lichaam aan de evenaar, op een breedte van 45°, aan de polen en op de maan bedraagt respektievelijk :

- aan de evenaar :

$$G_1 = \frac{G_n}{g_n} \cdot g_1 = \frac{20 \text{ kgf . } 9{,}780\ 318 \text{ m/s}^2}{9{,}806\ 65 \text{ m/s}^2} = 19{,}946\ 298 \text{ kgf}$$

- op een breedte van 45° :

$$G_2 = \frac{G_n}{g_n} \cdot g_2 = \frac{20 \text{ kgf . } 9{,}806\ 190 \text{ m/s}^2}{9{,}806\ 65 \text{ m/s}^2} = 19{,}999\ 062 \text{ kgf}$$

- aan de polen :

$$G_3 = \frac{G_n}{g_n} \cdot g_3 = \frac{20 \text{ kgf . } 9{,}832\ 177 \text{ m/s}^2}{9{,}806\ 65 \text{ m/s}^2} = 20{,}052\ 061 \text{ kgf}$$

- op de maan :

$$G_4 = \frac{G_n}{g_n} \cdot g_4 = \frac{20 \text{ kgf . } 1{,}62 \text{ m/s}^2}{9{,}806\ 65 \text{ m/s}^2} = 3{,}303\ 881 \text{ kgf}$$

Indien men de massa in $\frac{\text{kgf . s}^2}{\text{m}}$ wil berekenen, vertrekkend vanaf het werkelijk gewicht G, dient men dit werkelijk gewicht G (uitgedrukt in kgf) te delen door de werkelijke versnelling g (uitgedrukt in m/s^2).

Men bekomt :

- aan de evenaar :

$$\frac{G_1}{g_1} = \frac{19{,}946\ 298\ \text{kgf}}{9{,}780\ 318\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 2{,}039\ 432\ \frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}$$

- op een breedte van 45° :

$$\frac{G_2}{g_2} = \frac{19{,}999\ 062\ \text{kgf}}{9{,}806\ 190\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 2{,}039\ 432\ \frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}$$

- aan de polen :

$$\frac{G_3}{g_3} = \frac{20{,}052\ 061\ \text{kgf}}{9{,}832\ 177\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 2{,}039\ 432\ \frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}$$

- op de maan :

$$\frac{G_4}{g_4} = \frac{3{,}303\ 881\ \text{kgf}}{1{,}62\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 2{,}039\ 432\ \frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}$$

We stellen vast, dat :

$$\frac{G_n}{g_n} = \frac{G_1}{g_1} = \frac{G_2}{g_2} = \frac{G_3}{g_3} = \frac{G_4}{g_4} = 2{,}039\ 432\ \frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}$$

Dit bevestigt dat de massa van een lichaam een onveranderlijke grootheid is, onafhankelijk van de plaatselijke versnelling van de zwaartekracht (plaatselijke zwaarteveldsterkte).

4.3. De normversnelling g_n en de grootte van de afgeleide eenheid van massa in het TS

Indien men bij de definitie van de kilogramkracht (kgf) niet de normversnelling had ingevoerd, zou de grootte van de eenheid van kracht afhankelijk geweest zijn van de plaatselijke versnelling van de zwaartekracht. Uitgedrukt in SI-eenheden, zou men bekomen hebben :

- aan de evenaar : 1 kgf = 9,780 318 N
- op een breedte van 45° : 1 kgf = 9,806 190 N
- aan de polen : 1 kgf = 9,832 177 N

Ook de grootte van de eenheid van massa zou in het TS niet konstant geweest zijn; men zou bekomen hebben :

- aan de evenaar : $1 \frac{kgf \cdot s^2}{m} = \frac{9{,}780\ 318\ N}{1\ m/s^2} = 9{,}780\ 318\ kg$

- op een breedte van 45° : $1 \frac{kgf \cdot s^2}{m} = \frac{9{,}806\ 190\ N}{1\ m/s^2} = 9{,}806\ 190\ kg$

- aan de polen : $1 \frac{kgf \cdot s^2}{m} = \frac{9{,}832\ 177\ N}{1\ m/s^2} = 9{,}832\ 177\ kg$

Door het invoeren van de normversnelling bij de definitie van de eenheid van kracht in het TS, kreeg niet alleen de eenheid van kracht (kgf) een nauwkeurige konstante grootte, doch ook de afgeleide eenheid van massa $\left(\frac{kgf \cdot s^2}{m}\right)$:

$$1\ kgf = 9{,}806\ 65\ N$$

$$1 \frac{kgf \cdot s^2}{m} = 9{,}806\ 65\ kg$$

5. Overige eenheden in het TS

5.1. Koherente afgeleide TS-eenheden

Hierna treft men, naast de grondeenheden, de voornaamste afgeleide koherente TS-eenheden aan, alsook de overeenkomstige grootheden (die allen behoren tot het gebied van de mechanika).

grootheid	koherente TS-eenheid
lengte	m
kracht	kgf (of kp)
tijd	s
oppervlakte	m^2
volume	m^3
snelheid	$\frac{m}{s}$
versnelling	$\frac{m}{s^2}$
massa	$\frac{kg \cdot s^2}{m}$
arbeid	kgf . m

vermogen	$\frac{kgf \cdot m}{s}$
druk	$\frac{kgf}{m^2}$
volumestroom	$\frac{m^3}{s}$
normgewichtsstroom	$\frac{kgf}{s}$
dynamische viskositeit	$\frac{kgf \cdot s}{m^2}$
kinematische viskositeit	$\frac{m^2}{s}$

Opmerkingen

De koherente TS-eenheid van dynamische viskositeit η en van kinematische viskositeit ν worden afgeleid als volgt :

- TS-eenheid van dynamische viskositeit :

  De kracht F die vereist is om een vloeistoflaag met oppervlakte A te verschuiven met een relatieve snelheid w ten opzichte van een even grote vloeistoflaag die zich bevindt op een afstand d, is gelijk aan de weerstandskracht W. Men noemt dynamische viskositeit η de grootheid $\frac{W \cdot d}{A \cdot w}$.

  Men bekomt als koherente, van de grondeenheden afgeleide eenheid :

$$\frac{kgf \cdot m}{m^2 \cdot \frac{m}{s}} = \frac{kgf \cdot s}{m^2}$$

- TS-eenheid van kinematische viskositeit :

  De kinematische viskositeit is gelijk aan de dynamische viskositeit, gedeeld door de soortelijke massa (die in het TS wordt voorgesteld door $\frac{\frac{G_n}{g_n}}{V} = \frac{\frac{G_n}{V}}{g_n} = \frac{\gamma_n}{g_n}$) :

$$\nu = \frac{\eta}{\frac{\gamma_n}{g_n}} = \frac{\eta \cdot g_n}{\gamma_n}$$

Men bekomt als koherente, van de grondeenheden afgeleide eenheid :

$$\frac{\frac{kgf \cdot s}{m^2}}{\frac{kgf \cdot s^2}{m^4}} = \frac{\frac{m}{s^2} \cdot \frac{kgf \cdot s}{m^2}}{\frac{kgf}{m^3}} = \frac{m^2}{s}$$

5.2. Niet-koherente TS-eenheden

Naast de koherente, van de grondeenheden afgeleide eenheden werden in het TS ook veel niet-koherente eenheden gebruikt, waarvan er zelfs enkele (bijvoorbeeld hp, psi) behoren tot het Angelsaksische TS. Hierna worden de voornaamste van deze eenheden opgegeven :

grootheid	eenheid	
	benaming	symbool
energie onder de vorm van arbeid	paardekracht uur	pk.h
energie onder de vorm van warmte	calorie kilocalorie	cal kcal
vermogen als arbeid gedeeld door tijd	paardekracht horsepower	pk hp
vermogen als warmte gedeeld door tijd	calorie per uur	$\frac{cal}{h}$
	kilocalorie per uur	$\frac{kcal}{h}$
druk	technische atmosfeer	at
	fysische atmosfeer	atm
	meter waterkolom	mWK, mH_2O
	millimeter waterkolom	mmWK, mmH_2O
	millimeter kwik(kolom)	mmHg
	torr	Torr
	pound per square inch	psi, $\frac{lbf}{in^2}$

volumestroom	kubieke meter per uur	$\frac{m^3}{h}$
	liter per uur	$\frac{L}{h}$, $\frac{l}{h}$
	liter per minuut	$\frac{L}{min}$, $\frac{l}{min}$
normgewichtsstroom	kilogram(kracht) per uur	$\frac{kgf}{h}$

5.3. Elektrische eenheden

In het TS werden geen elektrische eenheden afgeleid van de grondeenheden; naast de hierboven aangegeven (mechanische) eenheden gebruikte men in de praktijk voor elektrische en elektromagnetische grootheden enerzijds achtereenvolgens de eenheden uit het kwadrantstelsel van 1881 (absolute praktische eenheden), de internationale elektrische eenheden van 1908 en de elektrische MKSA-eenheden van 1948, en anderzijds sommige em-CGS-eenheden waarvan enkele een eigen benaming hebben gekregen (gilbert, oersted, gauss, maxwell).

6. Weergave in het TS van een druk door de hoogte van een vloeistofkolom

6.1. Hydrostatische druk (zie ook Hoofdstuk XIV, onder 2.3.6.)

Een vloeistofkolom oefent op haar basis een druk uit die rechtstreeks evenredig is met de hoogte h van de betrokken vloeistofkolom. Daar de hoogte h van deze vloeistofkolom dus een maat is voor de druk op de basis, werd in het TS deze druk weergegeven in m (of mm) vloeistofkolom (waterkolom, kwikkolom, ...); hiermede wordt de druk bedoeld, die een kolom vloeistof (water, kwik, ...) van de betrokken hoogte uitoefent op haar basis (hydrostatische druk).

Voor het weergeven van een *druk* wordt in het SI geen gebruik gemaakt van de eenheden "m of mm vloeistofkolom" of "m of mm waterkolom" of "mm kwikkolom" enz. De *hoogte* echter van een vloeistofkolom (waterkolom, kwikkolom, ...) wordt in het SI uiteraard uitgedrukt in een eenheid van lengte.

Als algemene groothedenvergelijking voor de (hydrostatische) druk p uitgeoefend op de basis door een vloeistofkolom met hoogte h, geldt :

- in het TS :

$$p = \frac{\text{werkelijk gewicht}}{\text{grondoppervlakte}} = \frac{\frac{G_n}{g_n} \cdot g}{\text{grondoppervlakte}}$$

$$= \frac{\frac{G_n}{g_n} \cdot g \cdot h}{\text{grondoppervlakte} \cdot h} = \frac{\frac{G_n}{g_n} \cdot g \cdot h}{V}$$

$$= \frac{\frac{G_n}{V}}{g_n} \cdot g \cdot h = \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h \quad \left(\text{TS-eenheid : } \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}\right)$$

De gebruikelijke schrijfwijze was echter : $p = \gamma \cdot h$

- in het SI :

$$p = \frac{\text{werkelijk gewicht}}{\text{grondoppervlakte}} = \frac{m \cdot g}{\text{grondoppervlakte}}$$

$$= \frac{m \cdot g \cdot h}{\text{grondoppervlakte} \cdot h} = \frac{m \cdot g \cdot h}{V} = \rho \cdot g \cdot h$$

(SI-eenheid : Pa)

6.2. Meter en millimeter waterkolom (mWK; mmWK)

6.2.1. Inleiding

Daar vloeistoffen praktisch onsamendrukbaar zijn, zijn bij vloeistoffen zowel γ_n als ρ praktisch onafhankelijk van de heersende druk. Ze zijn echter wel afhankelijk van de temperatuur van de betrokken vloeistof, daar het volume zich wijzigt in funktie van de temperatuur (uitzetting of inkrimping). Bijgevolg zal de druk uitgeoefend op de basis door een kolom water op 20 °C van 1 m hoog, niet gelijk zijn aan de druk uitgeoefend op de basis door een kolom water van 50 °C die eveneens 1 m hoog is. Nochtans zou men beide drukken kunnen aanduiden met 1 mWK. Teneinde echter dergelijke onnauwkeurigheden te vermijden, werd nauwkeurig bepaald waaraan 1 mmWK beantwoordt. Een eerste definitie werd echter later gewijzigd door een tweede definitie.

6.2.2. Eerste definitie van mmWK (mmH_2O)

In het TS werd de mmWK volgens een eerste definitie bepaald als volgt : één mmWK is gedefinieerd als de druk uitgeoefend op de basis door een kolom water van 1 mm hoog, bij een versnelling van de zwaartekracht gelijk aan de normversnelling, waarbij het soortelijk normgewicht van het water gelijk is aan zijn maximale waarde (bij normale atmosferische druk). De maximale waarde van het soortelijk normgewicht van water bij normale atmosferische druk komt voor bij 4 °C en bedraagt :

$$\gamma_{n\ max} = 999{,}972\ \frac{kgf}{m^3}$$

Een druk van 1 mmWK stemt derhalve volgens de *eerste definitie overeen met* een druk p_1 gegeven door :

$$p_1 = \frac{\gamma_{n\ max}}{g_n} \cdot g_n \cdot h = \gamma_{n\ max} \cdot h = 999{,}972\ \frac{kgf}{m^3} \cdot 0{,}001\ m = 0{,}999\ 972\ \frac{kgf}{m^2}$$

In het SI zou men deze definitie van mmWK (die echter geen SI-eenheid is) enigszins anders formuleren. Hier zou men zeggen, dat één mmWK gelijk is aan de druk uitgeoefend op de basis door een kolom water van 1 mm hoog bij een versnelling van de zwaartekracht gelijk aan de normversnelling, waarbij de soortelijke massa (volumieke massa) van het water gelijk is aan zijn maximale waarde (bij normale atmosferische druk). De maximale waarde van de soortelijke massa (volumieke massa) van water bij normale atmosferische druk komt voor bij 4 °C en bedraagt : $\rho_{max} = 999{,}972\ \frac{kg}{m^3}$. Een druk van 1 mmWK stemt derhalve volgens de eerste definitie overeen met een druk p_1, gegeven door :

$$p_1 = \rho_{max} \cdot g_n \cdot h = 999{,}972\ \frac{kg}{m^3} \cdot 9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2} \cdot 0{,}001\ m$$

$$= 9{,}806\ 375\ 414\ Pa$$

In overeenstemming met deze eerste definitie geldt dus :

$$1\ mmWK = 0{,}999\ 972\ \frac{kgf}{m^2} = 9{,}806\ 375\ 414\ Pa$$

$$1\ mWK = 999{,}972\ \frac{kgf}{m^2} = 9806{,}375\ 414\ Pa$$

6.2.3. Tweede definitie van mmWK (mmH_2O)

De mmWK volgens deze tweede definitie, wordt soms "konventionele" mmWK genoemd. Met mmWK wordt, wanneer geen nadere toelichting wordt gegeven, steeds de "konventionele" mmWK bedoeld.
Als tweede definitie geldt :

$$1 \text{ konv. mmWK} = 1 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} = 9{,}806\ 65 \text{ Pa}$$

Dit komt er op neer, dat de druk p_2 op de basis van de kolom water van 1 mm hoogte berekend wordt volgens de eerste definitie, met dien verstande echter dat niet $\gamma_{n\ max}$ noch ρ_{max} in aanmerking worden genomen, doch wel een γ_n gelijk aan 1000 $\frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$ en een ρ gelijk aan 1000 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.
Aldus bekomt men :

$$p_2 = \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g_n \cdot h = \gamma_n \cdot h = 1000 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3} \cdot 0{,}001 \text{ m} = 1 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

$$p_2 = \rho \cdot g_n \cdot h = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9{,}806\ 65 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0{,}001 \text{ m} = 9{,}806\ 65 \text{ Pa}$$

In overeenstemming met deze tweede definitie geldt dus :

$$1 \text{ (konventionele) mmWK} = 1 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} = 9{,}806\ 65 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ (konventionele) mWK} = 1000 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} = 9806{,}65 \text{ Pa}$$

6.2.4. Verband tussen de werkelijke hoogte h_w in meter van een kolom water, en de hydrostatische druk weergegeven enerzijds in mWK (h_1) volgens de eerste definitie en anderzijds in mWK (h_2) volgens de tweede definitie

Dit verband wordt gegeven door :

- in het TS :

$$\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h_w = \frac{\gamma_{n\ max}}{g_n} \cdot g_n \cdot h_1 = \gamma_{n\ max} \cdot h_1$$

$$= \frac{1000 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}}{g_n} \cdot g_n \cdot h_2 = 1000 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3} \cdot h_2$$

- in het SI :

$$\rho \cdot g \cdot h_w = \rho_{max} \cdot g_n \cdot h_1$$

$$= 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot g_n \cdot h_2$$

Hieruit volgt :

$$h_1 = \frac{\gamma_n}{\gamma_{n\,max}} \cdot \frac{g}{g_n} \cdot h_w$$

$$= \frac{\rho}{\rho_{max}} \cdot \frac{g}{g_n} \cdot h_w$$

$$h_2 = \frac{\gamma_n}{1000\ \frac{kgf}{m^3}} \cdot \frac{g}{g_n} \cdot h_w$$

$$= \frac{\rho}{1000\ \frac{kg}{m^3}} \cdot \frac{g}{g_n} \cdot h_w$$

Voorbeeld :

Bereken de (hydrostatische) druk weergegeven in mWK, uitgeoefend op de basis door een kolom water op 30 °C van 25 m hoog (= h_w) aan de evenaar.
Voor water op 30 °C geldt :

$$\gamma_n = 995{,}6\ \frac{kgf}{m^3} \qquad (TS)$$

$$\rho = 995{,}6\ \frac{kg}{m^3} \qquad (SI)$$

De versnelling van de zwaartekracht aan de evenaar is gelijk aan $9{,}780\ 318\ \frac{m}{s^2}$.

Toepassing van bovenstaande uitdrukkingen geeft :

$$h_1 = \frac{995{,}6\ \frac{kgf}{m^3}}{999{,}972\ \frac{kgf}{m^3}} \cdot \frac{9{,}780\ 318\ \frac{m}{s^2}}{9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2}} \cdot 25\ m = 24{,}823\ 863\ mWK$$

$$= \frac{995{,}6\ \frac{kg}{m^3}}{999{,}972\ \frac{kg}{m^3}} \cdot \frac{9{,}780\ 318\ \frac{m}{s^2}}{9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2}} \cdot 25\ m = 24{,}823\ 863\ mWK$$

$$h_2 = \frac{995{,}6\ \frac{kgf}{m^3}}{1000\ \frac{kgf}{m^3}} \cdot \frac{9{,}780\ 318\ \frac{m}{s^2}}{9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2}} \cdot 25\ m = 24{,}823\ 167\ mWK \quad (konv.)$$

$$= \frac{995{,}6\ \frac{kg}{m^3}}{1000\ \frac{kg}{m^3}} \cdot \frac{9{,}780\ 318\ \frac{m}{s^2}}{9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2}} \cdot 25\ m = 24{,}823\ 167\ mWK \quad (konv.)$$

De onderlinge verschillen tussen h_w, h_1 en h_2 zijn klein. Dit is echter niet meer het geval wanneer men dezelfde berekening zou maken voor een

kolom water op 30 °C van 25 m hoog (= h_w) die zich op de maan zou bevinden. Dan zou men bekomen (met $g_{maan} = 1{,}62\ \frac{m}{s^2}$) :

$$h_1 = \frac{995{,}6\ \frac{kgf}{m^3}}{999{,}972\ \frac{kgf}{m^3}} \cdot \frac{1{,}62\ \frac{m}{s^2}}{9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2}} \cdot 25\ m = 4{,}111\ 794\ mWK$$

$$= \frac{995{,}6\ \frac{kg}{m^3}}{999{,}972\ \frac{kg}{m^3}} \cdot \frac{1{,}62\ \frac{m}{s^2}}{9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2}} \cdot 25\ m = 4{,}111\ 794\ mWK$$

$$h_2 = \frac{995{,}6\ \frac{kgf}{m^3}}{1000\ \frac{kgf}{m^3}} \cdot \frac{1{,}62\ \frac{m}{s^2}}{9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2}} \cdot 25\ m = 4{,}111\ 679\ mWK \quad (konv.)$$

$$= \frac{995{,}6\ \frac{kg}{m^3}}{1000\ \frac{kg}{m^3}} \cdot \frac{1{,}62\ \frac{m}{s^2}}{9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2}} \cdot 25\ m = 4{,}111\ 679\ mWK \quad (konv.)$$

Men stelt vast, dat het verschil tussen h_1 en h_2 klein blijft, vermits men steeds heeft :

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{1000}{999{,}972} = 1{,}000\ 028$$

Maar h_1 en h_2 verschillen thans wel veel van de werkelijke hoogte h_w vermits zij hier slechts ongeveer één zesde bedragen van h_w (die gelijk is aan 25 m). Naarmate (bij gebruik van het TS) de waarde van het produkt $\gamma_n \cdot g$ meer verschilt van de waarde van het produkt $\gamma_{n\ max} \cdot g_n$ of van het produkt $1000\ \frac{kgf}{m^3} \cdot g_n$, of naarmate (bij gebruik van het SI) de waarde van het produkt $\rho \cdot g$ meer verschilt van het produkt $\rho_{max} \cdot g_n$ of van het produkt $1000\ \frac{kg}{m^3} \cdot g_n$, zal ook het verschil groter worden tussen enerzijds h_1 en h_2 en anderzijds h_w.

6.3. Millimeter kwik (mmHg) en de eenheid torr (Torr)

6.3.1. Millimeter kwik (mmHg)

Door een besluit van de 7^{de} CGPM (1927) werd de normale atmosferische druk (atm_{1927}) bepaald als de druk uitgeoefend op de basis bij een versnelling van de zwaartekracht gelijk aan de normversnelling, door een kolom kwik van 760 mm hoog, met een soortelijke massa van $13\ 595{,}1\ \frac{kg}{m^3}$.

Dit is met een zeer goede benadering, de soortelijke massa van kwik onder normale atmosferische druk bij 0 °C, die gelijk is aan 13 595,08 $\frac{kg}{m^3}$.

Men bekomt :

- in het TS :

$$1\ atm_{1927} = \frac{\gamma_{n\ 0\ °C}}{g_n} \cdot g_n \cdot h = \gamma_{n\ 0\ °C} \cdot h = 13\ 595{,}1\ \frac{kgf}{m^3} \cdot 0{,}760\ m$$

$$= 10\ 332{,}276\ \frac{kgf}{m^2}$$

- in het SI :

$$1\ atm_{1927} = \rho_{0\ °C} \cdot g_n \cdot h = 13\ 595{,}1\ \frac{kg}{m^3} \cdot 9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2} \cdot 0{,}760\ m$$

$$= 101\ 325{,}0144\ Pa$$

Het 760ste deel van 1 atm_{1927} werd mmHg genoemd :

$$1\ mmHg = \frac{1\ atm_{1927}}{760} = \frac{10\ 332{,}276}{760}\ \frac{kgf}{m^2} = 13{,}5951\ \frac{kgf}{m^2}$$

$$= \frac{101\ 325{,}0144}{760}\ Pa = 133{,}322\ 387\ 4\ Pa$$

waaruit volgt :

$$1\ atm_{1927} = 760\ mmHg \qquad \text{(exact)}$$

6.3.2. De eenheid torr (Torr)

Door de 9de CGPM (1948) werd een nieuwe definitie vastgelegd van de normale atmosferische druk, namelijk :

$$1\ atm = 1\ 013\ 250\ \frac{dyn}{cm^2} = 101\ 325\ \frac{N}{m^2}$$

In 1971 werd door de 14de CGPM de benaming pascal toegekend aan de eenheid N/m^2.

Omgerekend in $\frac{kgf}{m^2}$ bekomt men :

$$1\ atm = \frac{101\ 325}{9{,}806\ 65}\ \frac{kgf}{m^2} = 10\ 332{,}274\ 53\ \frac{kgf}{m^2}$$

Het 760ste deel van 1 atm (volgens deze laatste definitie) werd torr (symbool Torr) genoemd :

$$1\ \text{Torr} = \frac{1}{760}\ \text{atm} = \frac{101\ 325}{760}\ \text{Pa} = 133{,}322\ 368\ 4\ \text{Pa}$$

$$= \frac{\frac{101\ 325}{9{,}806\ 65}\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}}{760} = 13{,}595\ 098\ 06\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

waaruit volgt :

$$1\ \text{atm} = 760\ \text{Torr} \quad \text{(exact)}$$

Het onderscheid tussen mmHg en Torr is zeer gering en praktisch te verwaarlozen :

$$1\ \text{mmHg} = \frac{13{,}5951}{13{,}595\ 098\ 06}\ \text{Torr} = 1{,}000\ 000\ 14\ \ldots\ \text{Torr}$$

$$= \frac{133{,}322\ 387\ 4}{133{,}322\ 368\ 4}\ \text{Torr} = 1{,}000\ 000\ 14\ \ldots\ \text{Torr}$$

$$1\ \text{atm} = 101\ 325\ \text{Pa} = 760\ \text{Torr}$$

$$= \frac{101\ 325}{133{,}322\ 387\ 4}\ \text{mmHg} = 759{,}999\ 891\ 8\ \text{mmHg}$$

6.3.3. Verband tussen de werkelijke hoogte h_w in mm van een kolom kwik en de hydrostatische druk h weergegeven in mmHg

Dit verband wordt gegeven door :

- in het TS :

$$\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h_w = \frac{13\ 595{,}1\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}}{g_n} \cdot g_n \cdot h = 13\ 595{,}1\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3} \cdot h$$

- in het SI :

$$\rho \cdot g \cdot h_w = \rho_{0\ °C} \cdot g_n \cdot h = 13\ 595{,}1\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot g_n \cdot h$$

Hieruit volgt :

$$h = \frac{\gamma_n}{13\ 595{,}1\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}} \cdot \frac{g}{g_n} \cdot h_w$$

$$= \frac{\rho}{13\ 595{,}1\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \cdot \frac{g}{g_n} \cdot h_w$$

Voorbeeld :

Bereken de werkelijke hoogte h_w van een kolom kwik op 20 °C wanneer de druk uitgeoefend op de basis gelijk is aan de normale atmosferische druk

(h = 759,999 891 8 mmHg) en de plaatselijke versnelling van de zwaartekracht gelijk is aan 9,811 583 $\frac{m}{s^2}$ (dit is de versnelling van de zwaartekracht op een breedte van 51°).

Voor kwik op 20 °C geldt :

$$\gamma_{n\ 20\ °C} = 13\ 545{,}884\ \frac{kgf}{m^3} \qquad (TS)$$

$$\rho_{20\ °C} = 13\ 545{,}884\ \frac{kg}{m^3} \qquad (SI)$$

De werkelijke hoogte h_w van de kolom kwik wordt gegeven door (met h = 759,999 891 8 mmHg) :

$$h_w = \frac{13\ 595{,}1\ \frac{kgf}{m^3}}{\gamma_{n\ 20\ °C}} \cdot \frac{g_n}{g} \cdot h = \frac{13\ 595{,}1\ \frac{kgf}{m^3}}{13\ 545{,}884\ \frac{kgf}{m^3}} \cdot \frac{9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2}}{9{,}811\ 583\ \frac{m}{s^2}} \cdot 0{,}759\ 999\ 891\ 8\ m$$

$$= 0{,}762\ 377\ 688\ 8\ m$$

$$= 762{,}377\ 688\ 8\ mm$$

$$= \frac{13\ 595{,}1\ \frac{kg}{m^3}}{\rho_{20\ °C}} \cdot \frac{g_n}{g} \cdot h = \frac{13\ 595{,}1\ \frac{kg}{m^3}}{13\ 545{,}884\ \frac{kg}{m^3}} \cdot \frac{9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2}}{9{,}811\ 583\ \frac{m}{s^2}} \cdot 0{,}759\ 999\ 891\ 8\ m$$

$$= 0{,}762\ 377\ 688\ 8\ m$$

$$= 762{,}377\ 688\ 8\ mm$$

Zowel aan h als aan h_w beantwoordt in dit voorbeeld een druk van 101 325 Pa (= normale atmosferische druk) :

$$\rho_{0\ °C} \cdot g_n \cdot h = 13\ 595{,}1\ \frac{kg}{m^3} \cdot 9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2} \cdot 0{,}759\ 999\ 891\ 8\ m = 101\ 325\ Pa$$

$$\rho_{20\ °C} \cdot g \cdot h_w = 13\ 545{,}884\ \frac{kg}{m^3} \cdot 9{,}811\ 583\ \frac{m}{s^2} \cdot 0{,}762\ 377\ 688\ 8\ m = 101\ 325\ Pa$$

6.3.4. Verband tussen de werkelijke hoogte h_w in mm van een kolom kwik en de hydrostatische druk h in Torr

Dit verband wordt gegeven door :

- in het TS :

$$\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h_w = 13\ 595{,}098\ 06\ \frac{kgf}{m^3} \cdot h$$

- in het SI :

$$\rho \cdot g \cdot h_w = 13\ 595{,}098\ 06\ \frac{kg}{m^3} \cdot g_n \cdot h$$

Hieruit volgt :

$$h = \frac{\gamma_n}{13\ 595{,}098\ 06\ \frac{kgf}{m^3}} \cdot \frac{g}{g_n} \cdot h_w$$

$$= \frac{\rho}{13\ 595{,}098\ 06\ \frac{kg}{m^3}} \cdot \frac{g}{g_n} \cdot h_w$$

Voorbeeld :

Bereken de werkelijke hoogte h_w van een kolom kwik op 20 °C wanneer de druk uitgeoefend op de basis gelijk is aan de normale atmosferische druk (h = 760 Torr) en de plaatselijke versnelling van de zwaartekracht gelijk is aan 9,811 583 $\frac{m}{s^2}$ (dit is de versnelling van de zwaartekracht op een breedte van 51°). Voor kwik op 20 °C geldt :

$$\gamma_{n\ 20\ °C} = 13\ 545{,}884\ \frac{kgf}{m^3}$$

$$\rho_{20\ °C} = 13\ 545{,}884\ \frac{kg}{m^3}$$

De werkelijke hoogte h_w van de kolom kwik wordt gegeven door (met h = 760 Torr) :

$$h_w = \frac{13\ 595{,}098\ 06\ \frac{kgf}{m^3}}{\gamma_{n\ 20\ °C}} \cdot \frac{g_n}{g} \cdot h = \frac{13\ 595{,}098\ 06\ \frac{kgf}{m^3}}{13\ 545{,}884\ \frac{kgf}{m^3}} \cdot \frac{9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2}}{9{,}811\ 583\ \frac{m}{s^2}} \cdot 0{,}760\ m$$

$$= 0{,}762\ 377\ 688\ 8\ m$$

$$= 762{,}377\ 688\ 8\ mm$$

$$= \frac{13\ 595{,}098\ 06\ \frac{kg}{m^3}}{\rho_{20\ °C}} \cdot \frac{g_n}{g} \cdot h = \frac{13\ 595{,}098\ 06\ \frac{kg}{m^3}}{13\ 545{,}884\ \frac{kg}{m^3}} \cdot \frac{9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2}}{9{,}811\ 583\ \frac{m}{s^2}} \cdot 0{,}760\ m$$

$$= 0{,}762\ 377\ 688\ 8\ m$$

$$= 762{,}377\ 688\ 8\ mm$$

7. Omzettingen tussen sommige eenheden uit het TS (en het Angelsaksische TS) enerzijds en eenheden uit het CGS-stelsel en SI-eenheden anderzijds, of tussen TS-eenheden onderling

a. kracht

☆ 1 kgf = 9,806 65 N

= 980 665 dyn

☆ $1\ N = \frac{1}{9{,}806\ 65}\ kgf = 0{,}101\ 971\ 621\ 3\ kgf \approx 0{,}102\ kgf$

$= 100\ 000\ dyn$

b. vermogen

☆ $1\ \frac{kgf \cdot m}{s} = 9{,}806\ 65\ \frac{N \cdot m}{s} = 9{,}806\ 65\ \frac{J}{s} = 9{,}806\ 65\ W$

$= 9{,}806\ 65 \cdot 10^7\ \frac{erg}{s}$

$= \frac{1}{75}\ pk = 0{,}013\ 333\ 333\ 33\ pk$

☆ $1\ pk = 75\ \frac{kgf \cdot m}{s} = 75 \times 9{,}806\ 65\ \frac{N \cdot m}{s} = 735{,}498\ 75\ W \approx 735{,}5\ W$

$= 0{,}735\ 498\ 75\ kW$

$= 735{,}498\ 75 \cdot 10^7\ \frac{erg}{s}$

De afronding 1 pk = 736 W komt nogal veel voor omdat vooraf reeds het getal 9,806 65 werd afgerond tot 9,81; hiermede bekomt men :
$1\ pk = 75 \times 9{,}81\ \frac{N \cdot m}{s} = 735{,}75\ W$, of afgerond : 736 W
Bij afronding tot op de eenheid nauwkeurig van de (nauwkeurige) waarde van 735,498 75 W, bekomt men : 1 pk = 735 W

☆ 1 hp = 1 horsepower $= 550\ \frac{ft \cdot lbf}{s}$ (zie ook Hoofdstuk XV, onder 5.15.)

$= 550 \cdot \frac{0{,}3048\ m \times 0{,}453\ 592\ 37 \times 9{,}806\ 65\ N}{s} = 745{,}699\ 871\ 5\ W$

$= 550 \cdot \frac{0{,}3048\ m \cdot 0{,}453\ 592\ 37\ kgf}{s} = 76{,}040\ 224\ 91\ \frac{kgf \cdot m}{s}$

$= 1{,}013\ 869\ 665\ pk$

☆ $1\ \frac{kcal}{h} = \frac{4186{,}8\ J}{3600\ s} = 1{,}163\ W$ (exact)

☆ $1\ W = 1\ \frac{J}{s}$

$= \frac{1}{9{,}806\ 65}\ \frac{kgf \cdot m}{s} = 0{,}101\ 971\ 621\ 3\ \frac{kgf \cdot m}{s} \approx 0{,}102\ \frac{kgf \cdot m}{s}$

$= 0{,}001\ kW$

$= 10^7\ \frac{erg}{s}$

$= \frac{1}{735{,}498\ 75}\ pk = 0{,}001\ 359\ 621\ 617\ pk$

$= \frac{1}{4186{,}8}\ \frac{kcal}{s} = \frac{3600}{4186{,}8}\ \frac{kcal}{h} = 0{,}859\ 845\ 227\ 9\ \frac{kcal}{h} \approx 0{,}860\ \frac{kcal}{h}$

☆ $1\ kW = 1000\ W = 1000\ \frac{J}{s} = \frac{1000}{9,806\ 65}\ \frac{kgf\ .\ m}{s} = 101,971\ 621\ 3\ \frac{kgf\ .\ m}{s}$

$\approx 102\ \frac{kgf\ .\ m}{s}$

$= 10^{10}\ \frac{erg}{s}$

$= \frac{1000}{735,498\ 75}\ pk = 1,359\ 621\ 617\ pk \approx 1,36\ pk$

$= \frac{1}{4,1868}\ \frac{kcal}{s} = \frac{3600}{4,1868}\ \frac{kcal}{h} = 859,845\ 227\ 9\ \frac{kcal}{h} \approx 860\ \frac{kcal}{h}$

c. energie (arbeid, warmte)

☆ $1\ kgf\ .\ m = 9,806\ 65\ N.m = 9,806\ 65\ J$

$= 9,806\ 65\ .\ 10^7\ erg$

$= \frac{9,806\ 65}{4186,8}\ kcal = 0,002\ 342\ 278\ 112\ kcal$ (zie ook Hoofdstuk V, onder 2.5.)

☆ $1\ pk\ .\ h = 75\ \frac{kgf\ .\ m}{s}\ .\ 3600\ s = 270\ 000\ kgf\ .\ m$

$= 75\ \frac{kgf\ .\ m}{s}\ .\ 9,806\ 65\ \frac{J}{kgf\ .\ m}\ .\ 3600\ s = 2\ 647\ 795,5\ J$

$= 735,498\ 75\ \frac{J}{s}\ .\ 3600\ s = 735,498\ 75\ W\ .\ 1\ h = 735,498\ 75\ W\ .\ h$

$= 0,735\ 498\ 75\ kW\ .\ h$

$= \frac{75 \times 9,806\ 65 \times 3600}{4186,8}\ kcal = 632,415\ kcal$ (zie ook Hoofdstuk V, onder 2.7.)

☆ $1\ W\ .\ h = 1\ \frac{J}{s}\ .\ 3600\ s = 3600\ J$

$= 0,001\ kW\ .\ h$

$= \frac{1}{735,498\ 75}\ pk\ .\ 3600\ s = \frac{1}{735,498\ 75}\ pk\ .\ 1\ h$

$= 0,001\ 359\ 621\ 617\ pk\ .\ h$

$= 3600\ J\ .\ \frac{1}{9,806\ 65}\ \frac{kgf\ .\ m}{J} = 367,097\ 836\ 7\ kgf\ .\ m$

$= \frac{3600}{4186,8}\ kcal = 0,859\ 845\ 227\ 9\ kcal \approx 0,860\ kcal$

☆ $1\ kW\ .\ h = 1000\ W\ .\ h = 1000\ \frac{J}{s}\ .\ 3600\ s = 3\ 600\ 000\ J = 3600\ kJ = 3,6\ MJ$

$= \frac{1000}{735,498\ 75}\ pk\ .\ 3600\ s = \frac{1000}{735,498\ 75}\ pk\ .\ 1\ h = 1,359\ 621\ 617\ pk\ .\ h$

$= 3\ 600\ 000\ J\ .\ \frac{1}{9,806\ 65}\ \frac{kgf\ .\ m}{J} = 367\ 097,8367\ kgf\ .\ m$

$= \frac{3\ 600\ 000}{4186,8}\ kcal = 859,845\ 227\ 9\ kcal \approx 860\ kcal$

(zie ook Hoofdstuk V, onder 2.4.)

☆ 1 kcal = 4186,8 J (exact) (zie ook Hoofdstuk V, onder 2.3.3.)

$= \frac{4186,8}{9,806\ 65}$ kgf . m = 426,934 784 0 kgf . m ≈ 427 kgf . m

$= \frac{4186,8}{3600}$ W . h = 1,163 W . h (exact)

= 0,001 163 kW . h (exact)

☆ 1 J = 1 N . m = 10^7 erg

$= \frac{1}{9,806\ 65}$ kgf . m = 0,101 971 621 3 kgf . m ≈ 0,102 kgf . m

$= \frac{1}{4186,8}$ kcal = 0,000 238 845 896 6 kcal ≈ 0,000 239 kcal

d. dynamische viskositeit η

☆ 1 $\frac{kgf\ .\ s}{m^2} = \frac{9,806\ 65\ N\ .\ s}{m^2}$ = 9,806 65 $\frac{N\ .\ s}{m^2}$ = 9,806 65 Pa . s

= 9806,65 mPa . s

$= \frac{980\ 665\ dyn\ .\ s}{(100\ cm)^2}$ = 98,0665 $\frac{dyn\ .\ s}{cm^2}$ = 98,0665 P

= 9806,65 cP

☆ 1 P = 1 $\frac{dyn\ .\ s}{cm^2}$ = 0,1 Pa . s

= 100 mPa . s

= 100 cP

☆ 1 cP = 1 mPa . s

= 0,001 Pa . s

= 0,01 P

☆ 1 Pa . s = 1 $\frac{N\ .\ s}{m^2}$ (vroeger in Frankrijk genoemd : 1 poiseuille, symbool Pl)

= 1000 mPa . s

= 1000 cP

= 10 P

e. kinematische viskositeit ν

☆ 1 $\frac{m^2}{s}$ (TS) = 1 $\frac{m^2}{s}$ (SI)

$= \frac{(100\ cm)^2}{s}$ = 10 000 $\frac{cm^2}{s}$ = 10 000 St

$= \frac{(1000\ mm)^2}{s}$ = 1 000 000 $\frac{mm^2}{s}$ = 1 000 000 cST

☆ 1 St = 1 $\frac{cm^2}{s}$ = 0,0001 $\frac{m^2}{s}$ = 100 cSt

☆ 1 cSt = 0,01 $\frac{cm^2}{s}$ = 0,000 001 $\frac{m^2}{s}$ = 1 $\frac{mm^2}{s}$ = 0,01 St

f. druk

☆ technische atmosfeer (at) : 1 at = 1 $\frac{kgf}{cm^2}$

1 at = 1 $\frac{kgf}{cm^2}$ = 10 000 $\frac{kgf}{m^2}$

= 98 066,5 Pa

= 98,0665 kPa ≈ 100 kPa

= 0,098 066 5 MPa ≈ 0,1 MPa

= 0,980 665 bar ≈ 1 bar

= 980,665 mbar

= 980 665 $\frac{dyn}{cm^2}$ $\left(\frac{dyn}{cm^2} = \mu bar\right)$

= $\frac{98\ 066,5}{101\ 325}$ atm = 0,967 841 105 4 atm

= 10 000 mmWK (konv.)

= 10 mWK (konv.)

= $\frac{10\ 000}{13,5951}$ mmHg = 735,559 135 3 mmHg ≈ 735,56 mmHg

= $\frac{\frac{98\ 066,5}{101\ 325}}{760}$ Torr = 735,559 240 1 Torr ≈ 735,56 Torr

= $\frac{\frac{1}{0,453\ 592\ 37}\ lbf}{\left(\frac{1}{2,54}\right)^2\ in^2}$ = 14,223 343 31 $\frac{lbf}{in^2}$ $\left(\frac{lbf}{in^2} = psi\right)$

☆ kgf per mm^2

1 $\frac{kgf}{mm^2}$ = 9,806 65 $\frac{N}{mm^2}$ = 9,806 65 . 10^6 Pa = 9,806 65 MPa

☆ fysische atmosfeer : 1 atm = 101 325 Pa = normale atmosferische druk

1 atm = 101 325 Pa

= 101,325 kPa

= 0,101 325 MPa

= 1,013 25 bar

= 1013,25 mbar = 1013,25 hPa (mbar = hPa)

= 1 013 250 $\frac{dyn}{cm^2}$ $\left(\frac{dyn}{cm^2} = \mu bar\right)$

$= \frac{101\ 325}{9,806\ 65}\ \frac{kgf}{m^2} = 10\ 332,274\ 53\ \frac{kgf}{m^2}$

$= \frac{101\ 325}{98\ 066,5}\ at = 1,033\ 227\ 453\ at \quad \left(at = \frac{kg}{cm^2}\right)$

$= \frac{101\ 325}{9,806\ 65}$ konv. mmWK = 10 332,274 53 mmWK (konv.)

$= \frac{10\ 332,274\ 53}{13,5951}$ mmHg = 759,999 891 9 mmHg $\approx$ 760 mmHg

= 760 Torr (exact)

☆ bar : 1 bar = $10^6\ \frac{dyn}{cm^2}$

1 bar = $10^6\ \frac{dyn}{cm^2} \quad \left(\frac{dyn}{cm^2} = \mu bar\right)$

= 10^5 Pa = 100 000 Pa

= 100 kPa

= 0,1 MPa

= 1000 mbar

$= \frac{100\ 000}{101\ 325}$ atm = 0,986 923 266 7 atm

$= \frac{100\ 000}{98\ 066,5}\ at = 1,019\ 716\ 213\ at \quad \left(at = \frac{kgf}{cm^2}\right)$

$\approx$ 1,02 at

$= \frac{100\ 000}{9,806\ 65}\ \frac{kgf}{m^2} = 10\ 197,162\ 13\ \frac{kgf}{m^2}$

$= \frac{100\ 000}{9,806\ 65}$ konv. mmWK = 10 197,162 13 mmWK (konv.)

= 10,197 162 13 mWK $\approx$ 10,2 mWK (konv.)

$= \frac{10\ 197,162\ 13}{13,5951}$ mmHg = 750,061 575 9 mmHg $\approx$ 750,062 mmHg

$= \frac{100\ 000}{\frac{101\ 325}{760}}$ = 750,061 682 7 Torr $\approx$ 750,062 Torr

☆ millibar : 1 mbar = 0,001 bar

1 mbar = 0,001 bar

= 1000 $\frac{dyn}{cm^2} \quad \left(\frac{dyn}{cm^2} = \mu bar\right)$

= 100 Pa = 1 hPa

= 0,1 kPa

= 0,0001 MPa

= 0,000 986 923 266 7 atm

= 0,001 019 716 213 at $\quad \left(at = \frac{kgf}{cm^2}\right)$

$= 10{,}197\ 162\ 13\ \frac{kgf}{m^2}$

$= 10{,}197\ 162\ 13$ mmWK (konv.)

$= 0{,}750\ 061\ 575\ 9$ mmHg $\approx 0{,}750\ 062$ mmHg

$= 0{,}750\ 061\ 682\ 7$ Torr $\approx 0{,}750\ 062$ Torr

☆ konventionele mmWK

1 mmWK $= 1\ \frac{kgf}{m^2}$

(konv.)

$= 0{,}0001$ at $\quad \left(\text{at} = \frac{kgf}{cm^2}\right)$

$= 9{,}806\ 65$ Pa

$= 9{,}806\ 65 \cdot 10^{-3}$ kPa

$= 9{,}806\ 65 \cdot 10^{-6}$ MPa

$= 0{,}000\ 098\ 066\ 5$ bar

$= 0{,}098\ 066\ 5$ mbar

$= 98{,}0665\ \frac{dyn}{cm^2} \quad \left(\frac{dyn}{cm^2} = \mu\text{bar}\right)$

$= 0{,}000\ 096\ 784\ 110\ 54$ atm

$= 0{,}073\ 555\ 913\ 53$ mmHg $\approx 0{,}073\ 556$ mmHg

$= 0{,}073\ 555\ 924\ 01$ Torr $\approx 0{,}073\ 556$ Torr

☆ konventionele mWK

1 mWK $= 1000\ \frac{kgf}{m^2}$

(konv.)

$= 0{,}1$ at $\quad \left(\text{at} = \frac{kgf}{cm^2}\right)$

$= 9806{,}65$ Pa

$= 9{,}806\ 65$ kPa

$= 9{,}806\ 65 \cdot 10^{-3}$ MPa

$= 0{,}098\ 066\ 5$ bar

$= 98{,}0665$ mbar

$= 98\ 066{,}5\ \frac{dyn}{cm^2} \quad \left(\frac{dyn}{cm^2} = \mu\text{bar}\right)$

$= 0{,}096\ 784\ 110\ 54$ atm

$= 1000$ mmWK

$= 73{,}555\ 913\ 53$ mmHg $\approx 73{,}556$ mmHg

$= 73{,}555\ 924\ 01$ Torr $\approx 73{,}556$ Torr

☆ Torr

1 Torr $= \frac{1}{760}$ atm $= 0{,}001\ 315\ 789\ 474$ atm

$= \frac{101\ 325\ Pa}{760} = 133{,}322\ 368\ 4\ Pa \approx 133{,}322\ Pa$

$= 0{,}133\ 322\ kPa$

$= 0{,}000\ 133\ 322\ MPa$

$= \frac{1{,}013\ 25}{760}\ bar = 0{,}001\ 333\ 223\ 684\ bar$

$= \frac{1013{,}25}{760}\ mbar = 1{,}333\ 223\ 684\ mbar$

$= \frac{1\ 013\ 250\ \frac{dyn}{cm^2}}{760} = 1333{,}223\ 684\ \frac{dyn}{cm^2} \qquad \left(\frac{dyn}{cm^2} = \mu bar\right)$

$= \frac{10\ 332{,}274\ 53\ \frac{kgf}{m^2}}{760} = 13{,}595\ 098\ 07\ \frac{kgf}{m^2}$

$= \frac{1{,}033\ 227\ 453}{760}\ at = 0{,}001\ 359\ 509\ 807\ at \qquad \left(at = \frac{kgf}{cm^2}\right)$

$= \frac{10\ 332{,}274\ 53}{760}\ mmWK = 13{,}595\ 098\ 07\ mmWK$ (konv.)

$= \frac{759{,}999\ 891\ 9}{760}\ mmHg = 0{,}999\ 999\ 857\ 8\ mmHg \approx 1\ mmHg$

☆ 1 mmHg (konventioneel)

$1\ mmHg\ (konv.) = \frac{1\ atm_{1927}}{760} = \frac{13\ 595{,}1\ \frac{kg}{m^3} \cdot 9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2} \cdot 0{,}76\ m}{760}$

$= \frac{101\ 325{,}0144\ Pa}{760}$

$= 133{,}322\ 387\ 4\ Pa \approx 133{,}322\ Pa$

$= 1{,}000\ 000\ 14\ Torr \approx 1\ Torr$

☆ pound per square inch (zie ook Hoofdstuk XV, onder 5.12.)

$1\ \frac{lbf}{in^2} = 1\ psi = \frac{0{,}453\ 592\ 37\ kgf}{(0{,}0254)^2\ m^2} = 703{,}069\ 579\ 6\ \frac{kgf}{m^2}$

$= 703{,}069\ 579\ 6\ mmWK\ (konv.) \approx 703\ mmWK\ (konv.)$

$= 0{,}070\ 306\ 957\ 96\ \frac{kgf}{cm^2} \qquad \left(\frac{kgf}{cm^2} = at\right)$

$= \frac{0{,}453\ 592\ 37 \times 9{,}806\ 65}{(0{,}0254)^2}\ Pa = 6894{,}757\ 293\ Pa$

$= 0{,}068\ 947\ 572\ 93\ bar$

$= 68{,}947\ 572\ 93\ mbar$

☆ pascal

$1\ Pa = 1\ \frac{N}{m^2}$

$= 10^{-5}\ bar = 0{,}000\ 01\ bar$

$= 0{,}01\ mbar$

$= 10 \frac{dyn}{cm^2}$ $\left(\frac{dyn}{cm^2} = \mu bar\right)$

$= \frac{1}{98\,066,5}$ at $\left(at = \frac{kgf}{cm^2}\right)$

$= \frac{1}{9,806\,65} \frac{kgf}{m^2} = 0,101\,971\,621\,3 \frac{kgf}{m^2} \approx 0,102 \frac{kgf}{m^2}$

$= \frac{1}{101\,325}$ atm

☆ kilopascal

1 kPa = 1000 Pa

$= 0,01$ bar

$= 10$ mbar

$= 10\,000 \frac{dyn}{cm^2}$ $\left(\frac{dyn}{cm^2} = \mu bar\right)$

$= \frac{1000}{98\,066,5}$ at $= 0,010\,197\,162\,13$ at $\left(at = \frac{kgf}{cm^2}\right)$

$= \frac{1000}{9,806\,65} \frac{kgf}{m^2} = 101,971\,621\,3 \frac{kgf}{m^2} \approx 102 \frac{kgf}{m^2}$

$= 101,971\,621\,3$ mmWK (konv.) ≈ 102 mmWK (konv.)

$= \frac{1000}{101\,325}$ atm $= 0,009\,869\,232\,667$ atm

☆ megapascal

1 MPa $= 10^6$ Pa $= 1\,000\,000$ Pa

$= 1000$ kPa

$= 1 \frac{N}{mm^2}$

$= 10$ bar

$= 10\,000$ mbar

$= 10^7 \frac{dyn}{cm^2}$ $\left(\frac{dyn}{cm^2} = \mu bar\right)$

$= \frac{1\,000\,000}{98\,066,5}$ at $= 10,197\,162\,13$ at $\approx 10,2$ at $\left(at = \frac{kgf}{cm^2}\right)$

$= \frac{1\,000\,000}{9,806\,65} \frac{kgf}{m^2} = 101\,971,6213 \frac{kgf}{m^2}$

$= 101\,971,6213$ mmWK (konv.)

$= 101,971\,621\,3$ mWK (konv.) ≈ 102 mWK (konv.)

$= \frac{1\,000\,000}{101\,325}$ atm $= 9,869\,232\,667$ atm

8. Eenheden van energie (arbeid of warmte) en van vermogen in de mechanika, de elektriciteitsleer en de verwarmingstechniek, vroeger en nu

Verschillende vakgebieden van de techniek hadden vroeger elk hun eigen eenheid van energie (arbeid of warmte) en van vermogen. Sinds de invoering van de SI-eenheden geldt voor alle vakgebieden dezelfde eenheid van energie (arbeid of warmte) en van vermogen, namelijk respektievelijk de joule (J) en de watt (W). Deze eenheden waren vroeger reeds gebruikelijk in de elektriciteitsleer.

In de mechanika was de eenheid van arbeid de kilogrammeter (kgf . m) en in de verwarmingstechniek was de eenheid van warmte de kilocalorie (kcal).

Vroeger werd de eenheid van vermogen "watt" gebruikt om het vermogen weer te geven van elektrische toestellen voor verwarming en verlichting en soms ook van elektrische motoren. Het vermogen van benzine- en diesel-motoren en meestal ook van elektrische motoren, werd uitgedrukt in paarde-kracht (1 pk = 75 $\frac{kgf \cdot m}{s}$), terwijl het vermogen van een verwarmingsketel, en van niet-elektrische verwarmingslichamen werd weergegeven in kcal/h. Voortaan worden al de betrokken vermogens uitgedrukt in watt (W).

Bijgaande tabel geeft een overzicht van de betrokken eenheden van energie (arbeid of warmte) en van vermogen.

		gebruikelijke eenheid vroeger	SI-eenheid	omrekening
energie (arbeid of warmte)	mechanika	kilogrammeter (kgf . m)	joule (J)	1kgf . m = 9,806 65 J ≈ 9,81 J
	elektriciteitsleer	joule (J) kilowattuur (kW . h)	joule (J)	1 kW . h = 3 600 000 J = 3600 kJ = 3,6 MJ
	verwarmingstechniek	kilocalorie (kcal)	joule (J)	1 kcal = 4186,8 J = 4,1868 kJ
vermogen	mechanika	kilogrammeter per sekonde $\left(\frac{\text{kgf . m}}{\text{s}}\right)$ paardekracht (pk) $\left(1\ \text{pk} = 75\ \frac{\text{kgf . m}}{\text{s}}\right)$	joule per sekonde = watt $\left(\frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{W}\right)$	$1\ \frac{\text{kgf . m}}{\text{s}}$ = 9,806 65 W ≈ 9,81 W 1 pk = 735,498 75 W ≈ 735,5 W
	elektriciteitsleer	joule per sekonde = watt $\left(\frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{W}\right)$	joule per sekonde = watt $\left(\frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{W}\right)$	
	verwarmingstechniek	kilocalorie per uur $\left(\frac{\text{kcal}}{\text{h}}\right)$	joule per sekonde = watt $\left(\frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{W}\right)$	$1\ \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$ = 1,163 W

HOOFDSTUK XII

VERVALLEN EENHEDEN EN EENHEDENSTELSELS, IN BEPAALDE LANDEN TIJDELIJK ERKENDE ANGELSAKSISCHE EENHEDEN, INTERNATIONAAL VERSPREIDE DOCH NIET DOOR DE EEG ERKENDE EENHEDEN

1. Vervallen eenheden en eenhedenstelsels

1.1. Eenheden en symbolen die vervallen zijn uiterlijk op 31 december 1977

- kilogramkracht : kgf — 1 kgf = 9,806 65 N
- technische atmosfeer : at (= 1 kgf/cm^2) — 1 at = 98 066,5 Pa
- meter waterkolom : mWK of mH_2O — 1 mWK = 9806,65 Pa
- millimeter waterkolom : mmWK of mmH_2O — 1 mmWK = 9,806 65 Pa
- millimeter kwik(kolom) : mmHg — 1 mmHg ≈ 133,322 Pa
  (alleen voor het aanduiden van de bloeddruk en de druk van andere lichaamsvloeistoffen mag de mmHg behouden blijven)
- torr : Torr — 1 Torr ≈ 133,322 Pa
- calorie 15 °C : cal_{15} — 1 cal_{15} = 4,1855 J
- kilocalorie 15 °C : $kcal_{15}$ — 1 $kcal_{15}$ = 4185,5 J
- frigorie : fr — 1 fr = 4185,5 J
- thermie : th — 1 th = 1000 $kcal_{15}$ = 4,1855 . 10^6 J

- calorie IT : cal_{IT} of cal — 1 cal_{IT} = 4,1868 J
- kilocalorie IT : $kcal_{IT}$ of kcal — 1 $kcal_{IT}$ = 4186,8 J
- termo-chemische calorie : $cal_{termoch}$ — 1 $cal_{termoch}$ = 4,184 J
- paardekracht : pk — 1 pk = 735,498 75 W
- paardekracht uur : pk . h — 1 pk . h = 2 647 795,5 J
- stilb : sb — 1 sb = 1 $\frac{cd}{cm^2}$ = 10 000 $\frac{cd}{m^2}$
- het symbool cc voor kubieke centimeter — 1 cc = 1 cm^3 = 10^{-6} m^3
- de benaming mikron en het symbool µ voor mikrometer (de benaming mikron en het symbool µ werden aangenomen door het CIPM in 1879 en bevestigd door de 9de CGPM in 1948; ze werden echter geschrapt door de 13de CGPM in 1967).

1.2. Eenheden en symbolen die vervallen zijn uiterlijk op 31 december 1979

- ångström : $\mathring{A}$ — $1\ \mathring{A} = 10^{-10}$ m = 0,1 nm
  De eenheid ångström werd uitsluitend gebruikt voor het weergeven van golflengten en atoomafstanden
- stere : st — 1 st = 1 m^3
  De stere werd uitsluitend gebruikt in de bosbouw en de houthandel
- gal : Gal — $1\ Gal = 1\ \frac{cm}{s^2} = 0{,}01\ \frac{m}{s^2}$
  De gal werd uitsluitend gebruikt in de geodesie ter aanduiding van de versnelling van de zwaartekracht
- dyne : dyn — $1\ dyn = 10^{-5}$ N = 0,000 01 N
- erg : erg — $1\ erg = 10^{-7}$ J = 0,000 000 1 J
- normale of fysische atmosfeer : atm — 1 atm = 101 325 Pa

1.3. Eenheden en symbolen die vervallen zijn uiterlijk op 31 december 1985

1.3.1. Symbool dat vervallen is uiterlijk op 31 december 1985

Het symbool ^{g} (hoog geschreven) voor decimale graad is vervallen uiterlijk op 31 december 1985; de eenheid gon (met als symbool eveneens gon) blijft echter wel behouden als eenheid van vlakke hoek :

$$1 \text{ decimale graad} = 1 \text{ gon} \mathrel{\hat{=}} \frac{\pi}{200} \text{ rad} = \frac{1}{400} \text{ volle hoek}$$

1.3.2. Eenheden en symbolen die vervallen zijn uiterlijk op 31 december 1985

Het gaat hier om de volgende eenheden (waarbij de voorvoegsels behandeld in Hoofdstuk X onder 2.6. mochten toegepast worden) :

a. eenheden van viskositeit :

- poise (P), CGS-eenheid van dynamische viskositeit

$$1\ P = 0{,}1\ Pa \cdot s$$

- stokes (St), CGS-eenheid van kinematische viskositeit

$$1\ St = 10^{-4}\ \frac{m^2}{s} = 0{,}0001\ \frac{m^2}{s}$$

b. radiologische eenheden :

- curie (Ci), eenheid van aktiviteit van een radio-aktieve bron
- röntgen (R), eenheid van exposie (röntgen- of gammastraling)
- rad (symbool : eveneens rad), eenheid van geabsorbeerde dosis; het woord rad is afgeleid uit : radiation absorbed dose; wanneer verwarring mogelijk is met radiaal (symbool : rad) mag rd gebruikt worden als symbool van de eenheid van geabsorbeerde dosis
- rem (symbool : eveneens rem), eenheid van dosisekwivalent (het woord rem is afgeleid uit röntgen equivalent man).

In tabel XII.1. staat het verband weergegeven tussen de betrokken radiologische eenheden en de overeenkomstige SI-eenheden.

Tabel XII.1. *Verband tussen de eenheden curie, röntgen, rad en rem en de overeenkomstige SI-eenheden*

grootheid	SI-eenheid en symbool	eenheden en symbolen vervallen uiterlijk op 31 december 1985	verband
aktiviteit van radionucliden	becquerel ($Bq = s^{-1}$)	curie (Ci)	$1\ Ci = 3{,}7 \cdot 10^{10}\ Bq = 37\ GBq$
exposie (röntgen- of gammastraling)	coulomb per kilogram $\left(\frac{C}{kg}\right)$	röntgen (R)	$1\ R = 2{,}58 \cdot 10^{-4}\ \frac{C}{kg} = 0{,}258\ \frac{mC}{kg}$
geabsorbeerde dosis, soortelijke energie-overdracht, kerma (1), index van geabsorbeerde dosis	gray $\left(Gy = \frac{J}{kg}\right)$	rad (rad; rd)	$1\ rad = \frac{1}{100}\ Gy$
dosisekwivalent	sievert $\left(Sv = \frac{J}{kg}\right)$	rem (rem)	$1\ rem = \frac{1}{100}\ Sv$

(1) kerma = kinetic energy released in material

Als definitie van de betrokken SI-eenheden geldt :

- de becquerel is de aktiviteit van een bron van ioniserende straling waarin per sekonde 1 nucleaire verandering of overgang plaatsvindt; de benaming becquerel werd door de 15de CGPM (Parijs, 1975) toegekend aan de SI-eenheid "per sekonde" voor "aktiviteit".
- de coulomb per kilogram is de exposie waarbij de lading van alle ionen van hetzelfde teken die in de lucht worden voortgebracht, gelijk is aan 1 coulomb wanneer de elektronen op uniforme wijze door de fotonen vrijgemaakt in een massa lucht van 1 kilogram, volledig in de lucht worden tegengehouden.
- de gray is de geabsorbeerde dosis in een materie met een massa van 1 kilogram waaraan op uniforme wijze door ioniserende straling een energie van 1 joule wordt toegevoerd; de benaming gray werd door de 15de CGPM (Parijs, 1975) toegekend aan de SI-eenheid "joule per kilogram" voor het weergeven van "geabsorbeerde dosis"; in 1976 besliste het CIPM dat de gray ook mag worden gebruikt voor het weergeven van soortelijke energieoverdracht, kerma en index van geabsorbeerde dosis.
- de sievert is de eenheid van dosisekwivalent van een ioniserende straling. Het dosisekwivalent is in de radiologie een maat voor de biologische schade die door straling is veroorzaakt; het effekt van ioniserende straling op levend weefsel wordt immers niet alleen door de energieabsorptie bepaald, maar ook door de soort straling en de aard van het weefsel. De benaming sievert (symbool Sv) werd aangenomen door de 16de CGPM in 1979; hierna volgt de tekst van de betrokken resolutie :

Résolution 5

La Seizième Conférence Générale des Poids et Mesures,

considérant

l'effort fait pour introduire les unités SI dans le domaine des rayonnements ionisants,

les risques que peuvent encourir des êtres humains soumis à des irradiations sous-estimées, risques qui pourraient résulter de la confusion entre dose absorbée et équivalent de dose,

que la prolifération des noms spéciaux représente un danger pour le Système International d'Unités et doit être évitée dans toute la mesure

du possible, mais que cette règle peut être transgressée lorsqu'il s'agit de sauvegarder la santé humaine.

adopte le nom spécial sievert, symbole Sv, *pour l'unité SI d'équivalent de dose dans le domaine de la radioprotection. Le sievert est égal au joule par kilogramme.*

In 1984 beslist het CIPM de volgende bijkomende uitleg toe te voegen aan bovenstaande resolutie :

Recommandation 1 *(CI-*1984*)*

Le Comité International des Poids et Mesures,

considérant la confusion qui continue d'exister au sujet de la Résolution 5, *votée par la* 16e *CGPM (*1979*).*

décide d'introduire l'explication suivante dans la brochure "Le Système International d'Unités (SI)" :

La grandeur équivalent de dose H est le produit de la dose absorbée D de rayonnements ionisants et de deux facteurs sans dimension Q (facteur de qualité) et N (produit de tous les autres facteurs de multiplication) prescrits par l'International Commission on Radiological Protection :

$$H = Q \cdot N \cdot D$$

Ainsi, pour une radiation donnée, la valeur numérique de H en joules par kilogramme peut être différente de la valeur numérique de D en joules par kilogramme, puisqu'elle est fonction de la valeur de Q et de N. Afin d'éviter tout risque de confusion entre la dose absorbée D et l'équivalent de dose H, il faut employer les noms spéciaux pour les unités correspondantes, c'est-à-dire qu'il faut utiliser le nom gray au lieu de joule par kilogramme pour l'unité de dose absorbée D et le nom sievert au lieu de joule par kilogramme pour l'unité d'équivalent de dose H.

Zoals men vroeger het aantal rem bekwam door het aantal rad te vermenigvuldigen met het produkt van de dimensieloze faktoren $Q \cdot N$, bekomt men thans het aantal sievert door het aantal gray te vermenigvuldigen met hetzelfde produkt $Q \cdot N$:

$$\{H\}_{rem} = Q \cdot N \cdot \{D\}_{rad}$$

$$\{H\}_{Sv} = Q \cdot N \cdot \{D\}_{Gy}$$

1.4. Einde van het TS en van het CGS-stelsel

1.4.1. Einde van het TS

Het vervallen op 31 december 1977 van de eenheid kilogramkracht kgf (zijnde een grondeenheid in het TS) en uiteraard ook van alle afgeleide eenheden waarin kgf voorkomt, betekent het einde van het TS.

1.4.2. Einde van het CGS-stelsel

Door het aannemen in het SI van elektrische stroom als basisgrootheid en ampère als grondeenheid, kregen in het SI alle elektrische en elektromagnetische grootheden een dimensie die verschillend was van de dimensie van de overeenkomstige grootheden in het CGS-stelsel. Hoewel de elektrische en elektromagnetische CGS-eenheden afgeleid zijn van de eenheden cm, g en s (zie Hoofdstuk III, onder 5.4., 5.5. en 5.6.), kunnen ze in het SI niet voorkomen, ook niet als veelvouden of delen van SI-eenheden. Dit betekent het einde van alle elektrische en elektromagnetische CGS-eenheden. Uiteraard komen ook de eigen benamingen te vervallen van de vier elektromagnetische CGS-eenheden die destijds een eigen benaming kregen, namelijk : gilbert, oersted, gauss en maxwell (zie Hoofdstuk III, onder 5.5.).
Het CGS-stelsel kende nog andere eigen benamingen van CGS-eenheden, namelijk de (mechanische) eenheden gal, dyne, erg, poise en stokes (zie Hoofdstuk III, onder 5.2.) :

$$\text{gal (Gal)} = \frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$$

$$\text{dyne (dyn)} = \frac{\text{g} \cdot \text{cm}}{\text{s}^2}$$

$$\text{erg (erg)} = \frac{\text{g} \cdot \text{cm}^2}{\text{s}^2}$$

$$\text{poise (P)} = \frac{\text{g}}{\text{cm} \cdot \text{s}}$$

$$\text{stokes (St)} = \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

De benamingen gal, dyne en erg zijn vervallen op 31 december 1979; de benamingen poise en stokes zijn vervallen op 31 december 1985.
Het vervallen van alle elektrische en elektromagnetische CGS-eenheden alsook het vervallen van de eigen benamingen gal, dyne, erg, poise en stokes, betekent het einde van het CGS-stelsel.

De eenheden cm en g blijven in het SI wel bestaan, niet als grondeenheden doch als delen van SI-eenheden (cm = 10^{-2} m; g = 10^{-3} kg); de eenheid s blijft uiteraard bestaan daar ze grondeenheid gebleven is.
Alle eenheden daarentegen van het MKS-stelsel (zie Hoofdstuk III, onder 6.) en het MKSA-stelsel (zie Hoofdstuk IV, onder 3.1.) zijn automatisch SI-eenheden geworden :

het MKS-stelsel + A = het MKSA-stelsel (of Giorgi-stelsel)

het MKSA-stelsel + K + mol + cd = het m-kg-s-A-K-mol-cd-stelsel

= het SI

2. Angelsaksische eenheden, in bepaalde landen tijdelijk erkend

Een aantal Angelsaksische eenheden blijven (volgens EEG-richtlijn 80/181/EEG van 20 december 1979) tijdelijk erkend in die lidstaten waarin deze eenheden op 21 april 1973 waren toegestaan, en zulks tot een door de lidstaten vast te stellen datum; deze datum mag een door de Raad vóór 31 december 1989 op basis van artikel 100 van het Verdrag van Rome vastgestelde einddatum niet overschrijden.

Het gaat om volgende eenheden (en hun samenstellingen), gerangschikt volgens de overeenkomstige grootheid (tevens wordt het symbool van de betrokken eenheden opgegeven alsook de benaderde waarde, uitgedrukt in SI-eenheden) :

Lengte :	inch	1 in = $2{,}54 \times 10^{-2}$ m
	foot	1 ft = 0,3048 m
	fathom (scheepvaart)	1 fm = 1,829 m
	mile	1 mile = 1609 m
	yard	1 yd = 0,9144 m
Oppervlakte :	square foot	1 sq ft = $0{,}929 \times 10^{-1}$ m^2
	acre	1 ac = 4047 m^2
	square yard	1 sq yd = 0,8361 m^2
Volume :	fluid ounce	1 fl oz = $28{,}41 \times 10^{-6}$ m^3
	gill	1 gill = $0{,}1421 \times 10^{-3}$ m^3
	pint	1 pt = $0{,}5683 \times 10^{-3}$ m^3
	quart	1 qt = $1{,}137 \times 10^{-3}$ m^3
	gallon	1 gal = $4{,}546 \times 10^{-3}$ m^3

Massa	: ounce (avoirdupois)	1 oz	= $28,35 \times 10^{-3}$ kg
	troy ounce	1 oz tr	= $31,10 \times 10^{-3}$ kg
	pound	1 lb	= 0,4536 kg
Energie	: therm (1 therm = 100 000 Btu)	1 therm	= $105,506 \times 10^{6}$ J

3. Internationaal verspreide doch niet door de EEG erkende eenheden

3.1. Opsomming van de betrokken eenheden

Het gaat hier om de volgende 5 eenheden die door één of meer internationale of nationale al dan niet officiële instanties nog worden erkend :

- zeemijl
- knoop
- registerton
- astronomische eenheid
- parsec

Op de lijsten opgesteld door de CGPM, het CIPM of het BIPM, is, wat betreft de hierboven opgesomde 5 eenheden, de eenheid registerton nooit voorgekomen.
De eenheden astronomische eenheid en parsec kwamen nog voor in de 3de uitgave (1977) van de brochure "Le Système International d'Unités (SI)", uitgegeven door het BIPM te Sèvres bij Parijs, (samen met de eenheden elektronvolt en atoommassa-eenheid) onder de rubriek : "Unités en usage avec le Système International, dont la valeur en unités SI est obtenue expérimentalement". Beide eenheden komen echter niet meer voor in de 4de (1981) en 5de (1985) uitgave, die van de 5 hier behandelde eenheden alleen de eenheden zeemijl en knoop vermelden, en dit onder de rubriek "Unités maintenues temporairement".

In de 2de uitgave (1981) van de internationale norm ISO 1000 (Unités SI et recommandations pour l'emploi de leurs multiples et de certaines autres unités) komt de eenheid registerton niet voor, doch wel de eenheden astronomische eenheid, parsec, zeemijl en knoop.

In de (thans geldende) Belgische wetgeving (zie Hoofdstuk I, onder 2.1.1.) komen de eenheden astronomische eenheid en parsec niet voor, doch wel de eenheden zeemijl, knoop en registerton.

In de (thans geldende) Nederlandse wetgeving ("Eenhedenbesluit 1981", zie Hoofdstuk I, onder 2.2.1.) komt geen enkele van de betrokken eenheden voor (in overeenstemming met de EEG-richtlijn 80/181/EEG van 20 december 1979). In het opgeheven "Eenhedenbesluit 1968" waren de eenheden zeemijl, knoop en registerton wel erkend, doch niet de eenheden astronomische eenheid en parsec.

3.2. Indeling van de betrokken 5 eenheden in bepaalde groepen

3.2.1. Eenheden die geen decimale veelvouden of delen van SI-eenheden zijn doch wel op basis van SI-eenheden gedefinieerd worden

Het gaat hier om de volgende eenheden van lengte en van snelheid, uitsluitend ter aanduiding van afstanden en snelheden in de zeevaart en de luchtvaart :

grootheid	eenheid	
	naam	waarde
lengte	zeemijl	1 zeemijl = 1852 m
snelheid	knoop	1 knoop = 1 zeemijl per uur $\approx 0{,}514\ 444\ \frac{m}{s}$

3.2.2. Angelsaksische eenheid van inhoud, uitsluitend ter aanduiding van de inhoud van schepen

grootheid	eenheid	
	naam	waarde
inhoud, volume	registerton	1 registerton = 100 ft^3 $\approx 2{,}832\ m^3$

3.2.3. Onafhankelijk van de zeven SI-grondeenheden gedefinieerde eenheden

Het gaat hier om de volgende eenheden die uitsluitend worden gebruikt in de astronomie :

grootheid	eenheid		
	naam	symbool	waarde
lengte	astronomische eenheid astronomische Einheit unité astronomique astronomical unit	AE AE UA AU	1 AE (of UA of AU) = 149 597,870 . 10^6 m
lengte	parsec	pc	1 pc = $\frac{1 \text{ AE}}{\sin 1''}$ ≈ 206 265 AE ≈ 30 857 . 10^{12} m

Opmerkingen

☆ De eenheden astronomische eenheid en parsec hebben een nauwkeurige definitie; de waarde echter van de betrokken eenheden, uitgedrukt in SI-eenheden, dient experimenteel bepaald te worden.

☆ De astronomische eenheid werd vroeger gedefinieerd als de lengte van de straal van een niet-gestoorde cirkelvormige baan van een planeet met verwaarloosbare massa, in beweging rond de zon met een siderale hoeksnelheid van 0,017 202 098 950 radialen per dag van 86 400 sekonden efemeridentijd (hetgeen overeenstemt met een omlooptijd van 365,256 898 326 3 middelbare dagen). Bij de berekening diende men beroep te doen op de derde wet van Kepler, die zegt dat de verhouding tussen de derde macht van de halve lange as van de ellipsvormige baan en het kwadraat van de omlooptijd een konstante is voor alle planeetbanen. De aldus gedefinieerde astronomische eenheid is bij benadering gelijk aan de gemiddelde afstand tussen de zon en de aarde; deze afstand wordt thans rechtstreeks gemeten met behulp van radarsignalen en de lichtsnelheid. In het stelsel van astronomische konstanten van de International Astronomical Union (IAU) van 1979, komt volgende waarde voor :

$$1 \text{ AE} = 149\,597{,}870 \cdot 10^6 \text{ m}$$

☆ De eenheid parsec is de afstand waarop een (boog)lengte gelijk aan 1 AE een hoek onderspant gelijk aan 1 (hoek)sekonde.

3.3. Indeling van de betrokken 5 eenheden volgens de grootheid waartoe ze behoren

grootheid	eenheid	symbool	omzetting in SI-eenheden
lengte	zeemijl	-	1 zeemijl = 1852 m
	astronomische eenheid	AE	1 AE = 149 597,870 . 10^6 m
	parsec	pc	1 pc ≈ 30,857 . 10^{15} m
volume, inhoud	registerton	-	1 registerton ≈ 2,832 m^3
snelheid	knoop	-	1 knoop ≈ 0,514 444 m/s

3.4. Voorvoegsels voor het aanduiden van decimale veelvouden en delen van eenheden

De voorvoegsels behandeld in Hoofdstuk X onder 2.6. mogen niet aangewend worden bij de eenheden zeemijl, knoop, registerton, astronomische eenheid en parsec.

3.5. Afgeleide eenheden

De Nederlandse norm NEN 1000 (2de druk, oktober 1976) vermeldt dat van de 5 hier behandelde eenheden, enkel de eenheid parsec mag aangewend worden in afgeleide eenheden, doch niet de eenheden zeemijl, knoop, registerton en astronomische eenheid.

HOOFDSTUK XIII

MASSA EN GEWICHT

1. Inleiding

De dubbelzinnige betekenis van het woord "gewicht" en het naast elkaar bestaan van enerzijds eenhedenstelsels waarin massa een basisgrootheid is (de "dynamische" eenhedenstelsels) en anderzijds eenhedenstelsels waarin kracht een basisgrootheid is (de "statische" eenhedenstelsels), zijn er de oorzaak van geweest dat reeds een eeuw lang verwarring is blijven bestaan betreffende de betekenis van het woord gewicht en de eenheid waarin deze grootheid moet worden uitgedrukt. Ook heden ten dage treft men hieromtrent dikwijls nog verkeerde voorstellingen aan. Hierna zal worden gepoogd, dit probleem op een klare en duidelijke wijze voor te stellen; een juist inzicht in de oorzaken die aanleiding gaven tot de heersende verwarring kan er veel toe bijdragen in de toekomst alle moeilijkheden hieromtrent te vermijden.

2. De zwaarteveldsterkte g (versnelling van de zwaartekracht, versnelling van de vrije val in het luchtledige, valversnelling)

2.1. De wetten van Newton (1642-1727)

De groothedenvergelijkingen die de betrokken wetmatigheden weergeven, worden hierna enkel in SI-notatie geschreven.
Van de hierna geformuleerde vier wetten van Newton, zijn het vooral de tweede en de vierde wet die ons hier aanbelangen.

Eerste wet

Een lichaam waarop geen kracht werkt, is in rust of in eenparige rechtlijnige beweging; zonder invloed van de omgeving blijft zijn bewegingstoestand ongewijzigd. Deze eerste wet wordt genoemd de wet van de traagheid of de wet van de inertie. Deze naam stamt uit een tijd waarin men, althans in de woordenkeus, aan dode stoffelijke lichamen neigingen van levende wezens toekende. Men noemde de stof traag, omdat een stoffelijk punt, eenmaal in rust verkerend, slechts in beweging kan worden gebracht

door een uitwendige kracht, en eenmaal in (rechtlijnige eenparige) beweging zijnde, in die beweging blijft volharden zolang geen uitwendige kracht daarin wijziging brengt.

Tweede wet

De fysische grootheid kracht F kan voorgesteld worden als het produkt van de massa m van een lichaam en van de versnelling a die dit lichaam onder inwerking van de kracht F zou ondervinden :

$$F = m \cdot a$$

Deze grondvergelijking van de dynamika wordt afgeleid als volgt :

- bij konstante versnelling a, is de kracht F evenredig met de massa m; dit wordt weergegeven als volgt :

$$F \sim m$$

- bij konstante massa m, is de kracht F evenredig met de versnelling a; dit wordt weergegeven als volgt :

$$F \sim a$$

Als beide evenredigheden gekombineerd worden, ontstaat :

$$F \sim m \cdot a$$

waaruit volgt :

$$F = \text{evenredigheidsfaktor} \times m \times a$$

Door de evenredigheidsfaktor gelijk te stellen aan 1, bekomt men :

$$F = m \cdot a$$

Hierdoor wordt de eenheid van kracht gedefinieerd als het produkt van de eenheid van massa en de eenheid van versnelling. Daar in het SI de eenheid van massa en de eenheid van versnelling respektievelijk gelijk zijn aan 1 kg en 1 $\frac{m}{s^2}$, bekomt men :

eenheid van kracht = 1 kg . 1 $\frac{m}{s^2}$ = 1 $\frac{kg \cdot m}{s^2}$; deze eenheid van kracht kreeg in 1948 (9de CGPM) als speciale benaming : newton (N).

De versnelling door een kracht aan een lichaam meegedeeld, is omgekeerd evenredig met de massa van dit lichaam :

$$a = \frac{F}{m}$$

Hoe groter de massa is, des te kleiner is de versnelling bij eenzelfde kracht. De massa van het lichaam verzet zich als het ware tegen een snelheidsverandering; daarom spreekt men in dit verband van "trage massa".

Derde wet

Oefent een lichaam A een kracht uit op een lichaam B, dan oefent ook lichaam B een kracht uit op lichaam A; beide krachten zijn even groot en werken langs dezelfde lijn doch in tegengovergestelde zin. Deze derde wet wordt genoemd de wet van aktie en reaktie.

Vierde wet

Tussen twee willekeurige massa's (bijvoorbeeld m_1 en m_2) bestaat een onderlinge gravitatiekracht (aantrekkingskracht) F waarvan de grootte evenredig is met het produkt van de betrokken massa's m_1 en m_2 en omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand r tussen hun zwaartepunten :

$$F \sim \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

Daar zowel voor de massa m, de afstand r en de kracht F de eenheden reeds vastliggen, namelijk kg, m en $\frac{kg \cdot m}{s^2}$ (of N), mag men hier niet schrijven :

$$F = \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

daar dit een definitie zou betekenen van een nieuwe eenheid van kracht (wanneer men kg behoudt als eenheid van massa en m als eenheid van afstand). Daarom wordt in de vergelijking een grootheid k opgenomen (die zoals alle grootheden bestaat uit het produkt van een getalwaarde en een eenheid) :

$$F = k \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \qquad \text{(SI-eenheid : } \frac{kg \cdot m}{s^2} = N\text{)}$$

Deze wet is algemeen en dient tot alle massa's uitgebreid te worden; vandaar de naam "algemene" of "universele" gravitatie.

Tussen twee willekeurige lichamen heerst dus een onderlinge gravitatiekracht waarvan de grootte mede bepaald wordt door de massa's van de betrokken lichamen; daarom spreekt men in dit verband van "zware massa".

De dimensies van F en $\frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$, uitgedrukt in de gronddimensies lengte L, massa M en tijd T, zijn respektievelijk $\frac{M\ L}{T^2}$ en $\frac{M^2}{L^2}$; om de vergelijking dimensioneel korrekt te maken dient de dimensie van k dus gelijk te zijn aan $\frac{L^3}{M\ T^2}$:

$$\frac{M\ L}{T^2} = \frac{L^3}{M\ T^2} \cdot \frac{M^2}{L^2}$$

Als SI-eenheid van k bekomt men :

$$\frac{m^3}{kg \cdot s^2} = \frac{kg \cdot m}{s^2} \cdot \frac{m^2}{kg^2} = \frac{N \cdot m^2}{kg^2}$$

De proefondervindelijk vastgestelde waarde van de gravitatiekonstante k bedraagt :

$$k = 66{,}720 \cdot 10^{-12} \frac{N \cdot m^2}{kg^2}$$

De gravitatiekonstante wordt ook soms voorgesteld door het symbool G.

Indien als definitievergelijking van kracht zou genomen geweest zijn : $F' = \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$ in plaats van $F = m \cdot a$, met behoud van kg als eenheid van massa en m als eenheid van lengte, zou men als eenheid van kracht bekomen hebben :

$$\left[F'\right] = \frac{kg^2}{m^2}$$

Deze eenheid zou overeengestemd hebben met $66{,}720 \cdot 10^{-12}$ N, wat wel een uiterst kleine eenheid zou geweest zijn; deze eenheid van kracht zou immers gelijk geweest zijn aan de onderlinge aantrekkingskracht tussen twee lichamen elk met een massa van 1 kg en zich bevindend op een onderlinge (zwaartepunts)afstand van 1 m. Als vergelijking voor de kracht die evenredig is enerzijds met de massa en anderzijds met de versnelling (tweede wet van Newton), zou men bekomen hebben : $F' = \frac{1}{k} \cdot m \cdot a$ (eenheid : $kg^2 \cdot m^{-2}$)

met

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{66{,}720 \cdot 10^{-12} \frac{m^3}{kg \cdot s^2}}$$

$$\approx 15\ 000\ 000\ 000 \frac{kg \cdot s^2}{m^3}$$

2.2. Het aardse zwaarteveld

Een lichaam dat zich op of in de nabijheid van het aardoppervlak bevindt, is onderworpen aan de aantrekkingskracht of gravitatiekracht F_{gr} uitgeoefend door de aarde (ook het betrokken lichaam oefent op de aarde een even grote aantrekkingskracht uit).

De gravitatiekracht F_{gr} wordt gegeven door :

$$F_{gr} = k \cdot \frac{m_A \cdot m}{r^2} \qquad \text{(SI-eenheid : } \frac{kg \cdot m}{s^2} = N\text{)}$$

met m_A = massa van de aarde $\approx 5{,}976 \cdot 10^{24}$ kg

m = massa van het betrokken lichaam

r = afstand tussen het zwaartepunt van de aarde en het zwaartepunt van het betrokken lichaam

Om de aarde (zoals om elke massa) bevindt zich een krachtveld; dit krachtveld oefent op een zich in dit veld bevindende massa m een kracht F_{gr} uit, die gericht is naar het zwaartepunt van de aarde. Daar dit krachtveld zijn oorsprong vindt in het verschijnsel van de gravitatie, geeft men aan dit krachtveld de benaming gravitatieveld. De betrokken kracht is (bij gelijkblijvende r) rechtstreeks evenredig met de massa m; de term $\frac{k \cdot m_A}{r^2}$, vermenigvuldigd met de eenheid van massa, is gelijk aan de gravitatiekracht uitgeoefend door de aarde op een massa waarvan de grootte gelijk is aan de eenheid van massa en die zich bevindt op een afstand r. De term $\frac{k \cdot m_A}{r^2}$ is een veldsterkte, gravitatieveldsterkte genoemd en hier voorgesteld door g_{gr}. De gravitatieveldsterkte wordt ook dikwijls voorgesteld door het symbool γ.
De gravitatiekracht die door de aarde wordt uitgeoefend op een lichaam met massa m kan als volgt weergegeven worden :

$$F_{gr} = k \cdot \frac{m_A \cdot m}{r^2} = m \cdot g_{gr} \qquad \text{(SI-eenheid : } \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} = \text{N)}$$

De koherente SI-eenheid van gravitatieveldsterkte is :

$$\frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} = \frac{\text{N}}{\text{kg}}$$

De gravitatiekracht F_{gr} die door de aarde op het betrokken lichaam wordt uitgeoefend, kan worden gesplitst in 2 komponenten (zie figuur XIII.1.) : enerzijds de centripetale (of middelpuntzoekende) kracht F_{cp} tengevolge van de rotatie van de aarde om haar as, en anderzijds de zwaartekracht F_z (die bij een lichaam in rust het gewicht G wordt genoemd, zijnde de kracht uitgeoefend door het betrokken lichaam op zijn ondersteuning of zijn ophangingspunt). De zwaartekracht F_z (of, bij een lichaam in rust, het gewicht G) kan vektorieel worden samengesteld (zie figuur XIII.1.) uit de gravitatiekracht F_{gr} en de zogenoemde centrifugale (of middelpuntvliedende) kracht F_{cf} (eigenlijk een traagheidskracht ingevolge de aardrotatie). In figuur XIII.1. zijn de krachten F_{cp} en F_{cf} omwille van de duidelijkheid veel te groot getekend ten opzichte van de kracht F_{gr}.

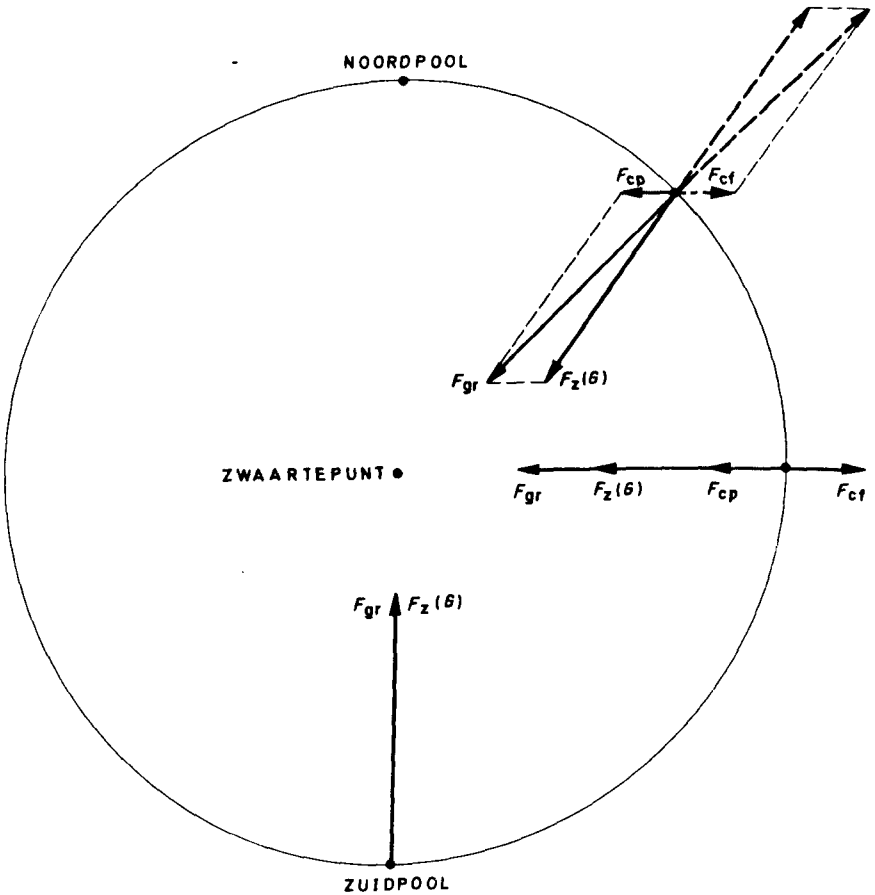


FIG. XIII.1. ONDERSCHEID (OP DE AARDE, HIER BOLVORMIG VOORGESTELD) TUSSEN DE ZWAARTEKRACHT F_z (DIE BIJ EEN LICHAAM IN RUST GELIJK IS AAN HET GEWICHT G) EN DE GRAVITATIE-KRACHT F_{gr}

De centrifugale kracht F_{cf} wordt gegeven door :

$$F_{cf} = m \cdot s \cdot \omega^2 \qquad \text{(SI-eenheid : } \frac{kg \cdot m}{s^2} = N\text{)}$$

met m = massa van het lichaam

s = loodrechte afstand van het lichaam tot de draaias van de aarde

ω = hoeksnelheid van de aardrotatie

Bij het gebruik van koherente SI-eenheden, wordt het produkt $s \cdot \omega^2$ uitgedrukt in dezelfde eenheid als de gravitatieveldsterkte g_{gr} :

$$m \cdot \frac{1}{s^2} = \frac{kg \cdot m}{kg \cdot s^2} = \frac{N}{kg}$$

Het produkt $s \cdot \omega^2$ wordt doorgaans centrifugale versnelling genoemd; naar analogie met de benaming gravitatieveldsterkte, kan men het produkt $s \cdot \omega^2$ hier centrifugale veldsterkte noemen.

De centrifugale veldsterkte op aarde is steeds klein ten opzichte van de gravitatieveldsterkte, zoals hierna blijkt.

Voor het berekenen van de centrifugale veldsterkte dient de waarde van de hoeksnelheid ω gekend te zijn; deze wordt berekend als volgt. Bij één volledige omwenteling van de aarde wordt een hoek beschreven van 2 π rad en dit geschiedt in één sterredag, die iets korter is dan een middelbare zonnedag. Een middelbare zonnedag is immers gelijk aan 86 400 s, terwijl een sterredag gelijk is aan 86 164,09 s (zie Hoofdstuk III, onder 3.1.). Als hoeksnelheid bekomt men :

$$\omega = \frac{2\ \pi\ rad}{86\ 164{,}09\ s} = 7{,}292\ 116 \cdot 10^{-5}\ \frac{rad}{s}$$

Voor een lichaam ter hoogte van de zeespiegel, varieert de loodrechte afstand s tot de rotatieas van de aarde vanaf 0 km aan de polen tot ongeveer 6378 km aan de evenaar; de waarde van de centrifugale veldsterkte (centrifugale versnelling) zal dus variëren tussen een waarde nul (aan de polen) en een maximum waarde (aan de evenaar); deze maximum waarde bedraagt :

$$s \cdot \omega^2 = 6\ 378\ 000\ m \cdot (7{,}292\ 116 \cdot 10^{-5})^2\ \frac{rad^2}{s^2}$$

$$= 0{,}033\ 915\ \frac{m}{s^2}\ \left(\frac{m}{s^2} = \frac{N}{kg}\right)$$

Deze waarde bedraagt slechts ongeveer 0,35 % van de gravitatieveldsterkte aan de evenaar ter hoogte van de zeespiegel.

Zoals de zwaartekracht F_z vektorieel kan worden samengesteld uit de gravitatiekracht F_{gr} en de centrifugale kracht F_{cf}, kan ook de zwaarteveldsterkte g vektorieel samengesteld worden uit de gravitatieveldsterkte g_{gr} en de centrifugale veldsterkte $s \cdot \omega^2$.

De zwaartevelosterkte g is niet gericht naar het middelpunt (zwaartepunt) van de aarde (uitgezonderd aan de polen en aan de evenaar), daar ze de vektoriële som is van de gravitatieveldsterkte g_{gr} (die wel naar het zwaartepunt van de aarde gericht is) en de centrifugale veldsterkte $s \cdot \omega^2$ (centrifugale versnelling). De richting van de zwaarteveldsterkte g in een bepaald punt noemt men de vertikaal van het beschouwde punt.

De SI-eenheid van zwaarteveldsterkte g is uiteraard $\frac{N}{kg}$. In plaats van de benaming "zwaarteveldsterkte" worden meestal de benamingen "versnelling van de zwaartekracht" of "versnelling van de vrije val in het luchtledige" of kortweg "valversnelling" gebruikt. De benaming "versnelling van de zwaartekracht" is minder goed gekozen, vermits een lichaam in rust wel onderworpen is aan de zwaartekracht doch geen versnelling ondergaat (vermits het in rust is). De SI-eenheid van versnelling is echter wel gelijk aan de SI-eenheid van zwaarteveldsterkte :

$$\frac{m}{s^2} = \frac{kg \cdot m}{kg \cdot s^2} = \frac{N}{kg}$$

Op te merken valt, dat ook de maan, de zon en andere hemellichamen een kracht uitoefenen op een lichaam op aarde, maar deze krachten zijn uiterst klein en verwaarloosbaar.

De waarde van de zwaarteveldsterkte g op een punt op aarde ter hoogte van de zeespiegel is in hoofdzaak afhankelijk van :

- de afstand van het betrokken punt tot het zwaartepunt van de aarde; aan de polen bedraagt deze afstand ongeveer 6357 km en aan de evenaar ongeveer 6378 km;
- de centrifugale veldsterkte die varieert van nul aan de polen tot een maximum waarde van 0,033 915 $\frac{N}{kg}$ aan de evenaar.

De zwaarteveldsterkte g op aarde ter hoogte van de zeespiegel wordt gegeven door :

$$g = g_{evenaar} \cdot (1 + 0{,}005\,302\,4 \sin^2 \varphi - 0{,}000\,005\,9 \sin^2 2\varphi)$$

met $g_{evenaar} = 9{,}780\,318 \frac{N}{kg}$

φ = breedtegraad

Aldus bekomt men aan de evenaar ($\varphi = 0°$), op een breedte van 45°, op een breedte van 51° (België) en aan de polen ($\varphi = 90°$) respektievelijk :

- aan de evenaar : $g = 9{,}780\,318 \frac{N}{kg}$
- op een breedte van 45° : $g = 9{,}806\,190 \frac{N}{kg}$
- op een breedte van 51° : $g = 9{,}811\,583 \frac{N}{kg}$
- aan de polen : $g = 9{,}832\,177 \frac{N}{kg}$

De zwaarteveldsterkte g_h op aarde op een (betrekkelijk kleine) hoogte h boven de zeespiegel wordt bij benadering gegeven door :

$$g_h = g_o \cdot \left(1 - \frac{2h}{r_A}\right)$$

met g_o = plaatselijke zwaarteveldsterkte ter hoogte van de zeespiegel

r_A = straal van de aarde (6357 ... 6378 km)

Op de maan is de zwaarteveldsterkte g gelijk aan 1,62 $\frac{N}{kg}$ en bedraagt dus ongeveer slechts één zesde van de zwaarteveldsterkte g op aarde (die varieert tussen 9,780 $\frac{N}{kg}$ en 9,832 $\frac{N}{kg}$).

De kracht F die op een lichaam in vrije val (in het luchtledige) wordt uitgeoefend wordt de zwaartekracht F_z genoemd; deze kracht is gelijk aan

het produkt van de massa m van het betrokken lichaam met de plaatselijke zwaarteveldsterkte g :

$$F = m \cdot g = F_z \qquad \text{(SI-eenheid : } \frac{kg \cdot m}{s^2} = N\text{)}$$

Dezelfde kracht F wordt uitgeoefend op een lichaam in rust (rustend op een ondersteuning of hangend aan een ophangpunt); bij een lichaam in rust wordt de betrokken kracht het gewicht G genoemd :

$$F = m \cdot g = G \qquad \text{(SI-eenheid : } \frac{kg \cdot m}{s^2} = N\text{)}$$

3. Beschouwingen in verband met de grootheid massa

3.1. Onderscheid tussen trage massa (traagheid) en zware massa (zwaarte)

Het zou mogelijk geweest zijn, "trage massa" en "zware massa" te beschouwen als twee grootheden van verschillende aard, elk met een eigen dimensie.

Beschouwen we om dit aan te tonen, opnieuw de tweede wet van Newton (traagheidswet) en de vierde wet van Newton (gravitatiewet).

De tweede wet van Newton (traagheidswet) luidt :

$$F = m \cdot a \qquad \text{(SI-eenheid : } \frac{kg \cdot m}{s^2} = N\text{)}$$

Deze wetmatigheid betekent, dat er een evenredigheid bestaat tussen de snelheidsverandering van een lichaam en de uitwendige kracht waardoor de snelheidsverandering veroorzaakt wordt. De grootte van de evenredigheidsfaktor m verschilt echter van lichaam tot lichaam, met andere woorden de evenredigheidsfaktor is een grootheid die inherent is aan het betrokken lichaam. Bij een welbepaalde kracht F zal de versnelling des te kleiner zijn naarmate m groter is; hoe groter m is, des te "trager" is het lichaam De grootheid m kan derhalve worden aangeduid met de benaming "traagheid" of "trage massa".

De vierde wet van Newton (gravitatiewet) leert dat de aantrekkingskracht tussen twee lichamen enerzijds omgekeerd evenredig is met het kwadraat van de onderlinge afstand, en anderzijds rechtstreeks evenredig met een grootheid die inherent is aan elk van de betrokken lichamen zelf.

Duiden we deze grootheid aan met m_{gr}, dan kan de betrokken wetmatigheid als volgt voorgesteld worden :

$$F = \frac{m_{gr,1} \cdot m_{gr,2}}{r^2} \qquad \left(\text{SI-eenheid} : \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} = \text{N}\right)$$

Voor een lichaam dat op aarde rust, zal de gravitatiekracht F des te groter zijn naarmate de grootheid m_{gr} van het betrokken lichaam groter is, met andere woorden het betrokken lichaam is zwaarder naarmate m_{gr} groter is. De grootheid m_{gr} kan derhalve worden aangeduid met de benaming "zwaarte" of "zware massa".

Wanneer lengte, trage massa m en tijd aangenomen worden als gronddimensies, kan de dimensie van zware massa m_{gr} (zoals zoëven gedefinieerd) afgeleid worden als volgt :

$$\dim(F) = M\ L\ T^{-2}$$

$$= \frac{\dim(m_{gr}) \cdot \dim(m_{gr})}{L^2}$$

Hieruit volgt :

$$\dim(m_{gr}) = \sqrt{M\ L^3\ T^{-2}} = M^{1/2}\ L^{3/2}\ T^{-1}$$

De SI-eenheid van zware massa m_{gr} zou geweest zijn : $kg^{1/2} \cdot m^{3/2} \cdot s^{-1}$. Tussen zware massa m_{gr} met als eenheid : $kg^{1/2} \cdot m^{3/2} \cdot s^{-1}$ (= een afgeleide eenheid) en trage massa m met als eenheid : kg (= een grondeenheid in het SI) zou echter steeds een vast verband bestaan hebben :

- 1 kg trage massa zou overeengestemd hebben met
  $\sqrt{66,72 \cdot 10^{-12}}\ kg^{1/2} \cdot m^{3/2} \cdot s^{-1}$ zware massa
  hetzij $8,168\ 231\ 143 \cdot 10^{-6}\ kg^{1/2} \cdot m^{3/2} \cdot s^{-1}$ zware massa
- 1 $kg^{1/2} \cdot m^{3/2} \cdot s^{-1}$ zware massa zou overeengestemd hebben met
  $\frac{1}{\sqrt{66,72 \cdot 10^{-12}}}$ kg trage massa
  hetzij 122 425,5267 kg trage massa.

Tot op heden is het echter nog niet nuttig of noodzakelijk gebleken, een onderscheid te maken tussen "trage massa" en "zware massa". Beide grootheden worden in het SI eenvoudigweg bestempeld als massa, met dimensie M; ze worden dan ook uitgedrukt in dezelfde eenheid, namelijk kg.

Dit heeft tot gevolg, dat de gravitatiekonstante verschijnt in de uitdrukking die de algemene gravitatiewet weergeeft.

3.2. Massa als afgeleide grootheid

De grootheid massa werd in het SI aangenomen als een basisgrootheid en de grootte van de grondeenheid kg werd op een totaal willekeurige manier bepaald. Het zou ook mogelijk geweest zijn, massa te beschouwen als een afgeleide grootheid, zoals hierna zal aangetoond worden. Hierbij wordt geen onderscheid gemaakt tussen trage massa en zware massa.

We nemen hierbij aan, dat alleen de eenheden lengte (m) en tijd (s) vastgelegd zijn, en zullen hierna aantonen dat het mogelijk zou geweest zijn, de eenheden massa, kracht, arbeid en vermogen af te leiden uit de eenheden van lengte en tijd.

Veronderstellen we dat de kracht, die een bepaalde massa m_1' een versnelling a_1 doet ondergaan, een gravitatiekracht is, die door het gravitatieveld van een tweede massa m_2' op de massa m_1' wordt uitgeoefend. Dit kan worden weergegeven als volgt :

$$F'' = m_1' \cdot a_1 = \frac{m_1' \cdot m_2'}{r^2}$$

Hieruit volgt :

$$m_2' = a_1 \cdot r^2$$

Uit $\dim(a) = \frac{L}{T^2}$ en $\dim(r^2) = L^2$ volgt :

$$\dim(m_2') = \frac{L}{T^2} \cdot L^2 = \frac{L^3}{T^2}$$

De afgeleide eenheid van massa (afgeleid uit de eenheden m en s) zou dus gelijk geweest zijn aan $\frac{m^3}{s^2}$.
Als afgeleide eenheden voor kracht, arbeid en vermogen zou men verder bekomen hebben :

- kracht (= massa x versnelling) : $\frac{m^3}{s^2} \cdot \frac{m}{s^2} = \frac{m^4}{s^4} = \left[F''\right]$
- arbeid (= kracht x afgelegde weg) : $\frac{m^4}{s^4} \cdot m = \frac{m^5}{s^4}$
- vermogen (= arbeid gedeeld door tijd) : $\frac{\frac{m^5}{s^4}}{s} = \frac{m^5}{s^5}$

Het verband tussen de SI-eenheid van massa (kg) en de hier afgeleide eenheid van massa $\left(\frac{m^3}{s^2}\right)$ behorend tot een ander eenhedenstelsel, wordt gevonden als volgt.

In het SI geldt :

$$F = k \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} = m_1 \cdot a_1 \qquad \left(\text{SI-eenheid : } \frac{kg \cdot m}{s^2} = N\right)$$

waaruit volgt :

$$k \cdot m_2 = a_1 \cdot r^2$$

In het andere beschouwde eenhedenstelsel (met massa als afgeleide grootheid) geldt :

$$F'' = \frac{m_1' \cdot m_2'}{r^2} = m_1' \cdot a_1 \qquad \left(\text{eenheid : } \frac{m^4}{s^4}\right)$$

waaruit volgt :

$$m_2' = a_1 \cdot r^2$$

Vermits zowel het produkt $k \cdot m_2$ als m_2' gelijk zijn aan het produkt $a_1 \cdot r^2$, zijn ze ook onderling gelijk :

$$m_2' = k \cdot m_2$$

Indien iedere grootheid vervangen wordt door het produkt "getalwaarde x eenheid", bekomt men :

$$\{m_2'\} \cdot \frac{m^3}{s^2} = \{k\} \cdot \frac{m^3}{kg \cdot s^2} \cdot \{m_2\} \cdot kg$$

$$\{m_2'\} = \{k\} \cdot \{m_2\}$$

Dit geeft weer dat de getalwaarde die behoort bij de eenheid $\frac{m^3}{s^2}$, $\{k\}$-maal groter is dan de getalwaarde die behoort bij de eenheid kg. Derhalve stemt de eenheid $\frac{m^3}{s^2}$ overeen met $\frac{1}{\{k\}}$ -maal de eenheid kg (met $\frac{1}{\{k\}} = \frac{1}{66{,}72 \cdot 10^{-12}} = 14\ 988\ 009\ 590$) :

$$1\ \frac{m^3}{s^2} \triangleq 14\ 988\ 009\ 590\ kg \approx 15\ 000\ 000\ 000\ kg$$

Een andere bewijsvoering levert hetzelfde resultaat op :

Vermits $m_2' = a_1 \cdot r^2$ en $m_2 = \frac{a_1 \cdot r^2}{k}$ geldt ook (daar m_2' wordt uitgedrukt in $\frac{m^3}{s^2}$ en m_2 in kg) :

$$\{a_1\}_{m/s^2} \cdot \{r^2\}_{m^2} \cdot \frac{m^3}{s^2} \triangleq \frac{\{a_1\}_{m/s^2} \cdot \{r^2\}_{m^2}}{\{k\}_{m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2}}} \cdot kg$$

waaruit volgt :

$$1\ \frac{m^3}{s^2} \triangleq \frac{1}{\{k\}_{m^3.kg^{-1}.s^{-2}}}\ .\ kg$$

$$\triangleq \frac{1}{66,72\ .\ 10^{-12}}\ .\ kg$$

$$\triangleq 14\ 988\ 009\ 590\ kg \approx 15\ 000\ 000\ 000\ kg$$

Tussen de SI-eenneden van kracht (N), arbeid (J) en vermogen (W) enerzijds en de hier afgeleide overeenkomstige eenheden $\frac{m^4}{s^4}$, $\frac{m^5}{s^4}$ en $\frac{m^5}{s^5}$ (eenheden die behoren tot een ander eenhedenstelsel) bestaat verder volgend verband :

$$1\ \frac{m^4}{s^4} \triangleq \frac{1}{66,72\ .\ 10^{-12}}\ N = 14\ 988\ 009\ 590\ N$$

$$\approx 15\ 000\ 000\ 000\ N$$

$$1\ \frac{m^5}{s^4} \triangleq \frac{1}{66,72\ .\ 10^{-12}}\ J = 14\ 988\ 009\ 590\ J$$

$$\approx 15\ 000\ 000\ 000\ J$$

$$1\ \frac{m^5}{s^5} \triangleq \frac{1}{66,72\ .\ 10^{-12}}\ W = 14\ 988\ 009\ 590\ W$$

$$\approx 15\ 000\ 000\ 000\ W$$

3.3. Relatieve betekenis van de gravitatiekonstante

Indien in het SI een onderscheid zou gemaakt geweest zijn tussen trage massa en zware massa (met als koherente eenheid respektievelijk de grondeenheid kg en de afgeleide eenheid $kg^{1/2}\ .\ m^{3/2}\ .\ s^{-1}$), of indien massa (zonder onderscheid tussen trage massa en zware massa) zou aangenomen geweest zijn als een afgeleide grootheid (met als koherente afgeleide eenheid $m^3\ .\ s^{-2}$), zou er geen sprake geweest zijn van een gravitatiekonstante.

Dit blijkt uit de hierboven onder 3.1. en 3.2. behandelde uitdrukkingen, namelijk :

$$F = \frac{m_{gr,1}\ .\ m_{gr,2}}{r^2} \qquad (SI\text{-eenheid} : \frac{kg\ .\ m}{s^2} = N)$$

met als eenheid van zware massa m_{gr} : $kg^{1/2}\ .\ m^{3/2}\ .\ s^{-1}$

en $$F'' = \frac{m'_1 \cdot m'_2}{r^2}$$ (eenheid : $\frac{m^4}{s^4}$)

met als eenheid van massa m' : $m^3 \cdot s^{-2}$

Hoewel het in bovenstaande uitdrukkingen om dezelfde kracht gaat, is de dimensie van de betrokken grootheid verschillend :

$\dim(F) = M\ L\ T^{-2}$ = dimensie van de grootheid kracht in het SI

$\dim(F'') = \frac{L^4}{T^4}$ = dimensie van de grootheid kracht in een eenhedenstelsel met als basisgrootheden uitsluitend lengte en tijd.

4. Aanduiden van een hoeveelheid

Een maat voor het aangeven van een hoeveelheid is bijvoorbeeld het volume (en bij gassen eventueel het normvolume, zijnde het volume ingenomen bij een temperatuur van 0 °C en een druk gelijk aan de normale atmosferische druk, zijnde 101 325 Pa). Volume als maat voor het aangeven van een hoeveelheid, komt voor in alle eenhedenstelsels.

In eenhedenstelsels waarin massa een basisgrootheid vormt, is naast bijvoorbeeld het volume, ook de massa een maat voor het aangeven van een hoeveelheid. Aldus kan in het SI een hoeveelheid worden weergegeven door zijn massa; de SI-eenheid van massa is het kilogram, met symbool kg.

In eenhedenstelsels waarin kracht een basisgrootheid vormt, is naast bijvoorbeeld het volume, ook het normgewicht een maat voor het aangeven van een bepaalde hoeveelheid. In deze eenhedenstelsels was het niet gebruikelijk hiervoor een beroep te doen op de massa. Aldus kan in het TS een hoeveelheid worden weergegeven in kgf (TS-eenheid van normgewicht). Het zou natuurlijk mogelijk geweest zijn, ook in het TS een hoeveelheid aan te geven door zijn massa (TS-eenheid : $\frac{kgf \cdot s^2}{m}$), doch dit was niet gebruikelijk.

De TS-eenheid van normgewicht wordt sinds 1950 genoemd hetzij kilogramkracht of kilogramme-force (symbool kgf) of kilopond (symbool kp); vóór 1950 sprak men eenvoudig van kilogram en gebruikte men ook het symbool kg. Vóór 1950 werd dus in het TS aan de eenheid van normgewicht en van kracht

dezelfde benaming gegeven en hetzelfde symbool toegekend als aan de eenheid van massa uit het toenmalig MKS-stelsel (dat later uitgegroeid is tot het SI).

Reeds in 1939 werd in Duitsland door de toenmalige Physikalisch-Technische Reichsanstalt (PTR) voorgesteld, de eenheden van kracht in het TS de benamingen "Pond" (symbool p) en "Kilopond" (symbool kp) te geven. Respektievelijk in 1945 en 1950 werd eveneens in Zweden en in Oostenrijk de benaming "kilopond" gegeven aan de TS-eenheid van kracht. In Nederland en België was er bezwaar tegen de benamingen "pond" en "kilopond" omwille van de mogelijke verwarring met het sinds lang bestaande nederlandstalige woord "pond" (= 500 g). Ook in de engelstalige landen werden de benamingen pond en kilopond niet aanvaard omwille van de gelijkenis met het reeds bestaande Engelse woord "pound" (≈ 0,4536 kg). In plaats van de benamingen "pond" en "kilopond", werden in de betrokken landen aan de eenheden van kracht in het TS de benamingen "gramkracht of gramme-force" (symbool gf) en "kilogramkracht of kilogramme-force" (symbool kgf) gegeven. In België kwamen ook nog de symbolen g' (gramkracht) en kg' (kilogramkracht) voor (zie de Belgische norm NBN 361 van 1955).

In de Duitse normen werd de benaming Pond (met symbool p) als eenheid van kracht voor het eerst aangetroffen in DIN 1301 "Einheiten; Kurzzeichen" Ausgabe Juni 1955; als voorbeelden van decimale veelvouden en delen werden opgegeven : kp, Mp, mp, µp. Verder werd er aan toegevoegd dat, wanneer er geen twijfel mogelijk was, ook nog g, kg, enz. mocht geschreven worden in plaats van p, kp, enz.

5. Wegen

5.1. Wegen met een weegschaal (balans)

Beschouwen we een klassieke gelijkarmige weegschaal (balans). Indien beide schalen leeg zijn, bevindt de weegschaal zich in evenwicht. Indien in één der schalen het te wegen voorwerp wordt gelegd, wordt het evenwicht verbroken. Het te wegen voorwerp bevindt zich immers in het aardse zwaarteveld en ondergaat de zwaartekracht van de aarde.

Met $G_{n,1}$ = normgewicht (TS) van het te wegen voorwerp
m_1 = massa (SI) van het te wegen voorwerp
g = plaatselijke zwaarteveldsterkte
(plaatselijke versnelling van de zwaartekracht)
wordt de kracht die het te wegen voorwerp op de schaal uitoefent, weergegeven als volgt :

$$G_1 = \frac{G_{n,1}}{g_n} \cdot g \qquad \text{(TS)}$$

$$G_1 = m_1 \cdot g \qquad \text{(SI)}$$

Om het verbroken evenwicht te herstellen, worden in de andere schaal geijkte gewichten geplaatst totdat het evenwicht hersteld is. Van deze geijkte gewichten is de massa (SI) en het normgewicht (TS) nauwkeurig gekend.

Met $G_{n,2}$ = totaal normgewicht (TS) van de geijkte gewichten
m_2 = totale massa (SI) van de geijkte gewichten
g_n = normversnelling (TS)
g = plaatselijke zwaarteveldsterkte (plaatselijke versnelling van de zwaartekracht)
wordt de kracht die de geijkte gewichten op de schaal uitoefenen, weergegeven als volgt :

$$G_2 = \frac{G_{n,2}}{g_n} \cdot g \qquad \text{(TS)}$$

$$G_2 = m_2 \cdot g \qquad \text{(SI)}$$

Het evenwicht wordt verwezenlijkt wanneer G_1 gelijk is aan G_2, dus als

$$\frac{G_{n,1}}{g_n} \cdot g = \frac{G_{n,2}}{g_n} \cdot g \qquad \text{(TS)}$$

$$m_1 \cdot g = m_2 \cdot g \qquad \text{(SI)}$$

Bij het evenwicht geldt dus :

$$G_{n,1} = G_{n,2} \qquad \text{(TS)}$$

$$m_1 = m_2 \qquad \text{(SI)}$$

Vermits de waarden van de massa m_2 en het normgewicht $G_{n,2}$ van de geijkte gewichten nauwkeurig gekend zijn, kennen we als resultaat van de

weging meteen de waarden van de massa m_1 en het normgewicht $G_{n,1}$ van het te wegen voorwerp.

Bij een nauwkeurige weging dient men rekening te houden met de opwaartse stuwkracht die ieder lichaam ondervindt dat zich in een fluïdum (lucht, water, enz.) bevindt. Wanneer bij een weging in lucht met de hierboven beschreven balans het evenwicht bereikt is, geldt, nauwkeurig gezien, volgend krachtsevenwicht :

TS : $$\frac{G_{n,1}}{g_n} \cdot g - V_1 \cdot \frac{\gamma_{n,L}}{g_n} \cdot g = \frac{G_{n,2}}{g_n} \cdot g - V_2 \cdot \frac{\gamma_{n,L}}{g_n} \cdot g$$

gebruikelijke schrijfwijze :

$$G_1 - V_1 \cdot \gamma_L = G_2 - V_2 \cdot \gamma_L$$

SI : $$m_1 \cdot g - V_1 \cdot \rho_L \cdot g = m_2 \cdot g - V_2 \cdot \rho_L \cdot g$$

met V_1 = volume van het te wegen voorwerp
V_2 = volume van de gebruikte geijkte gewichten
$\gamma_{n,L}$ = soortelijk normgewicht van de lucht (TS)
ρ_L = soortelijke massa van de lucht (SI)

Hieruit dient dan m_1 of $G_{n,1}$ berekend te worden; men bekomt :

TS $\left(\text{met } V_1 = \frac{G_{n,1}}{\gamma_{n,1}} \text{ en } V_2 = \frac{G_{n,2}}{\gamma_{n,2}}\right)$:

$$G_{n,1} = G_{n,2} \cdot \frac{\gamma_{n,1}}{\gamma_{n,2}} \cdot \frac{\gamma_{n,2} - \gamma_{n,L}}{\gamma_{n,1} - \gamma_{n,L}}$$

gebruikelijke schrijfwijze :

$$G_1 = G_2 \cdot \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \cdot \frac{\gamma_2 - \gamma_L}{\gamma_1 - \gamma_L}$$

SI $\left(\text{met } V_1 = \frac{m_1}{\rho_1} \text{ en } V_2 = \frac{m_2}{\rho_2}\right)$:

$$m_1 = m_2 \cdot \frac{\rho_1}{\rho_2} \cdot \frac{\rho_2 - \rho_L}{\rho_1 - \rho_L}$$

Bij een weging zoals hierboven beschreven is de waarde van de veldsterkte van het betrokken zwaarteveld, of anders uitgedrukt, de waarde van de plaatselijke versnelling van de zwaartekracht, van geen belang. Met de

hierboven beschreven weegschaal en dezelfde geijkte gewichten zou men hetzelfde resultaat bekomen bij een weging op de maan (met $g = 1{,}62\ \frac{m}{s^2}$) als bij een weging op aarde (met $g = \pm\ 9{,}81\ \frac{m}{s^2}$). Opdat de balans zou funktioneren is er echter wel een zwaarteveld vereist.

Derhalve kunnen we het volgende besluit treffen : wegen met een weegschaal, is het bepalen van de *massa* (SI) of van het *normgewicht* (TS), door het verwezenlijken van een evenwicht tussen twee krachten. De grootte zelf van deze twee krachten wordt niet gemeten. Elk van beide krachten is de resultante van drie krachten : de gravitatiekracht uitgeoefend door de aarde op het te wegen voorwerp, de middelpuntvliedende kracht veroorzaakt door de rotatie van de aarde om haar as, en de opwaartse stuwkracht. De gravitatiekracht en de middelpuntvliedende kracht vormen samen de zwaartekracht. Indien de weging gebeurt in het luchtledige, bekomt men rechtstreeks de massa van het te wegen voorwerp, vermits de opwaartse stuwkracht in dat geval gelijk is aan nul. Gebeurt de weging niet in het luchtledige en is toch een zeer nauwkeurig resultaat vereist, dan dient een kleine berekening te gebeuren, teneinde rekening te houden met het toch nog optredende (geringe) verschil tussen de massa van de geijkte gewichten en de massa van het te wegen voorwerp tengevolge van de opwaartse stuwkrachten.

De eenheid van massa (SI) is het kilogram (symbool kg); de eenheid van normgewicht (TS) is gelijk aan de eenheid van kracht (in het TS) die vóór 1950 eveneens kilogram werd genoemd (met symbool kg) en na 1950 kilogramkracht of kilogramme-force (met symbool kgf) of kilopond (met symbool kp). Te noteren valt dat de getalwaarde van het normgewicht uitgedrukt in kgf (of kp), gelijk is aan de getalwaarde van de massa uitgedrukt in kg.

Voor de gebruikers van het TS was "wegen" (met een weegschaal) synoniem van "bepalen van het normgewicht"; in plaats van het woord normgewicht (symbool G_n) gebruikte men in de praktijk kortweg het woord gewicht (symbool G) zodat voor hen "wegen" gelijk stond met "bepalen van het gewicht G". Het gewicht als resultaat van een weging werd bij het gebruik van het TS uitgedrukt in de eenheid van kracht met als symbool kg tot 1950, en kgf of kp na 1950.

"Bepalen van het gewicht" als synoniem van "wegen" was zodanig verspreid, dat ook de gebruikers van het MKS-stelsel het "wegen" (met een weegschaal) bestempelden als "bepalen van het gewicht". Het gewicht als resultaat van een weging wordt bij het gebruik van MKS-eenheden (of SI-eenheden) uitgedrukt in de eenheid van massa, namelijk het kilogram (symbool kg). Bij het gebruik van het MKS-stelsel (of het SI), is "wegen" synoniem van "bepalen van de massa"; in de gewone omgangstaal spreekt men echter (ten onrechte) steeds van "bepalen van het gewicht". Het symbool van gewicht in de betekenis van het resultaat van een weging, is bij het gebruik van het MKS-stelsel (of bij het gebruik van SI-eenheden) niet G doch wel m (vermits het gaat om een massa).

Met het verdwijnen van het TS (door de algemene invoering van het SI) heeft ook de grootheid normgewicht zijn bestaansreden verloren; toch bleef de uitdrukking "het gewicht bepalen" (afkomstig van "het bepalen van het normgewicht" uit het TS) in de gewone omgangstaal (ten onrechte) behouden door de gebruikers van het SI. De benaming "gewicht" voor het aangeven van een hoeveelheid als resultaat van een weging is zo diep ingeworteld in het spraakgebruik, dat men in de gewone omgangstaal bij het weergeven van het resultaat van een weging, wel altijd de benaming "gewicht" zal blijven gebruiken in plaats van de juiste benaming "massa".

Hierna wordt ter illustratie van bovenstaande uiteenzetting opgegeven welke benamingen, symbolen en eenheden werden of worden gebruikt in het TS en in het MKS-stelsel of het SI voor het aanduiden van het resultaat van een weging van een voorwerp met een massa gelijk aan 20 kg (= een normgewicht gelijk aan 20 kgf).

- bij gebruik van het TS :

  korrekte benaming en schrijfwijze vóór 1950 :

  normgewicht G_n = 20 kg (met kg = eenheid van kracht)

  gebruikelijke benaming en schrijfwijze vóór 1950 :

  gewicht G = 20 kg (met kg = eenheid van kracht)

  korrekte benaming en schrijfwijze na 1950 :

  normgewicht G_n = 20 kgf of 20 kp

  gebruikelijke benaming en schrijfwijze na 1950 :

  gewicht G = 20 kgf of 20 kp

- bij het gebruik van het MKS-stelsel of het SI :
  korrekte benaming en schrijfwijze :
  massa m = 20 kg
  gebruikelijke benaming (in de gewone omgangstaal) en schrijfwijze :
  gewicht m = 20 kg (en niet : gewicht G = 20 kg)

5.2. Wegen met een unster

Bij het wegen van een voorwerp met een unster, wordt eveneens een evenwicht verwezenlijkt tussen twee krachten. De ene kracht is de trekkracht van de veer en de andere kracht is opnieuw de resultante van drie krachten (bij een weging op aarde) : de gravitatiekracht door de aarde uitgeoefend op het te wegen voorwerp, de middelpuntvliedende kracht veroorzaakt door de rotatie van de aarde om haar as en de opwaartse stuwkracht. De gravitatiekracht en de middelpuntvliedende kracht vormen samen de zwaartekracht; bij een meting in het luchtledige is de opwaartse stuwkracht gelijk aan nul. Bij het evenwicht geldt (met G_n = normgewicht, m = massa en V = volume van het te wegen voorwerp; $\gamma_{n,L}$ en ρ_L = respektievelijk het soortelijk normgewicht en de soortelijke massa van de lucht) :

TS : $$\text{trekkracht van de veer} = \frac{G_n}{g_n} \cdot g - V \cdot \frac{\gamma_{n,L}}{g_n} \cdot g$$

gebruikelijke schrijfwijze :

$$\text{trekkracht van de veer} = G - V \cdot \gamma_L$$

SI : $$\text{trekkracht van de veer} = m \cdot g - V \cdot \rho_L \cdot g$$

Met een unster wordt een kracht gemeten en niet een massa; de aanwijzing op de schaal wordt mede bepaald zowel door de grootte van de massa (SI) of de grootte van het normgewicht (TS) van het te wegen voorwerp als door de sterkte van het zwaarteveld. De aanduidingen op de afleesschaal van een unster zouden dus moeten weergegeven worden in krachteenheden : bijvoorbeeld in newton (N) bij het gebruik van eenheden uit het MKS-stelsel of van SI-eenheden, en in kgf of kp bij het gebruik van eenheden uit het TS. Men zou dan het gezochte normgewicht (TS) of de gezochte massa (SI) kunnen berekenen als volgt :

TS : $$G_n = \frac{(\text{aflezing in kgf}) \cdot g_n}{g} + V \cdot \gamma_{n,L}$$

SI : $$m = \frac{\text{aflezing in newton}}{g} + V \cdot \rho_L$$

Bij het wegen met een unster is geen nauwkeurige meting mogelijk en is daarenboven, bij een weging in de lucht, de opwaartse stuwkracht zo gering, dat de termen $V \cdot \gamma_{n,1}$ en $V \cdot \rho_1$ mogen verwaarloosd worden bij de berekening van respektievelijk G_n en m.

Voorbeeld :

Zij van een lichaam de massa m gelijk aan 20 kg en het normgewicht G_n gelijk aan 20 kgf.

Bij het meten van de uitgeoefende kracht G met behulp van een unster ontworpen voor het meten van krachten en derhalve geijkt in eenheden van kracht (bijvoorbeeld in kgf of in N), bekomt men als aflezing :

- op een plaats waar g gelijk is aan g_n :

  $G = 20{,}0$ kgf = 196,1(33) N

- op een breedte van 51° (met $g = 9{,}811$ m/s^2) :

  $G = 20{,}0(08\ 871\ 53)$ kgf = 196,2(2) N

- aan de evenaar (met $g = 9{,}780$ m/s^2) :

  $G = 19{,}9(45\ 649\ 13)$ kgf = 195,6 N

- aan de polen (met $g = 9{,}832$ m/s^2) :

  $G = 20{,}0(51\ 699\ 61)$ kgf = 196,6(4) N

- op de maan (met $g = 1{,}62$ m/s^2) :

  $G = 3{,}3(03\ 860\ 53)$ kgf = 32,4 N

Uit de betrokken aflezingen wordt het normgewicht G_n (TS) en de massa m (MKS-stelsel en SI) berekend als volgt :

$$G_n = 20 \text{ kgf} \cdot \frac{9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2}}{9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2}} = 20 \text{ kgf}$$

$$= 20{,}0(08\ 871\ 53) \text{ kgf} \cdot \frac{9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2}}{9{,}811\ \frac{m}{s^2}} = 20 \text{ kgf}$$

$$= 19{,}9(45\ 649\ 13) \text{ kgf} \cdot \frac{9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2}}{9{,}780\ \frac{m}{s^2}} = 20 \text{ kgf}$$

$$= 20{,}0(51\ 699\ 61) \text{ kgf} \cdot \frac{9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2}}{9{,}832\ \frac{m}{s^2}} = 20 \text{ kgf}$$

$$= 3,3(03\ 830\ 53)\ \text{kgf} \cdot \frac{9,806\ 65\ \frac{m}{s^2}}{1,62\ \frac{m}{s^2}} = 20\ \text{kgf}$$

$$m = \frac{196,1(33)\ N}{9,806\ 65\ \frac{m}{s^2}} = \frac{196,2(2)\ N}{9,811\ \frac{m}{s^2}} = \frac{196,6(4)\ N}{9,832\ \frac{m}{s^2}} = \frac{32,4\ N}{1,62\ \frac{m}{s^2}} = 20\ \text{kg}$$

Het is nu wel mogelijk, een unster te voorzien van een zodanige afleesschaal, dat men onmiddellijk hetzij de massa in kg (MKS-stelsel of SI) hetzij het normgewicht in kgf of kp (TS) kan aflezen; een dergelijke unster is slechts bruikbaar voor zover de plaatselijke waarde van g gelijk is aan de waarde die men als grondslag genomen heeft bij het ontwerpen van de betrokken afleesschaal. De afleesschaal zou op aarde als grondslag een g-waarde hebben gelegen tussen 9,780 $\frac{m}{s^2}$ en 9,832 $\frac{m}{s^2}$, en op de maan een g-waarde gelijk aan 1,62 $\frac{m}{s^2}$.

Uit bovenstaande uiteenzetting kan het volgende besloten worden :

- een unster, ontworpen voor het meten van krachten en derhalve geijkt in eenheden van kracht (enerzijds in N en anderzijds in kgf of kp), geeft overal een juiste meting, namelijk de waarde van het produkt $m \cdot g$ (in het MKS-stelsel of het SI) of van het produkt $\frac{G_n}{g_n} \cdot g$ (in het TS); bij het wegen van eenzelfde voorwerp op de maan en op de aarde, zal de afgelezen waarde op de maan slechts ongeveer één zesde bedragen van de aflezing op aarde;
- een unster, ontworpen voor het meten van massa's (MKS-stelsel of SI) of van normgewichten (TS) en derhalve geijkt enerzijds in een eenheid van massa (bijvoorbeeld kg in het MKS-stelsel of het SI) en anderzijds in een eenheid van normgewicht (bijvoorbeeld kgf of kp in het TS), geeft slechts een juiste meting in zover de werkelijke g overeenstemt met de g-waarde die in aanmerking werd genomen bij het ontwerpen van de afleesschaal. Indien een dergelijke unster die op aarde de juiste waarde weergeeft van de massa (MKS-stelsel of SI) of van het normgewicht (TS), meegenomen wordt naar de maan, zal de afgelezen waarde volledig foutief zijn en slechts ongeveer één zesde bedragen van de werkelijke massa (MKS-stelsel of SI) of van het werkelijk normgewicht (TS).

Een unster waarvan de afleesschaal de werkelijk uitgeoefende kracht weergeeft in kgf, is volledig identiek aan een unster die het normgewicht

weergeeft in kgf en waarvan de afleesschaal werd ontworpen met als grondslag een g-waarde die gelijk is aan g_n (dus voor metingen van het normgewicht op plaatsen waar g gelijk is aan g_n). Het normgewicht is immers per definitie gelijk aan het werkelijk gewicht bij een g gelijk aan g_n. Op een unster die rechtstreeks de uitgeoefende kracht weergeeft in kgf, wordt op plaatsen waar g gelijk is aan g_n, ook het normgewicht rechtstreeks afgelezen. Vermits verder een unster geen nauwkeurige aflezingen toelaat, mag men aannemen dat het normgewicht ook rechtstreeks weergegeven wordt wanneer de werkelijke g niet veel afwijkt van g_n, hetgeen geldt voor metingen op aarde. En vermits de getalwaarde van het normgewicht uitgedrukt in kgf, gelijk is aan de getalwaarde van de massa uitgedrukt in kg, kan men besluiten : de afleesschaal van een unster, waarop de werkelijk uitgeoefende kracht wordt afgelezen in kgf, dient op aarde terzelfdertijd voor het aflezen van het normgewicht (eveneens in kgf) en van de massa (in kg).

Op de maan kan met de betrokken unster steeds de werkelijk uitgeoefende kracht rechtstreeks afgelezen worden, doch niet meer het normgewicht of de massa. Indien men op de maan de bekomen aflezing toch zou interpreteren als normgewicht en als massa, zou men volgende foutieve resultaten bekomen (bij weging van hetzelfde lichaam als hierboven, met m = 20 kg en G_n = 20 kgf) :

$$G_n = 3{,}3(03\ 880\ 53)\ \text{kgf}$$
$$m = 3{,}3(03\ 880\ 53)\ \text{kg}$$

Wanneer men per definitie aanneemt, dat "wegen" synoniem is van "bepalen van de massa" (met het verdwijnen van het TS laten we het "bepalen van het normgewicht" achterwege) moet ook het "wegen met een unster" er op gericht zijn de massa te bepalen en is het verantwoord, voor het dagelijks gebruik (op aarde), de afleesschaal van een unster te ijken in kg (eenheid van massa), niettegenstaande de uitwijking evenredig is met de kracht uitgeoefend door het te wegen voorwerp.

6. Gewicht als de kracht die tengevolge van het zwaarteveld, door een lichaam in rust wordt uitgeoefend op zijn ondersteuning of op zijn ophangingspunt

Zowel in het TS als bij het gebruik van eenheden uit het MKS-stelsel of het SI, wordt het gewicht zoals hier bedoeld, voorgesteld door het

symbool G en uitgedrukt in eenheden van kracht. Met m = massa (MKS-stelsel of SI), G_n = normgewicht (TS), g_n = normversnelling (TS) en g = zwaarteveldsterkte (versnelling van de zwaartekracht) bekomt men :

TS : $$G = \frac{G_n}{g_n} \cdot g$$

SI : $$G = m \cdot g$$

Aldus bedraagt het gewicht (in de zin als hier bedoeld) van een voorwerp met massa m = 20 kg en normgewicht G_n = 20 kgf :

- op een breedte van 51° (met $g = 9{,}811 \frac{m}{s^2}$) :

TS : $$G = \frac{G_n}{g_n} \cdot g = \frac{20 \text{ kgf} \cdot 9{,}811 \frac{m}{s^2}}{9{,}806\,65 \frac{m}{s^2}} = 20{,}008\,871\,53 \text{ kgf}$$

SI : $$G = m \cdot g = 20 \text{ kg} \cdot 9{,}811 \frac{m}{s^2} = 196{,}22 \text{ N}$$

- aan de evenaar (met $g = 9{,}780 \frac{m}{s^2}$) :

TS : $$G = \frac{G_n}{g_n} \cdot g = \frac{20 \text{ kgf} \cdot 9{,}780 \frac{m}{s^2}}{9{,}806\,65 \frac{m}{s^2}} = 19{,}945\,649\,13 \text{ kgf}$$

SI : $$G = m \cdot g = 20 \text{ kg} \cdot 9{,}780 \frac{m}{s^2} = 195{,}6 \text{ N}$$

- aan de polen (met $g = 9{,}832 \frac{m}{s^2}$) :

TS : $$G = \frac{G_n}{g_n} \cdot g = \frac{20 \text{ kgf} \cdot 9{,}832 \frac{m}{s^2}}{9{,}806\,65 \frac{m}{s^2}} = 20{,}051\,699\,61 \text{ kgf}$$

SI : $$G = m \cdot g = 20 \text{ kg} \cdot 9{,}832 \frac{m}{s^2} = 196{,}64 \text{ N}$$

- op de maan (met $g = 1{,}62 \frac{m}{s^2}$) :

TS : $$G = \frac{G_n}{g_n} \cdot g = \frac{20 \text{ kgf} \cdot 1{,}62 \frac{m}{s^2}}{9{,}806\,65 \frac{m}{s^2}} = 3{,}303\,880\,53 \text{ kgf}$$

SI : $$G = m \cdot g = 20 \text{ kg} \cdot 1{,}62 \frac{m}{s^2} = 32{,}4 \text{ N}$$

Het gewicht in de zin als hier bedoeld, kan niet rechtstreeks gemeten worden met behulp van een weegschaal (balans), maar kan echter wel (mits

verwaarlozing van de opwaartse stuwkracht) gemeten worden met een unster die geijkt is in eenheden van kracht (bijvoorbeeld N in het SI en kgf in het TS).

7. Dubbelzinnigheid van het woord "gewicht"

Enerzijds is "gewicht" de kracht die tengevolge van het zwaarteveld door een lichaam in rust wordt uitgeoefend op zijn ondersteuning of zijn ophangingspunt; gewicht in deze betekenis wordt voorgesteld door het symbool G en uitgedrukt in eenheden van kracht (bijvoorbeeld N in het SI en kgf in het TS).

Anderzijds is "gewicht" ofwel een afkorting van normgewicht (TS), voor te stellen door het symbool G_n en uit te drukken in de krachteenheid kgf, ofwel, bij het gebruik van het MKS-stelsel of het SI, een in de gewone omgangstaal verkeerd gebruikte benaming voor massa. Wanneer met gewicht massa bedoeld wordt, gebruikt men m als symbool (en nooit G); beter is het echter in dit geval niet te spreken van het gewicht m, doch wel van de massa m (uit te drukken in een eenheid van massa, bijvoorbeeld kg).

Reeds in 1901 was men gekonfronteerd met deze dubbelzinnigheid van het woord gewicht, zoals moge blijken uit de volgende verklaring gedaan door de 3de CGPM (1901) :

Considérant la nécessité de faire cesser l'ambiguïté qui existe encore dans l'usage courant sur la signification du terme poids, employé tantôt dans le sens du terme masse, tantôt dans le sens du terme effort mécanique;

La Conférence déclare :

1° *Le kilogramme est l'unité de masse; il est égal à la masse du prototype international du kilogramme;*

2° *Le terme poids désigne une grandeur de la même nature qu'une force; le poids d'un corps est le produit de la masse de ce corps par l'accélération de la pesanteur; en particulier, le poids normal d'un corps est le produit de la masse de ce corps par l'accélération normale de la pesanteur;*

3° Le nombre adopté dans le Service international des Poids et Mesures pour la valeur de l'accélération normale de la pesanteur est 980,665 cm/s^2, *nombre sanctionné déjà par quelques législations.*

Het Franse woord "poids" in deze tekst werd vertaald als volgt :
- in het Nederlands : gewicht (als kracht)
- in het Duits : Gewicht (als kracht)
- in het Engels : weight (als kracht).

Deze drie woorden (gewicht, Gewicht en weight) waren echter in hun respektievelijk taalgebied reeds algemeen gebruikt voor het aanduiden van het normgewicht en van de massa, en de verklaring van de 3de CGPM (1901) heeft hieraan weinig verholpen.

Met het wegvallen van het TS en de grootheid normgewicht, en de algemene invoering van het SI, is deze toestand als volgt geëvolueerd :

a. in het Nederlands taalgebied : hier wordt thans de voorkeur eraan gegeven, het woord gewicht, met symbool G te behouden voor de kracht die een lichaam uitoefent op zijn ondersteuning of zijn ophangingspunt; er wordt aanbevolen, voor het aangeven van de massa, eveneens het woord massa te gebruiken; wanneer men hier toch in de gewone omgangstaal het woord gewicht zou gebruiken, dient men uitsluitend gebruik te maken van het symbool m.

b. in het Duits taalgebied werden in de loop der jaren verschillende definities vastgelegd, waarvan er hierna enkele worden weergegeven.

☆ DIN 1305 : Gewicht, Masse, Menge (Juli 1938, September 1958)

Das Gewicht G eines an einem Orte der Erde ruhenden Körpers ist die Kraft, die er im luftleeren Raum auf seine Unterlage ausübt. Das Gewicht ändert sich proportional der Fallbeschleunigung. Das Gewicht eines körpers an einem Orte, für den der Normwert g_n der Fallbeschleunigung gilt, heiszt sein Normgewicht G_n.

Die Masse m eines Körpers ist eine ihm eigentümliche unveränderliche Eigenschaft; sie steht mit einer auf den körper wirkenden Kraft P

und der von dieser erzeugten Beschleunigung b in der Beziehung : $P = m \cdot b$. Die Masse eines Körpers ist insbesondere gleich seinem Gewicht an einem beliebigen Orte geteilt durch die Fallbeschleunigung an demselben Orte : $m = \frac{G}{g}$.

☆ DIN 1305 : Masse, Gewicht (Januar 1964)
(Engelse vertaling : mass, weight)
en DIN 1305 : Masse, Gewicht, Gewichtskraft, Fallbeschleunigung (Juni 1968)
(Engelse vertaling : mass, weight, weight-force, acceleration of free fall)

Masse : Die physikalische Grösze Masse m kennzeichnet die Eigenschaft eines Körpers, die sich sowohl als Trägheit gegenüber einer Änderung seines Bewegungszustandes als auch in der Anziehung zu anderen Körpern äuszert. Die Masse eines Körpers wird durch Vergleich mit Körpern bekannter Masse bestimmt. Ein Massenvergleich ist meist eine Wägung mit in Masseneinheiten geeichten Gewichtstücken (Wägestücken), nötigenfalls mit Anbringung entsprechender, z.B. den Luftauftrieb berücksichtigender Korrektionen.

Gewicht : Das Wort Gewicht wird vorwiegend in drei verschiedenen Bedeutungen gebraucht :
- als Grösze von der Art einer *Kraft*, und zwar für das Produkt der Masse eines Körpers und der örtlichen Fallbeschleunigung. Diese Bedeutung des Wortes Gewicht entspricht einer Grundsatzerklärung der 3. Generalkonferenz für Masz und Gewicht (1901).
Es wird empfohlen, an Stelle des Wortes Gewicht als Grösze von der Art einer Kraft, das Wort Gewichtskraft (Zeichen G) zu verwenden; diese Grösze wird in *Krafteinheiten* angegeben.
- als Grösze von der Art einer *Masse* bei der Angabe von Mengen im Sinne eines Wägeergebnisses. In dieser Bedeutung wird das Wort Gewicht insbesondere in Handel und Wirtschaft verwendet.
Es wird empfohlen, an Stelle des Wortes Gewicht als Grösze von der Art einer masse, das Wort Masse (Zeichen m) zu verwenden; diese Grösze wird

in *Masseneinheiten* angegeben. Wägeergebnisse zur Angabe von Mengen, insbesondere auch in Stücklisten und Katalogen können auch weiterhin Gewicht genannt werden.

- als Name für Verkörperungen von Masseneinheiten sowie deren Vielfachen oder Teilen.

Es wird empfohlen, an Stelle des Wortes Gewicht als Name für Verkörperungen von Masseneinheiten das Wort Gewichtstück oder auch Wägestück zu verwenden.

☆ DIN 1305 : Masse, Kraft, Gewichtskraft, Gewicht, Last (Mai 1977)
Engelse vertaling : Mass, force, weight-force, weight, load.

Masse : Die physikalische Grösze Masse *m* ist die Eigenschaft eines Körpers, die sich sowohl in Trägheitswirkungen gegenüber einer Änderung seines Bewegungszustandes als auch in der Anziehung auf andere Körper äuszert. Die Masse ist ortsunabhängig.

Die Masse eines Körpers kann durch Vergleich mit Körpern bekannter Masse bestimmt werden.

Die Verkörperung einer Einheit der Masse, ihrer Vielfachen oder Teile wird Gewichtstück oder Wägestück genannt.

Gewicht : Das Wort Gewicht wird vorwiegend in drei verschiedene Bedeutungen gebraucht :
a. als Benennung eines Wägeergebnisses zur Angabe von Warenmengen anstatt "Masse"
b. als Benennung für das Produkt aud der Masse eines Körpers und der örtlichen Fallbeschleunigung anstatt "Gewichtskraft"
c. als Name für Verkörperungen von Masseneinheiten sowie deren Vielfachen oder Teilen anstatt "Gewichtstück" oder "Wägestück".

Zur Vermeidung von Miszverständnissen wird empfohlen, anstelle des Wortes "Gewicht" folgende Wörter zu benutzen :
a. "Masse" für das Ergebnis einer Wägung
b. "Gewichtskraft" für das Produkt der Masse eines Körpers und der

Örtlichen Fallbeschleunigung

c. "Gewichtstück" oder "Wägestück" für Verkörperungen von Einheiten der Masse.

In Handel und Wirtschaft wird das Ergebnis einer Wägung Gewicht genannt. In diesem Sinne darf das Wort "Gewicht" auch weiterhin benutzt werden.

c. in het Engelse taalgebied : het Engelse woord "weight" is even dubbelzinnig als het Duitse woord "Gewicht", waarvan de verschillende betekenissen worden beschreven in DIN 1305 van 1938, 1958, 1964, 1968 en 1977. Onder het Duitse woord "Gewicht" in de betekenis van het resultaat van een weging, wordt een massa verstaan en daarom wordt ook aangeraden het woord "Masse" te gebruiken; in DIN 1305 van 1968 en van 1977 wordt als Engelse vertaling van "Gewicht" gegeven : weight (uit te drukken in een massa-eenheid).
Het Duitse woord "Gewichtskraft" wordt in DIN 1305 van 1968 en van 1977 in het Engels vertaald als "weight-force" (uit te drukken in een krachteenheid). In "The use of SI Units (PD 5686 : 1972)", uitgegeven door het British Standards Institution in 1972, lezen we op blz. 4 :
Ambiguity in the meaning of "weight" has long been a source of confusion. It is used in the sense of mass in the Weights and Measures Act 1963 and in common parlance; it is used in the sense of gravitational force by CGPM and in scientific and some technical work. There is no explicit SI unit of "weight". When "weight" is used to mean mass then the coherent SI unit is the kilogram. When "weight" is used to mean force then the coherent SI unit is the newton.
In "Conversion factors and tables (BS 350 : Part 1 : 1974), uitgegeven door het British Standards Institution in 1974, lezen we op blz. 45 :
Meaning of "weight". The term "weight" is commonly used either to denote mass or force, i.e. the mass of a body or the force of gravity acting upon it. It is used in the sense of mass in the UK Weights and Measures Act, 1963 and in common parlance; it is used in the sense of force by CGPM and in scientific and some technical work.

Hieraan kunnen we nog toevoegen dat in ISO 1000 van 1973 (SI units and recommendations for the use of their multiples and of certain other

units), "weight" niet meer wordt aangegeven als een grootheid die in krachteenheden wordt uitgedrukt; in "Draft ISO Proposal" van februari 1971 was dit wel het geval.

In "The use of SI-Units (PD 5686 : 1978)", uitgegeven door het British Standards Institution in 1978, lezen we op blz. 2 en 3 :

Units of force. The SI, being a coherent system of units, provides for a coherent unit of force, the kilogram metre per second squared ($kg.m/s^2$), with the special name newton (N). The newton is that force which, when applied to a body having a mass of one kilogram, produces an acceleration of one metre per second squared (1 m/s^2). The units having the special names pascal, watt and joule may be defined in terms of the newton.

The hitherto widely used "metric-technical" unit of force is the kilogram force, defined as that force which, acting on a body having a mass of one kilogram, produces an acceleration of 9.806 65 m/s^2. This is not an SI unit and the Member States of the EEC, under the conditions laid down in the Units of Measurement Directive, are required to cease to authorize the use of the kilogram force (kilopond in Germany) by 31 December 1977 at the latest. The coherence resulting from the adoption of the SI would be jeopardized by the preservation of this unit.

Units of weight. There is no explicit SI unit of "weight" but the word is in very common use; ambiguity as to its meaning has long been a source of confusion. "Weight" is used in the sense of mass in the Weights and Measures Acts of 1963 and 1976 and in common parlance. *When used with this meaning the SI unit is the kilogram.* Strictly, with this meaning, the "weight" of a body is equal to its apparent mass. In the past, "weight" has also been used with a particular scientific meaning, that of gravitational or downward force, the "weight" of a body being the product of its mass and the acceleration of free fall at the location of the body on the earth's surface. *When used with this meaning the SI unit is the newton.*

Whenever the distinction between the two physical properties of mass and force is necessary, then the term "weight" should not be used; a body should be referred to as having mass and of exerting a downward force. A mass of 1 kg at rest on the earth's surface exerts a downward force of approximately 9.8 N. There will then be no ambiguity and the

word "weight" can remain, as at present, as a common synonym for mass in nontechnical use. The load which may be lifted or carried by, for example, a crane or a vehicle, should be quoted in terms of the weight (mass), in kilograms or tonnes, as this is the physical quantity of direct concern to the operator. The designers of the equipment will be concerned, at the design stage, with the downward forces and other forces, in terms of the newton, which the equipment will have to withstand, but the operator will be interested only in the mass which can be moved with safety.

Vermelden we nog dat in de Verenigde Staten van Noord-Amerika (USA) verschillende technische *krachteenheden* andere benamingen hadden dan in Groot-Brittannië (UK) zoals uit volgende voorbeelden blijkt :

grain-force (UK) = grain-weight (USA) = 635,4601 . 10^{-6} N

pound-force (UK) = pound-weight (USA) = 4,448 221 N

ton-force (UK) = (long) ton-weight (USA) = 9964,015 N

Daartegenover staat, dat volgende eenheden *massa-eenheden* zijn :

1 cental (UK) = 1 short hundredweight (USA) = 100 pounds ≈ 45,359 kg

1 hundredweight (UK) = 1 long hundredweight (USA) = 112 pounds ≈ 50,802 kg

1 pennyweight (UK) = 1 pennyweight (USA) = $\frac{24}{7000}$ pound ≈ 1,555 . 10^{-3} kg

8. Lading, laadvermogen (toelaatbare lading), belasting, draagvermogen (toelaatbare belasting)

Bij de grootheden lading, laadvermogen (bijvoorbeeld van een spoorwegwagon, een vrachtwagen) en belasting, draagvermogen (bijvoorbeeld van een vloer, een brug, een lift, een kraan) dient men na te gaan wat bedoeld wordt, teneinde te weten of de betrokken grootheid dient uitgedrukt te worden in een massa-eenheid of een krachteenheid.

Degene die *gebruik* maakt van de spoorwegwagon, de vrachtwagen, de vloer, de brug, de lift of de kraan, is enkel geïnteresseerd in de hoeveelheid (massa) :

- die op de spoorwegwagon of de vrachtwagen mag geladen worden;
- die op de vloer mag opgestapeld worden;
- waarmede over een brug mag gereden worden;
- waarmede de lift mag belast worden;
- die de kraan mag opheffen.

Daarom zal de *gebruiker* de betrokken grootheden uitdrukken in een massa-eenheid, en dienen de aanduidingen op de betrokken konstruktie betreffende het laadvermogen of het draagvermogen dan ook weergegeven te worden in een eenheid van massa (bijvoorbeeld kg of ton). De *gebruiker* is trouwens niet geïnteresseerd in de optredende krachten.

Voor de *konstrukteur* of *bouwer* van de spoorwegwagon, de vrachtwagen, de vloer, de brug, de lift of de kraan, liggen de zaken helemaal anders. Vertrekkend van de hoeveelheid (massa) die volgens de opdrachtgever moet kunnen vervoerd (spoorwegwagon, vrachtwagen), gedragen (vloer, brug) of verplaatst worden (lift, kraan), dient de bouwer of konstrukteur eerst de uitwendige kracht te bepalen teneinde hieruit de inwendige krachten en de sterkte van de konstruktieonderdelen te kunnen bepalen. De betrokken uitwendige krachten worden meestal door de konstrukteur of bouwer ook belasting genoemd; in dit geval wordt belasting uiteraard uitgedrukt in een krachteenheid (bijvoorbeeld : N).

In overeenstemming met bovenstaande uiteenzetting kan de sneeuwbelasting van een dak uitgedrukt worden in $\frac{kg}{m^2}$ (dan verstaat men onder sneeuwbelasting de sneeuwmassa gedeeld door de oppervlakte) of (door de konstrukteur) in $\frac{N}{m^2}$ (dan verstaat men onder sneeuwbelasting de kracht die door de betrokken sneeuwmassa wordt uitgeoefend, gedeeld door de oppervlakte). Daartegenover zal de windbelasting van een wand steeds worden uitgedrukt in $\frac{N}{m^2}$ (windbelasting is immers een gegeven dat enkel voor de konstrukteur van belang is als optredende uitwendige kracht).

9. Soortelijk (norm)gewicht γ_n en soortelijke (of volumieke) massa ρ

9.1. Soortelijk (norm)gewicht γ_n

Het soortelijk (norm)gewicht is een grootheid die voorkomt bij het gebruik van eenhedenstelsels waarin *kracht* een basisgrootheid vormt

(technische eenhedenstelsels); het soortelijk (norm)gewicht wordt uitgedrukt in een eenheid van kracht, gedeeld door een eenheid van volume (bijvoorbeeld $\frac{kgf}{m^3}$ of $\frac{kp}{m^3}$, $\frac{lbf}{ft^3}$ ...). De definitievergelijking luidt :

$$\gamma_n = \frac{G_n}{V}$$

De index n werd echter meestal achterwege gelaten, zodat de gebruikelijke schrijfwijze was :

$$\gamma = \frac{G}{V}$$

De Franse, Duitse en Engelse vertaling van soortelijk (norm)gewicht luidt respektievelijk :

- poids spécifique
- spezifisches Gewicht, Wichte
- specific weight

Het verdwijnen van de technische eenhedenstelsels en dus ook van de grootheden "normversnelling" en "normgewicht", betekent ook het verdwijnen van de grootheid soortelijk (norm)gewicht γ_n (of γ).

9.2. Soortelijke (of volumieke) massa ρ (ook genoemd massadichtheid of absolute dichtheid)

Deze grootheid komt voor bij eenhedenstelsels waarin *massa* een basisgrootheid vormt en wordt uitgedrukt in een eenheid van massa gedeeld door een eenheid van volume (bijvoorbeeld : $\frac{kg}{m^3}$, $\frac{lb}{ft^3}$, ...). De definitievergelijking luidt :

$$\rho = \frac{m}{V}$$

De Franse, Duits en Engelse vertaling luidt respektievelijk :

- masse volumique
- Dichte, Massendichte
- density, mass density.

HOOFDSTUK XIV

VAN NORMGEWICHT IN HET TS NAAR MASSA IN HET SI

1. De grootheden normgewicht G_n (TS) en massa m (SI), en de soortelijke grootheden gedefinieerd in het TS met behulp van de grootheid normgewicht en in het SI met behulp van de grootheid massa

1.1. De grootheid massa in het SI als tegenhanger van de grootheid normgewicht in het TS voor het aanduiden van een hoeveelheid

1.1.1. Inleiding

Voor het aanduiden van een hoeveelheid kan in het SI beroep worden gedaan op de grootheid massa, en in het TS op de grootheid normgewicht (zie Hoofdstuk XIII, onder 4.).

In het SI is de massa een basisgrootheid, met als (grond)eenheid : kg. De massa van een lichaam is onafhankelijk van de plaatselijke versnelling van de zwaartekracht (plaatselijke zwaarteveldsterkte), en behoudt steeds en overal dezelfde waarde. Een hoeveelheid is nauwkeurig bepaald door opgave van de betrokken massa.

In het TS is niet de massa doch wel de kracht een basisgrootheid, met als (grond)eenheid : kgf. Om een hoeveelheid aan te duiden werd in het TS geen beroep gedaan op de grootheid massa, doch wel op de grootheid gewicht, uitgedrukt in een eenheid van kracht. Teneinde echter voor het aanduiden van een welbepaalde hoeveelheid, steeds en overal eenzelfde waarde te bekomen, was men verplicht onrechtstreeks en op kunstmatige wijze, toch een beroep te doen op de massa van het betrokken lichaam. Aldus kwam men in het TS tot de definitie van het normgewicht, zijnde het werkelijk gewicht dat een lichaam zou hebben indien de plaatselijke versnelling van de zwaartekracht (plaatselijke zwaarteveldsterkte) zou gelijk zijn aan de normversnelling g_n (zie Hoofdstuk XI, onder 3.1.).

1.1.2. De normversnelling g_n (normzwaarteveldsterkte)

Door de 3de CGPM (1901) werd de normversnelling per definitie als volgt vastgelegd :

$$g_n = 9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2}$$

In Hoofdstuk XIII onder 2.2. wordt uitgelegd, waarom het meer aangewezen is, de benaming "zwaarteveldsterkte" te gebruiken in plaats van de benamingen "versnelling van de vrije val in het luchtledige" en "versnelling van de zwaartekracht". Om dezelfde reden is de benaming "normzwaarteveldsterkte" meer aangewezen dan de benaming "normversnelling".

De grootheid g_n is (evenals het normgewicht G_n) een kunstmatige TS-grootheid, die in het SI geen reden van bestaan heeft.

Door het invoeren van de normzwaarteveldsterkte g_n, kon de TS-eenheid van kracht kgf en de TS-eenheid van massa $\frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}$ nauwkeurig gedefinieerd worden (zie Hoofdstuk XI, onder 2. en onder 4.3.).

Daar $1 \text{ kgf} = 9{,}806\ 65 \text{ N}$

en $1 \frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}} = 9{,}806\ 65 \text{ kg}$

kan de grootheid g_n in het algemeen als volgt weergegeven worden (met als eenheid een eenheid van kracht gedeeld door een eenheid van massa) :

- met behulp van SI-eenheden :

$$g_n = 9{,}806\ 65 \frac{\text{N}}{\text{kg}} \qquad \left(\frac{\text{N}}{\text{kg}} = \frac{\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{\text{kg}} = \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)$$

- met behulp van TS eenheden :

$$g_n = 9{,}806\ 65 \frac{\text{kgf}}{\frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}} \qquad \left(\frac{\text{kgf}}{\frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}} = \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)$$

- met behulp van de SI-eenheid N en de TS-eenheid $\frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}$:

$$g_n = (9{,}806\ 65)^2 \frac{\text{N}}{\frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}} \qquad \left(g_n = 9{,}806\ 65 \frac{\text{kgf}}{\frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}} = 9{,}806\ 65 \cdot \frac{9{,}806\ 65 \text{ N}}{\frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}}\right)$$

- met behulp van de TS-eenheid kgf en de SI-eenheid kg :

$$g_n \quad 1 \frac{\text{kgf}}{\text{kg}} \qquad \left(1 \frac{\text{kgf}}{\text{kg}} = \frac{9{,}806\ 65 \text{ N}}{\text{kg}} = 9{,}806\ 65 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)$$

Uit de laatste uitdrukking volgt :

$$\text{kgf} = \text{kg} \cdot g_n$$

1.1.3. Gebruikelijke en niet gebruikelijke grootheden en symbolen inzake normgewicht en massa in het TS en in het SI, en hun respektieve eenheden

Zowel de grootheid massa als de grootheid normgewicht kunnen worden uitgedrukt in TS-eenheden en in SI-eenheden.

In het TS is het niet gebruikelijk, voor de massa een eigen symbool aan te wenden. In het TS wordt de massa voorgesteld door $\frac{G_n}{g_n}$.

Hierna wordt de grootheid massa bij het gebruik van TS-eenheden toch voorgesteld door een eigen symbool dat echter tussen enkele ronde haakjes wordt geplaatst om aan te duiden dat het gaat om een in het TS niet gebruikelijk symbool : (m).

Het normgewicht is een kunstmatige grootheid, die van belang is in het TS, doch zonder nut en totaal overbodig in het SI. Daarom wordt hierna het symbool van de grootheid normgewicht, als het bedoeld wordt als SI-symbool, voorgesteld tussen dubbele ronde haakjes : $((G_n))$.

Gebruik makend van koherente, van de grondeenheden afgeleide eenheden, worden de betrokken grootheden uitgedrukt in volgende eenheden :

TS		SI	
grootheid	eenheid	grootheid	eenheid
G_n	kgf	$((G_n))$	N
(m)	$\frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}$	m	kg

1.1.4. Verband tussen massa en normgewicht

Het verband tussen massa en normgewicht wordt gegeven door :

$$\frac{\text{normgewicht}}{\text{massa}} = g_n = \frac{G_n}{m} = \frac{G_n}{(m)} = \frac{((G_n))}{m} = \frac{((G_n))}{(m)}$$

Het symbool G_n en de erdoor voorgestelde grootheid komt normaal alleen voor in het TS en niet in het SI.

Het symbool m vóór massa komt normaal alleen voor in het SI, en niet in het TS.

De uitdrukkingen waarbij symbolen tussen enkele of dubbele ronde haakjes voorkomen, zijn enkel van teoretisch belang.

Geen gebruik makend van de uitdrukkingen waarin symbolen tussen enkele of dubbele ronde haakjes voorkomen, behoudt men :

$$\frac{G_n}{m} = g_n \quad \text{of} \quad m = \frac{G_n}{g_n} \quad \text{of} \quad G_n = m \cdot g_n$$

Het feit dat in het TS de eenheid van kracht kgf gelijk is aan het normgewicht van het standaardkilogram (zijnde de belichaming van de SI-eenheid van massa), heeft tot gevolg dat de getalwaarde van het normgewicht G_n, uitgedrukt in kgf, gelijk is aan de getalwaarde van de massa m, uitgedrukt in kg :

$$\left\{m\right\}_{kg} = \left\{G_n\right\}_{kgf}$$

Bij de overgang van het TS naar het SI, kan bij de bepaling van de waarde van m vertrekkend van de waarde van G_n, de grootheid g_n in de uitdrukking $m = \frac{G_n}{g_n}$ rechtstreeks weggedeeld worden met de g_n die te voorschijn komt wanneer de eenheid van normgewicht kgf vervangen wordt door kg . g_n (dit mag geen toegelaten is vermits kgf = kg . g_n, zie onderhavig hoofdstuk onder 1.1.2.). Dit zal duidelijk blijken aan de hand van een voorbeeld. Hierna zal m en (m) berekend worden, gegeven zijnde dat G_n = 20 000 kgf

hetzij $((G_n))$ = 196 133 N

Men bekomt :

$$m = \frac{G_n}{g_n} = \frac{20\ 000\ \text{kgf}}{g_n} = \frac{20\ 000\ \text{kg} \cdot g_n}{g_n} = 20\ 000\ \text{kg}$$

$$m = \frac{((G_n))}{g_n} = \frac{196\ 133\ \text{N}}{9{,}806\ 65\ \frac{\text{N}}{\text{kg}}} = 20\ 000\ \text{kg}$$

$$(m) = \frac{G_n}{g_n} = \frac{20\ 000\ \text{kgf}}{9,806\ 65\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 2039,432\ 426\ \frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}$$

$$(m) = \frac{((G_n))}{g_n} = \frac{196\ 133\ \text{N}}{(9,806\ 65)^2 \frac{\text{N}}{\frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}}} = 2039,432\ 426\ \frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}$$

(voor de waarde van g_n, zie onderhavig hoofdstuk onder 1.1.2.).

Alleen bij de uitwerking $m = \frac{G_n}{g_n}$ (de enige van de vier uitdrukkingen waarbij er geen ronde haakjes aan te pas komen), dient g_n niet gescheiden te worden in een getalwaarde en een eenheid, vermits de betrokken g_n onmiddellijk kan weggedeeld worden met de g_n die te voorschijn komt wanneer de eenheid van normgewicht kgf vervangen wordt door kg . g_n :

$$m = \frac{G_n}{g_n} = \frac{20\ 000\ \text{kgf}}{g_n} = 20\ 000\ \frac{\text{kg} \cdot g_n}{g_n} = 20\ 000\ \text{kg}$$

Bij de uitwerking van de drie overige uitdrukkingen, namelijk :

$$m = \frac{((G_n))}{g_n} \qquad (m) = \frac{G_n}{g_n} \qquad (m) = \frac{((G_n))}{g_n}$$

wordt g_n wel gescheiden in een getalwaarde en een eenheid; de getalwaarde wordt verrekend met de overige getallen terwijl de eenheid verwerkt wordt met de overige eenheden. De drie uitdrukkingen waarin ofwel (m) ofwel $((G_n))$ ofwel zowel (m) als $((G_n))$ voorkomen, belangen ons echter minder aan. Immers, in het SI is het normgewicht geen gebruikelijke grootheid en in het TS wordt een hoeveelheid aangeduid niet door zijn massa maar door zijn normgewicht en werd het niet nuttig of noodzakelijk geacht, een afzonderlijk symbool te voorzien voor de massa $\left(\text{die werd voorgesteld door } \frac{G_n}{g_n}\right)$.

Als besluit geldt dus, dat het verband tussen de massa m uit het SI en het normgewicht G_n uit het TS gegeven wordt door :

$$m = \left\{m\right\}_{SI} \cdot \text{kg} = \frac{G_n}{g_n} = \frac{\left\{G_n\right\}_{TS} \cdot \text{kgf}}{g_n} = \frac{\left\{G_n\right\}_{TS} \cdot \text{kg} \cdot g_n}{g_n} = \left\{G_n\right\}_{TS} \cdot \text{kg}$$

$$G_n = \{G_n\}_{TS} \cdot \text{kgf} = m \cdot g_n = \{m\}_{SI} \cdot \text{kg} \cdot g_n = \{m\}_{SI} \cdot \text{kgf}$$

Uit deze uitdrukkingen blijkt ook, dat de getalwaarde van m, uitgedrukt in de SI-eenheid kg, gelijk is aan de getalwaarde van G_n, uitgedrukt in de TS-eenheid kgf :

$$\{m\}_{kg} = \{G_n\}_{kgf}$$

1.2. Grootheden gedefinieerd in het TS met behulp van de grootheid normgewicht en in het SI met behulp van de grootheid massa

1.2.1. Aangewende symbolen

De grootheden die hier worden bedoeld zijn grootheden die, hoewel ze in het SI meestal dezelfde benaming dragen als in het TS, toch op een andere wijze gedefinieerd zijn : in het TS zijn de betrokken grootheden gedefinieerd met behulp van de grootheid normgewicht, en in het SI met behulp van de grootheid massa. De betrokken grootheden hebben in het SI dus niet dezelfde dimensie (zie Hoofdstuk II, onder 10.) als in het TS.

Wanneer voor de betrokken grootheden zowel in het SI als in het TS ook hetzelfde symbool wordt gebruikt, zullen de symbolen van de TS-grootheden hierna voorzien worden van een sterretje ☆.

In het TS werd aan de grootheid massa en aan de grootheden waarbij in de definitievergelijking beroep wordt gedaan op de grootheid massa, geen eigen symbool toegekend. Hierna wordt aan de betrokken grootheden een eigen symbool toegekend, dat echter geplaatst wordt tussen enkele ronde haakjes om aan te duiden dat het gaat om een in het TS niet gebruikelijk symbool.

De symbolen van de in het SI niet gebruikelijke en totaal overbodige grootheden normgewicht en normversnelling, alsook van in het SI niet gebruikelijke en overbodige grootheden waarbij in de definitievergelijking de in het SI niet gebruikelijke grootheid normgewicht voorkomt, worden hierna, als ze bedoeld zijn als SI-symbool, voorgesteld tussen dubbele ronde haakjes.

1.2.2. De grootheden soortelijk (norm)gewicht, soortelijke massa (of volumieke massa of absolute dichtheid of massadichtheid) en soortelijk volume

1.2.2.1. *Gebruikelijke en niet gebruikelijke grootheden en symbolen inzake soortelijk (norm)gewicht, soortelijke massa en soortelijk volume, enerzijds bij het gebruik van het TS en anderzijds bij het gebruik van het SI, en hun respektieve eenheden*

De betrokken gebruikelijke grootheden zijn :

- in het TS :

soortelijk (norm)gewicht γ_n : $\gamma_n = \frac{G_n}{V} = \frac{1}{v^{\star}}$

soortelijk volume $v^{\star}$: $v^{\star} = \frac{V}{G_n} = \frac{1}{\gamma_n}$

- in het SI :

soortelijke massa ρ : $\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{v}$

soortelijk volume v : $v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho}$

De grootheden G_n en m zijn stofeigenschappen, onafhankelijk van de plaatselijke versnelling van de zwaartekracht (plaatselijke zwaarteveldsterkte). De TS-grootheden γ_n en $v^{\star}$ en de SI-grootheden ρ en v zijn echter slechts konstant in de mate dat het volume V (dat afhankelijk is van de temperatuur en de druk) konstant blijft.

De niet gebruikelijke symbolen van TS-grootheden, waarbij in de definitievergelijking beroep gedaan wordt op de grootheid massa (die hier in het TS door het niet gebruikelijk symbool (m) wordt voorgesteld, zie onderhavig hoofdstuk onder 1.1.3.), worden voorgesteld tussen enkele ronde haakjes (zie onderhavig hoofdstuk onder 1.2.1.) :

soortelijke massa (ρ) :

$$(\rho) = \frac{(m)}{V} = \frac{1}{(v)} = \frac{G_n}{\frac{g_n}{V}} = \frac{\gamma_n}{g_n} = \frac{1}{v^{\star} \cdot g_n}$$

soortelijk volume (v) :

$$(v) = \frac{V}{(m)} = \frac{1}{(\rho)} = \frac{V}{\frac{G_n}{g_n}} = \frac{g_n}{\gamma_n} = v^{\star} \cdot g_n$$

De symbolen van in het SI niet gebruikelijke en totaal overbodige grootheden zoals normgewicht en normversnelling, alsook de symbolen van in het SI niet gebruikelijke grootheden waarbij in de definitievergelijking de in het SI niet gebruikelijke grootheid normgewicht voorkomt (die hier in het SI door het niet gebruikelijk symbool $((G_n))$ wordt voorgesteld, zie onderhavig hoofdstuk onder 1.1.3.), worden voorgesteld tussen dubbele ronde haakjes (zie onderhavig hoofdstuk onder 1.2.1.) :

soortelijk (norm)gewicht $((\gamma_n))$:

$$((\gamma_n)) = \frac{((G_n))}{V} = \frac{1}{((v))} = \rho \cdot ((g_n)) = \frac{((g_n))}{v}$$

soortelijk volume $((v))$:

$$((v)) = \frac{V}{((G_n))} = \frac{1}{((\gamma_n))} = \frac{1}{\rho \cdot ((g_n))} = \frac{v}{((g_n))}$$

Al de betrokken aangewende symbolen zijn overzichtelijk weergegeven in tabel XIV.1.

Tabel XIV.1. *Aangewende symbolen inzake normgewicht en massa, soortelijk (norm)gewicht en soortelijke massa en soortelijk volume*

grootheid	symbool	
	TS	SI
normgewicht	G_n	$((G_n))$
soortelijk (norm)gewicht	γ_n	$((\gamma_n))$
soortelijk volume in de zin van $\frac{\text{volume}}{\text{normgewicht}}$	$v^{\star}$	$((v))$
massa	(m)	m
soortelijke massa	(ρ)	ρ
soortelijk volume in de zin van $\frac{\text{volume}}{\text{massa}}$	(v)	v

Op te merken valt, dat de benamingen "normgewicht" en "soortelijk normgewicht" weinig werden gebruikt; men gebruikte kortweg de benamingen "gewicht" en "soortelijk gewicht" en de index n bij de betrokken symbolen werd ook meestal achterwege gelaten (zie Hoofdstuk XI, onder 3.3. en Hoofdstuk XIII, onder 9.).

In tabel XIV.2. treft men de definitievergelijkingen van de betrokken grootheden aan, en de eenheden waarin ze worden uitgedrukt; ook de algemene groothedenvergelijking die het werkelijk gewicht G van een lichaam weergeeft in het TS en in het SI, werd in de tabel opgenomen.

1.2.2.2. *Verband tussen de grootheden soortelijk (norm)gewicht en soortelijke massa, en verband tussen de grootheden soortelijk volume in de zin van* $\frac{\text{normgewicht}}{\text{volume}}$ *en soortelijk volume in de zin van* $\frac{\text{massa}}{\text{volume}}$*, gebruik makend van de verschillende al dan niet gebruikelijke grootheden en symbolen*

De hierboven vernoemde grootheden hebben volgende dimensie :

dimensie van γ_n = dimensie van $((\gamma_n))$ = dimensie van $\frac{\text{kracht}}{\text{volume}}$

dimensie van (ρ) = dimensie van ρ = dimensie van $\frac{\text{massa}}{\text{volume}}$

dimensie van v^* = dimensie van $((v))$ = dimensie van $\frac{\text{volume}}{\text{kracht}}$

dimensie van (v) = dimensie van v = dimensie van $\frac{\text{volume}}{\text{massa}}$

Het verband tussen de betrokken soortelijke grootheden wordt gegeven door :

$$\frac{\text{soortel. (norm)gewicht}}{\text{soortel. massa}} = \frac{\gamma_n}{\rho} = \frac{\gamma_n}{(\rho)} = \frac{((\gamma_n))}{\rho} = \frac{((\gamma_n))}{(\rho)} = g_n$$

$$\frac{\frac{\text{volume}}{\text{massa}}}{\frac{\text{volume}}{\text{normgewicht}}} = \frac{v}{v^*} = \frac{(v)}{v^*} = \frac{v}{((v))} = \frac{(v)}{((v))} = g_n$$

De uiteindelijke bedoeling is, het verband vast te leggen enerzijds tussen ρ en γ_n, en anderzijds tussen v en v^*.

Tabel XIV.2. *Definitievergelijkingen en eenheden van de grootheden soortelijk (norm)gewicht, soortelijke massa en soortelijk volume, in het TS en in het SI*

grootheid	TS			SI	
	symbolen		eenheid	symbolen	eenheid
	korrekte schrijfwijze	gebruikelijke schrijfwijze			
normgewicht	G_n	G	kgf	$((G_n)) = m \cdot ((g_n))$	N
soortelijk (norm)gewicht	$\gamma_n = \frac{G_n}{V} = \frac{1}{v^*}$	$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{1}{v}$	$\frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$	$((\gamma_n)) = \frac{((G_n))}{V} = \frac{1}{((v))} = \rho \cdot ((g_n)) = \frac{((g_n))}{v}$	$\frac{\text{N}}{\text{m}^3}$
soortelijk volume in de zin van $\frac{\text{volume}}{\text{normgewicht}}$	$v^* = \frac{V}{G_n} = \frac{1}{\gamma_n}$	$v = \frac{V}{G} = \frac{1}{\gamma}$	$\frac{\text{m}^3}{\text{kgf}}$	$((v)) = \frac{V}{((G_n))} = \frac{1}{((\gamma_n))} = \frac{1}{\rho \cdot ((g_n))} = \frac{v}{((g_n))}$	$\frac{\text{m}^3}{\text{N}}$
massa	$(m) = \frac{G_n}{g_n}$	$\frac{G}{g}$	$\frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}$	m	kg
soortelijke massa	$(\rho) = \frac{(m)}{V} = \frac{1}{(v)} = \frac{\gamma_n}{g_n} = \frac{1}{v^* \cdot g_n}$	$\frac{\gamma}{g} = \frac{1}{v \cdot g}$	$\frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^4}$	$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{v}$	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
soortelijk volume in de zin van $\frac{\text{volume}}{\text{massa}}$	$(v) = \frac{V}{(m)} = \frac{1}{(\rho)} = \frac{g_n}{\gamma_n} = v^* \cdot g_n$	$\frac{g}{\gamma} = v \cdot g$	$\frac{\text{m}^4}{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}$	$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho}$	$\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$
werkelijk gewicht	$G = \frac{G_n}{g_n} \cdot g = \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot V = \frac{g \cdot V}{g_n \cdot v^*}$	$G = \gamma \cdot V = \frac{V}{v}$	kgf	$G = m \cdot g = \rho \cdot g \cdot V = \frac{g \cdot V}{v}$	N

Geen gebruik makend dus van de symbolen tussen enkele of dubbele ronde haakjes, behoudt men :

$$\frac{\gamma_n}{\rho} = g_n \quad \text{of} \quad \rho = \frac{\gamma_n}{g_n} \quad \text{of} \quad \gamma_n = \rho \cdot g_n$$

$$\frac{v}{v^*} = g_n \quad \text{of} \quad v = v^* \cdot g_n \quad \text{of} \quad v^* = \frac{v}{g_n}$$

De betrokken vergelijkingen zijn uiteraard gesteund op de basisvergelijking $G_n = m \cdot g_n$ (zie onderhavig hoofdstuk onder 1.1.4.), zoals duidelijk blijkt uit volgende voorstellingen :

$$\frac{\gamma_n}{\rho} = \frac{\frac{G_n}{V}}{\frac{m}{V}} = \frac{G_n}{m} = g_n$$

$$\frac{v}{v^*} = \frac{\frac{V}{m}}{\frac{V}{G_n}} = \frac{G_n}{m} = g_n$$

Bij de overgang van het TS naar het SI, kan bij de bepaling van de waarde van ρ en v, vertrekkend respektievelijk van de waarde van γ_n en v^*, de grootheid g_n in de uitdrukkingen $\rho = \frac{\gamma_n}{g_n}$ en $v = v^* \cdot g_n$ rechtstreeks weggedeeld worden met de g_n die te voorschijn komt wanneer de eenheid van normgewicht kgf vervangen wordt door kg . g_n (hetgeen toegelaten is vermits kgf = kg . g_n, zie onderhavig hoofdstuk onder 1.1.2.).

In verband met de getalwaarden van de grootheden G_n, γ_n en v^* (uitgedrukt in koherente van de TS-grondeenheden afgeleide eenheden) en de respektieve getalwaarden van de grootheden m, ρ en v (uitgedrukt in koherente, van de SI-grondeenheden afgeleide eenheden) geldt :

$$\{m\}_{kg} = \{G_n\}_{kgf}$$

$$\{\rho\}_{kg/m^3} = \{\gamma_n\}_{kgf/m^3}$$

$$\{v\}_{m^3/kg} = \{v^*\}_{m^3/kgf}$$

Dit alles zal worden toegelicht aan de hand van een voorbeeld.

Hierna wordt enerzijds γ_n, $v^{\star}$, (m), (ρ), (v) en anderzijds ρ, v, $((G_n))$, $((\gamma_n))$ en $((v))$ berekend, alsook het werkelijk gewicht G voor een plaats respektievelijk aan de evenaar (index 1), op een breedte van 51° (breedtegraad door België, index 2), aan de pool (index 3) en op de maan (index 4), van een lichaam waarvoor geldt :

$$G_n = 20\ 000 \text{ kgf}$$
$$m = 20\ 000 \text{ kg}$$
$$V = 20 \text{ m}^3$$

Vervolgens wordt het verband nagegaan tussen de soortelijke massa en het soortelijk (norm)gewicht en tussen het soortelijk volume in de zin van $\frac{\text{volume}}{\text{massa}}$ en het soortelijk volume in de zin van $\frac{\text{volume}}{\text{normgewicht}}$.

Zowel op de aarde als op de maan als om het even waar, geldt voor het betrokken lichaam :

- uitgedrukt in TS-eenheden :

$$G_n = 20\ 000 \text{ kgf}$$

$$\gamma_n = \frac{G_n}{V} = \frac{20\ 000 \text{ kgf}}{20 \text{ m}^3} = 1000 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$$

$$= \frac{1}{v^{\star}} = \frac{1}{0{,}001 \frac{\text{m}^3}{\text{kgf}}} = 1000 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$$

$$v^{\star} = \frac{V}{G_n} = \frac{20 \text{ m}^3}{20\ 000 \text{ kgf}} = 0{,}001 \frac{\text{m}^3}{\text{kgf}}$$

$$= \frac{1}{\gamma_n} = \frac{1}{1000 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}} = 0{,}001 \frac{\text{m}^3}{\text{kgf}}$$

$$(m) = \frac{G_n}{g_n} = \frac{20\ 000 \text{ kgf}}{9{,}806\ 65 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 2039{,}432\ 426 \frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}$$

$$(\rho) = \frac{(m)}{V} = \frac{2039{,}432\ 426 \frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}}{20 \text{ m}^3} = 101{,}971\ 621\ 3 \frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^4}$$

$$= \frac{1}{(v)} = \frac{1}{0{,}009\ 806\ 65 \frac{\text{m}^4}{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}} = 101{,}971\ 621\ 3 \frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^4}$$

$$= \frac{\gamma_n}{g_n} = \frac{1000 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}}{9{,}806\ 65 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 101{,}971\ 621\ 3 \frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^4}$$

$$= \frac{1}{v^{\star} \cdot g_n} = \frac{1}{0{,}001\ \frac{m^3}{kgf} \cdot 9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2}} = 101{,}971\ 621\ 3\ \frac{kgf \cdot s^2}{m^4}$$

$$(v) = \frac{V}{(m)} = \frac{20\ m^3}{2039{,}432\ 426\ \frac{kgf \cdot s^2}{m}} = 0{,}009\ 806\ 65\ \frac{m^4}{kgf \cdot s^2}$$

$$= \frac{1}{(\rho)} = \frac{1}{101{,}971\ 621\ 3\ \frac{kgf \cdot s^2}{m^4}} = 0{,}009\ 806\ 65\ \frac{m^4}{kgf \cdot s^2}$$

$$= \frac{g_n}{\gamma_n} = \frac{9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2}}{1000\ \frac{kgf}{m^3}} = 0{,}009\ 806\ 65\ \frac{m^4}{kgf \cdot s^2}$$

$$= v^{\star} \cdot g_n = 0{,}001\ \frac{m^3}{kgf} \cdot 9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2} = 0{,}009\ 806\ 65\ \frac{m^4}{kgf \cdot s^2}$$

- uitgedrukt in SI-eenheden :

$$m = 20\ 000\ kg$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{20\ 000\ kg}{20\ m^3} = 1000\ \frac{kg}{m^3}$$

$$= \frac{1}{v} = \frac{1}{0{,}001\ \frac{m^3}{kg}} = 1000\ \frac{kg}{m^3}$$

$$v = \frac{V}{m} = \frac{20\ m^3}{20\ 000\ kg} = 0{,}001\ \frac{m^3}{kg}$$

$$= \frac{1}{\rho} = \frac{1}{1000\ \frac{kg}{m^3}} = 0{,}001\ \frac{m^3}{kg}$$

$$((G_n)) = m \cdot ((g_n)) = 20\ 000\ kg \cdot 9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2} = 196\ 133\ N$$

$$((\gamma_n)) = \frac{((G_n))}{V} = \frac{196\ 133\ N}{20\ m^3} = 9806{,}65\ \frac{N}{m^3}$$

$$= \frac{1}{((v))} = \frac{1}{0{,}000\ 101\ 971\ 621\ 3\ \frac{m^3}{N}} = 9806{,}65\ \frac{N}{m^3}$$

$$= \rho \cdot ((g_n)) = 1000\ \frac{kg}{m^3} \cdot 9{,}806\ 65\ \frac{N}{kg} = 9806{,}65\ \frac{N}{m^3}$$

$$= \frac{((g_n))}{v} = \frac{9{,}806\ 65\ \frac{N}{kg}}{0{,}001\ \frac{m^3}{kg}} = 9806{,}65\ \frac{N}{m^3}$$

$$((v)) = \frac{V}{((G_n))} = \frac{20\ m^3}{196\ 133\ N} = 0{,}000\ 101\ 971\ 621\ 3\ \frac{m^3}{N}$$

$$= \frac{1}{((\gamma_n))} = \frac{1}{9806{,}65\ \frac{N}{m^3}} = 0{,}000\ 101\ 971\ 621\ 3\ \frac{m^3}{N}$$

$$= \frac{1}{\rho \cdot (\!(g_n)\!)} = \frac{1}{1000\ \frac{kg}{m^3} \cdot 9{,}806\ 65\ \frac{N}{kg}} = 0{,}000\ 101\ 971\ 621\ 3\ \frac{m^3}{N}$$

$$= \frac{v}{(\!(g_n)\!)} = \frac{0{,}001\ \frac{m^3}{kg}}{9{,}806\ 65\ \frac{N}{kg}} = 0{,}000\ 101\ 971\ 621\ 3\ \frac{m^3}{kg}$$

De waarde van het werkelijk gewicht G is afhankelijk van de plaatselijke versnelling van de zwaartekracht (plaatselijke zwaarteveldsterkte). De betrokken versnellingen van de zwaartekracht zijn (zie Hoofdstuk XIII, onder 2.2.) :

$g_1 = 9{,}780\ 318\ \frac{m}{s^2}$ (evenaar)

$g_2 = 9{,}811\ 583\ \frac{m}{s^2}$ (breedte van 51°)

$g_3 = 9{,}832\ 177\ \frac{m}{s^2}$ (polen)

$g_4 = 1{,}62\ \frac{m}{s^2}$ (maan)

Men bekomt als waarde van het werkelijk gewicht G

- in het TS :

$$G_1 = \frac{G_n}{g_n} \cdot g_1 = \frac{20\ 000\ kgf}{9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2}} \cdot 9{,}780\ 318\ \frac{m}{s^2} = 19\ 946{,}237\ 67\ kgf$$

$$G_2 = \frac{G_n}{g_n} \cdot g_2 = \frac{20\ 000\ kgf}{9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2}} \cdot 9{,}811\ 583\ \frac{m}{s^2} = 20\ 010{,}060\ 52\ kgf$$

$$G_3 = \frac{G_n}{g_n} \cdot g_3 = \frac{20\ 000\ kgf}{9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2}} \cdot 9{,}832\ 177\ \frac{m}{s^2} = 20\ 052{,}060\ 59\ kgf$$

$$G_4 = \frac{G_n}{g_n} \cdot g_4 = \frac{20\ 000\ kgf}{9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2}} \cdot 1{,}62\ \frac{m}{s^2} = 3303{,}880\ 530\ kgf$$

- in het SI :

$$G_1 = m \cdot g_1 = 20\ 000\ kg \cdot 9{,}780\ 318\ \frac{m}{s^2} = 195\ 606{,}36\ N$$

$$G_2 = m \cdot g_2 = 20\ 000\ kg \cdot 9{,}811\ 583\ \frac{m}{s^2} = 196\ 231{,}66\ N$$

$$G_3 = m \cdot g_3 = 20\ 000\ kg \cdot 9{,}832\ 177\ \frac{m}{s^2} = 196\ 643{,}54\ N$$

$$G_4 = m \cdot g_4 = 20\ 000\ kg \cdot 1{,}62\ \frac{m}{s^2} = 32\ 400\ N$$

Het resultaat van bovenstaande berekeningen is overzichtelijk weergegeven in tabel XIV.3.

Wat betreft het verband tussen soortelijke massa en soortelijk (norm)gewicht geldt :

$$\rho = \frac{\gamma_n}{g_n} = \frac{1000\ \frac{kgf}{m^3}}{g_n} = \frac{1000\ \frac{kg\ .\ g_n}{m^3}}{g_n} = 1000\ \frac{kg}{m^3}$$

$$\rho = \frac{((\gamma_n))}{g_n} = \frac{9806{,}65\ \frac{N}{m^3}}{9{,}806\ 65\ \frac{N}{kg}} = 1000\ \frac{kg}{m^3}$$

$$(\rho) = \frac{\gamma_n}{g_n} = \frac{1000\ \frac{kgf}{m^3}}{9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2}} = 101{,}971\ 621\ 3\ \frac{kgf\ .\ s^2}{m^4}$$

$$(\rho) = \frac{((\gamma_n))}{g_n} = \frac{9806{,}65\ \frac{N}{m^3}}{(9{,}806\ 65)^2\ \frac{N}{\frac{kgf\ .\ s^2}{m}}} = 101{,}971\ 621\ 3\ \frac{kgf\ .\ s^2}{m^4}$$

(voor de waarde van g_n, zie onderhavig hoofdstuk onder 1.1.2.)

Alleen bij de uitwerking van $\rho = \frac{\gamma_n}{g_n}$ (de enige van de vier uitdrukkingen waarbij er geen ronde haakjes aan te pas komen), dient g_n niet gescheiden te worden in een getalwaarde en een eenheid, vermits de betrokken g_n onmiddellijk kan weggedeeld worden met de g_n die te voorschijn komt wanneer de eenheid van normgewicht kgf vervangen wordt door kg . g_n (hetgeen toegelaten is vermits kgf = kg . g_n, zie onderhavig hoofdstuk onder 1.1.2.) :

$$\rho = \frac{\gamma_n}{g_n} = \frac{1000\ \frac{kgf}{m^3}}{g_n} = \frac{1000\ \frac{kg\ .\ g_n}{m^3}}{g_n} = 1000\ \frac{kg}{m^3}$$

Bij de uitwerking van de drie overige uitdrukkingen, namelijk :

$$\rho = \frac{((\gamma_n))}{g_n} \qquad (\rho) = \frac{\gamma_n}{g_n} \qquad (\rho) = \frac{((\gamma_n))}{g_n}$$

wordt g_n wel gescheiden in een getalwaarde en een eenheid; de getalwaarde wordt verrekend met de overige getallen terwijl de eenheid verwerkt wordt met de overige eenheden. De drie uitdrukkingen waarin ofwel (ρ) ofwel

Tabel XIV.3. Samenvatting van de berekeningsresultaten (voorbeeld)

grootheid	TS		SI	
	symbool	waarde	symbool	waarde
volume	V	20 m^3	V	20 m^3
normgewicht	G_n	20 000 kgf	$\{\{G_n\}\}$	196 133 N
soortelijk (norm)gewicht	γ_n	1000 $\frac{kgf}{m^3}$	$\{\{\gamma_n\}\}$	9806,65 $\frac{N}{m^3}$
soortelijk volume in de zin van $\frac{\text{volume}}{\text{normgewicht}}$	v^*	0,001 $\frac{m^3}{kgf}$	$\{\{v\}\}$	0,000 101 971 621 3 $\frac{m^3}{N}$
massa	$\{m\} = \frac{G_n}{g_n}$	2039,432 426 $\frac{kgf \cdot s^2}{m}$	m	20 000 kg
soortelijke massa	$\{\rho\} = \frac{\gamma_n}{g_n}$	101,971 621 3 $\frac{\frac{kgf \cdot s^2}{m}}{m^3}$	ρ	1000 $\frac{kg}{m^3}$
soortelijk volume in de zin van $\frac{\text{volume}}{\text{massa}}$	$\{v\} = v^* \cdot g_n$	0,009 806 65 $\frac{m^3}{\frac{kgf \cdot s^2}{m}}$	v	0,001 $\frac{m^3}{kg}$
werkelijk gewicht				
- aan de evenaar (0°)	$G_1 = \frac{G_n}{g_n} \cdot g_1$	19 946,297 67 kgf	$G_1 = m \cdot g_1$	195 606,36 N
- op een breedte van 51°	$G_2 = \frac{G_n}{g_n} \cdot g_2$	20 010,060 52 kgf	$G_2 = m \cdot g_2$	196 231,66 N
- aan de polen (90°)	$G_3 = \frac{G_n}{g_n} \cdot g_3$	20 052,060 59 kgf	$G_3 = m \cdot g_3$	196 643,54 N
- op de maan	$G_4 = \frac{G_n}{g_n} \cdot g_4$	3303,660 53 kgf	$G_4 = m \cdot g_4$	32 400,00 N

$((\gamma_n))$ ofwel zowel (ρ) als $((\gamma_n))$ voorkomen, belangen ons echter minder aan. Immers, in het SI is soortelijk (norm)gewicht een nutteloze en overbodige grootheid, en in het TS werd het niet nuttig of noodzakelijk geacht, een afzonderlijk symbool te voorzien voor soortelijke massa (die in het TS werd voorgesteld door $\frac{\gamma_n}{g_n}$ of $\frac{1}{v^{\star} \cdot g_n}$, zoals weergegeven in tabel XIV.2.).

Wat betreft het verband tussen het soortelijk volume in de zin van $\frac{\text{volume}}{\text{massa}}$ en het soortelijk volume in de zin van $\frac{\text{volume}}{\text{normgewicht}}$ geldt :

$$v = v^{\star} \cdot g_n = 0{,}001 \frac{m^3}{kgf} \cdot g_n = 0{,}001 \frac{m^3}{kg \cdot g_n} \cdot g_n = 0{,}001 \frac{m^3}{kg}$$

$$v = ((v)) \cdot g_n = 0{,}000\,101\,971\,621\,3 \frac{m^3}{N} \cdot g_n$$

$$= 0{,}000\,101\,971\,621\,3 \frac{m^3}{N} \cdot 9{,}806\,65 \frac{N}{kg}$$

$$= 0{,}001 \frac{m^3}{kg}$$

$$(v) = v^{\star} \cdot g_n = 0{,}001 \frac{m^3}{kgf} \cdot g_n = 0{,}001 \frac{m^3}{kgf} \cdot 9{,}806\,65 \frac{m}{s^2}$$

$$= 0{,}009\,806\,65 \frac{m^4}{kgf \cdot s^2}$$

$$(v) = ((v)) \cdot g_n = 0{,}000\,101\,971\,621\,3 \frac{m^3}{N} \cdot (9{,}806\,65)^2 \frac{N}{\frac{kgf \cdot s^2}{m}}$$

$$= 0{,}009\,806\,65 \frac{m^4}{kgf \cdot s^2}$$

(voor de waarde van g_n, zie onderhavig hoofdstuk onder 1.1.2.).

Alleen bij de uitwerking van $v = v^{\star} \cdot g_n$ (de enige van de vier uitdrukkingen waarbij er geen ronde haakjes aan te pas komen), dient g_n niet gescheiden te worden in een getalwaarde en een eenheid, vermits de betrokken g_n onmiddellijk kan weggedeeld worden met de g_n die te voorschijn komt wanneer de eenheid van normgewicht kgf vervangen wordt door kg . g_n (hetgeen toegelaten is vermits kgf = kg . g_n, zie onderhavig hoofdstuk onder 1.1.2.) :

$$v = v^{\star} \cdot g_n = 0{,}001 \frac{m^3}{kgf} \cdot g_n = 0{,}001 \frac{m^3}{kg \cdot g_n} \cdot g_n = 0{,}001 \frac{m^3}{kg}$$

Bij de uitwerking van de drie overige uitdrukkingen, namelijk :

$v = \{(v)\} \cdot g_n$ $\quad$ $(v) = v^{\star} \cdot g_n$ $\quad$ $(v) = \{(v)\} \cdot g_n$

wordt g_n wel gescheiden in een getalwaarde en een eenheid; de getalwaarde wordt verrekend met de overige getallen terwijl de eenheid verwerkt wordt met de overige eenheden. De drie uitdrukkingen waarin ofwel (v) ofwel $\{(v)\}$ ofwel zowel (v) als $\{(v)\}$ voorkomen, belangen ons echter minder aan. Immers, in het SI is soortelijk volume in de zin van $\frac{\text{volume}}{\text{normgewicht}}$ een nutteloze en overbodige grootheid, en in het TS werd het niet nuttig of noodzakelijk geacht, een afzonderlijk symbool te voorzien voor soortelijk volume in de zin van $\frac{\text{volume}}{\text{massa}}$ (dat in het TS werd voorgesteld door $\frac{g_n}{\gamma_n}$ of $v^{\star} \cdot g_n$, zoals weergegeven in tabel XIV.2.).

1.2.3. Andere soortelijke grootheden

1.2.3.1. *Definitievergelijking van de betrokken grootheden*

De hier bedoelde soortelijke grootheden zijn grootheden (andere dan de hierboven afzonderlijk behandelde grootheden soortelijk (norm)gewicht, soortelijke massa en soortelijk volume) die gedefinieerd worden in het TS met behulp van de grootheid normgewicht en in het SI met behulp van de grootheid massa.

De betrokken grootheden kunnen in twee groepen ingedeeld worden :

a. soortelijke grootheden waarbij in de definitievergelijking de grootheid normgewicht (TS) of massa (SI) voorkomt in de teller; deze definitievergelijkingen kunnen herleid worden tot de vorm :

in het TS : $\quad x^{\star} = \frac{G_n}{X}$

in het SI : $\quad x = \frac{m}{X}$

b. soortelijke grootheden waarbij in de definitievergelijking de grootheid normgewicht (TS) of massa (SI) voorkomt in de noemer; deze definitievergelijkingen kunnen herleid worden tot de vorm :

in het TS : $\quad y^{\star} = \frac{Y}{G_n}$

in het SI : $\quad y = \frac{Y}{m}$

In bovenstaande uitdrukkingen stellen de TS-grootheden $x^{\star}$ en $y^{\star}$ en de SI-grootheden x en y soortelijke grootheden voor, terwijl X en Y een grootheid of een produkt van grootheden voorstellen (waarin uiteraard noch de grootheid normgewicht noch de grootheid massa voorkomen).

Wat betreft de in het TS niet gebruikelijke symbolen (x) en (y) en de in het SI niet gebruikelijke en overbodige grootheden $((x))$ en $((y))$ geldt (voor de betekenis van de enkele en dubbele ronde haakjes wordt verwezen naar onderhavig hoofdstuk onder 1.2.1.) :

$$(x) = \frac{(m)}{X} \qquad (y) = \frac{Y}{(m)}$$

$$((x)) = \frac{((G_n))}{X} \qquad ((y)) = \frac{Y}{((G_n))}$$

1.2.3.2. *Verband tussen soortelijke grootheden met een verschillende dimensie, veroorzaakt door het gebruik van de grootheid normgewicht in het TS en van de grootheid massa in het SI*

Wat betreft het verband tussen de betrokken soortelijke grootheden, geldt in het algemeen (voor de betekenis van de enkele en dubbele ronde haakjes wordt verwezen naar onderhavig hoofdstuk onder 1.2.1.) :

$$\frac{x^{\star}}{x} = \frac{x^{\star}}{(x)} = \frac{((x))}{x} = \frac{((x))}{(x)} = g_n$$

$$\frac{y}{y^{\star}} = \frac{(y)}{y^{\star}} = \frac{y}{((y))} = \frac{(y)}{((y))} = g_n$$

De uitdrukkingen waarin (x), (y), $((x))$ en $((y))$ voorkomen belangen ons minder aan, en zullen daarom verder niet meer behandeld worden.

De uiteindelijke bedoeling is, het verband vast te leggen enerzijds tussen x en $x^{\star}$, en anderzijds tussen y en $y^{\star}$. Geen gebruik makend van de symbolen tussen enkele of dubbele ronde haakjes, behoudt men :

$$\frac{x^{\star}}{x} = g_n \quad \text{of} \quad x = \frac{x^{\star}}{g_n} \quad \text{of} \quad x^{\star} = x \cdot g_n$$

$$\frac{y}{y^{\star}} = g_n \quad \text{of} \quad y = y^{\star} \cdot g_n \quad \text{of} \quad y^{\star} = \frac{y}{g_n}$$

De betrokken vergelijkingen zijn uiteraard gesteund op de basisvergelijking $G_n = m \cdot g_n$ (zie onderhavig hoofdstuk onder 1.1.4.), zoals duidelijk blijkt uit volgende voorstellingen :

$$\frac{x^{\star}}{x} = \frac{\frac{G_n}{X}}{\frac{m}{X}} = \frac{G_n}{m} = g_n$$

$$\frac{y}{y^{\star}} = \frac{\frac{Y}{m}}{\frac{Y}{G_n}} = \frac{G_n}{m} = g_n$$

Bij de overgang van het TS naar het SI, kan bij de bepaling van de waarde van de grootheden x en y, vertrekkend respektievelijk van de waarde van de grootheden $x^{\star}$ en $y^{\star}$, de grootheid g_n in de uitdrukkingen $x = \frac{x^{\star}}{g_n}$ en $y = y^{\star} \cdot g_n$ rechtstreeks weggedeeld worden met de g_n die te voorschijn komt wanneer de eenheid van normgewicht kgf vervangen wordt door kg . g_n (hetgeen toegelaten is vermits kgf = kg . g_n, zie onderhavig hoofdstuk onder 1.1.2.).

In verband met de getalwaarden enerzijds van de grootheden x en $x^{\star}$ en anderzijds van de grootheden y en $y^{\star}$, geldt het volgende : de getalwaarde van respektievelijk x en y is gelijk aan de getalwaarde van respektievelijk $x^{\star}$ en $y^{\star}$, alleen wanneer al de grootheden die naast de grootheid m voorkomen in de definitievergelijking van respektievelijk x en y en al de grootheden die naast de grootheid G_n voorkomen in de definitievergelijking van respektievelijk $x^{\star}$ en $y^{\star}$, uitgedrukt worden in dezelfde eenheden (en op voorwaarde uiteraard dat kg wordt aangewend als eenheid van massa in het SI en kgf als eenheid van normgewicht in het TS).

1.2.3.3. *Toepassingen*

1.2.3.3.1. *Soortelijke grootheden van de vorm* $x^{\star} = \frac{G_n}{X}$ *in het TS en* $x = \frac{m}{X}$ *in het SI*

Een voorbeeld van een dergelijke grootheid is molair (norm)gewicht $M^{\star}$ in het TS, en molaire massa M in het SI :

$$M^{*} = \frac{G_n}{n} \qquad \text{(TS)}$$

$$M = \frac{m}{n} \qquad \text{(SI)}$$

met n = hoeveelheid stof

Het verband tussen M en M^{*} wordt gegeven door :

$$\frac{M^{*}}{M} = g_n \qquad M = \frac{M^{*}}{g_n} \qquad M^{*} = M \cdot g_n$$

Bij de overgang van het TS naar het SI, kan bij de bepaling van de waarde van M, vertrekkend van de waarde van M^{*}, de grootheid g_n in de uitdrukking $M = \frac{M^{*}}{g_n}$ rechtstreeks weggedeeld worden met de g_n die te voorschijn komt wanneer de eenheid van normgewicht kgf vervangen wordt door kg . g_n (hetgeen toegelaten is vermits kgf = kg . g_n, zie onderhavig hoofdstuk onder 1.1.2.).

Wanneer de massa m en het normgewicht G_n worden uitgedrukt respektievelijk in kg en kgf, en de hoeveelheid stof n in mol, zijn de getalwaarden van M en M^{*} gelijk :

$$\{M\}_{kg/mol} = \{M^{*}\}_{kgf/mol}$$

Vertrekkend bijvoorbeeld van het molair (norm)gewicht van lucht $M^{*} = \frac{28,95}{1000}$ kgf/mol, bekomt men :

$$\text{molaire massa } M = \frac{M^{*}}{g_n} = \frac{28,95}{1000} \frac{\text{kgf}}{g_n \cdot \text{mol}} = \frac{28,95}{1000} \frac{\text{kg} \cdot g_n}{g_n \cdot \text{mol}} = \frac{28,95}{1000} \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$$

$$= 28,95 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

$$= 28,95 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

Een ander voorbeeld van een grootheid van deze soort werd reeds hoger behandeld in onderhavig hoofdstuk onder 1.2.2., namelijk :

$$\gamma_n = \frac{G_n}{V} = \text{soortelijk (norm)gewicht}$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \text{soortelijke massa}$$

Hier valt op te merken niet enkel, dat de grootheden $\frac{G_n}{V}$ en $\frac{m}{V}$ verschillen van benaming, maar ook dat ze voorgesteld worden door een verschillend symbool, namelijk γ_n en ρ.

1.2.3.3.2. *Soortelijke grootheden van de vorm* $y^{\star} = \frac{Y}{G_n}$ *in het TS en* $y = \frac{Y}{m}$ *in het SI*

Een grootheid van deze soort werd reeds hoger behandeld in onderhavig hoofdstuk onder 1.2.2., namelijk :

$v^{\star} = \frac{V}{G_n}$ = soortelijk volume in de zin van $\frac{\text{volume}}{\text{normgewicht}}$

$v = \frac{V}{m}$ = soortelijk volume in de zin van $\frac{\text{volume}}{\text{massa}}$

Andere voorbeelden van dergelijke grootheden zijn :

- soortelijke warmtekapaciteit :

$$c^{\star} = \frac{dQ}{G_n \cdot dT} = \frac{C}{G_n} \qquad \text{(TS)}$$

$$c = \frac{dQ}{m \cdot dT} = \frac{C}{m} \qquad \text{(SI)}$$

- soortelijke inwendige energie :

$$u^{\star} = \frac{U}{G_n} \qquad \text{(TS)}$$

$$u = \frac{U}{m} \qquad \text{(SI)}$$

- soortelijke entalpie :

$$h^{\star} = \frac{H}{G_n} \qquad \text{(TS)}$$

$$h = \frac{H}{m} \qquad \text{(SI)}$$

- soortelijke entropie :

$$s^{\star} = \frac{S}{G_n} \qquad \text{(TS)}$$

$$s = \frac{S}{m} \qquad \text{(SI)}$$

- soortelijke stookwaarde :

$$Hu^{\star} = \frac{Q}{G_n} \qquad \text{(TS)}$$

$$Hu = \frac{Q}{m} \qquad \text{(SI)}$$

- specifieke gaskonstante :

$$R^{\star} = \frac{p \cdot v^{\star}}{T} = \frac{p \cdot V}{G_n \cdot T} = \frac{n \cdot \mathcal{R}}{G_n} \qquad \text{(TS)}$$

$$R = \frac{p \cdot v}{T} = \frac{p \cdot V}{m \cdot T} = \frac{n \cdot \mathcal{R}}{m} \qquad \text{(SI)}$$

Het verband tussen deze grootheden wordt gegeven door :

$$\frac{c}{c^{\star}} = g_n \qquad c = c^{\star} \cdot g_n \qquad c^{\star} = \frac{c}{g_n}$$

$$\frac{u}{u^{\star}} = g_n \qquad u = u^{\star} \cdot g_n \qquad u^{\star} = \frac{u}{g_n}$$

$$\frac{h}{h^{\star}} = g_n \qquad h = h^{\star} \cdot g_n \qquad h^{\star} = \frac{h}{g_n}$$

$$\frac{s}{s^{\star}} = g_n \qquad s = s^{\star} \cdot g_n \qquad s^{\star} = \frac{s}{g_n}$$

$$\frac{Hu}{Hu^{\star}} = g_n \qquad Hu = Hu^{\star} \cdot g_n \qquad Hu^{\star} = \frac{Hu}{g_n}$$

$$\frac{R}{R^{\star}} = g_n \qquad R = R^{\star} \cdot g_n \qquad R^{\star} = \frac{R}{g_n}$$

Bij de overgang van het TS naar het SI, kan bij de bepaling van de waarde van de grootheden c, u, h, s, Hu en R, vertrekkend respektievelijk van de waarde van de grootheden $c^{\star}$, $u^{\star}$, $h^{\star}$, $s^{\star}$, $Hu^{\star}$ en $R^{\star}$, de grootheid g_n in de uitdrukkingen $c^{\star} \cdot g_n$, $u^{\star} \cdot g_n$, $h^{\star} \cdot g_n$, $s^{\star} \cdot g_n$, $Hu^{\star} \cdot g_n$ en $R^{\star} \cdot g_n$, rechtstreeks weggedeeld worden met de g_n die te voorschijn komt wanneer de eenheid van normgewicht kgf vervangen wordt door kg . g_n (hetgeen toegelaten is vermits kgf = kg . g_n, zie onderhavig hoofdstuk onder 1.1.2.).

De getalwaarden van de grootheden c, u, h, s, Hu en R zullen hier niet gelijk zijn aan de getalwaarden van respektievelijk $c^{\star}$, $u^{\star}$, $h^{\star}$, $s^{\star}$, $Hu^{\star}$ en $R^{\star}$, omdat in het SI als eenheid van warmte en als eenheid van arbeid de eenheid joule wordt aangewend en in het TS hiervoor andere

eenheden worden gebruikt, namelijk kcal als eenheid van warmte en kgf . m als eenheid van arbeid.

Tussen de betrokken eenheden geldt volgend verband :

$$1 \text{ kcal} = 4186{,}8 \text{ J}$$
$$1 \text{ kgf . m} = 9{,}806\ 65 \text{ J}$$

Derhalve bekomt men :

$$\{c\}_{\frac{J}{kg \cdot K}} = 4186{,}8 \{c^{\star}\}_{\frac{kcal}{kgf \cdot {}^{\circ}C}}$$
$$\{u\}_{\frac{J}{kg}} = 4186{,}8 \{u^{\star}\}_{\frac{kcal}{kgf}}$$
$$\{h\}_{\frac{J}{kg}} = 4186{,}8 \{h^{\star}\}_{\frac{kcal}{kgf}}$$
$$\{s\}_{\frac{J}{kg \cdot K}} = 4186{,}8 \{s^{\star}\}_{\frac{kcal}{kgf \cdot {}^{\circ}K}}$$
$$\{Hu\}_{\frac{J}{kg}} = 4186{,}8 \{Hu^{\star}\}_{\frac{kcal}{kgf}}$$
$$\{R\}_{\frac{J}{kg \cdot K}} = 9{,}806\ 65 \{R^{\star}\}_{\frac{kgf \cdot m}{kgf \cdot {}^{\circ}K}}$$

Voorbeeld 1

Met $c_p^{\star} = 0{,}24 \frac{kcal}{kgf \cdot {}^{\circ}C}$ (soortelijke warmtekapaciteit van lucht onder konstante druk) bekomt men :

$$c_p = c_p^{\star} \cdot g_n = 0{,}24 \frac{kcal \cdot g_n}{kgf \cdot K}$$
$$= 0{,}24 \frac{kcal \cdot g_n}{kg \cdot g_n \cdot K}$$
$$= 0{,}24 \frac{kcal}{kg \cdot K}$$
$$= 0{,}24 \cdot \frac{4186{,}8 \text{ J}}{kg \cdot K}$$
$$= 0{,}24 \times 4186{,}8 \frac{J}{kg \cdot K}$$
$$= 1004{,}832 \frac{J}{kg \cdot K}$$

Voorbeeld 2

Met $R^* = 29{,}286\ 15\ \frac{kgf\ .\ m}{kgf\ .\ °K}$ (specifieke gaskonstante van lucht) bekomt men :

$$R = R^* \cdot g_n = 29{,}286\ 15\ \frac{kgf\ .\ m\ .\ g_n}{kgf\ .\ K}$$

$$= 29{,}286\ 15\ \frac{kgf\ .\ m\ .\ g_n}{kg\ .\ g_n\ .\ K}$$

$$= 29{,}286\ 15\ \frac{kgf\ .\ m}{kg\ .\ K}$$

$$= 29{,}286\ 15\ .\ \frac{9{,}806\ 65\ J}{kg\ .\ K}$$

$$= 29{,}286\ 15 \times 9{,}806\ 65\ \frac{J}{kg\ .\ K}$$

$$= 287{,}199\ \frac{J}{kg\ .\ K}$$

Uit dit voorbeeld blijkt ook dat het wenselijk is, in het TS als eenheid van R^* de eenheid $\frac{kgf\ .\ m}{kgf\ .\ °K}$ te behouden en deze niet te herleiden tot $\frac{m}{°K}$, daar anders de betekenis "energie per normgewicht en temperatuur" verloren gaat.

Voorbeeld 3

Bereken de specifieke gaskonstante van lucht R^* respektievelijk R, wanneer gegeven is :

- molaire (of algemene of universele) gaskonstante :

$$\mathcal{R} = 847{,}834\ \frac{kgf\ .\ m}{kmol\ .\ °K} \qquad (TS)$$

$$= 8314{,}41\ \frac{J}{kmol\ .\ K} \qquad (SI)$$

- molair (norm)gewicht van lucht $M^* = 28{,}95\ \frac{kgf}{kmol}$ (TS)

- molaire massa van lucht $M = 28{,}95\ \frac{kg}{kmol}$ (SI)

Men bekomt :

$$R^* = \frac{\mathcal{R}}{M^*} = \frac{847{,}834\ \frac{kgf\ .\ m}{kmol\ .\ °K}}{28{,}95\ \frac{kgf}{kmol}} = 29{,}286\ 15\ \frac{kgf\ .\ m}{kgf\ .\ °K}$$

$$R = \frac{\mathcal{R}}{M} = \frac{8314{,}41\ \frac{J}{kmol\ .\ K}}{28{,}95\ \frac{kg}{kmol}} = 287{,}199\ \frac{J}{kg\ .\ K}$$

Bemerk dat in het produkt $M^{\star} \cdot R^{\star} = \mathcal{R}$, de grootheid normgewicht niet meer "verscholen" zit in de grootheid $\mathcal{R}$:

$$\mathcal{R} = M^{\star} \cdot R^{\star} = \frac{G_n}{n} \cdot \frac{p \cdot v^{\star}}{T} = \frac{G_n}{n} \cdot \frac{p \cdot V}{T \cdot G_n} = \frac{p \cdot V}{n \cdot T}$$

1.3. Slotbeschouwingen

Om over te gaan van normgewicht G_n naar massa m, of van de grootheden $x^{\star}$ of $y^{\star}$ naar de grootheden x en y, (zoals gedefinieerd in onderhavig hoofdstuk onder 1.2.3.1.), wordt beroep gedaan op volgende uitdrukkingen :

$$m = \frac{G_n}{g_n}$$

$$x = \frac{x^{\star}}{g_n} \qquad \text{(met } x^{\star} = \frac{G_n}{X} \text{ en } x = \frac{m}{X}\text{)}$$

$$y = y^{\star} \cdot g_n \qquad \text{(met } y^{\star} = \frac{Y}{G_n} \text{ en } y = \frac{Y}{m}\text{)}$$

De grootheid g_n die in bovenstaande uitdrukkingen voorkomt, kan bij de bepaling van de waarde van de grootheden m, x en y, vertrekkend respektievelijk van de waarde van de grootheden G_n, $x^{\star}$ en $y^{\star}$, telkens weggedeeld worden met de g_n die te voorschijn komt wanneer de eenheid van normgewicht kgf, waarin G_n wordt uitgedrukt en die ook voorkomt respektievelijk in de teller en in de noemer van de samengestelde eenheid waarin $x^{\star}$ en $y^{\star}$ wordt uitgedrukt, vervangen wordt door kg $\cdot$ g_n (netgeen toegelaten is vermits kgf = kg $\cdot$ g_n, zie onderhavig hoofdstuk onder 1.1.2.).

Wanneer het er alleen om gaat, de grootheid m of x of y weer te geven als het produkt van een getalwaarde en een eenheid, vertrekkend van de waarde respektievelijk van de grootheid G_n of $x^{\star}$ of $y^{\star}$, dient men geen beroep te doen op bovenstaande uitdrukkingen om m of x of y te kunnen weergeven als het produkt van een getalwaarde en een eenheid. Men dient immers alleen de eenheid van normgewicht kgf te vervangen door de eenheid van massa kg (de eenheid kgf als een eenheid van een andere kracht dan normgewicht mag uiteraard nooit in kg omgezet worden).

Voorbeelden :

- wanneer G_n = 20 kgf, dan is m = 20 kg
- wanneer γ_n = 1000 $\frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$, dan is ρ = 1000 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
- wanneer v^* = 0,001 $\frac{\text{m}^3}{\text{kgf}}$, dan is v = 0,001 $\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$
- wanneer c^* = 0,024 $\frac{\text{kcal}}{\text{kgf . °C}}$, dan is c = 0,024 $\frac{\text{kcal}}{\text{kg . K}}$

$$= 0{,}024 \cdot \frac{4186{,}8\ \text{J}}{\text{kg . K}}$$

$$= 1004{,}832\ \frac{\text{J}}{\text{kg . K}}$$

- wanneer R^* = 29,286 15 $\frac{\text{kgf . m}}{\text{kgf . °K}}$, dan is R = 29,286 15 $\frac{\text{kgf . m}}{\text{kg . K}}$

$$= 29{,}286\ 15 \cdot \frac{9{,}806\ 65\ \text{J}}{\text{kg . K}}$$

$$= 287{,}199\ \frac{\text{J}}{\text{kg . K}}$$

Wanneer echter bijvoorbeeld gegeven wordt dat het werkelijke gewicht G van een lichaam op een bepaalde plaats gelijk is aan 20 kgf, mag men hieruit zo maar niet besluiten dat m = 20 kg. Alleen wanneer de versnelling van de zwaartekracht (zwaarteveldsterkte) g op de betrokken plaats gelijk is aan de normversnelling g_n, zal m gelijk zijn aan 20 kg. Wanneer het werkelijke gewicht G gegeven wordt in de TS-eenheid kgf, dient men het gewicht G eerst uit te drukken in de SI-eenheid newton (1 kgf = 9,806 65 N), en vervolgens m te berekenen als volgt :

$$m = \frac{G}{g}$$

Als het werkelijke gewicht G van een lichaam op de maan (met g = 1,62 N/kg) bijvoorbeeld gelijk is aan 20 kgf, bekomt men :

$$G = 20\ \text{kgf} \qquad \text{(TS)}$$

$$G = 196{,}133\ \text{N} \qquad \text{(SI)}$$

$$m = \frac{G}{g} = \frac{196{,}133\ \text{N}}{1{,}62\ \text{N/kg}} = 121{,}069\ 753\ 1\ \text{kg}$$

Het groot belang van de uitdrukkingen

$$G_n = m \cdot g_n \qquad x^{\star} = x \cdot g_n \qquad y^{\star} = \frac{y}{g_n}$$

$$\text{(met } x^{\star} = \frac{G_n}{X}\text{)} \qquad \text{(met } y^{\star} = \frac{Y}{G_n}\text{)}$$

zal echter pas duidelijk blijken bij het herschrijven in SI-notatie van (korrekt weergegeven) algemene groothedenvergelijkingen die geschreven zijn in TS-notatie.

2. Het herschrijven in SI-notatie van algemene groothedenvergelijkingen die geschreven zijn in TS-notatie

2.1. Inleiding

Een algemene groothedenvergelijking (zie Hoofdstuk II, onder 3.) bestaat uit grootheden en eventueel getallen die voortkomen uit de keuze van bepaalde definitievergelijkingen. Een algemene groothedenvergelijking bevat nooit omrekeningsgetallen tussen eenheden. Een algemene groothedenvergelijking brengt tot uiting, dat een natuurwet niet afhankelijk is van de keuze van de eenheden. Er worden geen eenheden opgedrongen, en de gebruikte eenheden hoeven zelfs niet noodzakelijk koherent te zijn. Het gebruik van koherente eenheden biedt echter grote voordelen (zie Hoofdstuk II, onder 8.).

De grootheden normgewicht G_n en normversnelling (normzwaarteveldsterkte) g_n en de grootheden van de vorm $x^{\star} = \frac{G_n}{X}$ en $y^{\star} = \frac{Y}{G_n}$ zijn TS-grootheden, die niet voorkomen in het SI.

Het symbool m en de symbolen van grootheden van de vorm $x = \frac{m}{X}$ en $y = \frac{Y}{m}$, zijn SI-symbolen, die niet voorkomen in het TS.

Alle algemene groothedenvergelijkingen waarin de grootheid G_n en/of g_n en/of een soortelijke grootheid van de vorm $x^{\star} = \frac{G_n}{X}$ of $y^{\star} = \frac{Y}{G_n}$ voorkomt, zijn algemene groothedenvergelijkingen "geschreven in TS-notatie".

Alle algemene groothedenvergelijkingen waarin het symbool m als symbool voor de grootheid massa en/of het symbool van een grootheid van de vorm $x = \frac{m}{X}$ of $y = \frac{Y}{m}$ voorkomt, zijn algemene groothedenvergelijkingen "geschreven in SI-notatie".

Alle overige algemene groothedenvergelijkingen worden in het SI op dezelfde wijze geschreven als in het TS.

Als voorbeeld van een dergelijke algemene groothedenvergelijking geven we de algemene groothedenvergelijking die de warmtedoorgangskoëfficiënt k van een uit verschillende lagen samengestelde wand weergeeft in funktie van : de warmteoverdrachtskoëfficiënt aan het binnenoppervlak (α_i) en aan het buitenoppervlak (α_u) van de wand, de dikte δ van elke laag waaruit de wand samengesteld is, en de warmtegeleidingskoëfficiënt λ van het materiaal van elke laag :

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \Sigma \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_u}} \qquad \text{(TS en SI)}$$

De betrokken grootheden worden in volgende eenheden uitgedrukt :

grootheid	gebruikelijke eenheid in het TS	SI-eenheid
α_i, α_u, k	$\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot {}^\circ\text{C}}$	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$
δ	m	m
λ	$\frac{\text{kcal}}{\text{m} \cdot \text{h} \cdot {}^\circ\text{C}}$	$\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$

Tussen de betrokken eenheden geldt volgend verband :

$$1 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot {}^\circ\text{C}} = \frac{4186{,}8 \text{ J}}{\text{m}^2 \cdot 3600 \text{ s} \cdot \text{K}} = 1{,}163 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \qquad \text{(exact)}$$

$$1 \frac{\text{kcal}}{\text{m} \cdot \text{h} \cdot {}^\circ\text{C}} = \frac{4186{,}8 \text{ J}}{\text{m} \cdot 3600 \text{ s} \cdot \text{K}} = 1{,}163 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \qquad \text{(exact)}$$

2.2. Richtlijnen in verband met het herschrijven in SI-notatie van algemene groothedenvergelijkingen geschreven in TS-notatie

Voor het omzetten van een algemene groothedenvergelijking geschreven in TS-notatie in een algemene groothedenvergelijking geschreven in SI-notatie, gelden volgende richtlijnen.

a. Het symbool g in de TS-notatie

Wanneer in de groothedenvergelijking in TS-notatie het symbool g voorkomt, dient men eerst te onderzoeken of het hier gaat om de plaatselijke versnelling g van de zwaartekracht (plaatselijke zwaarteveldsterkte) of om de normversnelling g_n waarbij de index n werd achterwege gelaten. In het eerste geval wordt bij de overgang naar de SI-notatie, de betrokken g gewoon behouden en in het tweede geval wordt g vervangen door g_n.

In een groothedenvergelijking betreffende een fysische wetmatigheid waarbij de versnelling van de zwaartekracht (zwaarteveldsterkte) geen rol speelt, komt de grootheid g in de betekenis van plaatselijke versnelling van de zwaartekracht, niet voor (noch in de TS-notatie, noch in de SI-notatie). In de TS-notatie kan dan wel de grootheid g_n voorkomen, meestal geschreven zonder index n. Zoals gezegd, wordt in dit laatste geval de betrokken g vervangen door g_n.

In een algemene groothedenvergelijking in SI-notatie betreffende een fysische wetmatigheid waarin de plaatselijke versnelling van de zwaartekracht (plaatselijke zwaarteveldsterkte) wel een rol speelt, komt de grootheid g altijd voor. In het TS is dit bij een korrekt geschreven groothedenvergelijking uiteraard ook het geval. In het TS echter was het gebruikelijk, waneer een g (plaatselijke versnelling) voorkwam in de teller en een g_n (normversnelling) in de noemer of omgekeerd, de twee betrokken grootheden met elkaar weg te delen. Vooraleer een algemene groothedenvergelijking geschreven in TS-notatie, om te zetten in een algemene groothedenvergelijking geschreven in SI-notatie, dient men dus eerst na te gaan of de betrokken groothedenvergelijking in TS-notatie korrekt weergegeven is.

b. Het symbool G in de TS-notatie

Het symbool G in een algemene groothedenvergelijking geschreven in TS-notatie kan beduiden :

- ofwel het normgewicht G_n; in dit geval wordt G vervangen door het produkt $m \cdot g_n$ (zie onderhavig hoofdstuk onder 1.1.4.)
- ofwel het werkelijk gewicht $\frac{G_n}{g_n} \cdot g$ waarbij ten onrechte g werd weggedeeld met g_n en de index n bij G_n werd weggelaten; in dit geval wordt G vervangen door het produkt $m \cdot g$.

c. Het symbool γ in de TS-notatie

Het symbool γ in een algemene groothedenvergelijking geschreven in TS-notatie kan beduiden :

- ofwel het soortelijk normgewicht γ_n; in dit geval wordt γ vervangen door het produkt $\rho \cdot g_n$ (zie onderhavig hoofdstuk onder 1.2.2.2.)
- ofwel het soortelijk werkelijk gewicht $\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g$ waarbij ten onrechte g werd weggedeeld met g_n en de index n bij γ_n werd weggelaten; in dit geval wordt γ vervangen door het produkt $\rho \cdot g$.

d. Symbolen van grootheden van de vorm $x^{\star} = \frac{G_n}{X}$ en $y^{\star} = \frac{Y}{G_n}$ (zie onderhavig hoofdstuk onder 1.2.3.2. en 1.2.3.3.)

In de groothedenvergelijking geschreven in TS-notatie, worden de symbolen van de grootheden waarvan in de definitievergelijking de grootheid normgewicht voorkomt, voorzien van een sterretje *. Vervolgens worden de betrokken symbolen vervangen door het overeenkomstig SI-symbool, vermenigvuldigd of gedeeld door g_n, naargelang ze van de vorm $x^{\star} = \frac{G_n}{X}$ of van de vorm $y^{\star} = \frac{Y}{G_n}$ zijn :

$x^{\star}$ wordt vervangen door $x \cdot g_n$ en $y^{\star}$ wordt vervangen door $\frac{y}{g_n}$

Wanneer in de algemene groothedenvergelijking geschreven in TS-notatie bovenstaande omzettingen hebben plaats gegrepen, kunnen al de voorkomende grootheden g_n worden weggedeeld en bekomt men uiteindelijk de gezochte groothedenvergelijking in SI-notatie (waarin de grootheid g_n dus niet meer voorkomt).

Hierna zijn een aantal voorbeelden samengebracht die aantonen hoe symbolen van typische TS-grootheden in een algemene groothedenvergelijking geschreven in TS-notatie, worden vervangen teneinde te komen tot een algemene groothedenvergelijking geschreven in SI-notatie (zie ook onderhavig hoofdstuk onder 1.2.3.3.) :

symbool van de TS-grootheid	vervangings-symbolen
G_n	$m \cdot g_n$
grootheden van de vorm $x^\star = \frac{G_n}{X}$	
γ_n	$\rho \cdot g_n$
$M^\star$	$M \cdot g_n$
grootheden van de vorm $y^\star = \frac{Y}{G_n}$	
$v^\star$	$\frac{v}{g_n}$
$c^\star$	$\frac{c}{g_n}$
$u^\star$	$\frac{u}{g_n}$
$h^\star$	$\frac{h}{g_n}$
$s^\star$	$\frac{s}{g_n}$
$Hu^\star$	$\frac{Hu}{g_n}$
$R^\star$	$\frac{R}{g_n}$

De grootste moeilijkheden vinden hun oorsprong in het feit, dat in het TS meestal geen onderscheid werd gemaakt tussen de plaatselijke versnelling g van de zwaartekracht en de normversnelling g_n; beide grootheden werden voorgesteld door g. Hierdoor viel ook het onderscheid weg tussen

het normgewicht G_n en het werkelijk gewicht $\frac{G_n}{g_n} \cdot g$ (beide grootheden werden voorgesteld door G) en tussen het soortelijk normgewicht γ_n en het soortelijk werkelijk gewicht $\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g$ (beide grootheden werden voorgesteld door γ).

Voor het weergeven van fysische wetmatigheden op aarde kon dit in zekere mate toelaatbaar worden geacht (tenzij voor heel nauwkeurige berekeningen) daar op aarde de plaatselijke versnelling van de zwaartekracht niet veel kan afwijken van de normversnelling. Groothedenvergelijkingen in TS-notatie waarin een g werd weggedeeld met een g_n zijn echter uiteraard niet meer bruikbaar in verband met plaatsen waar de plaatselijke versnelling van de zwaartekracht (plaatselijke zwaarteveldsterkte) in grotere mate afwijkt van de normversnelling. Dergelijke groothedenvergelijkingen zijn uiteraard geen "algemene" groothedenvergelijkingen meer. Het valt soms moeilijk te onderkennen of een bepaalde groothedenvergelijking al dan niet een "algemene" groothedenvergelijking is.

2.3. Toepassingen

2.3.1. Toestandsvergelijking van een ideaal gas (algemene gaswet)

Aangewende grootheden en symbolen :

- voorkomend zowel in het TS als in het SI :

p = druk

V = volume

n = hoeveelheid stof

V_m = molair volume = $\frac{V}{n}$

R = molaire gaskonstante (vroeger ook genoemd algemene of universele gaskonstante)

= 0,847 837 $\frac{\text{kgf . m}}{\text{mol . °K}}$ (TS)

= 8,314 41 $\frac{\text{J}}{\text{mol . K}}$ (SI)

T = termodynamische temperatuur (absolute temperatuur)

- enkel voorkomend in het TS :

G_n = normgewicht

$v^{\star}$ = soortelijk volume = $\frac{V}{G_n}$

γ_n = soortelijk normgewicht = $\frac{G_n}{V}$

$R^{\star}$ = specifieke gaskonstante = $\frac{p \cdot V}{G_n \cdot T} = \frac{p \cdot v^{\star}}{T} = \frac{n \cdot \mathfrak{R}}{G_n} = \frac{\mathfrak{R}}{M^{\star}}$

$M^{\star}$ = molair normgewicht = $\frac{G_n}{n}$

- enkel voorkomend in het SI :

m = massa

v = soortelijk volume = $\frac{V}{m}$

ρ = soortelijke massa (volumieke massa) = $\frac{m}{V}$

R = specifieke gaskonstante = $\frac{p \cdot V}{m \cdot T} = \frac{p \cdot v}{T} = \frac{n \cdot \mathfrak{R}}{m} = \frac{\mathfrak{R}}{M}$

M = molaire massa = $\frac{m}{n}$

De toestandsvergelijking van een ideaal gas wordt in het TS weergegeven door elk van de volgende uitdrukkingen :

	term-eenheid
$p \cdot V = G_n \cdot R^{\star} \cdot T = n \cdot \mathfrak{R} \cdot T$	kgf . m
$p \cdot v^{\star} = \frac{p}{\gamma_n} = R^{\star} \cdot T = \frac{n \cdot \mathfrak{R} \cdot T}{G_n} = \frac{\mathfrak{R} \cdot T}{M^{\star}}$	$\frac{\text{kgf . m}}{\text{kgf}} = (\text{m})$
$p \cdot M^{\star} \cdot v^{\star} = p \cdot V_m = M^{\star} \cdot R^{\star} \cdot T = \mathfrak{R} \cdot T$	$\frac{\text{kgf . m}}{\text{mol}}$

Het TS was de gebruikelijke schrijfwijze als volgt :

$$p \cdot V = G \cdot R \cdot T = n \cdot \mathfrak{R} \cdot T$$

$$p \cdot v = \frac{p}{\gamma} = R \cdot T = \frac{n \cdot \mathfrak{R} \cdot T}{G} = \frac{\mathfrak{R} \cdot T}{M}$$

$$p \cdot M \cdot v = p \cdot V_m = M \cdot R \cdot T = \mathfrak{R} \cdot T$$

In het SI wordt de toestandsvergelijking van een ideaal gas weergegeven door elk van de volgende uitdrukkingen :

	term-eenheid :
$p \cdot V = m \cdot R \cdot T = n \cdot \mathfrak{R} \cdot T$	J
$p \cdot v = \frac{p}{\rho} = R \cdot T = \frac{n \cdot \mathfrak{R} \cdot T}{m} = \frac{\mathfrak{R} \cdot T}{M}$	$\frac{J}{kg}$
$p \cdot M \cdot v = p \cdot V_m = M \cdot R \cdot T = \mathfrak{R} \cdot T$	$\frac{J}{mol}$

De overgang van TS-notatie naar SI-notatie gebeurt als volgt :

$p \cdot V = G \cdot R \cdot T = n \cdot \mathfrak{R} \cdot T$ (TS gebruikelijk)

$p \cdot V = G_n \cdot R^{\star} \cdot T = n \cdot \mathfrak{R} \cdot T$ (TS korrekt)

$p \cdot V = m \cdot g_n \cdot \frac{R}{g_n} \cdot T = n \cdot \mathfrak{R} \cdot T$ ↓

$p \cdot V = m \cdot R \cdot T = n \cdot \mathfrak{R} \cdot T$ (SI)

$p \cdot v = \frac{p}{\gamma} = R \cdot T = \frac{n \cdot \mathfrak{R} \cdot T}{G} = \frac{\mathfrak{R} \cdot T}{M}$ (TS gebruikelijk)

$p \cdot v^{\star} = \frac{p}{\gamma_n} = R^{\star} \cdot T = \frac{n \cdot \mathfrak{R} \cdot T}{G_n} = \frac{\mathfrak{R} \cdot T}{M^{\star}}$ (TS korrekt)

$p \cdot \frac{v}{g_n} = \frac{p}{\rho \cdot g_n} = \frac{R}{g_n} \cdot T = \frac{n \cdot \mathfrak{R} \cdot T}{m \cdot g_n} = \frac{\mathfrak{R} \cdot T}{M \cdot g_n}$ ↓

$p \cdot v = \frac{p}{\rho} = R \cdot T = \frac{n \cdot \mathfrak{R} \cdot T}{m} = \frac{\mathfrak{R} \cdot T}{M}$ (SI)

$p \cdot M \cdot v = p \cdot V_m = M \cdot R \cdot T = \mathfrak{R} \cdot T$ (TS gebruikelijk)

$p \cdot M^{\star} \cdot v^{\star} = p \cdot V_m = M^{\star} \cdot R^{\star} \cdot T = \mathfrak{R} \cdot T$ (TS korrekt)

$p \cdot M \cdot g_n \cdot \frac{v}{g_n} = p \cdot V_m = M \cdot g_n \cdot \frac{R}{g_n} \cdot T = \mathfrak{R} \cdot T$ ↓

$p \cdot M \cdot v = p \cdot V_m = M \cdot R \cdot T = \mathfrak{R} \cdot T$ (SI)

Voorbeeld 1

Bereken het volume ingenomen door een hoeveelheid lucht waarvan G_n = 10 kgf en m = 10 kg, bij een druk gelijk aan de normale atmosferische druk (= 10 332,274 53 $\frac{kgf}{m^2}$ = 101 325 Pa) en een temperatuur van 20 °C (T = 293,15 K), gegeven zijnde dat $R^{\star}$ = 29,286 15 $\frac{kgf \cdot m}{kgf \cdot °K}$

en R = 287,199 $\frac{J}{kg \cdot K}$

(N.B. : Het is aangewezen in het TS $R^{\star}$ uit te drukken in de eenheid $\frac{kgf \cdot m}{kgf \cdot {}^{\circ}K}$ en deze eenheid niet te vereenvoudigen tot $\frac{m}{{}^{\circ}K}$, daar anders de betekenis "energie per normgewicht en temperatuur" verloren gaat).

Men bekomt in het TS :

$$V = \frac{G_n \cdot R^{\star} \cdot T}{p} = \frac{10\ kgf \cdot 29{,}286\ 15\ \frac{kgf \cdot m}{kgf \cdot {}^{\circ}K} \cdot 293{,}15\ {}^{\circ}K}{10\ 332{,}274\ 53\ \frac{kgf}{m^2}} = 8{,}309\ m^3$$

Men bekomt in het SI :

$$V = \frac{m \cdot R \cdot T}{p} = \frac{10\ kg \cdot 287{,}199\ \frac{J}{kg \cdot K} \cdot 293{,}15\ K}{101\ 325\ \frac{N}{m^2}} = 8{,}309\ m^3$$

Voorbeeld 2

Bereken het normvolume V_n (volume ingenomen bij T = 273,15 K en p = normale atmosferische druk) van dezelfde hoeveelheid gas.

$$V_n = \frac{G_n \cdot R^{\star} \cdot 273{,}15\ {}^{\circ}K}{10\ 332{,}274\ 53\ \frac{kgf}{m^2}} = \frac{10\ kgf \cdot 29{,}286\ 15\ \frac{kgf \cdot m}{kgf \cdot {}^{\circ}K} \cdot 273{,}15\ {}^{\circ}K}{10\ 332{,}274\ 53\ \frac{kgf}{m^2}} = 7{,}742\ m^3$$

$$V_n = \frac{m \cdot R \cdot 273{,}15\ K}{101\ 325\ \frac{N}{m^2}} = \frac{10\ kg \cdot 287{,}199\ \frac{J}{kg \cdot K} \cdot 273{,}15\ K}{101\ 325\ \frac{N}{m^2}} = 7{,}742\ m^3$$

2.3.2. Voortplantingssnelheid van het geluid

De voortplantingssnelheid c van het geluid in een (ideaal) gas wordt in het TS gegeven door :

$$c = \sqrt{\frac{g_1}{\gamma_n} \cdot \kappa \cdot p} = \sqrt{g_n \cdot \kappa \cdot p \cdot v^{\star}} = \sqrt{g_n \cdot \kappa \cdot R^{\star} \cdot T}$$

(TS-eenheid : $\frac{m}{s}$)

met $\kappa = \frac{c_p^{\star}}{c_v^{\star}}$ = verhouding van de soortelijke warmtekapaciteit onder konstante druk tot de soortelijke warmtekapaciteit onder konstant volume

p = luchtdruk (omgevingsdruk)

$v^{\star}$ = soortelijk volume = $\frac{V}{G_n}$

γ_n = soortelijk normgewicht = $\frac{G_n}{V}$

$R^{\star}$ = specifieke gaskonstante = $\frac{p \cdot V}{G_n \cdot T} = \frac{p \cdot v^{\star}}{T} = \frac{n \cdot \mathcal{R}}{G_n} = \frac{\mathcal{R}}{M^{\star}}$

g_n = normversnelling (normzwaarteveldsterkte)

T = termodynamische temperatuur (absolute temperatuur)

In het TS was de gebruikelijke schrijfwijze als volgt :

$$c = \sqrt{\frac{g \cdot \kappa \cdot p}{\gamma}} = \sqrt{g \cdot \kappa \cdot p \cdot v} = \sqrt{g \cdot \kappa \cdot R \cdot T}$$

Deze gebruikelijke schrijfwijze zou ten onrechte kunnen laten veronderstellen, dat de plaatselijke versnelling van de zwaartekracht (plaatselijke zwaarteveldsterkte) van invloed is op de geluidssnelheid.

De voortplantingssnelheid c van het geluid in een (ideaal) gas wordt in het SI gegeven door :

$$c = \sqrt{\frac{\kappa \cdot p}{\rho}} = \sqrt{\kappa \cdot p \cdot v} = \sqrt{\kappa \cdot R \cdot T} \qquad \text{(SI-eenheid : } \frac{m}{s}\text{)}$$

met : $\kappa = \frac{c_p}{c_v}$ $\left(\text{bemerk dat } \kappa = \frac{c_p}{c_v} = \frac{c_p^{\star} \cdot g_n}{c_v^{\star} \cdot g_n} = \frac{c_p^{\star}}{c_v^{\star}}\right)$

p = luchtdruk (omgevingsdruk)

v = soortelijk volume = $\frac{V}{m}$

ρ = soortelijke massa = $\frac{m}{V}$

R = specifieke gaskonstante = $\frac{p \cdot V}{m \cdot T} = \frac{p \cdot v}{T} = \frac{n \cdot \mathcal{R}}{m} = \frac{\mathcal{R}}{M}$

T = termodynamische temperatuur (absolute temperatuur)

De overgang van TS-notatie naar SI-notatie gebeurt als volgt :

$$c = \sqrt{\frac{g \cdot \kappa \cdot p}{\gamma}} = \sqrt{g \cdot \kappa \cdot p \cdot v} = \sqrt{g \cdot \kappa \cdot R \cdot T} \qquad \text{(TS gebruikelijk)}$$

$$c = \sqrt{\frac{g_n \cdot \kappa \cdot p}{\gamma_n}} = \sqrt{g_n \cdot \kappa \cdot p \cdot v^{\star}} = \sqrt{g_n \cdot \kappa \cdot R^{\star} \cdot T} \qquad \text{(TS korrekt)}$$

$$c = \sqrt{\frac{g_n \cdot \kappa \cdot p}{\rho \cdot g_n}} = \sqrt{g_n \cdot \kappa \cdot p \cdot \frac{v}{g_n}} = \sqrt{g_n \cdot \kappa \cdot \frac{R}{g_n} \cdot T}$$

$$c = \sqrt{\frac{\kappa \cdot p}{\rho}} = \sqrt{\kappa \cdot p \cdot v} = \sqrt{\kappa \cdot R \cdot T} \qquad \text{(SI)}$$

Voorbeeld :

Als voortplantingssnelheid van het geluid in (droge) lucht (beschouwd als een ideaal gas) bij een temperatuur van 20 °C (dus T = 293,15 K) bekomt men (met $R^{\star}$ = 29,286 15 $\frac{kgf \cdot m}{kgf \cdot °K}$, R = 287,199 $\frac{J}{kg \cdot K}$ en κ = 1,4) :

- in het TS :

$$c = \sqrt{g_n \cdot \kappa \cdot R^{\star} \cdot T}$$

$$= \sqrt{9{,}806\ 65 \frac{m}{s^2} \times 1{,}4 \times 29{,}286\ 15 \frac{kgf \cdot m}{kgf \cdot °K} \times 293{,}15\ °K}$$

$$= 343{,}3..\ \frac{m}{s}$$

- in het SI :

$$c = \sqrt{\kappa \cdot R \cdot T}$$

$$= \sqrt{1{,}4 \times 287{,}199 \frac{J}{kg \cdot K} \times 293{,}15\ K}$$

$$= 343{,}3..\ \frac{m}{s}$$

$$\left(\text{bemerk dat } \sqrt{\frac{J}{kg}} = \sqrt{\frac{N \cdot m}{kg}} = \sqrt{\frac{\frac{kg \cdot m}{s^2} \cdot m}{kg}} = \sqrt{\frac{m^2}{s^2}} = \frac{m}{s}\right)$$

2.3.3. Arbeidsvermogen van plaats

In het TS wordt het arbeidsvermogen van plaats weergegeven door volgende algemene groothedenvergelijking (met h = afstand tot een horizontaal referentievlak) :

$$E_p = \frac{G_n}{g_n} \cdot g \cdot h \qquad \text{(TS-eenheid : kgf . m)}$$

In het TS was de gebruikelijke schrijfwijze : $E_p = G \cdot h$
In deze laatste uitdrukking komt de grootheid g niet meer voor, hoewel het arbeidsvermogen van plaats mede bepaald wordt door de plaatselijke versnelling van de zwaartekracht (plaatselijke zwaarteveldsterkte).

In het SI wordt het arbeidsvermogen van plaats gegeven door volgende algemene groothedenvergelijking :

$$E_p = m \cdot g \cdot h \qquad \text{(SI-eenheid : J)}$$

De overgang van TS-notatie naar SI-notatie gebeurt als volgt :

$$E_p = G \cdot h \qquad \text{(TS gebruikelijk)}$$

$$E_p = \frac{G_n}{g_n} \cdot g \cdot h \qquad \text{(TS korrekt)}$$

$$\downarrow$$

$$E_p = \frac{m \cdot g_n}{g_n} \cdot g \cdot h$$

$$E_p = m \cdot g \cdot h \qquad \text{(SI)}$$

Voorbeeld :

Bereken het arbeidsvermogen van plaats van een lichaam met een normgewicht G_n = 500 kgf (TS) en een massa m = 500 kg (SI), dat zich 10 meter boven het referentievlak bevindt, voor een plaats waar de plaatselijke versnelling van de zwaartekracht g gelijk is aan 9,811 583 m/s^2 (dit is de versnelling van de zwaartekracht op aarde ter hoogte van de zeespiegel op de breedtecirkel van 51°, die door België loopt) alsook voor een plaats op de maan (met g = 1,62 m/s^2).

Men bekomt in het TS :

- op aarde (op een breedte van 51°) :

$$E_p = \frac{G_n}{g_n} \cdot g \cdot h = \frac{500 \text{ kgf}}{9{,}806\ 65 \ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \cdot 9{,}811\ 583 \ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 10 \text{ m}$$

$$= 5002{,}515 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

Volgens de in het TS gebruikelijke (en minder nauwkeurige) schrijfwijze bekomt men op aarde :

$$E_p = G \cdot h = 500 \text{ kgf} \cdot 10 \text{ m} = 5000 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

- op de maan :

$$E_p = \frac{G_n}{g_n} \cdot g \cdot h = \frac{500 \text{ kgf}}{9{,}806\ 65 \ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \cdot 1{,}62 \ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 10 \text{ m}$$

$$= 825{,}970 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

Op de maan mag de minder nauwkeurige schrijfwijze niet worden toegepast, omdat daar de plaatselijke g veel verschilt van de normversnelling g_n.

Men bekomt in het SI :

- op aarde (op een breedte van 51°) :

$$E_p = m \cdot g \cdot h = 500 \text{ kg} \cdot 9{,}811\ 583 \ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 10 \text{ m}$$

$$= 49\ 057{,}915 \text{ J}$$

- op de maan :

$$E_p = m \cdot g \cdot h = 500 \text{ kg} \cdot 1{,}62 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 10 \text{ m}$$

$$= 8100 \text{ J}$$

2.3.4. Arbeidsvermogen van beweging (kinetische energie)

In het TS wordt het arbeidsvermogen van beweging gegeven door volgende algemene groothedenvergelijking (met v = snelheid) :

$$E_k = \frac{G_n \cdot v^2}{2\, g_n} \qquad \text{(TS-eenheid : kgf . m)}$$

In het TS was de gebruikelijke schrijfwijze :

$$E_k = \frac{G \cdot v^2}{2\, g}$$

In deze laatste uitdrukking komt g voor, hoewel het arbeidsvermogen van beweging niet afhankelijk is van de plaatselijke versnelling van de zwaartekracht (plaatselijke zwaarteveldsterkte).

In het SI wordt het arbeidsvermogen van beweging gegeven door volgende algemene groothedenvergelijking (met v = snelheid) :

$$E_k = \frac{m \cdot v^2}{2} \qquad \text{(SI-eenheid : J)}$$

De overgang van TS-notatie naar SI-notatie gebeurt als volgt :

$$E_k = \frac{G \cdot v^2}{2\, g} \qquad \text{(TS gebruikelijk)}$$

$$E_k = \frac{G_n \cdot v^2}{2\, g_n} \qquad \text{(TS korrekt)}$$

$$\downarrow$$

$$E_k = \frac{m \cdot g_n \cdot v^2}{2\, g_n}$$

$$E_k = \frac{m \cdot v^2}{2} \qquad \text{(SI)}$$

Voorbeeld :

Bereken het arbeidsvermogen van beweging van een lichaam met een normgewicht G_n = 20 kgf (TS) en een massa m = 20 kg (SI), dat een snelheid heeft van 5 m/s.

Men bekomt :

- in het TS :

$$E_k = \frac{G_n \cdot v^2}{2\, g_n} = \frac{20 \text{ kgf} \cdot 5^2 \frac{m^2}{s^2}}{2 \times 9{,}806\,65 \frac{m}{s^2}} = 25{,}493 \text{ kgf} \cdot m$$

- in het SI :

$$E_k = \frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{20 \text{ kg} \cdot 5^2 \frac{m^2}{s^2}}{2} = 250 \text{ J}$$

2.3.5. Valsnelheid (in het luchtledige) en valhoogte

Bij het vallen wordt het arbeidsvermogen van plaats omgezet in arbeidsvermogen van beweging; dit wordt weergegeven door volgende algemene groothedenvergelijkingen :

- in het TS :

$$\frac{G_n}{g_n} \cdot g \cdot h = \frac{G_n \cdot v^2}{2\, g_n} \qquad \text{waaruit : } v = \sqrt{2\, g \cdot h} \qquad \left(\text{TS-eenheid : } \frac{m}{s}\right)$$

met als gebruikelijke schrijfwijze :

$$G \cdot h = \frac{G \cdot v^2}{2\, g} \qquad \text{waaruit : } v = \sqrt{2\, g \cdot h}$$

- in het SI :

$$m \cdot g \cdot h = \frac{m \cdot v^2}{2} \qquad \text{waaruit : } v = \sqrt{2\, g \cdot h} \qquad \left(\text{SI-eenheid : } \frac{m}{s}\right)$$

Wanneer de eindsnelheid v gekend is, alsook de waarde van de plaatselijke versnelling van de zwaartekracht (plaatselijke zwaarteveldsterkte), wordt zowel in het TS als in het SI de valhoogte gegeven door :

$$h = \frac{v^2}{2\, g}$$

De grootheid $\frac{v^2}{2\, g}$ wordt snelheidshoogte genoemd, omdat het de hoogte is waarover men een lichaam moet laten vallen (in het luchtledige) teneinde het een snelheid v te laten verkrijgen.

De overgang van TS-notatie naar SI-notatie gebeurt als volgt :

$$G \cdot h = \frac{G \cdot v^2}{2\,g} \qquad \text{(TS gebruikelijk)}$$

$$\frac{G_n}{g_n} \cdot g \cdot h = \frac{G_n \cdot v^2}{2\,g_n} \qquad \text{(TS korrekt)}$$

$$\frac{m \cdot g_n}{g_n} \cdot g \cdot h = \frac{m \cdot g_n \cdot v^2}{2\,g_n}$$

$$m \cdot g \cdot h = \frac{m \cdot v^2}{2} \qquad \text{(SI)}$$

De g die voorkomt in de in het TS gebruikelijke schrijfwijze $G \cdot h = \frac{G \cdot v^2}{2\,g}$ is in feite de normversnelling g_n. Wanneer nu deze vergelijking opgelost wordt naar v, bekomt men : $v = \sqrt{2\,g \cdot h}$. Men zou kunnen geneigd zijn, aan te nemen dat de g die voorkomt in deze laatste uitdrukking dus ook gelijk is aan de normversnelling g_n. Dit zou echter een foutieve redenering zijn. In de uitdrukking $v = \sqrt{2\,g \cdot h}$ gaat het wel degelijk om de plaatselijke versnelling van de zwaartekracht en niet om de normversnelling. Dit blijkt duidelijk uit de korrekte schrijfwijze.

2.3.6. Hydrostatische druk (zie ook Hoofdstuk XI, onder 6.1.)

In het TS wordt de hydrostatische druk gegeven door volgende algemene groothedenvergelijking (met h = vloeistofhoogte) :

$$p = \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h \qquad \left(\text{TS-eenheid : } \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}\right)$$

In het TS was de gebruikelijke schrijfwijze :

$$p = \gamma \cdot h$$

In het SI wordt de hydrostatische druk gegeven door volgende algemene groothedenvergelijking (met h = vloeistofhoogte) :

$$p = \rho \cdot g \cdot h \qquad \text{(SI-eenheid : Pa)}$$

De overgang van TS-notatie naar SI-notatie gebeurt als volgt :

$$p = \gamma \cdot h \qquad \text{(TS gebruikelijk)}$$

$$p = \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h \qquad \text{(TS korrekt)}$$

$$\downarrow$$

$$p = \frac{\rho \cdot g_n}{g_n} \cdot g \cdot h$$

$$p = \rho \cdot g \cdot h \qquad \text{(SI)}$$

De hoogte h wordt drukhoogte genoemd, omdat het de hoogte is die vereist is om de druk p te verkrijgen.

Voorbeeld :

Bereken de hydrostatische druk p in water $\left(\text{met } \gamma_n = 1000 \frac{kgf}{m^3} \text{ en } \rho = 1000 \frac{kg}{m^3}\right)$ op een diepte $h = 10$ m, op een plaats op aarde gelegen op 51° breedte $\left(g = 9{,}811\ 583 \frac{m}{s^2}\right)$ alsook voor een plaats op de maan $\left(g = 1{,}62 \frac{m}{s^2}\right)$.

Men bekomt in het TS :

- op aarde (op een breedte van 51°) :

$$p = \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h = \frac{1000 \frac{kgf}{m^3}}{9{,}806\ 65 \frac{m}{s^2}} \cdot 9{,}811\ 583 \frac{m}{s^2} \cdot 10 \text{ m} = 10\ 005{,}030 \frac{kgf}{m^2}$$

$\left(\text{N.B. : met } g = g_n \text{ zou men bekomen hebben : } p = 10\ 000 \frac{kgf}{m^2}\right)$

- op de maan :

$$p = \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h = \frac{1000 \frac{kgf}{m^3}}{9{,}806\ 65 \frac{m}{s^2}} \cdot 1{,}62 \frac{m}{s^2} \cdot 10 \text{ m} = 1651{,}940 \frac{kgf}{m^2}$$

N.B. : Op de maan geldt :

10 000 "werkelijke" mmWK = 1651,940 "konventionele" mmWK

(zie ook Hoofdstuk XI, onder 6.2.).

Men bekomt in het SI :

- op aarde (op een breedte van 51°) :

$$p = \rho \cdot g \cdot h = 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 9{,}811\ 583 \frac{m}{s^2} \cdot 10 \text{ m}$$

$$= 98\ 115{,}830 \text{ Pa}$$

- op de maan :

$$p = \rho \cdot g \cdot h = 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 1{,}62 \frac{m}{s^2} \cdot 10\ m$$

$$= 16\ 200\ Pa$$

Indien men in de betrokken punten de absolute druk wenst te kennen, dient men aan de berekende hydrostatische druk de (absolute) druk toe te voegen die boven de vloeistof heerst.

2.3.7. Uitstroomsnelheid van een vloeistof uit een open vat (met uitstroomopening in de bodem), snelheidshoogte, uitstromende hoeveelheden

Wanneer de verliezen tengevolge van de wrijving en de vorm van de uitstroomopening worden verwaarloosd, wordt de uitstroomsnelheid w en de snelheidshoogte h op dezelfde wijze bekomen als de hoger behandelde valsnelheid en valhoogte (zie onderhavig hoofdstuk onder 2.3.5.); men bekomt zowel in het TS als in het SI :

$$w = \sqrt{2\,g \cdot h}$$

$$h = \frac{w^2}{2\,g}$$

De grootheid $\frac{w^2}{2\,g}$ wordt hier snelheidshoogte genoemd, omdat het de hoogte is waarop het vat dient gevuld te zijn teneinde de uitstroomsnelheid w te verkrijgen.

In de uitstroomopening is de hydrostatische druk gelijk aan nul geworden, doch is een dynamische druk aanwezig weergegeven door :

- in het TS :

$$\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w^2}{2} \qquad \left(\text{TS-eenheid} : \frac{kgf}{m^2}\right)$$

met als gebruikelijke schrijfwijze :

$$\frac{\gamma \cdot w^2}{2\,g}$$

- in het SI :

$$\frac{\rho \cdot w^2}{2} \cdot \qquad \text{(SI-eenheid : Pa)}$$

De verdwenen hydrostatische druk is gelijk aan de ontstane dynamische druk; men bekomt :

- in het TS :

$$\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h = \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w^2}{2} \qquad \text{waaruit : } w = \sqrt{2\,g \cdot h} \quad \text{en} \quad h = \frac{w^2}{2\,g}$$

met als gebruikelijke schrijfwijze :

$$\gamma \cdot h = \frac{\gamma \cdot w^2}{2\,g}$$

- in het SI :

$$\rho \cdot g \cdot h = \frac{\rho \cdot w^2}{2} \qquad \text{waaruit : } w = \sqrt{2\,g \cdot h} \quad \text{en} \quad h = \frac{w^2}{2\,g}$$

De overgang van TS-notatie naar SI-notatie gebeurt als volgt :

$$\gamma \cdot h = \frac{\gamma \cdot w^2}{2\,g} \qquad \text{(TS gebruikelijk)}$$

$$\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h = \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w^2}{2} \qquad \text{(TS korrekt)}$$

$$\frac{\rho \cdot g_n}{g_n} \cdot g \cdot h = \frac{\rho \cdot g_n}{g_n} \cdot \frac{w^2}{2}$$

$$\rho \cdot g \cdot h = \frac{\rho \cdot w^2}{2} \qquad \text{(SI)}$$

De g die voorkomt in de in het TS gebruikelijke schrijfwijze $\gamma \cdot h = \frac{\gamma \cdot w^2}{2\,g}$ is in feite de normversnelling g_n. Wanneer nu deze vergelijking opgelost wordt naar w, bekomt men : $w = \sqrt{2\,g \cdot h}$. Men zou kunnen geneigd zijn aan te nemen dat de g die voorkomt in de laatste uitdrukking dus ook gelijk is aan de normversnelling g_n. Dit zou echter een foutieve redenering zijn. In de uitdrukking $w = \sqrt{2\,g \cdot h}$ gaat het wel degelijk om de plaatselijke versnelling van de zwaartekracht en niet om de normversnelling. Dit blijkt duidelijk uit de korrekte schrijfwijze.

Wanneer wel rekening wordt gehouden met de uitstroomverliezen tengevolge van de wrijving en de vorm van de uitstroomopening, is de werkelijke gemiddelde snelheid (berekend over de ganse oppervlakte A van de doorstroomopening) kleiner dan de hierboven berekende teoretische snelheid. Men bekomt dan (zowel in het TS als in het SI) :

$$w = \mu \cdot \sqrt{2\,g \cdot h}$$

met μ = uitstromingskoëfficiënt (dimensieloos getal dat kleiner is dan 1).

De hoeveelheid uitstromende vloeistof wordt gegeven hetzij door de volumestroom Q (in het TS en in het SI; in het SI wordt ook het symbool q_v gebruikt); hetzij door de normgewichtsstroom $\dot{G}_n$ (in het TS) en door de massastroom q_m (in het SI).

De volumestroom wordt (zowel in het TS als in het SI) gegeven door volgende algemene groothedenvergelijking :

$$Q = q_v = A \cdot w = A \cdot \mu \cdot \sqrt{2\,g \cdot h}$$

$$\left(\text{TS-eenheid} : \frac{m^3}{s};\ \text{SI-eenheid} : \frac{m^3}{s}\right)$$

In het TS wordt de normgewichtsstroom gegeven door volgende algemene groothedenvergelijking :

$$\dot{G}_n = Q \cdot \gamma_n = A \cdot \mu \cdot \sqrt{2\,g \cdot h \cdot \gamma_n^2}$$

$$= A \cdot \mu \cdot \sqrt{2\,\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h \cdot g_n \cdot \gamma_n}$$

$$= A \cdot \mu \cdot \sqrt{2\,p \cdot g_n \cdot \gamma_n}$$

$$= A \cdot \mu \cdot \sqrt{\frac{2\,p \cdot g_n}{v^*}}$$

$$\left(\text{TS-eenheid} : \frac{\text{kgf}}{s}\right)$$

In het TS was de gebruikelijke schrijfwijze :

$$\dot{G} = Q \cdot \gamma = A \cdot \mu \cdot \sqrt{2\,p \cdot g \cdot \gamma}$$

$$= A \cdot \mu \cdot \sqrt{\frac{2\,p \cdot \varrho}{v}}$$

In het SI wordt de massastroom gegeven door volgende algemene groothedenverlijkin :

$$q_m = q_v \cdot \rho = \rho \cdot A \cdot \mu \cdot \sqrt{2\,g \cdot h}$$

$$= A \cdot \mu \cdot \sqrt{2\,g \cdot h \cdot \rho \cdot \rho}$$

$$= A \cdot \mu \cdot \sqrt{2\,p \cdot \rho}$$

$$= A \cdot \mu \cdot \sqrt{\frac{2\,p}{v}}$$

$$\left(\text{SI-eenheid} : \frac{\text{kg}}{s}\right)$$

Om over te gaan van de algemene groothedenvergelijking in TS-notatie naar de algemene groothedenvergelijking in SI-notatie, vervangt men :

$\dot{G}_n$ door $q_m \cdot g_n$ $\qquad$ γ_n door $\rho \cdot g_n$ $\qquad$ v^* door $\frac{v}{g_n}$

Men bekomt :

$$\dot{G} = Q \cdot \gamma = A \cdot \mu \cdot \sqrt{2p \cdot g \cdot \gamma} \qquad \text{(TS gebruikelijk)}$$

$$= A \cdot \mu \cdot \sqrt{\frac{2p \cdot g}{v}} \qquad \text{(TS gebruikelijk)}$$

$$\dot{G}_n = Q \cdot \gamma_n = A \cdot \mu \cdot \sqrt{2p \cdot g_n \cdot \gamma_n} \qquad \text{(TS korrekt)}$$

$$= A \cdot \mu \cdot \sqrt{\frac{2p \cdot g_n}{v^*}} \qquad \text{(TS korrekt)}$$

$$q_m \cdot g_n = q_v \cdot \rho \cdot g_n = A \cdot \mu \cdot \sqrt{2p \cdot g_n \cdot \rho \cdot g_n}$$

$$= A \cdot \mu \cdot \sqrt{\frac{2p \cdot g_n^2}{v}}$$

$$q_m = q_v \cdot \rho = A \cdot \mu \cdot \sqrt{2p \cdot \rho} \qquad \text{(SI)}$$

$$= A \cdot \mu \cdot \sqrt{\frac{2p}{v}} \qquad \text{(SI)}$$

Wat de druk p betreft die in bovenstaande uitdrukkingen voorkomt, geldt (zie onderhavig hoofdstuk onder 2.3.6.) :

$$p = \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h \qquad \text{(TS)}$$

$$p = \rho \cdot g \cdot h \qquad \text{(SI)}$$

2.3.8. Meten van doorstromende hoeveelheden

De hoeveelheid vloeistof, gas of damp die door een buisleiding stroomt, kan gemeten worden met behulp van een meetflens (meetschijf) of een meettuit.

a. Aangewende grootheden en symbolen

- voorkomend zowel in het TS als in het SI :
  - Δp = verschil in statische druk vóór en na het meetorgaan
  - Q = volumestroom
  - α = doorstromingsgetal (dimensieloos getal)
  - ϵ = expansiegetal (dimensieloos getal; ϵ = 1 voor vloeistoffen)

- enkel voorkomend in het TS :

  $\dot{G}_n$ = normgewichtsstroom = $Q \cdot \gamma_n$

  g_n = normversnelling = 9,806 65 m/s^2

  γ_n = soortelijk normgewicht

  F_o = oppervlakte van de doorstroomopening in het meetorgaan

- enkel voorkomend in het SI :

  q_v = volumestroom (dikwijls ook aangeduid met Q, vroeger ook met $\dot{V}$)

  q_m = massastroom (vroeger ook aangeduid met $\dot{m}$) = $q_v \cdot \rho$

  ρ = soortelijke massa

  A_d = oppervlakte van de doorstroomopening in het meetorgaan (de index d duidt op de diameter van de doorstroomopening)

b. Doorstromende hoeveelheden

De doorstromende hoeveelheid wordt gegeven door :

- in het TS :

  normgewichtsstroom :

$$\dot{G}_n = \alpha \cdot \epsilon \cdot F_o \cdot \sqrt{2\, g_n \cdot \gamma_n \cdot \Delta p} \qquad \left(\text{TS-eenheid : } \frac{\text{kgf}}{\text{s}}\right)$$

  met als gebruikelijke schrijfwijze :

$$\dot{G} = \alpha \cdot \epsilon \cdot F_o \cdot \sqrt{2\, g \cdot \gamma \cdot \Delta p}$$

  volumestroom :

$$Q = \frac{\dot{G}_n}{\gamma_n} = \frac{\alpha \cdot \epsilon \cdot F_o \cdot \sqrt{2\, g_n \cdot \gamma_n \cdot \Delta p}}{\gamma_n} = \alpha \cdot \epsilon \cdot F_o \cdot \sqrt{\frac{2\, g_n \cdot \Delta p}{\gamma_n}}$$

$$\left(\text{TS-eenheid : } \frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)$$

  met als gebruikelijke schrijfwijze :

$$Q = \frac{\dot{G}}{\gamma} = \alpha \cdot \epsilon \cdot F_o \cdot \sqrt{\frac{2\, g \cdot \Delta p}{\gamma}}$$

- in het SI :

  massastroom :

$$q_m = \alpha \cdot \epsilon \cdot A_d \cdot \sqrt{2\, \rho \cdot \Delta p} \qquad \left(\text{SI-eenheid : } \frac{\text{kg}}{\text{s}}\right)$$

  volumestroom :

$$q_v = \frac{q_m}{\rho} = \frac{\alpha \cdot \epsilon \cdot A_d \cdot \sqrt{2\, \rho \cdot \Delta p}}{\rho} = \alpha \cdot \epsilon \cdot A_d \cdot \sqrt{\frac{2\, \Delta p}{\rho}}$$

$$\left(\text{SI-eenheid : } \frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)$$

Om van beide algemene groothedenvergelijkingen in TS-notatie over te gaan naar de overeenkomstige algemene groothedenvergelijkingen in SI-notatie, vervangt men :

$\dot{G}_n$ door $q_m \cdot g_n$ $\qquad$ γ_n door $\rho \cdot g_n$ $\qquad$ F_o door A_d

eventueel Q door q_v (*Q* mag ook behouden blijven)

Aldus bekomt men :

$$\dot{G} = \alpha \cdot \epsilon \cdot F_o \cdot \sqrt{2 g \cdot \gamma \cdot \Delta p} \qquad \text{(TS gebruikelijk)}$$

$$\dot{G}_n = \alpha \cdot \epsilon \cdot F_o \cdot \sqrt{2 g_n \cdot \gamma_n \cdot \Delta p} \qquad \text{(TS korrekt)}$$

$$q_m \cdot g_n = \alpha \cdot \epsilon \cdot A_d \cdot \sqrt{2 g_n \cdot \rho \cdot g_n \cdot \Delta p}$$

$$q_m = \alpha \cdot \epsilon \cdot A_d \cdot \sqrt{2 \rho \cdot \Delta p} \qquad \text{(SI)}$$

$$Q = \alpha \cdot \epsilon \cdot F_o \cdot \sqrt{\frac{2 g \cdot \Delta p}{\gamma}} \qquad \text{(TS gebruikelijk)}$$

$$Q = \alpha \cdot \epsilon \cdot F_o \cdot \sqrt{\frac{2 g_n \cdot \Delta p}{\gamma_n}} \qquad \text{(TS korrekt)}$$

$$q_v = \alpha \cdot \epsilon \cdot A_d \cdot \sqrt{\frac{2 g_n \cdot \Delta p}{\rho \cdot g_n}}$$

$$q_v = \alpha \cdot \epsilon \cdot A_d \cdot \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}} \qquad \text{(SI)}$$

Voorbeeld :

Berekend de doorstromende hoeveelheid water $\left(\epsilon = 1;\ \gamma_n = 1000\ \frac{kgf}{m^3};\ \rho = 1000\ \frac{kg}{m^3}\right)$ aan de hand van volgende gegevens :

- meetflens met $F_o = A_d = 0{,}001\ 963\ m^2$
  $= 1963\ mm^2$ ($d = 50$ mm)
  $\alpha = 0{,}66$
- gemeten drukverschil : $\Delta p = 12\ 000$ Pa
  $= 1223{,}659\ 456\ \frac{kgf}{m^2}$

Men bekomt :

- in het TS :

$$\dot{G}_n = \alpha \cdot \epsilon \cdot F_o \cdot \sqrt{2\, g_n \cdot \gamma_n \cdot \Delta p}$$

$$= 0{,}66 \times 1 \times 0{,}001\ 963\ m^2 \cdot \sqrt{2 \times 9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2} \times 1000\ \frac{kgf}{m^3} \times 1223{,}659\ 456\ \frac{kgf}{m^2}}$$

$$= 6{,}347\ 019\ 842\ \frac{kgf}{s}$$

$$= 22\ 849\ \frac{kgf}{h}$$

$$Q = \alpha \cdot \epsilon \cdot F_o \cdot \sqrt{\frac{2\, g_n \cdot \Delta p}{\gamma_n}}$$

$$= 0{,}66 \times 1 \times 0{,}001\ 963\ m^2 \cdot \sqrt{\frac{2 \times 9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2} \times 1223{,}659\ 456\ \frac{kgf}{m^2}}{1000\ \frac{kgf}{m^3}}}$$

$$= 0{,}006\ 347\ 019\ 842\ \frac{m^3}{s}$$

$$= 22{,}849\ \frac{m^3}{h}$$

- in het SI :

$$q_m = \alpha \cdot \epsilon \cdot A_d \cdot \sqrt{2\, \rho \cdot \Delta p}$$

$$= 0{,}66 \times 1 \times 0{,}001\ 963\ m^2 \cdot \sqrt{2 \times \frac{1000\ kg}{m^3} \times 12\ 000\ \frac{N}{m^2}}$$

$$= 6{,}347\ 019\ 842\ \frac{kg}{s}$$

$$= 22\ 849\ \frac{kg}{h}$$

$$q_v = \alpha \cdot \epsilon \cdot A_d \cdot \sqrt{\frac{2\, \Delta p}{\rho}}$$

$$= 0{,}66 \times 1 \times 0{,}001\ 963\ m^2 \cdot \sqrt{\frac{2 \times 12\ 000\ \frac{N}{m^2}}{\frac{1000\ kg}{m^3}}}$$

$$= 0{,}006\ 347\ 019\ 842\ \frac{m^3}{s}$$

$$= 22{,}849\ \frac{m^3}{h}$$

2.3.9. Wet van Bernoulli (1700 - 1782)

a. Aangewende grootheden en symbolen

- voorkomend zowel in het TS als in het SI :
  - h = plaatshoogte (geodetische hoogte) = hoogte boven een willekeurig gekozen (horizontaal) referentievlak
  - p = (absolute) statische druk (dikwijls ook voorgesteld door het symbool p_{st})
  - p_d = dynamische druk, stuwdruk
  - w = snelheid van de vloeistof
  - g = plaatselijke versnelling van de zwaartekracht (plaatselijke zwaartevaldsterkte)
  - h_v = verlieshoogte (verlies aan energiehoogte), te wijten aan de wrijving zowel tussen de vloeistofdeeltjes onderling als tussen de vloeistofdeeltjes en de wand
- enkel voorkomend in het TS :
  - G_n = normgewicht
  - γ_n = soortelijk normgewicht
  - g_n = normversnelling = 9,806 65 m/s^2
- enkel voorkomend in het SI :
  - m = massa
  - ρ = soortelijke massa (volumieke massa)

b. Eenheden

Hoewel een groothedenvergelijking geen verplichte eenheden oplegt, zal hierna eenvoudigheidshalve bij iedere groothedenvergelijking de eenheid worden opgegeven waarin elke term van de groothedenvergelijking wordt uitgedrukt indien men gebruik maakt van de grondeenheden en van de ervan afgeleide koherente eenheden, en dit respektievelijk voor het TS en het SI.

c. Uitdrukkingsvormen van de wet van Bernoulli

De betrokken wet zal hierna onder verschillende, al dan niet gebruikelijke vormen worden voorgesteld.

Uitdrukkingsvormen in het TS van de wet van Bernoulli :

- in aanmerking genomen een hoeveelheid vloeistof met normgewicht G_n of werkelijk gewicht $\frac{G_n}{g_n} \cdot g$:

$$\frac{G_n}{g_n} \cdot g \cdot h_1 + \frac{G_n}{\gamma_n} \cdot p_1 + \frac{G_n}{g_n} \cdot \frac{w_1^2}{2}$$

$$= \frac{G_n}{g_n} \cdot g \cdot h_2 + \frac{G_n}{\gamma_n} \cdot p_2 + \frac{G_n}{g_n} \cdot \frac{w_2^2}{2} + \frac{G_n}{g_n} \cdot g \cdot h_v \qquad \text{(XIV,1,TS)}$$

Gebruikelijke schrijfwijze :

$$G \cdot h_1 + \frac{G}{\gamma} \cdot p_1 + \frac{G \cdot w_1^2}{2\,g} = G \cdot h_2 + \frac{G}{\gamma} \cdot p_2 + \frac{G \cdot w_2^2}{2\,g} + G \cdot h_v$$

(XIV, 1', TS)

Term-eenheid : kgf . m = eenheid van energie

Bemerk dat de term $\frac{G_n}{\gamma_n} \cdot p$ gelijk is aan $p \cdot V$

- betrokken op het normgewicht (vergelijking (XIV, 1, TS), waarvan iedere term gedeeld wordt door het normgewicht G_n) :

$$\left(\frac{g}{g_n} \cdot h_1\right)^{\star} + \left(\frac{p_1}{\gamma_n}\right)^{\star} + \left(\frac{w_1^2}{2\,g_n}\right)^{\star}$$

$$= \left(\frac{g}{g_n} \cdot h_2\right)^{\star} + \left(\frac{p_2}{\gamma_n}\right)^{\star} + \left(\frac{w_2^2}{2\,g_n}\right)^{\star} + \left(\frac{g}{g_n} \cdot h_v\right)^{\star} \qquad \text{(XIV, 2, TS)}$$

Elke term wordt hier tussen haakjes geplaatst omdat het sterretje * betrekking heeft op gans de term.

Gebruikelijke schrijfwijze :

$$h_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{w_1^2}{2\,g} = h_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{w_2^2}{2\,g} + h_v \qquad \text{(XIV, 2', TS)}$$

Term-eenheid : $\frac{\text{kgf . m}}{\text{kgf}}$ = (m) = eenheid van $\frac{\text{energie}}{\text{normgewicht}}$

Bemerk dat de term $\frac{p}{\gamma_n}$ gelijk is aan $p \cdot v^{\star}$

De eenheid m laat hier niet vermoeden dat elke term een grootheid is van de vorm $y^{\star} = \frac{Y}{G_n}$, en wordt tussen haakjes geplaatst omdat het aangewezen is om $\frac{\text{kgf . m}}{\text{kgf}}$ als eenheid te behouden (anders gaat de betekenis "energie per normgewicht" verloren).

- betrokken op het werkelijk gewicht (vergelijking (XIV, 1, TS) waarvan iedere term gedeeld wordt door het werkelijk gewicht $\frac{G_n}{g_n} \cdot g$) :

$$h_1 + \frac{p_1}{\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g} + \frac{w_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g} + \frac{w_2^2}{2g} + h_v \qquad \text{(XIV, 3, TS)}$$

Gebruikelijke schrijfwijze :

$$h_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{w_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{w_2^2}{2g} + h_v \qquad \text{(XIV,3', TS)}$$

Term-eenheid : $\frac{\text{kgf . m}}{\text{kgf}} = \text{m} =$ eenheid van $\frac{\text{energie}}{\text{werkelijk gewicht}}$

= eenheid van hoogte

Bemerk dat de term $\frac{p}{\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g}$ gelijk is aan $p \cdot \frac{g_n}{g} \cdot v$☆

De verschillende termen die voorkomen in de vergelijking (XIV, 3, TS) zijn grafisch voorgesteld in figuur XIV.1.

- betrokken op het volume (vergelijking (XIV, 1, TS) waarvan iedere term gedeeld wordt door het volume V) :

$$\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h_1 + p_1 + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w_1^2}{2} = \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h_2 + p_2 + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w_2^2}{2} + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h_v$$

(XIV, 4, TS)

Gebruikelijke schrijfwijze :

$$\gamma \cdot h_1 + p_1 + \frac{\gamma \cdot w_1^2}{2g} = \gamma \cdot h_2 + p_2 + \frac{\gamma \cdot w_2^2}{2g} + \gamma \cdot h_v \qquad \text{(XIV, 4', TS)}$$

Term-eenheid : $\frac{\text{kgf . m}}{\text{m}^3} = \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} =$ eenheid van $\frac{\text{energie}}{\text{volume}}$

= eenheid van druk

Opmerking : Uitdrukking (XIV, 2', TS) ziet er precies uit als uitdrukking (XIV, 3', TS) hoewel de uitdrukkingen waarvan ze de vereenvoudigde weergave zijn, namelijk (XIV, 2, TS) en (XIV, 3, TS), helemaal niet aan elkaar gelijk zijn.

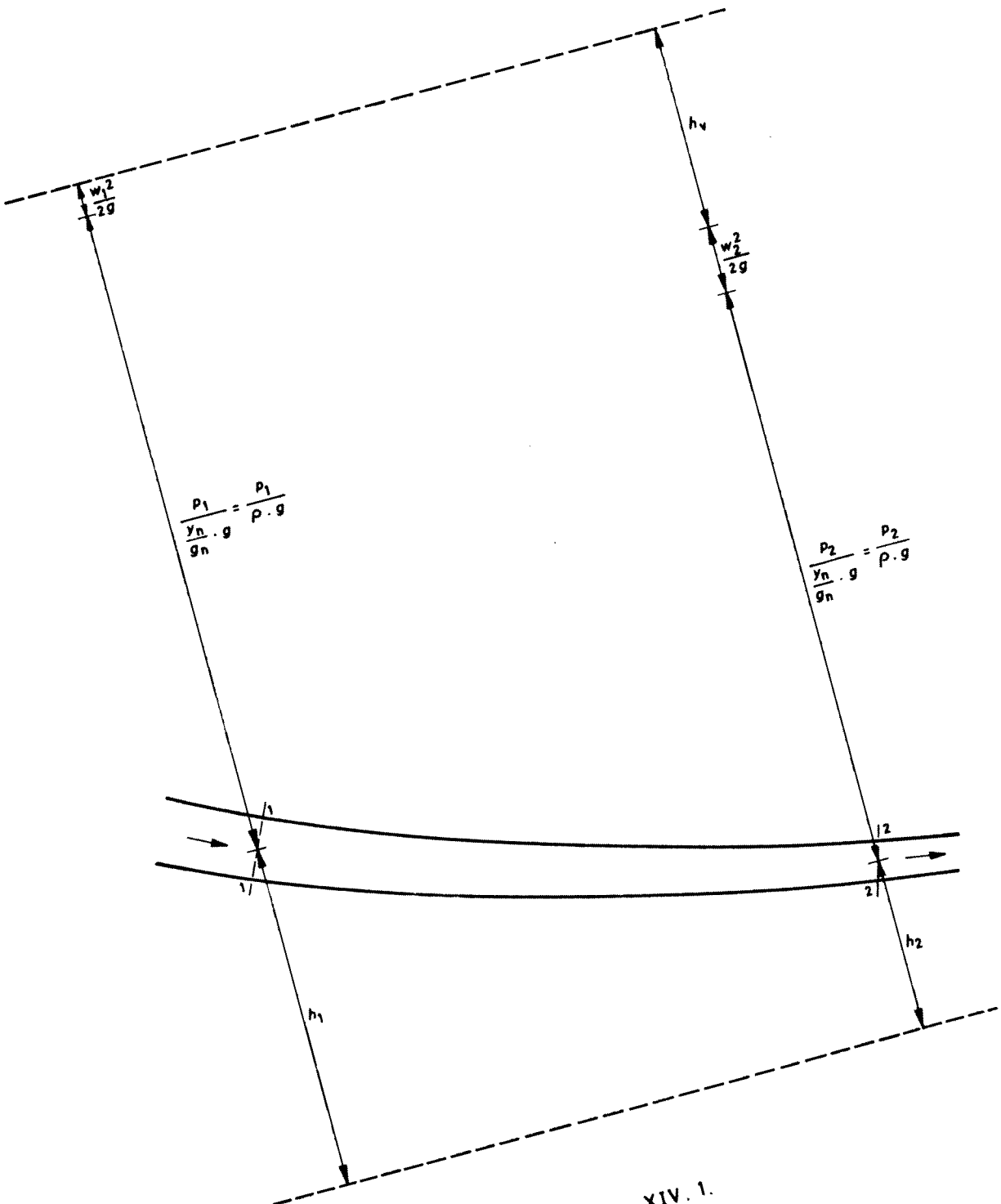

$\frac{w_1^2}{2g}$
h_v
$\frac{w_2^2}{2g}$
$\frac{p_1}{\frac{y_n}{g_n} \cdot g} = \frac{p_1}{\rho \cdot g}$
$\frac{p_2}{\frac{y_n}{g_n} \cdot g} = \frac{p_2}{\rho \cdot g}$
1
1/
2
2/
h_1
h_2

FIG. XIV. 1.

Uitdrukkingsvormen in het SI van de wet van Bernoulli :

- in aanmerking genomen een hoeveelheid vloeistof met massa m :

$$m \cdot g \cdot h_1 + \frac{m}{\rho} \cdot p_1 + \frac{m \cdot w_1^2}{2} = m \cdot g \cdot h_2 + \frac{m}{\rho} \cdot p_2 + \frac{m \cdot w_2^2}{2} + m \cdot g \cdot h_v \qquad \text{(XIV, 1, SI)}$$

Term-eenheid : J = eenheid van energie

Bemerk dat de term $\frac{m}{\rho} \cdot p$ gelijk is aan $p \cdot V$

- betrokken op de massa (vergelijking (XIV, 1, SI), waarvan iedere term gedeeld wordt door de massa m) :

$$g \cdot h_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{w_1^2}{2} = g \cdot h_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{w_2^2}{2} + g \cdot h_v \qquad \text{(XIV, 2, SI)}$$

Term-eenheid : $\frac{J}{kg} = \frac{N \cdot m}{kg} = \frac{m^2}{s^2}$ = eenheid van $\frac{\text{energie}}{\text{massa}}$

Bemerk dat de term $\frac{p}{\rho}$ gelijk is aan $p \cdot v$

- betrokken op het werkelijk gewicht (vergelijking (XIV, 1, SI), waarvan iedere term gedeeld wordt door het werkelijk gewicht $m \cdot g$) :

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{w_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{w_2^2}{2g} + h_v \qquad \text{(XIV, 3, SI)}$$

Term-eenheid : $\frac{J}{N} = \frac{N \cdot m}{N} = m$ = eenheid van $\frac{\text{energie}}{\text{werkelijk gewicht}}$

= eenheid van hoogte

Bemerk dat de term $\frac{p}{\rho \cdot g}$ gelijk is aan $\frac{p \cdot v}{g}$

De verschillende termen die voorkomen in de vergelijking (XIV, 3, SI) zijn grafisch voorgesteld in figuur XIV.1.

- betrokken op het volume (vergelijking (XIV, 1, SI), waarvan iedere term gedeeld wordt door het volume V) :

$$\rho \cdot g \cdot h_1 + p_1 + \frac{\rho \cdot w_1^2}{2} = \rho \cdot g \cdot h_2 + p_2 + \frac{\rho \cdot w_2^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h_v \qquad \text{(XIV, 4, SI)}$$

Term-eenheid : $\frac{J}{m^3} = \frac{N \cdot m}{m^3} = \frac{N}{m^2} = Pa$ = eenheid van $\frac{\text{energie}}{\text{volume}}$

= eenheid van druk

d. Overgang van TS-notatie naar SI-notatie

De betrokken overgang gebeurt volgens de richtlijnen uiteengezet in onderhavig hoofdstuk onder 2.2. en biedt geen enkele moeilijkheid, uitge-

nomen eventueel wat betreft de overgang van (XIV, 2, TS) naar (XIV, 2, SI). Hierna wordt nader ingegaan op laatstgenoemde overgang.

Een eerste wijze waarop dit kan gebeuren is als volgt :

$$\left(\frac{g}{g_n} \cdot h_1\right)^{\star} + \left(\frac{p_1}{\gamma_n}\right)^{\star} + \left(\frac{w_1^2}{2\,g_n}\right)^{\star}$$

$$= \left(\frac{g}{g_n} \cdot h_2\right)^{\star} + \left(\frac{p_2}{\gamma_n}\right)^{\star} + \left(\frac{w_2^2}{2\,g_n}\right)^{\star} + \left(\frac{g}{g_n} \cdot h_v\right)^{\star} \qquad \text{(TS)}$$

Wanneer γ_n vervangen wordt door $\rho \cdot g_n$, kan de grootheid g_n worden geëlimineerd en bekomt men de vergelijking in SI-notatie :

$$g \cdot h_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{w_1^2}{2} = g \cdot h_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{w_2^2}{2} + g \cdot h_v \qquad \text{(SI)}$$

Elke term kan uiteraard ook zelf rechtstreeks van TS-notatie in SI-notatie worden omgezet; iedere term is immers een grootheid van de vorm $y^{\star} = \frac{Y}{G_n}$. Aldus bekomt men :

$$g_n \cdot \left(\frac{g}{g_n} \cdot h_1\right)^{\star} = g \cdot h_1$$

$$g_n \cdot \left(\frac{p_1}{\gamma_n}\right)^{\star} = g_n \cdot \left(\frac{p_1}{\rho \cdot g_n}\right)^{\star} = \frac{p_1}{\rho}$$

$$g_n \cdot \left(\frac{w_1^2}{2\,g_n}\right)^{\star} = \frac{w_1^2}{2}$$

$$g_n \cdot \left(\frac{g}{g_n} \cdot h_v\right)^{\star} = g \cdot h_v$$

Vergelijking (XIV, 2, TS) kan ook als volgt weergegeven worden :

$$\frac{\frac{G_n}{g_n} \cdot g \cdot h_1}{G_n} + \frac{V \cdot p_1}{G_n} + \frac{\frac{G_n}{g_n} \cdot \frac{w_1^2}{2}}{G_n}$$

$$= \frac{\frac{G_n}{g_n} \cdot g \cdot h_2}{G_n} + \frac{V \cdot p_2}{G_n} + \frac{\frac{G_n}{g_n} \cdot \frac{w_2^2}{2}}{G_n} + \frac{\frac{G_n}{g_n} \cdot g \cdot h_v}{G_n}$$

Het normgewicht G_n in de noemer wordt hier aangewend om een hoeveelheid aan te duiden; in het SI daarentegen zal men beroep doen op de massa m om een hoeveelheid aan te duiden. Waar G_n in de teller voorkomt, is het steeds als $\frac{G_n}{g_n}$, met $\frac{G_n}{g_n}$ = massa (in het SI wordt de massa voorgesteld door m).

e. Benamingen van de grootheden voorgesteld door de termen van de vergelijkingen (XIV, 1, TS) en (XIV, 1, SI), (XIV, 3, TS) en (XIV, 3, SI), (XIV, 4, TS) en (XIV, 4, SI)

Wat betreft de algemene groothedenvergelijkingen (XIV, 1, TS) en (XIV, 1, SI), stellen de voorkomende termen volgende grootheden voor :

- potentiële energie van plaats (arbeidsvermogen van plaats) :

$$\frac{G_n}{g_n} \cdot g \cdot h \qquad \text{(TS)}$$

$$m \cdot g \cdot h \qquad \text{(SI)}$$

- potentiële drukenergie :

$$\frac{G_n}{\gamma_n} \cdot p = p \cdot V \qquad \text{(TS)}$$

$$\frac{m}{\rho} \cdot p = p \cdot V \qquad \text{(SI)}$$

- kinetische energie (arbeidsvermogen van beweging) :

$$\frac{G_n}{g_n} \cdot \frac{w^2}{2} \qquad \text{(TS)}$$

$$\frac{m \cdot w^2}{2} \qquad \text{(SI)}$$

- totale stromingsenergie = potentiële energie van plaats + potentiële drukenergie + kinetische energie :

$$\frac{G_n}{g_n} \cdot g \cdot h + \frac{G_n}{\gamma_n} \cdot p + \frac{G_n}{g_n} \cdot \frac{w^2}{2} \qquad \text{(TS)}$$

$$m \cdot g \cdot h + \frac{m}{\rho} \cdot p + \frac{m \cdot w^2}{2} \qquad \text{(SI)}$$

- stromingsenergie-verlies tussen de doorsneden 1 en 2 (te wijten aan de wrijving) :

$$\frac{G_n}{g_n} \cdot g \cdot h_v = \frac{G_n}{g_n} \cdot g \cdot (h_1 - h_2) + \frac{G_n}{\gamma_n} \cdot (p_1 - p_2) + \frac{G_n}{g_n} \cdot \frac{w_1^2 - w_2^2}{2} \qquad \text{(TS)}$$

$$m \cdot g \cdot h_v = m \cdot g \cdot (h_1 - h_2) + \frac{m}{\rho}(p_1 - p_2) + \frac{m \cdot (w_1^2 - w_2^2)}{2} \qquad \text{(SI)}$$

Wat betreft de algemene groothedenvergelijkingen (XIV, 3, TS) en (XIV, 3, SI) (betrokken op het werkelijk gewicht), stellen de voorkomende termen volgende grootheden voor :

- plaatshoogte (geodetische hoogte) = hoogte boven een willekeurig gekozen referentievlak :

$$h \qquad \text{(TS en SI)}$$

- drukhoogte :

$$\frac{p}{\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g} \qquad \text{(TS)}$$

$$\frac{p}{\rho \cdot g} \qquad \text{(SI)}$$

- snelheidshoogte :

$$\frac{w^2}{2g} \qquad \text{(TS)}$$

$$\frac{w^2}{2g} \qquad \text{(SI)}$$

- energiehoogte H = plaatshoogte + drukhoogte + snelheidshoogte :

$$h + \frac{p}{\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g} + \frac{w^2}{2g} \qquad \text{(TS)}$$

$$h + \frac{p}{\rho \cdot g} + \frac{w^2}{2g} \qquad \text{(SI)}$$

- verlies aan energiehoogte tussen de doorsneden 1 en 2, ook verlieshoogte genoemd (te wijten aan de wrijving) :

$$h_v = h_1 - h_2 + \frac{p_1 - p_2}{\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g} + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2g} \qquad \text{(TS)}$$

$$h_v = h_1 - h_2 + \frac{p_1 - p_2}{\rho \cdot g} + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2g} \qquad \text{(SI)}$$

Wat betreft de algemene groothedenvergelijkingen (XIV, 4, TS) en (XIV, 4, SI) (betrokken op het volume), stellen de voorkomende termen volgende grootheden voor :

- hoogtedruk (met h = hoogte boven een willekeurig referentievlak) :

$$\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h \qquad \text{(TS)}$$

$$\rho \cdot g \cdot h \qquad \text{(SI)}$$

- (absolute) statische druk :

$$p \quad (\text{of } p_{st}) \qquad \text{(TS en SI)}$$

- dynamische druk, stuwdruk

$$p_d = \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w^2}{2} \qquad \text{(TS)}$$

$$p_d = \frac{\rho \cdot w^2}{2} \qquad \text{(SI)}$$

- stromingsenergie per volume = hoogtedruk + statische druk + dynamische druk :

$$\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h + p + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w^2}{2} \qquad \text{(TS)}$$

$$\rho \cdot g \cdot h + p + \frac{\rho \cdot w^2}{2} \qquad \text{(SI)}$$

- stromingsenergie-verlies per volume tussen de doorsneden 1 en 2 (verlies aan "hoogtedruk + statische druk + dynamische druk"), ook verliesdruk genoemd (te wijten aan de wrijving) :

$$\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h_v = \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot (h_1 - h_2) + (p_1 - p_2) + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w_1^2 - w_2^2}{2} \qquad \text{(TS)}$$

$$\rho \cdot g \cdot h_v = \rho \cdot g \cdot (h_1 - h_2) + (p_1 - p_2) + \frac{\rho \cdot (w_1^2 - w_2^2)}{2} \qquad \text{(SI)}$$

- totale druk : de som van de statische druk en de dynamische druk wordt meestal de "totale druk" genoemd.
  De hoogtedruk is dus niet begrepen in de aldus gedefinieerde totale druk. Derhalve geldt :

TS : $p_{tot} = p_{st} + p_d$

$= p_{st} + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w^2}{2}$ (TS-eenheid : $\frac{kgf}{m^2}$)

SI : $p_{tot} = p_{st} + p_d$

$= p_{st} + \frac{\rho \cdot w^2}{2}$ (SI-eenheid : $\frac{N}{m^2}$ = Pa)

Wanneer de aldus gedefinieerde totale druk in doorsnede 1 voorgesteld wordt door $p_{tot,1}$ en in doorsnede 2 door $p_{tot,2}$, geldt :

TS : $\text{verliesdruk} = \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h_v = p_{tot,1} - p_{tot,2} + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot (h_1 - h_2)$

SI : $\text{verliesdruk} = \rho \cdot g \cdot h_v = p_{tot,1} - p_{tot,2} + \rho \cdot g \cdot (h_1 - h_2)$

Bij snelheidsberekeningen uit drukmetingen met de Pitot-buis of Prandtl-buis, wordt dikwijls gebruik gemaakt van volgende uitdrukkingen (met p_a = heersende atmosferische druk en p_{st} = absolute statische druk) :

TS : $\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w^2}{2} = p_{tot} - p_{st} = (p_{tot} - p_a) - (p_{st} - p_a)$

SI : $\frac{\rho \cdot w^2}{2} = p_{tot} - p_{st} = (p_{tot} - p_a) - (p_{st} - p_a)$

f. Voorbeelden

Voorbeeld 1

Gegeven in verband met een transportleiding die zich bevindt op aarde aan de evenaar (g = 9,780 318 m/s^2) met water als doorstromende vloeistof (met γ_n = 1000 kgf/m^3 en ρ = 1000 kg/m^3) :

h_1 = 100 m

p_1 = 3,5 $\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ = 35 000 $\frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$ = 343 232,75 Pa

w_1 = 2 m/s

h_2 = 80 m

p_2 = 4 $\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ = 40 000 $\frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$ = 392 266 Pa

w_2 = 1 m/s

Te berekenen : de waarde van elke term van de vergelijkingen (XIV, 2, TS), (XIV, 3, TS), (XIV, 4, TS), (XIV, 2, SI), (XIV, 3, SI), (XIV, 4, SI).
Eerst worden de termen uitgerekend die het stromingsverlies karakteriseren, namelijk :

$\left(\frac{g}{g_n} \cdot h_v\right)^{\star}$ uit (XIV, 2, TS) $\qquad$ $g \cdot h_v$ uit (XIV, 2, SI)

h_v uit (XIV, 3, TS) $\qquad$ h_v uit (XIV, 3, SI)

$\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h_v$ uit (XIV, 4, TS) $\rho \cdot g \cdot h_v$ uit (XIV, 4, SI)

Men bekomt in het TS :

$$\left(\frac{g}{g_n} \cdot h_v\right)^{\star} = \left(\frac{g}{g_n} \cdot h_1 - \frac{g}{g_n} \cdot h_2\right)^{\star} + \left(\frac{p_1 - p_2}{\gamma_n}\right)^{\star} + \left(\frac{w_1^2 - w_2^2}{2\, g_n}\right)^{\star}$$

$$= 9{,}973\ 149\ \frac{\text{kgf . m}}{\text{kgf}} - 5\ \frac{\text{kgf . m}}{\text{kgf}} + 0{,}152\ 957\ \frac{\text{kgf . m}}{\text{kgf}}$$

$$= 5{,}126\ 106\ \frac{\text{kgf . m}}{\text{kgf}}$$

$$= \frac{\text{stromingsenergie-verlies}}{\text{normgewicht}} \qquad \left(\text{TS-eenheid : } \frac{\text{kgf . m}}{\text{kgf}}\right)$$

$$h_v = h_1 - h_2 + \frac{p_1 - p_2}{\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g} + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2}$$

$$= 10\ \text{m} - 5{,}013\ 461\ 73\ \text{m} + 0{,}153\ 369\ 246\ \text{m} = 5{,}139\ 907\ 516\ \text{m}$$

$$= \frac{\text{stromingsenergie-verlies}}{\text{werkelijk gewicht}} \qquad \left(\text{TS-eenheid : } \frac{\text{kgf . m}}{\text{kgf}} = \text{m}\right)$$

$$\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h_v = \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot (h_1 - h_2) + p_1 - p_2 + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w_1^2 - w_2^2}{2}$$

$$= 9973{,}149\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} - 5000\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} + 152{,}957\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

$$= 5126{,}106\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

$$= \frac{\text{stromingsenergie-verlies}}{\text{volume}} \qquad \left(\text{TS-eenheid : } \frac{\text{kgf . m}}{\text{m}^3} = \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}\right)$$

Men bekomt in het SI :

$$g \cdot h_v = g \cdot (h_1 - h_2) + \frac{p_1 - p_2}{\rho} + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2}$$

$$= 97{,}803\ 180\ \frac{\text{J}}{\text{kg}} - 49{,}033\ 25\ \frac{\text{J}}{\text{kg}} + 1{,}5\ \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 50{,}269\ 93\ \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$= \frac{\text{stromingsenergie-verlies}}{\text{massa}} \qquad \left(\text{SI-eenheid : } \frac{\text{J}}{\text{kg}}\right)$$

$$h_v = h_1 - h_2 + \frac{p_1 - p_2}{\rho \cdot g} + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2\, g}$$

$$= 10\ \text{m} - 5{,}013\ 461\ 73\ \text{m} + 0{,}153\ 369\ 246\ \text{m} = 5{,}139\ 907\ 516\ \text{m}$$

$$= \frac{\text{stromingsenergie-verlies}}{\text{werkelijk gewicht}} \qquad \left(\text{SI-eenheid : } \frac{\text{J}}{\text{N}} = \frac{\text{N . m}}{\text{N}} = \text{m}\right)$$

$$\rho \cdot g \cdot h_v = \rho \cdot g \cdot (h_1 - h_2) + p_1 - p_2 + \frac{\rho \cdot (w_1^2 - w_2^2)}{2}$$

$$= 97\,803{,}18 \text{ Pa} - 49\,033{,}25 \text{ Pa} + 1500 \text{ Pa} = 50\,269{,}93 \text{ Pa}$$

$$= \frac{\text{stromingsenergie-verlies}}{\text{volume}} \quad \left(\text{SI-eenheid} : \frac{J}{m^3} = \frac{N \cdot m}{m^3} = \frac{N}{m^2} = \text{Pa}\right)$$

Indien in de algemene groothedenvergelijkingen (XIV, 2, TS), (XIV, 3, TS), (XIV, 4, TS) en (XIV, 2, SI), (XIV, 3, SI), (XIV, 4, SI) alle grootheden worden vervangen door de gekende waarden uit dit voorbeeld, bekomt men :

- volgens (XIV, 2, TS) :

$$99{,}731\,488 \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{kgf}} + 35 \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{kgf}} + 0{,}203\,943 \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{kgf}}$$

$$= 89{,}758\,339 \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{kgf}} + 40 \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{kgf}} + 0{,}050\,986 \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{kgf}} + 5{,}126\,106 \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{kgf}}$$

De som van elke veelterm is gelijk aan $134{,}935\,431 \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{kgf}}$

- volgens (XIV, 3, TS) :

$$100 \text{ m} + 35{,}094\,232 \text{ m} + 0{,}204\,492 \text{ m}$$

$$= 90 \text{ m} + 40{,}107\,694 \text{ m} + 0{,}051\,123 \text{ m} + 5{,}139\,907 \text{ m}$$

De som van elke veelterm is gelijk aan 135,298 724 m

- volgens (XIV, 4, TS) :

$$99\,731{,}488 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} + 35\,000 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} + 203{,}943 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

$$= 89\,758{,}339 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} + 40\,000 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} + 50{,}986 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} + 5126{,}106 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

De som van elke veelter is gelijk aan $134\,935{,}431 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$

- volgens (XIV, 2, SI) :

$$978{,}0318 \frac{J}{kg} + 343{,}232\,75 \frac{J}{kg} + 2 \frac{J}{kg}$$

$$= 880{,}228\,62 \frac{J}{kg} + 392{,}26\text{6} \frac{J}{kg} + 0{,}5 \frac{J}{kg} + 50{,}269\,93 \frac{J}{kg}$$

De som van elke veelterm is gelijk aan $1323{,}264\,55 \frac{J}{kg}$

- volgens (XIV, 3, SI) :

$$100 \text{ m} + 35{,}094\,232 \text{ m} + 0{,}204\,492 \text{ m}$$

$$= 90 \text{ m} + 40{,}107\,694 \text{ m} + 0{,}051\,123 \text{ m} + 5{,}139\,907 \text{ m}$$

De som van elke veelterm is gelijk aan 135,298 724 m

- volgens (XIV, 4, SI) :

978 031,8 Pa + 343 232,75 Pa + 2000 Pa

= 880 228,62 Pa + 392 266 Pa + 500 Pa + 50 269,93 Pa

De som van elke veelterm is gelijk aan 1 323 264,55 Pa

Voorbeeld 2

Bereken de waarde van elke term van de vergelijkingen (XIV, 2, TS), (XIV, 3, TS), (XIV, 4, TS), (XIV, 2, SI), (XIV, 3, SI) (XIV, 4, SI) in het geval van een identieke transportleiding (dus ook zelfde h_1 en h_2) op de maan (g = 1,62 m/s^2), met een zelfde debiet water (en dus ook dezelfde snelheden w_1 en w_2), echter met dien verstande dat enkel p_1 gegeven is (zelfde waarde als in voorbeeld 1) en dat p_2 moet berekend worden.

Het verlies aan stromingsenergie tengevolge van de wrijving is niet afhankelijk van de plaatselijke versnelling van de zwaartekracht (plaatselijke zwaarteveldsterkte). Indien zich op de maan een identieke transportleiding bevindt waardoor een even groot debiet water gestuurd wordt, zal het verlies aan stromingsenergie tussen doorsnede 1 en doorsnede 2 even groot zijn als in voorbeeld 1. Ook het stromingsenergie-verlies per normgewicht (TS) en per massa (SI), alsook het stromingsenergie-verlies per volume (TS en SI) behouden dezelfde waarden :

TS : - stromingsenergie-verlies per normgewicht :

$$\left(\frac{g}{g_n} \cdot h_v\right)^{\star} = 5{,}126\ 106\ \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{kgf}}$$

- stromingsenergie-verlies per volume (of verliesdruk) :

$$\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h_v = 5126{,}106\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

SI : - stromingsenergie-verlies per massa :

$$g \cdot h_v = 50{,}269\ 93\ \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

- stromingsenergie-verlies per volume (of verliesdruk) :

$$\rho \cdot g \cdot h_v = 50\ 269{,}93\ \text{Pa}$$

De verlieshoogte h_v (of stromingsenergie-verlies per werkelijk gewicht) kan onmiddellijk uit elk van de vier bovenstaande uitdrukkingen

berekend worden; met behulp bijvoorbeeld van de laatste uitdrukking bekomt men :

$$h_v = \frac{50\ 269{,}93\ \text{Pa}}{\rho \cdot g} = \frac{50\ 269{,}93\ \text{Pa}}{1000\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1{,}62\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 31{,}030\ 820\ 99\ \text{m}$$

Het stromingsenergie-verlies per werkelijk gewicht (of verlieshoogte) op de maan is in dezelfde mate groter dan de verlieshoogte op de aarde (zie voorbeeld 1) als g op de aarde (in ons voorbeeld : aan de evenaar) groter is dan g op de maan :

$$h_v = 5{,}139\ 907\ 516\ \text{m} \cdot \frac{9{,}780\ 318\ \text{m/s}^2}{1{,}62\ \text{m/s}^2} = 31{,}030\ 820\ 99\ \text{m}$$

Het drukverschil $p_1 - p_2$ zal een andere waarde hebben dan in voorbeeld 1; vooraleer de druk p_2 te kunnen berekenen dient eerst het drukverschil $p_1 - p_2$ berekend te worden.
In het TS vindt men met behulp van vergelijking (XIV, 4, TS) :

$$p_1 - p_2 = \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot (h_2 - h_1) + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h_v$$

$$= -\ 1651{,}940\ 265\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} - 152{,}957\ 432\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} + 5126{,}106\ 265\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

$$= 3321{,}208\ 568\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} \qquad \left(\text{hetzij } 0{,}332\ 121\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}\right)$$

In het SI vindt men met behulp van vergelijking (XIV, 4, SI) :

$$p_1 - p_2 = \rho \cdot g \cdot (h_2 - h_1) + \rho \cdot \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h_v$$

$$= -\ 16\ 200\ \text{Pa} - 1500\ \text{Pa} + 50\ 269{,}93\ \text{Pa}$$

$$= 32\ 569{,}93\ \text{Pa}$$

De waarde van p_1 is gegeven (zelfde waarde als in vorig voorbeeld) :

$$p_1 = 3{,}5\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} = 35\ 000\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} = 343\ 232{,}75\ \text{Pa}$$

Men bekomt voor p_2 :

in het TS : $p_2 = 35\ 000\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} - 3321{,}209\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} = 31\ 678{,}791\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$

$$= 3{,}5\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} - 0{,}332\ 121\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} = 3{,}167\ 879\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

in het SI : $p_2 = 343\ 232{,}75\ \text{Pa} - 32\ 569{,}93\ \text{Pa} = 310\ 662{,}82\ \text{Pa}$

Indien in de algemene groothedenvergelijkingen (XIV, 2, TS), (XIV, 3, TS), (XIV, 4, TS) en (XIV, 2, SI), (XIV, 3, SI), (XIV, 4, SI) alle grootheden worden vervangen door de gekende waarden uit dit voorbeeld, bekomt men :

- volgens (XIV, 2, TS) :

$$16{,}519\,402\ \frac{\text{kgf . m}}{\text{kgf}} + 35\ \frac{\text{kgf . m}}{\text{kgf}} + 0{,}203\,943\ \frac{\text{kgf . m}}{\text{m}}$$

$$= 14{,}867\,462\ \frac{\text{kgf . m}}{\text{kgf}} + 31{,}678\,791\ \frac{\text{kgf . m}}{\text{kgf}} + 0{,}050\,986\ \frac{\text{kgf . m}}{\text{kgf}} + 5{,}126\,106\ \frac{\text{kgf . m}}{\text{kgf}}$$

De som van elke veelterm is gelijk aan $51{,}723\,345\ \frac{\text{kgf . m}}{\text{kgf}}$

- volgens (XIV, 3, TS) :

$$100\ \text{m} + 211{,}872\,068\ \text{m} + 1{,}234\,568\ \text{m}$$

$$= 90\ \text{m} + 191{,}767\,173\ \text{m} + 0{,}308\,642\ \text{m} + 31{,}030\,821\ \text{m}$$

De som van elke veelterm is gelijk aan 313,106 636 m

- volgens (XIV, 4, TS) :

$$16\,519{,}402\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} + 35\,000\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} + 203{,}943\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

$$= 14\,867{,}462\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} + 31\,678{,}791\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} + 50{,}986\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} + 5126{,}106\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

De som van elke veelterm is gelijk aan $51\,723{,}345\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$

- volgens (XIV, 2, SI) :

$$162{,}0\ \frac{\text{J}}{\text{kg}} + 343{,}232\,75\ \frac{\text{J}}{\text{kg}} + 2\ \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$= 145{,}8\ \frac{\text{J}}{\text{kg}} + 310{,}662\,82\ \frac{\text{J}}{\text{kg}} + 0{,}5\ \frac{\text{J}}{\text{kg}} + 50{,}269\,93\ \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

De som van elke veelterm is gelijk aan $507{,}232\,75\ \frac{\text{J}}{\text{kg}}$

- volgens (XIV, 3, SI) :

$$100\ \text{m} + 211{,}872\,068\ \text{m} + 1{,}234\,568\ \text{m}$$

$$= 90\ \text{m} + 191{,}767\,173\ \text{m} + 0{,}308\,642\ \text{m} + 31{,}030\,821\ \text{m}$$

De som van elke veelterm is gelijk aan 313,106 636 m

- volgens (XIV, 4, SI) :

$$162\,000\ \text{Pa} + 343\,232{,}75\ \text{Pa} + 2000\ \text{Pa}$$

$$= 145\,800\ \text{Pa} + 310\,662{,}82\ \text{Pa} + 500\ \text{Pa} + 50\,269{,}93\ \text{Pa}$$

De som van elke veelterm is gelijk aan 507 232,75 Pa

Uit de betrokken twee voorbeelden blijkt dat, hoewel voor een gelijkaardig debiet in een gelijkaardige transportleiding, enerzijds op aarde en anderzijds op de maan, het stromingsenergie-verlies per normgewicht (TS) en per massa (SI) en de verliesdruk (stromingsenergie-verlies per volume) dezelfde waarden behouden, de verlieshoogte (stromingsenergie-verlies per werkelijk gewicht) daarentegen omgekeerd evenredig is met de plaatselijke versnelling van de zwaartekracht (plaatselijke zwaarteveldsterkte).

Het stromingsenergie-verlies per normgewicht (TS) of per massa (SI) wordt gegeven door :

in het TS : $\left(\frac{g}{g_n} \cdot h_v\right)^{\star}$, gebruikelijke schrijfwijze : h_v

in het SI : $g \cdot h_v$

De verliesdruk wordt weergegeven door :

in het TS : $\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h_v$, gebruikelijke schrijfwijze : $\gamma \cdot h_v$

in het SI : $\rho \cdot g \cdot h_v$

De verlieshoogte is het stromingsenergie-verlies per werkelijk gewicht, en wordt zowel in het TS als in het SI voorgesteld door h_v.

Op aarde is de getalwaarde van $\left(\frac{g}{g_n} \cdot h_v\right)^{\star}$ (gebruikelijke schrijfwijze : h_v) uitgedrukt in $\frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{kgf}}$ = (m), nagenoeg gelijk aan de getalwaarde van de verlieshoogte h_v uitgedrukt in m (zie voorbeeld 1 : 5,126 106 tegenover 5,139 907); op de maan echter is dit niet meer het geval (zie voorbeeld 2 : 5,126 106 tegenover 31,030 821).

2.3.10. Stromingsverliezen (verliezen aan stromingsenergie)

2.3.10.1. *Algemene verliezen en plaatselijke verliezen*

De stromingsverliezen kunnen worden ingedeeld in algemene verliezen en plaatselijke verliezen.

Algemene verliezen zijn verliezen die zich voordoen in een rechte leiding met konstante doorsnede; deze verliezen zijn te wijten aan de wrijving tussen de vloeistofdeeltjes onderling en tussen de vloeistof en de buiswand.

Plaatselijke verliezen zijn wrijvingsverliezen die zich voordoen tengevolge van een verandering van de stromingsrichting of tengevolge van een verandering van de vorm of de doorsnede van de leiding (bocht, verwijding, vernauwing, ingebouwde armatuur, ...).

Het stromingsenergie-verlies per volume tussen doorsnede 1 en doorsnede 2 is gelijk aan (zie onderhavig hoofdstuk onder 2.3.9.) :

TS : $$\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h_v = \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot (h_1 - h_2) + (p_1 - p_2) + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w_1^2 - w_2^2}{2}$$

Term-eenheid : $\frac{kgf \cdot m}{m^3} = \frac{kgf}{m^2}$ = eenheid van druk

SI : $$\rho \cdot g \cdot h_v = \rho \cdot g \cdot (h_1 - h_2) + (p_1 - p_2) + \rho \cdot \frac{w_1^2 - w_2^2}{2}$$

Term-eenheid : $\frac{J}{m^3} = \frac{N \cdot m}{m^3} = \frac{N}{m^2}$ = Pa = eenheid van druk

Het stromingsenergie-verlies per volume tussen doorsnede 1 en doorsnede 2 is gelijk aan het verlies aan "hoogtedruk + statische druk + dynamische druk", en werd bij de behandeling van de wet van Bernoulli (zie onderhavig hoofdstuk onder 2.3.9.) "verlies*druk*" genoemd naar analogie met de benamingen : hoogte*druk*, statische *druk*, dynamische *druk*; hierna wordt de betrokken grootheid "drukverlies" genoemd.

Voor een horizontale leiding ($h_1 = h_2$) met konstante doorsnede ($w_1 = w_2$) bekomt men :

- in het TS : $$\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h_v = p_1 - p_2$$

gebruikelijke schrijfwijze : $\gamma \cdot h_v = p_1 - p_2$

in het SI : $$\rho \cdot g \cdot h_v = p_1 - p_2$$

Hoewel in de betrokken uitdrukkingen de grootheid g voorkomt, is het drukverlies niet afhankelijk van de plaatselijke versnelling van de zwaartekracht (plaatselijke zwaarteveldsterkte), daar de verlieshoogte h_v omgekeerd evenredig is met de grootheid g.

Het drukverlies kan worden gesplitst in twee termen die respektievelijk het drukverlies tengevolge van algemene verliezen en het drukverlies tengevolge van plaatselijke verliezen weergeven; dit wordt voorgesteld als volgt :

TS : $$\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h_v = \Sigma \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w^2}{2} + \Sigma \zeta \cdot \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w^2}{2}$$

Gebruikelijke schrijfwijze : $$\gamma \cdot h_v = \Sigma \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\gamma}{g} \cdot \frac{w^2}{2} + \Sigma \zeta \cdot \frac{\gamma}{g} \cdot \frac{w^2}{2}$$

Term-eenheid : $\frac{kgf \cdot m}{m^3} = \frac{kgf}{m^2}$ = mmWK (konventioneel)

SI : $$\rho \cdot g \cdot h_v = \Sigma \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2} + \Sigma \zeta \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2}$$

Term-eenheid : $\frac{J}{m^3} = \frac{N \cdot m}{m^3} = \frac{N}{m^2}$ = Pa

met l = lengte van elk recht leidingsstuk met konstante diameter

d = (binnen)diameter van het betrokken recht leidingsstuk

λ = wrijvingskoëfficiënt (dimensieloos)

ζ = weerstandskoëfficiënt (dimensieloos); de waarde van ζ is afhankelijk van de aard van de belemmering of weerstand

Uit bovenstaande uitdrukkingen blijkt, dat het drukverlies niet afhankelijk is van de plaatselijke versnelling van de zwaartekracht g (plaatselijke zwaarteveldsterkte).

De wrijvingskoëfficiënt λ is een veranderlijke grootheid, waarvan de waarde meestal gelegen is tussen 0,01 en 0,05.
Bij laminaire stroming is λ enkel afhankelijk van de kengrootheid van Reynolds (kengrootheid van Reynolds of getal van Reynolds : zie onderhavig hoofdstuk onder 2.3.23.).
Bij turbulente stroming kan men drie gebieden onderscheiden naargelang van de waarde van de kengrootheid van Reynolds en de relatieve ruwheid $\frac{k}{d}$ (de relatieve ruwheid is de verhouding van de hoogte k van de zeer kleine

oneffenheden op de binnenwand van de buis tot de binnendiameter d van de buis) :

- een gebied waar λ enkel afhankelijk is van de kengrootheid van Reynolds;
- een gebied waar λ afhankelijk is zowel van de kengrootheid van Reynolds als van de relatieve ruwheid;
- een gebied waar λ enkel afhankelijk is van de relatieve ruwheid.

Het stromingsenergie-verlies per werkelijk gewicht of verlieshoogte h_v kan uiteraard ook worden gesplitst in twee termen die respektievelijk de verlieshoogte tengevolge van algemene verliezen en de verlieshoogte tengevolge van plaatselijke verliezen weergeven; dit wordt voorgesteld zowel in het TS als in het SI als volgt :

$$h_v = \Sigma \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{w^2}{2g} + \Sigma \zeta \cdot \frac{w^2}{2g} \quad \text{(TS- en SI-eenheid : m)}$$

Hieruit blijkt, dat de verlieshoogte h_v omgekeerd evenredig is met de plaatselijke versnelling van de zwaartekracht g (plaatselijke zwaarteveldsterkte).

Men dient goed het onderscheid te maken tussen de eenheden waarin de verlieshoogte en het drukverlies worden uitgedrukt.

De verlieshoogte wordt uitgedrukt in een eenheid van lengte, zowel in het TS als in het SI.

In het TS wordt het drukverlies gewoonlijk uitgedrukt in $\frac{kgf}{m^2}$ ofwel in mm waterkolom (mmWK), zelfs al is de betrokken vloeistof geen water. Een druk van 1 $\frac{kgf}{m^2}$ is immers per definitie gelijk aan een druk van 1 mmWK (konventionele mm waterkolom, zie Hoofdstuk XI, onder 6.2.3.).

De verlieshoogte zowel als de hoogte van een vloeistofkolom wordt, zowel in het TS als in het SI, uitgedrukt in m of mm (en niet in m "vloeistofkolom" of mm "vloeistofkolom"). Aldus wordt ook de hoogte van een waterkolom uitgedrukt in m of mm (en niet in mWK of mmWK).

Dit betekent, dat men enerzijds de verlieshoogte h_v kan uitdrukken in m of mm, terwijl in het TS het drukverlies $\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h_v$ kan worden uitgedrukt

in mmWK of mWK, hetgeen uiteraard tot verwarring kan aanleiding geven. Daarom is het in het TS aangewezen, het drukverlies uit te drukken in $\frac{kgf}{m^2}$ en niet in mmWK of mWK.

Op aarde (waar g niet veel verschilt van g_n) zal, wanneer het om water gaat, het getal dat de verlieshoogte aangeeft in m of mm, ongeveer gelijk zijn aan het getal dat het drukverlies weergeeft respektievelijk in mWK en mmWK.

Opdat, voor om het even welke vloeistof om het even waar, de betrokken getallen precies aan elkaar zouden gelijk zijn, dient volgende voorwaarde vervuld te zijn :

$$\left\{\gamma_n\right\}_{kgf/m^3} \cdot \frac{g}{g_n} = 1000$$

Nemen we als voorbeeld water met :

$$\gamma_n = 1000\ \frac{kgf}{m^3} \qquad \text{(TS)}$$

$$\rho = 1000\ \frac{kg}{m^3} \qquad \text{(SI)}$$

Met een verlieshoogte h_v = 5 m en een versnelling van de zwaartekracht $g = g_{51°} = 9{,}811\ 583\ \frac{m}{s^2} = 9{,}811\ 583\ \frac{N}{kg}$, bekomt men :

- in het TS :

$$\text{drukverlies} = \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h_v = \frac{1000\ \frac{kgf}{m^3}}{9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2}} \cdot 9{,}811\ 583\ \frac{m}{s^2} \cdot 5\ m$$

$$= 5002{,}515\ \frac{kgf}{m^2}$$

$$= 5002{,}515\ \text{mmWK} \quad \text{(konventionele mmWK)}$$

$$= 5{,}002\ 515\ \text{mWK} \quad \text{(konventionele mWK)}$$

- in het SI :

$$\text{drukverlies} = \rho \cdot g \cdot h_v = 1000\ \frac{kg}{m^3} \cdot 9{,}811\ 583\ \frac{N}{kg} \cdot 5\ m$$

$$= 49\ 057{,}915\ \text{Pa}$$

Daar het drukverlies niet afhankelijk is van de plaatselijke versnelling van de zwaartekracht, zou men voor een gelijkaardige installatie op de maan een even groot drukverlies hebben, hetzij 5002,515 $\frac{kgf}{m^2}$ of 5002,515 mmWK (TS), hetzij 49 057,915 Pa (SI). Als verlieshoogte zou men echter op de maan bekomen (met $g = g_{maan} = 1{,}62\ \frac{m}{s^2} = 1{,}62\ \frac{N}{kg}$) :

- in het TS :

$$h_v = \frac{\text{drukverlies}}{\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g} = \frac{5002{,}515\ \frac{kgf}{m^2}}{\frac{1000\ \frac{kgf}{m^3}}{9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2}} \cdot 1{,}62\ \frac{m}{s^2}} = 30{,}283\ m$$

- in het SI :

$$h_v = \frac{\text{drukverlies}}{\rho \cdot g} = \frac{49\ 057{,}915\ \frac{N}{m^2}}{1000\ \frac{kg}{m^3} \cdot 1{,}62\ \frac{N}{kg}} = 30{,}283\ m$$

2.3.10.2. *Centrale verwarming : drukverval R en verlieshoogte per lengte $\frac{h_{v,a}}{l}$; plaatselijke verliezen; opvoerhoogte van de circulatiepomp*

a. Drukverval R en verlieshoogte per lengte $\frac{h_{v,a}}{l}$

Bij centrale verwarming (met behulp van warm water, met $\gamma_{n,80\ °C} = 971{,}8\ \frac{kgf}{m^3}$ en $\rho_{80\ °C} = 971{,}8\ \frac{kg}{m^3}$) wordt het drukverlies (tengevolge van algemene verliezen) per lengte buis voorgesteld door het drukverval R; het drukverlies over een lengte l (zonder plaatselijke weerstanden) is dan gelijk aan $R \cdot l$.

Dit wordt weergegeven als volgt :

- in het TS :

$$R = \lambda \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w^2}{2} \qquad \left(\text{eenheid : } \frac{\frac{kgf}{m^2}}{m} = \text{mmWK per meter}\right)$$

$$R \cdot l = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w^2}{2} \qquad \left(\text{eenheid : } \frac{kgf}{m^2} = \text{mmWK}\right)$$

- in het SI :

$$R = \lambda \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2} \qquad \left(\text{SI-eenheid : } \frac{Pa}{m}\right)$$

$$R \cdot l = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2} \qquad (\text{SI-eenheid : Pa})$$

Het drukverval R wordt in het TS dikwijls weergegeven in (konventionele) mmWK (1 mmWK = 1 $\frac{kgf}{m^2}$) per meter. De aldus weergegeven waarde van R mag niet worden verward met de verlieshoogte per lengte $\frac{h_{v,a}}{l}$, die een

grootheid is die in tegenstelling met het drukverval R, afhankelijk is van de plaatselijke versnelling van de zwaartekracht g (plaatselijke zwaarteveldsterkte).

De verlieshoogte per lengte $\frac{h_{v,a}}{l}$ (uitsluitend tengevolge van algemene verliezen) wordt zowel in het TS als in het SI gegeven door :

$$\frac{h_{v,a}}{l} = \lambda \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{w^2}{2\,g} \quad \text{(TS- en SI-eenheid : } \frac{m}{m}\text{)}$$

Uit bovenstaande uitdrukkingen blijkt dat het drukverval R en de verlieshoogte per lengte $\frac{h_{v,a}}{l}$ bij stroming van een vloeistof doorheen een leiding met diameter d, niet alleen varieert evenredig met het kwadraat van de snelheid (of wat op hetzelfde neerkomt : met het kwadraat van het debiet), doch ook varieert evenredig met de waarde van de wrijvingskoëfficiënt λ.

Het verband tussen R en $\frac{h_{v,a}}{l}$ wordt gegeven door :

- in het TS : $$\frac{h_{v,a}}{l} = \frac{R}{\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g}$$

- in het SI : $$\frac{h_{v,a}}{l} = \frac{R}{\rho \cdot g}$$

Een drukverval dat in het TS wordt weergegeven door R = 10 mmWK per meter (= 10 $\frac{kgf}{m^2}$ per meter), zal in het SI weergegeven worden door

$$R = 10 \times 9{,}806\,65 \frac{Pa}{m} = 98{,}0665 \frac{Pa}{m}$$
$$\approx 100 \frac{Pa}{m}$$

De verlieshoogte per lengte bedraagt in dit geval :

☆ op de aarde (met $g = g_{51°} = 9{,}811\,583 \frac{m}{s^2}$) :

- in het TS :

$$\frac{h_{v,a}}{l} = \frac{R}{\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g} = \frac{10 \frac{kgf}{m^2 \cdot m}}{\frac{971{,}8 \frac{kgf}{m^3}}{9{,}806\,65 \frac{m}{s^2}} \cdot 9{,}811\,583 \frac{m}{s^2}} = 0{,}010\,285 \frac{m}{m}$$
$$= 10{,}285 \frac{mm}{m}$$

- in het SI :

$$\frac{h_{v,a}}{l} = \frac{R}{\rho \cdot g} = \frac{98{,}0665\ \frac{Pa}{m}}{971{,}8\ \frac{kg}{m^3} \cdot 9{,}811\ 583\ \frac{m}{s^2}} = 0{,}010\ 285\ \frac{m}{m}$$

$$= 10{,}285\ \frac{mm}{m}$$

☆ op de maan (met $g = 1{,}62\ \frac{m}{s^2}$) :

- in het TS :

$$\frac{h_{v,a}}{l} = \frac{R}{\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g} = \frac{10\ \frac{kgf}{m^2 \cdot m}}{\frac{971{,}8\ \frac{kgf}{m^3}}{9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2}} \cdot 1{,}62\ \frac{m}{s^2}} = 0{,}062\ 291\ \frac{m}{m}$$

$$= 62{,}291\ \frac{mm}{m}$$

- in het SI :

$$\frac{h_{v,a}}{l} = \frac{R}{\rho \cdot g} = \frac{98{,}0665\ \frac{Pa}{m}}{971{,}8\ \frac{kg}{m^3} \cdot 1{,}62\ \frac{m}{s^2}} = 0{,}062\ 291\ \frac{m}{m}$$

$$= 62{,}291\ \frac{mm}{m}$$

Voor het beschouwde geval geldt echter, zowel op de aarde als op de maan :

$$R = 10\ \frac{\frac{kgf}{m^2}}{m} = 10\ \text{mmWK per meter}$$

$$= 98{,}0665\ \frac{Pa}{m}$$

Een drukverval dat in het SI wordt weergegeven door $R = 100\ \frac{Pa}{m}$, wordt in het TS weergegeven door :

$$R = \frac{100\ \frac{\frac{kgf}{m^2}}{m}}{9{,}806\ 65} = 10{,}197\ 162\ 13\ \frac{\frac{kgf}{m^2}}{m}$$

$$\approx 10{,}2\ \frac{\frac{kgf}{m^2}}{m} \qquad \text{(of 10,2 mmWK per meter)}$$

De waarde van R in funktie van de diameter en de hoeveelheid doorstromend water, kan gevonden worden in tabellen. Voor het opstellen van deze

tabellen dient R uitgedrukt te worden in funktie van de (binnen)diameter, de hoeveelheid doorstromende vloeistof en de waarde van λ. Dit gebeurt als volgt :

- in het TS $\left(\text{met } w = \frac{\text{volumestroom}}{\text{doorsnede}} = \frac{Q}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{\frac{\dot{G}_n}{\gamma_n}}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{4\,\dot{G}_n}{\pi d^2 \cdot \gamma_n}\right)$:

$$R = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w^2}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \left(\frac{4\,Q}{\pi d^2}\right)^2$$

$$= \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{\lambda}{d^5} \cdot \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot Q^2 \qquad \text{(XIV, 5, TS)}$$

$$= 0{,}810\,569\,468\,9 \cdot \frac{\lambda}{d^5} \cdot \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot Q^2$$

$$R = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w^2}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \left(\frac{4\,\dot{G}_n}{\pi d^2 \cdot \gamma_n}\right)^2$$

$$= \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{\lambda}{d^5} \cdot \frac{\dot{G}_n^2}{g_n \cdot \gamma_n} \qquad \text{(XIV, 6, TS)}$$

$$= 0{,}810\,569\,468\,9 \cdot \frac{\lambda}{d^5} \cdot \frac{\dot{G}_n^2}{g_n \cdot \gamma_n}$$

In plaats van bovenstaande algemene groothedenvergelijkingen, werden in het TS meestal getalwaardenvergelijkingen aangewend (met $\gamma_n = \gamma_{n,80\,°C} = 971{,}8\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$).

Een eerste getalwaardenvergelijking werd afgeleid van de algemene groothedenvergelijking (XIV, 5, TS) :

$$\left\{R\right\}_{\frac{\text{kgf/m}^2}{\text{m}}} = \frac{8 \cdot \lambda \cdot \left\{\gamma_n\right\}_{\text{kgf/m}^3} \cdot \left(\frac{\left\{Q\right\}_{\text{L/h}}}{3600 \times 1000}\right)^2}{\pi^2 \cdot \left(\frac{\left\{d\right\}_{\text{mm}}}{1000}\right)^5 \cdot \left\{g_n\right\}_{\text{m/s}^2}}$$

$$= \frac{8 \times 1000^5 \times 971{,}8}{\pi^2 \times 3600^2 \times 1000^2 \times 9{,}806\,65} \cdot \frac{\lambda \cdot Q^2}{d^5}$$

$$R = 619{,}055\,678 \cdot \frac{\lambda \cdot Q^2}{d^5} \qquad \text{(XIV, 5', TS)}$$

met Q = volumestroom in L/h

d = (binnen)diameter in mm

R = drukverval in $\frac{\frac{kgf}{m^2}}{m}$ (of mmWK per meter)

Een tweede getalwaardenvergelijking werd afgeleid van de algemene groothedenvergelijking (XIV, 6, TS) :

$$\frac{\{R\}_{kgf/m^2}}{m} = \frac{8 \cdot \lambda \cdot \left(\frac{\{\dot{G}_n\}_{kgf/h}}{3600}\right)^2}{\pi^2 \cdot \left(\frac{\{d\}_{mm}}{1000}\right)^5 \cdot \{g_n\}_{m/s^2} \cdot \{\gamma_{n,80\ °C}\}_{kgf/m^3}}$$

$$= \frac{8 \times 1000^5}{\pi^2 \times 3600^2 \times 9{,}806\ 65 \times 971{,}8} \cdot \frac{\lambda \cdot \dot{G}_n^2}{d^5}$$

$$R = 6562{,}777\ 338 \cdot \frac{\lambda \cdot \dot{G}_n^2}{d^5} \qquad \text{(XIV, 6', TS)}$$

met $\dot{G}_n$ = normgewichtsstroom in $\frac{kgf}{h}$

d = (binnen)diameter in mm

R = drukverval in $\frac{\frac{kgf}{m^2}}{m}$ (of mmWK per meter)

- in het SI $\left(\text{met } w = \frac{\text{volumestroom}}{\text{doorsnede}} = \frac{q_v}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{\frac{q_m}{\rho}}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{4\ q_m}{\pi d^2 \cdot \rho}\right)$:

$$R = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \rho \cdot \left(\frac{4\ q_v}{\pi d^2}\right)^2$$

$$= \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{\lambda}{d^5} \cdot \rho \cdot q_v^2 \qquad \text{(XIV, 5, SI)}$$

$$= 0{,}810\ 569\ 468\ 9\ \frac{\lambda}{d^5} \cdot \rho \cdot q_v^2$$

$$R = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \rho \cdot \left(\frac{4\ q_m}{\pi d^2 \cdot \rho}\right)^2$$

$$= \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{\lambda}{d^5} \cdot \frac{q_m^2}{\rho} \qquad \text{(XIV, 6, SI)}$$

$$= 0{,}810\ 569\ 468\ 9\ \frac{\lambda}{d^5} \cdot \frac{q_m^2}{\rho}$$

Voorbeeld :

met $Q = q_v = 0{,}005 \frac{m^3}{s} = 18\ 000 \frac{L}{h}$ (TS en SI)

$\dot{G}_n = 0{,}005 \times 971{,}8 \frac{kgf}{s} = 4{,}859 \frac{kgf}{s} = 17\ 492{,}4 \frac{kgf}{h}$ (TS)

$q_m = 0{,}005 \times 971{,}8 \frac{kg}{s} = 4{,}859 \frac{kg}{s}$ (SI)

$d = 0{,}0825$ m (hetzij 82,5 mm) (TS en SI)

$\gamma_n = \gamma_{n,80\ °C} = 971{,}8 \frac{kgf}{m^3}$ (TS)

$\rho = \rho_{80\ °C} = 971{,}8 \frac{kg}{m^3}$ (SI)

$\lambda = 0{,}0195$ (TS en SI)

bekomt men :

- volgens (XIV, 5, TS) :

$$R = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{\lambda}{d^5} \cdot \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot Q^2 = \frac{8 \times 0{,}0195 \times 971{,}8 \frac{kgf}{m^3} \times 0{,}005^2 \frac{m^6}{s^2}}{\pi^2 \times 0{,}0825^5\ m^5 \times 9{,}806\ 65 \frac{m}{s^2}}$$

$$= 10{,}246 \frac{\frac{kgf}{m^2}}{m}$$

$$= 10{,}246\ \text{mmWK per meter}$$

- volgens (XIV, 6, TS) :

$$R = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{\lambda}{d^5} \cdot \frac{\dot{G}_n^2}{g_n \cdot \gamma_n} = \frac{8 \times 0{,}0195 \times 4{,}859^2 \frac{kgf^2}{s^2}}{\pi^2 \times 0{,}0825^5\ m^5 \times 9{,}806\ 65 \frac{m}{s^2} \times 971{,}8 \frac{kgf}{m^3}}$$

$$= 10{,}246 \frac{\frac{kgf}{m^2}}{m}$$

$$= 10{,}246\ \text{mmWK per meter}$$

- volgens (XIV, 5', TS) :

$$R = 6197{,}855\ 678 \times \frac{0{,}0195 \times 18\ 000^2}{82{,}5^5}$$

$$= 10{,}246 \frac{\frac{kgf}{m^2}}{m}$$

$$= 10{,}246\ \text{mmWK per meter}$$

- volgens (XIV, 6', TS) :

$$R = 6562{,}777\ 338 \times \frac{0{,}0195 \times 17\ 492{,}4^2}{82{,}5^5}$$

$$= 10{,}246 \frac{\frac{kgf}{m^2}}{m}$$

$$= 10{,}246 \text{ mmWK per meter}$$

- volgens (XIV, 5, SI) :

$$R = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{\lambda}{d^5} \cdot \rho \cdot q_v^2$$

$$= \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{0{,}0195}{0{,}0825^5\ m^5} \cdot 971{,}8\ \frac{kg}{m^3} \cdot 0{,}005^2\ \frac{m^6}{s^2}$$

$$= 100{,}478\ \frac{Pa}{m}$$

- volgens (XIV, 6, SI) :

$$R = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{\lambda}{d^5} \cdot \frac{q_m^2}{\rho}$$

$$= \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{0{,}0195}{0{,}0825^5\ m^5} \cdot \frac{4{,}859^2\ \frac{kg^2}{s^2}}{971{,}8\ \frac{kg}{m^3}}$$

$$= 100{,}478\ \frac{Pa}{m}$$

Het is ook mogelijk, tabellen op te stellen die de waarde van de verlieshoogte per lengte $\frac{h_{v,a}}{l}$ weergeven in funktie van de hoeveelheid doorstromend water en de (binnen)diameter. De uitdrukkingen die hiertoe vereist zijn tonen aan dat $\frac{h_{v,a}}{l}$ niet alleen afhangt van de hoeveelheid doorstromende vloeistof, de (binnen)diameter en de waarde van λ, doch ook van de waarde van de plaatselijke versnelling van de zwaartekracht g (plaatselijke zwaarteveldsterkte).

Deze uitdrukkingen (algemene groothedenvergelijkingen) zien er uit als volgt :

- in het TS :

$$\frac{h_{v,a}}{l} = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{w^2}{2g} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{\lambda}{d^5} \cdot \frac{Q^2}{g} \qquad \text{(XIV, 7, TS)}$$

$$\frac{h_{v,a}}{l} = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{w^2}{2g} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{\lambda}{d^5} \cdot \frac{\dot{G}_n^2}{g \cdot \gamma_n^2} \qquad \text{(XIV, 8, TS)}$$

- in het SI :

$$\frac{h_{v,a}}{l} = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{w^2}{2\,g} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{\lambda}{d^5} \cdot \frac{q_v^2}{g} \qquad \text{(XIV, 7, SI)}$$

$$\frac{h_{v,a}}{l} = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{w^2}{2\,g} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{\lambda}{d^5} \cdot \frac{q_m^2}{g \cdot \rho^2} \qquad \text{(XIV, 8, SI)}$$

De tabellen die de verlieshoogte per lengte $\frac{h_{v,a}}{l}$ weergeven in funktie van het debiet en de (binnen)diameter, zijn enkel geldig voor een welbepaalde waarde van g, terwijl daarentegen de tabellen die het drukverval R weergeven, algemeen geldig zijn.

Voorbeeld :

Bereken $\frac{h_{v,a}}{l}$, respektievelijk met $g_{51°} = 9{,}811\,583\ \frac{m}{s^2}$ en $g_{maan} = 1{,}62\ \frac{m}{s^2}$, en voor het overige met dezelfde gegevens als in vorig voorbeeld.

Men bekomt :

- volgens (XIV, 7, TS) :

op de aarde :

$$\frac{h_{v,a}}{l} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{0{,}0195}{0{,}0825^5\ m^5} \cdot \frac{0{,}005^2\ \frac{m^6}{s^2}}{9{,}811\,583\ \frac{m}{s^2}}$$

$$= 0{,}010\,537\,948\ \frac{m}{m} = 10{,}538\ \frac{mm}{m}$$

op de maan :

$$\frac{h_{v,a}}{l} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{0{,}0195}{0{,}0825^5\ m^5} \cdot \frac{0{,}005^2\ \frac{m^6}{s^2}}{1{,}62\ \frac{m}{s^2}}$$

$$= 0{,}063\,823\,425\ \frac{m}{m} = 63{,}823\ \frac{mm}{m}$$

- volgens (XIV, 8, TS) .

p de aarde :

$$\frac{h_{v,a}}{l} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{0{,}0195}{0{,}0825^5\ m^5} \cdot \frac{4{,}859^2\ \frac{kgf^2}{s^2}}{9{,}811\,583\ \frac{m}{s^2} \times 971{,}8^2\ \frac{kgf^2}{m^6}}$$

$$= 0{,}010\,537\,948\ \frac{m}{m} = 10{,}538\ \frac{mm}{m}$$

op de maan :

$$\frac{h_{v,a}}{l} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{0{,}0195}{0{,}0825^5\ m^5} \cdot \frac{4{,}859^2\ \frac{kgf^2}{s^2}}{1{,}62\ \frac{m}{s^2} \times 971{,}8^2\ \frac{kgf^2}{m^6}}$$

$$= 0{,}063\,823\,425\ \frac{m}{m} = 63{,}823\ \frac{mm}{m}$$

- volgens (XIV, 7, SI) :

op de aarde :

$$\frac{h_{v,a}}{l} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{0,0195}{0,0825^5\ m^5} \cdot \frac{0,005^2\ \frac{m^6}{s^2}}{9,811\ 583\ \frac{m}{s^2}}$$

$$= 0,010\ 537\ 948\ \frac{m}{m} = 10,538\ \frac{mm}{m}$$

op de maan :

$$\frac{h_{v,a}}{l} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{0,0195}{0,0825^5\ m^5} \cdot \frac{0,005^2\ \frac{m^6}{s^2}}{1,62\ \frac{m}{s^2}}$$

$$= 0,063\ 823\ 425\ \frac{m}{m} = 63,823\ \frac{mm}{m}$$

- volgens (XIV, 8, SI) :

op de aarde :

$$\frac{h_{v,a}}{l} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{0,0195}{0,0825^5\ m^5} \cdot \frac{4,859^2\ \frac{kg^2}{s^2}}{9,811\ 583\ \frac{m}{s^2} \times 971,8^2\ \frac{kg^2}{m^6}}$$

$$= 0,010\ 537\ 948\ \frac{m}{m} = 10,538\ \frac{mm}{m}$$

op de maan :

$$\frac{h_{v,a}}{l} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{0,0195}{0,0825^5\ m^5} \cdot \frac{4,859^2\ \frac{kg^2}{s^2}}{1,62\ \frac{m}{s^2} \times 971,8^2\ \frac{kg^2}{m^6}}$$

$$= 0,063\ 823\ 425\ \frac{m}{m} = 63,823\ \frac{mm}{m}$$

Voor R bekomt men telkens dezelfde waarde (zie vorig voorbeeld); hierna wordt R berekend vertrekkend vanaf de waarde van $\frac{h_{v,a}}{l}$; men bekomt :

- in het TS :

op de aarde :

$$R = \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot \frac{h_{v,a}}{l} = \frac{971,8\ \frac{kgf}{m^3}}{9,806\ 65\ \frac{m}{s^2}} \times 9,811\ 583\ \frac{m}{s^2} \times 0,010\ 537\ 948\ \frac{m}{m}$$

$$= 10,246\ \frac{\frac{kgf}{m^2}}{m} = 10,246\ \text{mmWK per meter}$$

op de maan :

$$R = \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot \frac{h_{v,a}}{l} = \frac{971,8\ \frac{kgf}{m^3}}{9,806\ 65\ \frac{m}{s^2}} \times 1,62\ \frac{m}{s^2} \times 0,063\ 823\ 425\ \frac{m}{m}$$

$$= 10,246\ \frac{\frac{kgf}{m^2}}{m} = 10,246\ \text{mmWK per meter}$$

- in het SI :

op de aarde :

$$R = \rho \cdot g \cdot \frac{h_{v,a}}{l} = 971{,}8 \frac{kg}{m^3} \times 9{,}811\ 583 \frac{m}{s^2} \times 0{,}010\ 537\ 948 \frac{m}{m}$$

$$= 100{,}478 \frac{Pa}{m}$$

op de maan :

$$R = \rho \cdot g \cdot \frac{h_{v,a}}{l} = 971{,}8 \frac{kg}{m^3} \times 1{,}62 \frac{m}{s^2} \times 0{,}063\ 823\ 425 \frac{m}{m}$$

$$= 100{,}478 \frac{Pa}{m}$$

b. Plaatselijke verliezen

Het drukverlies Z tengevolge van plaatselijke verliezen wordt gegeven door :

- in het TS : $Z = \Sigma \zeta \cdot \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w^2}{2}$ (TS-eenheid : $\frac{kgf}{m^2}$ = mmWK)

gebruikelijke schrijfwijze : $Z = \Sigma \zeta \cdot \frac{\gamma \cdot w^2}{2g}$

- in het SI : $Z = \Sigma \zeta \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2}$ (SI-eenheid : Pa)

Bij de centrale verwarming met behulp van warm water geldt :

$$\gamma_{n,80\ °C} = 971{,}8 \frac{kgf}{m^3} \qquad \text{(TS)}$$

$$\rho_{80\ °C} = 971{,}8 \frac{kg}{m^3} \qquad \text{(SI)}$$

Wat betreft de berekeningen van het drukverlies tengevolge van plaatselijke verliezen, wordt in het TS dikwijls gebruik gemaakt van een getalwaardenvergelijking die als volgt werd afgeleid :

$$\{Z\}_{kgf/m^2} = \Sigma \zeta \cdot \frac{\{\gamma_n\}_{kgf/m^3}}{\{g_n\}_{m/s^2}} \cdot \frac{\{w\}^2_{m/s}}{2} = \Sigma \zeta \cdot \frac{971{,}8}{9{,}806\ 65} \cdot \frac{\{w\}^2_{m/s}}{2}$$

$$= \Sigma \zeta \times 49{,}548 \times \{w\}^2_{m/s}$$

$$\approx \Sigma \zeta \cdot 50\ w^2$$

met w in $\frac{m}{s}$

Z in $\frac{kgf}{m^2}$ = mmWK

De verlieshoogte $h_{v,p}$ tengevolge van plaatselijke verliezen wordt zowel in het TS als in het SI gegeven door :

$$h_{v,p} = \Sigma\, \zeta \cdot \frac{w^2}{2\,g} \qquad \text{(TS- en SI-eenheid : m)}$$

c. Opvoerhoogte van de circulatiepomp

De manometrische opvoerdruk p_{man} van de circulatiepomp dient gelijk te zijn aan het totaal drukverlies (algemene verliezen + plaatselijke verliezen) van de betrokken verwarmingskringloop, of, wat op hetzelfde neerkomt, de manometrische opvoerhoogte H_{man} dient gelijk te zijn aan de totale verlieshoogte van de betrokken verwarmingskringloop (telkens bij het in aanmerking genomen debiet) :

$$H_{man} = h_v = h_{v,a} + h_{v,p} = \Sigma\, \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{w^2}{2\,g} + \Sigma\, \zeta \cdot \frac{w^2}{2\,g}$$

Het verband tussen p_{man} en H_{man} wordt gegeven door :

- in het TS : $\quad p_{man} = \dfrac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot H_{man} \qquad H_{man} = \dfrac{p_{man}}{\dfrac{\gamma_n}{g_n} \cdot g}$

- in het SI : $\quad p_{man} = \rho \cdot g \cdot H_{man} \qquad H_{man} = \dfrac{p_{man}}{\rho \cdot g}$

De manometrische opvoerdruk p_{man} is gelijk aan de door de pomp aan de vloeistof toegevoerde stromingsenergie per volume, en wordt uitgedrukt bijvoorbeeld in $\frac{kgf \cdot m}{m^3} = \frac{kgf}{m^2}$ (TS) en in $\frac{J}{m^3} = \frac{N \cdot m}{m^3} = \frac{N}{m^2} = Pa$ (SI). In het TS kende men als eenheid van druk ook de (konventionele) millimeter waterkolom (mmWK) met als definitie :

$$1\ \text{mmWK} = 1\ \frac{kgf}{m^2}$$

De manometrische opvoerhoogte H_{man} is gelijk aan de door de pomp aan de vloeistof toegevoerde stromingsenergie per werkelijk gewicht, en wordt uitgedrukt bijvoorbeeld in $\frac{kgf \cdot m}{kgf} = m$ (TS) en in $\frac{J}{N} = \frac{N \cdot m}{N} = m$ (SI).
De manometrische opvoerhoogte H_{man} wordt dus zowel in het TS als in het SI uitgedrukt in een eenheid van lengte (zonder meer !) en dus bijvoorbeeld niet als volgt :

H_{man} = 12 m waterkolom

of $\quad H_{man}$ = 12 m vloeistofkolom

doch wel als volgt : $\quad H_{man}$ = 12 m

Voor eenzelfde volumestroom is de manometrische opvoerdruk p_{man} van een (centrifugaal)pomp niet afhankelijk van g, maar wel evenredig met het soortelijk normgewicht γ_n (TS) of de soortelijke massa ρ (SI) van de betrokken vloeistof. Voor eenzelfde volumestroom is de manometrische opvoerhoogte H_{man} omgekeerd evenredig met g, doch niet afhankelijk van het soortelijk normgewicht γ_n (TS) of de soortelijke massa ρ (SI) van de betrokken vloeistof. De waarde echter van $\frac{g_n \cdot p_{man}}{\gamma_n} = \frac{p_{man}}{\rho} = H_{man} \cdot g$ blijft steeds konstant. Hoewel p_{man} dus verandert evenredig met γ_n respektievelijk ρ, blijft $H_{man} \cdot g$ dezelfde waarde behouden voor eenzelfde volumestroom van verschillende vloeistoffen. Daarom wordt de karakteristiek van een (centrifugaal)pomp altijd weergegeven als een grafiek die de opvoerhoogte H_{man} weergeeft in funktie van de volumestroom Q of q_v (grafiek geldig voor een welbepaalde waarde van g).

2.3.11. Pompvermogen

Beschouwen we een centrifugaalpomp, die een vloeistof pompt uit een lager gelegen reservoir naar een hoger gelegen reservoir, waarin de persleiding onderaan uitmondt, zie figuur XIV.2.

a. Aangewende grootheden en symbolen

- voorkomend zowel in het TS als in het SI :

  h_1, h_A, h_B, h_2 : hoogte boven een willekeurig gekozen referentievlak
  w_1, w_A, w_B, w_2 : vloeistofsnelheid
  p_1, p_A, p_B, p_2 : (absolute) statische druk
  h_{vz} = verlieshoogte vanaf de vloeistofspiegel 1 tot aan de zuigflens A (verlieshoogte over de zuigleiding)
  h_{vp} = verlieshoogte vanaf de persflens B tot aan de vloeistofspiegel 2 (verlieshoogte over de persleiding)
  Q = volumestroom
  g = plaatselijke versnelling van de zwaartekracht (plaatselijke zwaartevelsterkte)

- enkel voorkomend in het TS :

  $\dot{G}_n$ = normgewichtsstroom = $Q \cdot \gamma_n$
  $\frac{\dot{G}_n}{g_n} \cdot g$ = gewichtsstroom (op basis van het werkelijk gewicht) = $Q \cdot \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g$

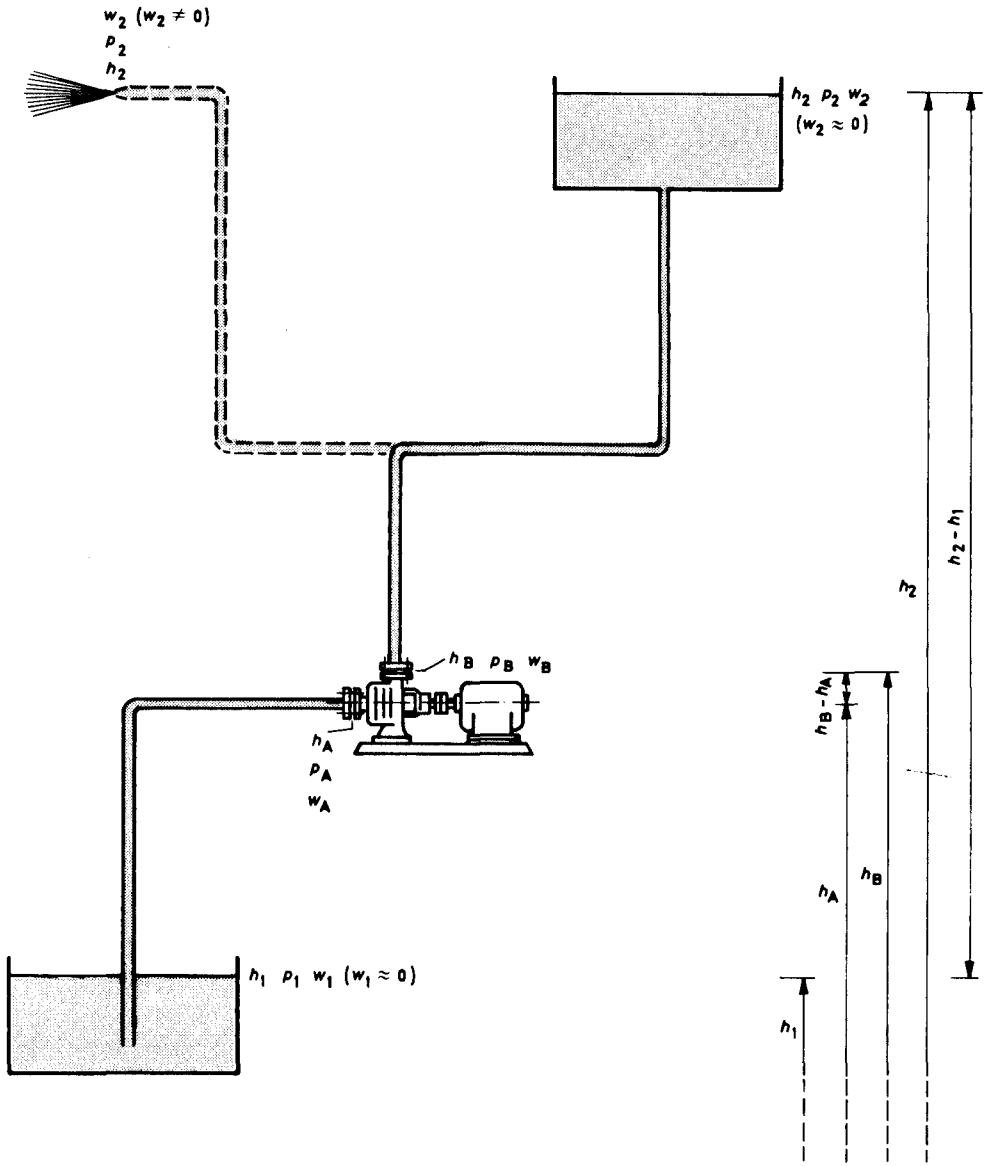

w_2 ($w_2 \neq 0$)
p_2
h_2
h_2 p_2 w_2
($w_2 \approx 0$)
h_B p_B w_B
h_A
p_A
w_A
h_1 p_1 w_1 ($w_1 \approx 0$)
$h_2 - h_1$
h_2
$h_B - h_A$
h_A
h_B
h_1

FIG. XIV. 2.

γ_n = soortelijk normgewicht

g_n = normversnelling = 9,806 65 $\frac{m}{s^2}$

- enkel voorkomend in het SI :

q_m = massastroom (vroeger ook aangeduid met $\dot{m}$) = $q_v \cdot \rho$

q_v = volumestroom (dikwijls ook aangeduid met Q, vroeger ook met $\dot{V}$)

ρ = soortelijke massa

b. Definitie van de grootheden manometrische opvoerhoogte H_{man} en manometrische opvoerdruk p_{man} in het TS

☆ Toepassing van de wet van Bernoulli, enerzijds tussen 1 en A, en anderzijds tussen B en 2, geeft volgens (XIV, 3, TS) :

$$h_1 + \frac{p_1}{\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g} + \frac{w_1^2}{2g} = h_A + \frac{p_A}{\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g} + \frac{w_A^2}{2g} + h_{vz} \qquad \text{(TS)}$$

$$h_B + \frac{p_B}{\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g} + \frac{w_B^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g} + \frac{w_2^2}{2g} + h_{vp} \qquad \text{(TS)}$$

De pomp staat er voor in, dat de vloeistof van toestand 1, gekenmerkt door de energiehoogte $h_1 + \frac{p_1}{\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g} + \frac{w_1^2}{2g}$, overgaat naar toestand 2, gekenmerkt door de energiehoogte $h_2 + \frac{p_2}{\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g} + \frac{w_2^2}{2g}$, waarbij ook de verlieshoogte $h_{vz} + h_{vp}$ dient overwonnen te worden. Men noemt manometrische opvoerhoogte H_{man}, het verschil in energiehoogte in toestand 1 en toestand 2, plus de verlieshoogte tussen 1 en A en tussen B en 2 :

$$H_{man} = h_2 - h_1 + \frac{p_2 - p_1}{\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g} + h_{vz} + h_{vp} \qquad \text{(TS)}$$

Aan de hand van bovenstaande uitdrukkingen, kan men ook bewijzen :

$$H_{man} = \frac{p_B - p_A}{\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g} + \frac{w_B^2 - w_A^2}{2g} + h_B - h_A \qquad \text{(TS)}$$

De tussenkomst van de pomp kan ook als volgt omschreven worden : de pomp staat er voor in, dat de vloeistof van toestand A, gekenmerkt door

de energiehoogte $h_A + \dfrac{p_A}{\dfrac{\gamma_n}{g_n} \cdot g} + \dfrac{w_A^2}{2g}$, overgaat naar toestand B, gekenmerkt door de energiehoogte $h_B + \dfrac{p_B}{\dfrac{\gamma_n}{g_n} \cdot g} + \dfrac{w_B^2}{2g}$.

☆ Toepassing van de wet van Bernoulli, enerzijds tussen 1 en A, en anderzijds tussen B en 2, geeft volgens (XIV, 4, TS) :

$$\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h_1 + p_1 + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w_1^2}{2} = \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h_A + p_A + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w_A^2}{2} + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h_{vz} \qquad \text{(TS)}$$

$$\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h_B + p_B + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w_B^2}{2} = \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h_2 + p_2 + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w_2^2}{2} + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h_{vp} \qquad \text{(TS)}$$

De pomp staat er voor in, dat de vloeistof van toestand 1, gekenmerkt door de stromingsenergie per volume $\dfrac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h_1 + p_1 + \dfrac{\gamma_n}{g_n} \cdot \dfrac{w_1^2}{2}$, overgaat naar toestand 2, gekenmerkt door de stromingsenergie per volume $\dfrac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h_2 + p_2 + \dfrac{\gamma_n}{g_n} \cdot \dfrac{w_2^2}{2}$, waarbij ook het stromingsenergie-verlies per volume $\dfrac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot (h_{vz} + h_{vp})$ dient overwonnen te worden.

Men noemt manometrische opvoerdruk p_{man}, het verschil in de stromingsenergie per volume in toestand 1 en toestand 2, plus het stromingsenergie-verlies per volume tussen 1 en A en tussen B en 2 :

$$p_{man} = \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot (h_2 - h_1) + p_2 - p_1 + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot (h_{vz} + h_{vp}) \qquad \text{(TS)}$$

Aan de hand van bovenstaande uitdrukkingen kan men ook bewijzen :

$$p_{man} = p_B - p_A + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \left(\frac{w_B^2 - w_A^2}{2}\right) + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot (h_B - h_A) \qquad \text{(TS)}$$

De tussenkomst van de pomp kan ook als volgt omschreven worden : de pomp staat er voor in, dat de vloeistof van toestand A, gekenmerkt door de

stromingsenergie per volume $\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h_A + p_A + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w_A^2}{2}$, overgaat naar toestand B, gekenmerkt door de stromingsenergie per volume $\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h_B + p_B + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w_B^2}{2}$.

Tussen H_{man} en p_{man} geldt volgend verband :

$$H_{man} = \frac{p_{man}}{\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g} \qquad \text{(TS)}$$

$$p_{man} = \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot H_{man} \qquad \text{(TS)}$$

c. Definitie van de grootheden manometrische opvoerhoogte H_{man} en manometrische opvoerdruk p_{man} in het SI

Indien men een gelijkaardige werkwijze toepast als hierboven, maar thans met behulp van de groothedenvergelijkingen (XIV, 3, SI) en (XIV, 4, SI), bekomt men als resultaat :

$$H_{man} = h_2 - h_1 + \frac{p_2 - p_1}{\rho \cdot g} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g} + h_{vz} + h_{vp} \qquad \text{(SI)}$$

$$= \frac{p_B - p_A}{\rho \cdot g} + \frac{w_B^2 - w_A^2}{2g} + h_B - h_A \qquad \text{(SI)}$$

$$p_{man} = \rho \cdot g \cdot (h_2 - h_1) + p_2 - p_1 + \frac{\rho \cdot (w_2^2 - w_1^2)}{2} + \rho \cdot g \cdot (h_{vz} + h_{vp}) \qquad \text{(SI)}$$

$$= p_B - p_A + \frac{\rho \cdot (w_B^2 - w_A^2)}{2} + \rho \cdot g \cdot (h_B - h_A) \qquad \text{(SI)}$$

$$H_{man} = \frac{p_{man}}{\rho \cdot g} \qquad \text{(SI)}$$

$$p_{man} = \rho \cdot g \cdot H_{man} \qquad \text{(SI)}$$

d. Opmerkingen in verband met de hierboven weergegeven uitdrukkingen in verband met H_{man} en p_{man}

- Wanneer $w_A = w_B$ (hetgeen zich voordoet wanneer de zuigleiding aan de zuigflens en de persleiding aan de persflens dezelfde diameter hebben) en wanneer ook $h_A = h_B$ (hetgeen zich voordoet wanneer de zuigflens en de persflens in hetzelfde horizontaal vlak liggen), bekomt men :

in het TS :

$$H_{man} = \frac{p_B - p_A}{\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g}$$

$$p_{man} = p_B - p_A$$

in het SI :

$$H_{man} = \frac{p_B - p_A}{\rho \cdot g}$$

$$p_{man} = p_B - p_A$$

Wanneer $w_A = w_B$ en $h_A = h_B$, is de manometrische opvoerdruk p_{man} gelijk aan het verschil van de aflezing op twee manometers (drukmeters) die zich respektievelijk op de zuigflens en op de persflens bevinden. Hoewel de betrokken manometers de overdruk aangeven, is het verschil tussen beide overdrukken ook gelijk aan het verschil tussen de respektievelijke absolute drukken.

- De snelheid van de vloeistofspiegel w_1 in het zuigreservoir kan gelijkgesteld worden aan nul; wanneer de persleiding onderaan uitmondt in het persreservoir, kan ook de snelheid w_2 in het persreservoir (ter hoogte van de vloeistofspiegel) gelijkgesteld worden aan nul (zie figuur XIV.2.).
- Wanneer de vloeistofspiegel zowel in het zuigreservoir als in het persreservoir blootgesteld is aan de heersende atmosferische druk, heeft men :

$$p_1 = p_2 = \text{atmosferische druk}$$
$$p_2 - p_1 = \text{nul}$$

- Wanneer de persleiding niet uitmondt onder de vloeistofspiegel, en de vloeistof dus vrij uitstroomt uit de persleiding, is de druk p_2 gelijk aan de omgevingsdruk (die meestal de atmosferische druk zal zijn). De snelheid w_2 mag in dit geval uiteraard niet gelijkgesteld worden aan nul.

e. Algemene groothedenvergelijkingen die in het TS het vereist pompvermogen P_{as} weergeven

Onder vereist pompvermogen P_{as} verstaat men het vermogen dat door de motor aan de as van de pomp wordt overgedragen. Gezien de optredende verliezen in de motor zelf, zal het vermogen dat door de pompmotor opgenomen wordt, groter zijn dan P_{as}. Nemen we bijvoorbeeld het geval van een pomp aangedreven door een elektrische motor waarvan het rendement voorgesteld wordt

door η_m. Het door de motor opgenomen vermogen P is dan gelijk aan $\frac{P_{as}}{\eta_m}$. Hierna wordt enkel P_{as} behandeld.

☆ Toepassing van de wet van Bernoulli enerzijds tussen 1 en A, en anderzijds tussen B en 2, geeft volgens (XIV, 2, TS) :

$$\left(\frac{g}{g_n} \cdot h_1\right)^{\star} + \left(\frac{p_1}{\gamma_n}\right)^{\star} + \left(\frac{w_1^2}{2\,g_n}\right)^{\star} = \left(\frac{g}{g_n} \cdot h_A\right)^{\star} + \left(\frac{p_A}{\gamma_n}\right)^{\star} + \left(\frac{w_A^2}{2\,g_n}\right)^{\star} + \left(\frac{g}{g_n} \cdot h_{vz}\right)^{\star} \quad \text{(TS)}$$

$$\left(\frac{g}{g_n} \cdot h_B\right)^{\star} + \left(\frac{p_B}{\gamma_n}\right)^{\star} + \left(\frac{w_B^2}{2\,g_n}\right)^{\star} = \left(\frac{g}{g_n} \cdot h_2\right)^{\star} + \left(\frac{p_2}{\gamma_n}\right)^{\star} + \left(\frac{w_2^2}{2\,g_n}\right)^{\star} + \left(\frac{g}{g_n} \cdot h_{vp}\right)^{\star} \quad \text{(TS)}$$

Hieruit wordt afgeleid hoeveel de verhoging van de stromingsenergie per normgewicht verpompte vloeistof bedraagt; men bekomt :

$$\left(\frac{g}{g_n} \cdot h_2 - \frac{g}{g_n} \cdot h_1\right)^{\star} + \left(\frac{p_2 - p_1}{\gamma_n}\right)^{\star} + \left(\frac{w_2^2 - w_1^2}{2\,g_n}\right)^{\star} + \left(\frac{g}{g_n} \cdot h_{vz}\right)^{\star} + \left(\frac{g}{g_n} \cdot h_{vp}\right)^{\star}$$

$$= \left(\frac{p_B - p_A}{\gamma_n}\right)^{\star} + \left(\frac{w_B^2 - w_A^2}{2\,g_n}\right)^{\star} + \left(\frac{g}{g_n} \cdot h_B\right)^{\star} - \left(\frac{g}{g_n} \cdot h_A\right)^{\star} \quad \text{(TS)}$$

Term-eenheid : $\frac{\text{kgf . m}}{\text{kgf}} = \text{(m)}$

Elk van beide veeltermen, vermenigvuldigd met de normgewichtsstroom $\dot{G}_n$ en gedeeld door het pomprendement η_p, geeft het vereist vermogen dat aan de as van de pomp dient toegevoerd te worden (P_{as}) bij een normgewichtsstroom $\dot{G}_n$. Aldus bekomt men :

$$P_{as} = \frac{\dot{G}_n \cdot \left(\frac{g}{g_n} \cdot h_2 - \frac{g}{g_n} \cdot h_1 + \frac{p_2 - p_1}{\gamma_n} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2\,g_n} + \frac{g}{g_n} \cdot h_{vz} + \frac{g}{g_n} \cdot h_{vp}\right)^{\star}}{\eta_p}$$

$$= \frac{\dot{G}_n \cdot \left(\frac{p_B - p_A}{\gamma_n} + \frac{w_B^2 - w_A^2}{2\,g_n} + \frac{g}{g_n} \cdot h_B - \frac{g}{g_n} \cdot h_A\right)^{\star}}{\eta_p} \quad \text{(TS)}$$

TS-eenheid : $\frac{\text{kgf . m}}{\text{s}}$

Gebruik makend van de grootheden H_{man} en p_{man}, geldt eveneens :

$$P_{as} = \frac{\dot{G}_n \cdot \left(\frac{g}{g_n} \cdot H_{man}\right)^{\star}}{\eta_p} = \frac{\frac{\dot{G}_n}{g_n} \cdot g \cdot H_{man}}{\eta_p} \qquad \text{(TS)}$$

TS-eenheid : $\frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{s}}$

$$P_{as} = \frac{\dot{G}_n \cdot \left(\frac{p_{man}}{\gamma_n}\right)^{\star}}{\eta_p} = \frac{\frac{\dot{G}_n}{\gamma_n} \cdot p_{man}}{\eta_p} \qquad \text{(TS)}$$

TS-eenheid : $\frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{s}}$

$\star$ Toepassing van de wet van Bernoulli, enerzijds tussen 1 en A, en anderzijds tussen B en 2, geeft volgens (XIV, 3, TS) :

$$h_1 + \frac{p_1}{\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g} + \frac{w_1^2}{2g} = h_A + \frac{p_A}{\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g} + \frac{w_A^2}{2g} + h_{vz} \qquad \text{(TS)}$$

$$h_B + \frac{p_B}{\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g} + \frac{w_B^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g} + \frac{w_2^2}{2g} + h_{vp} \qquad \text{(TS)}$$

Hieruit wordt afgeleid, hoeveel de verhoging van de stromingsenergie per werkelijk gewicht verpompte vloeistof bedraagt (met gewicht in de betekenis van kracht); men bekomt :

$$h_2 - h_1 + \frac{p_2 - p_1}{\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g} + h_{vz} + h_{vp} = \frac{p_B - p_A}{\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g} + \frac{w_B^2 - w_A^2}{2g} + h_B - h_A \qquad \text{(TS)}$$

Term-eenheid : $\frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{kgf}} = \text{m}$

Elk van beide veeltermen, vermenigvuldigd met de gewichtsstroom (op basis van het werkelijk gewicht) $\frac{\dot{G}_n}{g_n} \cdot g$ en gedeeld door het pomprendement η_p, geeft het vereist vermogen dat aan de as van de pomp (P_{as}) dient toegevoerd te worden bij een gewichtsstroom $\frac{\dot{G}_n}{g_n} \cdot g$.

Aldus bekomt men :

$$P_{as} = \frac{\frac{\dot{G}_n}{g_n} \cdot g \cdot \left(h_2 - h_1 + \frac{p_2 - p_1}{\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2\,g} + h_{vz} + h_{vp} \right)}{\eta_p} \qquad \text{(TS)}$$

$$= \frac{\frac{\dot{G}_n}{g_n} \cdot g \cdot \left(\frac{p_B - p_A}{\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g} + \frac{w_B^2 - w_A^2}{2\,g} + h_B - h_A \right)}{\eta_p} \qquad \text{(TS)}$$

TS-eenheid : $\frac{\text{kgf . m}}{\text{s}}$

Gebruik makend van de grootheden H_{man} en p_{man}, geldt eveneens :

$$P_{as} = \frac{\frac{\dot{G}_n}{g_n} \cdot g \cdot H_{man}}{\eta_p} \qquad \text{(TS)}$$

TS-eenheid : $\frac{\text{kgf . m}}{\text{s}}$

$$= \frac{\frac{\dot{G}_n}{\gamma_n} \cdot p_{man}}{\eta_p} \qquad \text{(TS)}$$

TS-eenheid : $\frac{\text{kgf . m}}{\text{s}}$

☆ Toepassing van de wet van Bernoulli, enerzijds tussen 1 en A en anderzijds tussen B en 2, geeft volgens (XIV, 4, TS) :

$$\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h_1 + p_1 + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w_1^2}{2}$$

$$= \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h_A + p_A + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w_A^2}{2} + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h_{vz} \qquad \text{(TS)}$$

$$\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h_B + p_B + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w_B^2}{2}$$

$$= \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h_2 + p_2 + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w_2^2}{2} + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot h_{vp} \qquad \text{(TS)}$$

Hieruit wordt afgeleid, hoeveel de verhoging van de stromingsenergie per volume verpompte vloeistof bedraagt; men bekomt :

$$\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot (h_2 - h_1) + p_2 - p_1 + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot (h_{vz} + h_{vp})$$

$$= p_B - p_A + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w_B^2 - w_A^2}{2} + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot (h_B - h_A) \qquad \text{(TS)}$$

Term-eenheid : $\frac{\text{kgf . m}}{\text{m}^3} = \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$

Elk van beide veeltermen, vermenigvuldigd met Q en gedeeld door het pomprendement η_p, geeft het vereist vermogen dat aan de as van de pomp (P_{as}) dient toegevoerd te worden bij een volumestroom Q.

Aldus bekomt men :

$$P_{as} = \frac{Q \cdot \left[\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot (h_2 - h_1) + p_2 - p_1 + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot (h_{vz} + h_{vp})\right]}{\eta_p}$$

$$= \frac{Q \cdot \left[p_B - p_A + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w_B^2 - w_A^2}{2} + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot (h_B - h_A)\right]}{\eta_p} \qquad \text{(TS)}$$

TS-eenheid : $\frac{\text{kgf . m}}{\text{s}}$

Gebruik makend van de grootheden H_{man} en p_{man}, geldt eveneens :

$$P_{as} = \frac{Q \cdot \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot H_{man}}{\eta_p} \qquad \text{(TS)}$$

TS-eenheid : $\frac{\text{kgf . m}}{\text{s}}$

$$= \frac{Q \cdot p_{man}}{\eta_p} \qquad \text{(TS)}$$

TS-eenheid : $\frac{\text{kgf . m}}{\text{s}}$

f. Algemene groothedenvergelijkingen die in het SI het pompvermogen P_{as} weergeven

☆ Toepassing van de wet van Bernoulli, enerzijds tussen 1 en A en anderzijds tussen B en 2, geeft volgens (XIV, 2, SI) :

$$g \cdot h_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{w_1^2}{2} = g \cdot h_A + \frac{p_A}{\rho} + \frac{w_A^2}{2} + g \cdot h_{vz} \qquad \text{(SI)}$$

$$g \cdot h_B + \frac{p_B}{\rho} + \frac{w_B^2}{2} = g \cdot h_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{w_2^2}{2} + g \cdot h_{vp} \qquad \text{(SI)}$$

Hieruit wordt afgeleid, hoeveel de verhoging van de stromingsenergie per massa verpompte vloeistof bedraagt; men bekomt :

$$g \cdot (h_2 - h_1) + \frac{p_2 - p_1}{\rho} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + g \cdot (h_{vz} + h_{vp}) =$$

$$\frac{p_B - p_A}{\rho} + \frac{w_B^2 - w_A^2}{2} + g \cdot (h_B - h_A) \qquad \text{(SI)}$$

Term-eenheid : $\frac{J}{kg} = \frac{N \cdot m}{kg} = \frac{m^2}{s^2}$

Elk van beide veeltermen, vermenigvuldigd met de massastroom q_m en gedeeld door het pomprendement η_p, geeft het vereist vermogen dat aan de as van de pomp dient toegevoerd te worden (P_{as}) bij een massastroom q_m. Aldus bekomt men :

$$P_{as} = \frac{q_m \cdot \left[g \cdot (h_2 - h_1) + \frac{p_2 - p_1}{\rho} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + g \cdot (h_{vz} + h_{vp}) \right]}{\eta_p}$$

$$= \frac{q_m \cdot \left[\frac{p_B - p_A}{\rho} + \frac{w_B^2 - w_A^2}{2} + g \cdot (h_B - h_A) \right]}{\eta_p} \qquad \text{(SI)}$$

SI-eenheid : $\frac{N \cdot m}{s} = \frac{J}{s} = W$

Gebruik makend van de grootheden H_{man} en p_{man}, geldt eveneens :

$$P_{as} = \frac{q_m \cdot g \cdot H_{man}}{\eta_p} \qquad \text{(SI)}$$

$$= \frac{\frac{q_m}{\rho} \cdot p_{man}}{\eta_p} \qquad \text{(SI)}$$

☆ Toepassing van de wet van Bernoulli, enerzijds tussen 1 en A, en anderzijds tussen B en 2, geeft volgens (XIV, 3, SI) :

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{w_1^2}{2\,g} = h_A + \frac{p_A}{\rho \cdot g} + \frac{w_A^2}{2\,g} + h_{vz} \qquad \text{(SI)}$$

$$h_B + \frac{p_B}{\rho \cdot g} + \frac{w_B^2}{2\,g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{w_2^2}{2\,g} + h_{vp} \qquad \text{(SI)}$$

Hieruit wordt afgeleid, hoeveel de verhoging van de stromingsenergie per werkelijk gewicht verpompte vloeistof bedraagt (met gewicht in de betekenis van kracht); men bekomt :

$$h_2 - h_1 + \frac{p_2 - p_1}{\rho \cdot g} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2\,g} + h_{vz} + h_{vp} = \frac{p_B - p_A}{\rho \cdot g} + \frac{w_B^2 - w_A^2}{2\,g} + h_B - h_A \qquad \text{(SI)}$$

Term-eenheid : $\frac{J}{N} = \frac{N \cdot m}{N} = m$

Elk van beide veeltermen, vermenigvuldigd met de gewichtsstroom $q_m \cdot g$ en gedeeld door het pomprendement η_p, geeft het vereist vermogen dat aan de as van de pomp dient toegevoerd te worden (P_{as}) bij een gewichtsstroom $q_m \cdot g$.
Aldus bekomt men :

$$P_{as} = \frac{q_m \cdot g \cdot \left[h_2 - h_1 + \frac{p_2 - p_1}{\rho \cdot g} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2\,g} + h_{vz} + h_{vp} \right]}{\eta_p}$$

$$= \frac{q_m \cdot g \cdot \left[\frac{p_B - p_A}{\rho \cdot g} + \frac{w_B^2 - w_A^2}{2\,g} + h_B - h_A \right]}{\eta_p} \qquad \text{(SI)}$$

SI-eenheid : $\frac{N \cdot m}{s} = \frac{J}{s} = W$

Gebruik makend van de grootheden H_{man} en p_{man}, geldt eveneens :

$$P_{as} = \frac{q_m \cdot g \cdot H_{man}}{\eta_p} \qquad \text{(SI)}$$

$$= \frac{\frac{q_m}{\rho} \cdot p_{man}}{\eta_p} \qquad \text{(SI)}$$

☆ Toepassing van de wet van Bernoulli, enerzijds tussen 1 en A, en anderzijds tussen B en 2, geeft volgens (XIV, 4, SI) :

$$\rho \cdot g \cdot h_1 + p_1 + \frac{\rho \cdot w_1^2}{2} = \rho \cdot g \cdot h_A + p_A + \frac{\rho \cdot w_A^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h_{vz} \qquad \text{(SI)}$$

$$\rho \cdot g \cdot h_B + p_B + \frac{\rho \cdot w_B^2}{2} = \rho \cdot g \cdot h_2 + p_2 + \frac{\rho \cdot w_2^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h_{vp} \qquad \text{(SI)}$$

Hieruit wordt afgeleid, hoeveel de verhoging van de stromingsenergie per volume verpompte vloeistof bedraagt; men bekomt :

$$\rho \cdot g \cdot (h_2 - h_1) + p_2 - p_1 + \rho \cdot \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + \rho \cdot g \cdot (h_{vz} + h_{vp})$$

$$= p_B - p_A + \rho \cdot \frac{w_B^2 - w_A^2}{2} + \rho \cdot g \cdot (h_B - h_A) \qquad \text{(SI)}$$

Term-eenheid : $\frac{J}{m^3} = \frac{N \cdot m}{m^3} = \frac{N}{m^2} = Pa$

Elk van beide veeltermen, vermenigvuldigd met de volumestroom q_v en gedeeld door het pomprendement η_p, geeft het vereist vermogen dat aan de as van de pomp dient toegevoerd te worden (P_{as}) bij een volumestroom q_v. Aldus bekomt men :

$$P_{as} = \frac{q_v \cdot \left[\rho \cdot g \cdot (h_2 - h_1) + p_2 - p_1 + \rho \cdot \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + \rho \cdot g \cdot (h_{vz} + h_{vp})\right]}{\eta_p}$$

$$= \frac{q_v \cdot \left[p_B - p_A + \rho \cdot \frac{w_B^2 - w_A^2}{2} + \rho \cdot g \cdot (h_B - h_A)\right]}{\eta_p} \qquad \text{(SI)}$$

SI-eenheid : $\frac{N \cdot m}{s} = \frac{J}{s} = W$

Gebruik makend van de grootheden H_{man} en p_{man}, geldt eveneens :

$$P_{as} = \frac{q_v \cdot \rho \cdot g \cdot H_{man}}{\eta_p} \qquad \text{(SI)}$$

$$= \frac{q_v \cdot p_{man}}{\eta_p} \qquad \text{(SI)}$$

g. Samenvatting

Het pompvermogen P_{as} wordt weergegeven door volgende algemene grootheden-vergelijkingen :

- in het TS :

$$P_{as} = \frac{\frac{\dot{G}_n}{g_n} \cdot g \cdot H_{man}}{\eta_p} = \frac{\frac{\dot{G}_n}{\gamma_n} \cdot p_{man}}{\eta_p} \qquad \left(\text{TS-eenheid : } \frac{\text{kgf . m}}{\text{s}}\right)$$

$$= \frac{Q \cdot \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot H_{man}}{\eta_p} = \frac{Q \cdot p_{man}}{\eta_p} \qquad \left(\text{TS-eenheid : } \frac{\text{kgf . m}}{\text{s}}\right)$$

- in het SI :

$$P_{as} = \frac{q_m \cdot g \cdot H_{man}}{\eta_p} = \frac{\frac{q_m}{\rho} \cdot p_{man}}{\eta_p} \qquad \text{(SI-eenheid : W)}$$

$$= \frac{q_v \cdot \rho \cdot g \cdot H_{man}}{\eta_p} = \frac{q_v \cdot p_{man}}{\eta_p} \qquad \text{(SI-eenheid : W)}$$

h. Gebruikelijke getalwaardenvergelijkingen in het TS in verband met het pompvermogen

Voor het berekenen van het vereist pompvermogen gebruikte men in het TS geen algemene groothedenvergelijkingen, doch wel getalwaardenvergelijkingen die zelfs niet helemaal nauwkeurig waren daar men geen rekening hield met de plaatselijke versnelling van de zwaartekracht (plaatselijke zwaarteveldsterkte). Verder werd in het TS het vermogen voorgesteld door het symbool N (dat thans vervangen is door het symbool P).

Een eerste getalwaardenvergelijking toegepast in het TS in verband met het pompvermogen luidt als volgt :

$$N_{as} = \frac{Q \cdot \gamma \cdot H_{man}}{60 \times 75 \times \eta_p} = \frac{Q \cdot \gamma \cdot H_{man}}{4500\ \eta_p}$$

met N_{as} = vereist vermogen in pk $\left(1 \text{ pk} = 75 \frac{\text{kgf . m}}{\text{s}}\right)$

Q = volumestroom in $\frac{\text{L}}{\text{min}}$ $\left(= \frac{\text{dm}^3}{\text{min}}\right)$

γ = soortelijk gewicht in $\frac{\text{kgf}}{\text{dm}^3}$

H_{man} = manometrische opvoerhoogte in meter

In feite dient de betrokken getalwaardenvergelijking, om nauwkeurig te zijn, geschreven te worden als volgt :

$$N_{as} = \frac{Q \cdot \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot H_{man}}{4500\ \eta_p}$$

Men gaat over van de algemene groothedenvergelijking in TS-notatie $P_{as} = \frac{Q \cdot \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot H_{man}}{\eta_p}$ naar de opgegeven getalwaardenvergelijking als volgt (na g met g_n weggedeeld te hebben) :

$$75\left\{N_{as}\right\}_{pk} = \frac{\frac{\left\{Q\right\}_{L/min}}{60\ 000} \cdot 1000\left\{\gamma_n\right\}_{kgf/dm^3} \cdot \left\{H_{man}\right\}_m}{\eta_p}$$

$$\left\{N_{as}\right\}_{pk} = \frac{\left\{Q\right\}_{L/min} \cdot \left\{\gamma_n\right\}_{kgf/dm^3} \cdot \left\{H_{man}\right\}_m}{4500}$$

Een tweede getalwaardenvergelijking toegepast in het TS in verband met het pompvermogen luidt :

$$N_{as} = \frac{Q \cdot \gamma \cdot H_{man}}{270\ \eta_p}$$

met N_{as} = vereist vermogen in pk $\left(1\ pk = 75\ \frac{kgf \cdot m}{s}\right)$

Q = volumestroom in $\frac{m^3}{h}$

γ = soortelijk gewicht in $\frac{kgf}{dm^3}$

H_{man} = manometrische opvoerhoogte in meter

In feite dient de betrokken getalwaardenvergelijking, om nauwkeurig te zijn, geschreven te worden als volgt :

$$N_{as} = \frac{Q \cdot \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot H_{man}}{270\ \eta_p}$$

Men gaat over van de algemene groothedenvergelijking in TS-notatie $P_{as} = \frac{Q \cdot \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot H_{man}}{\eta_p}$ naar de opgegeven getalwaardenvergelijking als volgt (na g met g_n weggedeeld te hebben) :

$$75\left\{N_{as}\right\}_{pk} = \frac{\left\{Q\right\}_{m^3/h}}{3600} \cdot 1000\left\{\gamma_n\right\}_{kgf/dm^3} \cdot \left\{H_{man}\right\}_m \over \eta_p$$

$$\left\{N_{as}\right\}_{pk} = \frac{\left\{Q\right\}_{m^3/h} \cdot \left\{\gamma_n\right\}_{kgf/dm^3} \cdot \left\{H_{man}\right\}_m}{270\ \eta_p}$$

Een derde getalwaardenvergelijking toegepast in het TS in verband met het pompvermogen luidt :

$$N_{as} = \frac{Q \cdot \gamma \cdot H_{man}}{75\ \eta_p}$$

met N_{as} = vereist vermogen in pk $\left(1\ pk = 75\ \frac{kgf \cdot m}{s}\right)$

Q = volumestroom in $\frac{L}{s}$ $\left(= \frac{dm^3}{s}\right)$

γ = soortelijk gewicht in $\frac{kgf}{dm^3}$

H_{man} = manometrische opvoerhoogte in meter

In feite dient de betrokken getalwaardenvergelijking, om nauwkeurig te zijn, geschreven te worden als volgt :

$$N_{as} = \frac{Q \cdot \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot H_{man}}{75\ \eta_p}$$

Men gaat over van de algemene groothedenvergelijking $P_{as} = \frac{Q \cdot \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot H_{man}}{\eta_p}$ in TS-notatie naar de opgegeven getalwaardenvergelijking als volgt (na g weggedeeld te hebben met g_n) :

$$75\left\{N_{as}\right\}_{pk} = \frac{\left\{Q\right\}_{L/s}}{1000} \cdot 1000\left\{\gamma_n\right\}_{kgf/dm^3} \cdot \left\{H_{man}\right\}_m \over \eta_p$$

$$\left\{N_{as}\right\}_{pk} = \frac{\left\{Q\right\}_{L/s} \cdot \left\{\gamma_n\right\}_{kgf/dm^3} \cdot \left\{H_{man}\right\}_m}{75\ \eta_p}$$

Een vierde getalwaardenvergelijking toegepast in het TS in verband met het pompvermogen luidt :

$$N_{as} = \frac{Q \cdot \gamma \cdot H_{man}}{102\ \eta_p}$$

met N_{as} = vereist vermogen in kW $\left(1\ kW = \frac{1000}{9{,}806\ 65}\ \frac{kgf \cdot m}{s}\right)$

Q = volumestroom in $\frac{L}{s}$ $\left(= \frac{dm^3}{s}\right)$

γ = soortelijk gewicht $\frac{kgf}{dm^3}$

H_{man} = manometrische opvoerhoogte in meter

In feite dient de betrokken getalwaardenvergelijking, om nauwkeurig te zijn, geschreven te worden als volgt :

$$N_{as} = \frac{Q \cdot \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot H_{man}}{102\ \eta_p}$$

Men gaat over van de algemene groothedenvergelijking in TS-notatie $P_{as} = \frac{Q \cdot \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot H_{man}}{\eta_p}$ naar de opgegeven getalwaardenvergelijking als volgt (na g weggedeeld te hebben met g_n) :

$$\frac{1000}{9{,}806\ 65}\left\{N_{as}\right\}_{kW} = \frac{\frac{\{Q\}_{L/s}}{1000} \cdot 1000\left\{\gamma_n\right\}_{kgf/dm^3} \cdot \left\{H_{man}\right\}_m}{\eta_p}$$

$$\left\{N_{as}\right\}_{kW} = \frac{\{Q\}_{L/s} \cdot \left\{\gamma_n\right\}_{kgf/dm^3} \cdot \left\{H_{man}\right\}_m}{101{,}971\ 621\ 3\ \eta_p}$$

Een vijfde getalwaardenvergelijking toegepast in het TS in verband met het pompvermogen luidt :

$$N_{as} = \frac{Q \cdot \gamma \cdot H_{man}}{367\ \eta_p}$$

met N_{as} = vereist vermogen in kW $\left(1\ kW = \frac{1000}{9{,}806\ 65}\ \frac{kgf \cdot m}{s}\right)$

Q = volumestroom in $\frac{m^3}{h}$

γ = soortelijk gewicht in $\frac{kgf}{dm^3}$

H_{man} = manometrische opvoerhoogte in meter

In feite dient de betrokken getalwaardenvergelijking, om nauwkeurig te zijn, geschreven te worden als volgt :

$$N_{as} = \frac{Q \cdot \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot H_{man}}{367\ \eta_p}$$

Men gaat over van de algemene groothedenvergelijking in TS-notatie $P_{as} = \frac{Q \cdot \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot H_{man}}{\eta_p}$ naar de opgegeven getalwaardenvergelijking als volgt (na g weggedeeld te hebben met g_n) :

$$\frac{1000}{9,806\ 65} \left\{N_{as}\right\}_{kW} = \frac{\frac{\{Q\}_{m^3/h}}{3600} \cdot 1000 \{\gamma_n\}_{kgf/dm^3} \cdot \{H_{man}\}_m}{\eta_p}$$

$$\{N_{as}\}_{kW} = \frac{\{Q\}_{m^3/h} \cdot \{\gamma_n\}_{kgf/dm^3} \cdot \{H_{man}\}_m}{367,097\ 836\ 7\ \eta_p}$$

Een zesde getalwaardenvergelijking toegepast in het TS in verband met het pompvermogen luidt :

$$N_{as} = \frac{Q \cdot \gamma \cdot H_{man}}{\eta_p}$$

met N_{as} = vereist vermogen in $\frac{kgf \cdot m}{s}$

Q = volumestroom in $\frac{L}{s}$ $(= \frac{dm^3}{s})$

γ = soortelijk gewicht in $\frac{kgf}{dm^3}$

H_{man} = manometrische opvoerhoogte in meter

In feite dient de betrokken getalwaardenvergelijking, om nauwkeurig te zijn, geschreven te worden als volgt :

$$N_{as} = \frac{Q \cdot \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot H_{man}}{\eta_p}$$

Deze getalwaardenvergelijking ziet er precies uit als de algemene groothedenvergelijking in TS-notatie $P_{as} = \frac{Q \cdot \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot H_{man}}{\eta_p}$ daar men heeft :

$\{Q\}_{L/s} \cdot \{\gamma_n\}_{kgf/dm^3} = \{Q\}_{m^3/s} \cdot \{\gamma_n\}_{kgf/m^3}$

2.3.12. Vermogen van ventilatoren

a. Aangewende grootheden en symbolen

Index 1 geldt voor de ingang van het aanzuigkanaal (indien aanwezig)
Index A geldt voor de zuigflens van de ventilator
Index B geldt voor de persflens van de ventilator
Index 2 geldt voor de uitgang van het perskanaal (indien aanwezig)
Indien er geen aanzuigkanaal aanwezig is, heeft men : 1 = A
Indien er geen perskanaal aanwezig is, heeft men : 2 = B

h_1, h_A, h_B, h_2 : hoogte boven een willekeurig gekozen referentievlak
w_1, w_A, w_B, w_2 : snelheid van het gas
p_1, p_A, p_B, p_2 : (absolute) statische druk van het gas
Q = volumestroom (in het SI wordt hiervoor ook het symbool q_v gebruikt)
h_{vz} = verlieshoogte tussen 1 en A (dus over het aanzuigkanaal)
h_{vp} = verlieshoogte tussen B en 2 (dus over het perskanaal)
g = plaatselijke versnelling van de zwaartekracht (plaatselijke zwaarteveldsterkte)

b. Manometrische opvoerdruk p_{man}

De wet van Bernoulli in de behandelde vorm (zie onderhavig hoofdstuk onder 2.3.9.) is slechts geldig voor alle fluïda die bij de beschouwde stroming niet samengedrukt worden; bij benadering wordt deze wet ook toegepast op gassen in zover de drukverschillen klein zijn en bijgevolg het soortelijk normgewicht (TS) en de soortelijke massa (SI) als nagenoeg konstant mogen aangenomen worden. Als soortelijk normgewicht γ_n (TS) en soortelijke massa ρ (SI) neemt men dan het gemiddeld soortelijk normgewicht en de gemiddelde soortelijke massa; dit is het soortelijk normgewicht en de soortelijke massa bij de gemiddelde (absolute) druk p waarvoor men in het geval van een ventilator kan nemen :

$$p = \frac{p_A + p_B}{2}$$

De waarde van het soortelijk normgewicht γ_n van een gas bij de temperatuur T en de druk p wordt gevonden als volgt :

☆ als de waarde van de specifieke gaskonstante $R^{\star}$ gekend is :

$$\gamma_{n,T,p} = \frac{p}{R^{\star} \cdot T} \qquad \text{(TS)}$$

☆ als de waarde van γ_n bij 0 °C en bij normale atmosferische druk gekend is (voorgesteld door $\gamma_{n,o}$) :

$$\gamma_{n,T,p} = \gamma_{n,o} \cdot \frac{273{,}15\ \text{K}}{T} \cdot \frac{p}{10\ 333{,}274\ 53\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}} \qquad \text{(TS)}$$

De waarde van de soortelijke massa ρ bij de temperatuur T en de druk p wordt gevonden als volgt :

☆ als de waarde van de specifieke gaskonstante R gekend is :

$$\rho_{T,p} = \frac{p}{R \cdot T} \qquad \text{(SI)}$$

☆ als de waarde van ρ bij 0 °C en bij normale atmosferische druk gekend is (voorgesteld door ρ_o) :

$$\rho_{T,p} = \rho_o \cdot \frac{273{,}15\ \text{K}}{T} \cdot \frac{p}{101\ 325\ \text{Pa}} \qquad \text{(SI)}$$

De manometrische opvoerdruk van ventilatoren wordt weergegeven door dezelfde uitdrukkingen als bij pompen (zie onderhavig hoofdstuk onder 2.3.11.). Hier echter worden, gezien het gering soortelijk normgewicht (TS) of de geringe soortelijke massa (SI), alle verschillen in plaatshoogte (en dus ook in hoogtedruk) steeds verwaarloosd. Men bekomt dan :

- in het TS :

$$p_{man} = p_2 - p_1 + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot (h_{vz} + h_{vp})$$

$$= p_B - p_A + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w_B^2 - w_A^2}{2}$$

- in het SI :

$$p_{man} = p_2 - p_1 + \frac{\rho \cdot (w_2^2 - w_1^2)}{2} + \rho \cdot g \cdot (h_{vz} + h_{vp})$$

$$= p_B - p_A + \frac{\rho \cdot (w_B^2 - w_A^2)}{2}$$

In het meest voorkomend geval, waar een ventilator lucht aanzuigt uit een ruimte waar atmosferische druk heerst (p_{atm}), is de druk p_1 aan de ingang van het zuigkanaal iets kleiner dan p_{atm}, daar men heeft :

- in het TS :

$$p_1 = p_{atm} - \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w_1^2}{2}$$

- in het SI :

$$p_1 = p_{atm} - \frac{\rho \cdot w_1^2}{2}$$

Op de plaats waar het perskanaal uitmondt in de buitenlucht (of eventueel in dezelfde ruimte waar lucht aangezogen wordt en waar de atmosferische druk heerst), heeft men : $p_2 = p_{atm}$; de dynamische druk $\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w_2^2}{2}$ (TS) of $\frac{\rho \cdot w_2^2}{2}$ (SI) dient hier als verloren beschouwd te worden.
Voor dit veel voorkomend geval waarvoor geldt :

$$p_1 = p_{atm} - \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w_1^2}{2} \qquad \text{(TS)}$$

$$p_1 = p_{atm} - \frac{\rho \cdot w_1^2}{2} \qquad \text{(SI)}$$

$$p_2 = p_{atm}$$

bekomt men :

- in het TS :

$$p_{man} = \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w_2^2}{2} + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot (h_{vz} + h_{vp}) = \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot g \cdot \left(\frac{w_2^2}{2\,g} + h_{vz} + h_{vp}\right)$$

$$= p_B - p_A + \frac{\gamma_n}{g_n} \cdot \frac{w_B^2 - w_A^2}{2}$$

- in het SI :

$$p_{man} = \frac{\rho \cdot w_2^2}{2} + \rho \cdot g \cdot (h_{vz} + h_{vp}) = \rho \cdot g \cdot \left(\frac{w_2^2}{2\,g} + h_{vz} + h_{vp}\right)$$

$$= p_B - p_A + \frac{\rho \cdot \left(w_B^2 - w_A^2\right)}{2}$$

c. Vereist ventilatorvermogen (vermogen toegevoerd aan de as van de ventilator)

Onder vereist ventilatorvermogen P_{as} verstaat men het vermogen dat door de motor aan de as van de ventilator wordt overgedragen. Gezien de

optredende verliezen in de motor zelf, zal het vermogen dat door de ventilatormotor opgenomen wordt, groter zijn dan P_{as}. Nemen we bijvoorbeeld het geval van een ventilator aangedreven door een elektrische motor waarvan het rendement wordt voorgesteld door η_m. Het door de motor opgenomen vermogen is dan gelijk aan $\frac{P_{as}}{\eta_m}$.

Als algemene groothedenvergelijking in verband met het vermogen dat door de motor aan de as van een ventilator wordt overgedragen bekomt men : (met η_v = rendement van de ventilator) :

- in het TS :

$$P_{as} = \frac{Q \cdot p_{man}}{\eta_v} \qquad \left(\text{TS-eenheid : } \frac{\text{kgf . m}}{\text{s}}\right)$$

- in het SI :

$$P_{as} = \frac{q_v \cdot p_{man}}{\eta_v} \qquad (\text{SI-eenheid : W})$$

d. Gebruikelijke getalwaardenvergelijkingen in het TS in verband met het ventilatorvermogen

Een eerste getalwaardenvergelijking toegepast in het TS in verband met het ventilatorvermogen luidt :

$$N_{as} = \frac{Q \cdot p_{man}}{3600 \times 75 \times \eta_v} = \frac{Q \cdot p_{man}}{270\ 000\ \eta_v}$$

met N_{as} = vereist vermogen in pk (1 pk = 75 $\frac{\text{kgf . m}}{\text{s}}$)

Q = volumestroom in $\frac{m^3}{h}$

p_{man} = manometrische opvoerdruk in $\frac{\text{kgf}}{m^2}$ (= mmWK)

Men gaat over van de algemene groothedenvergelijking $P_{as} = \frac{Q \cdot p_{man}}{\eta_v}$ in TS-notatie naar de opgegeven getalwaardenvergelijking als volgt :

$$75\left\{N_{as}\right\}_{pk} = \frac{\frac{\left\{Q\right\}_{m^3/h}}{3600} \cdot \left\{p_{man}\right\}_{kgf/m^2}}{\eta_v}$$

$$\left\{N_{as}\right\}_{pk} = \frac{\left\{Q\right\}_{m^3/h} \cdot \left\{p_{man}\right\}_{kgf/m^2}}{270\ 000}$$

Een tweede getalwaardenvergelijking toegepast in het TS in verband met het ventilatorvermogen luidt :

$$N_{as} = \frac{Q \cdot p_{man}}{3600 \times 102 \times \eta_v} = \frac{Q \cdot p_{man}}{367\,200\,\eta_v}$$

met N_{as} = vereist vermogen in kW ($1\ kW = \frac{1000}{9,806\,65}\ \frac{kgf \cdot m}{s}$)

Q = volumestroom in $\frac{m^3}{h}$

p_{man} = manometrische opvoerdruk in $\frac{kgf}{m^2}$ (= mmWK)

Men gaat over van de algemene groothedenvergelijking $P_{as} = \frac{Q \cdot p_{man}}{\eta_v}$ in TS-notatie naar de opgegeven getalwaardenvergelijking als volgt :

$$\frac{1000}{9,806\,65}\left\{N_{as}\right\}_{kW} = \frac{\frac{\left\{Q\right\}_{m^3/h}}{3600} \cdot \left\{p_{man}\right\}_{kgf/m^2}}{\eta_v}$$

$$\left\{N_{as}\right\}_{kW} = \frac{\left\{Q\right\}_{m^3/h} \cdot \left\{p_{man}\right\}_{kgf/m^2}}{3600 \times 101,971\,621\,3} = \frac{\left\{Q\right\}_{m^3/h} \cdot \left\{p_{man}\right\}_{kgf/m^2}}{367\,097,8367}$$

2.3.13. Luchtsnelheid in een trekschouw

Beschouwen we een ruimte (bijvoorbeeld een veestal) waar de luchtverversing gebeurt als volgt : luchtinlaat langs openingen in de zijwanden van de stal en luchtafvoer langs een trekschouw, werkend met natuurlijke trek, zie figuur XIV.3.

a. Aangewende grootheden en symbolen

Index 1 geldt voor het horizontale vlak (zowel binnen als buiten het lokaal) gelegen ter hoogte van de luchtinlaatopeningen

Index 2 geldt voor het horizontale vlak ter hoogte van de uitlaatopening van de trekschouw

h_1, h_2 : hoogte boven een willekeurig gekozen referentievlak

h : afstand tussen vlak 1 en vlak 2; $h = h_2 - h_1$

w_1 : luchtsnelheid in het lokaal ter hoogte van het horizontale vlak 1; gezien de grootte van dit vlak, geldt : $w_1 \approx 0$

w_2 : luchtsnelheid in de uitlaatopening van de trekschouw

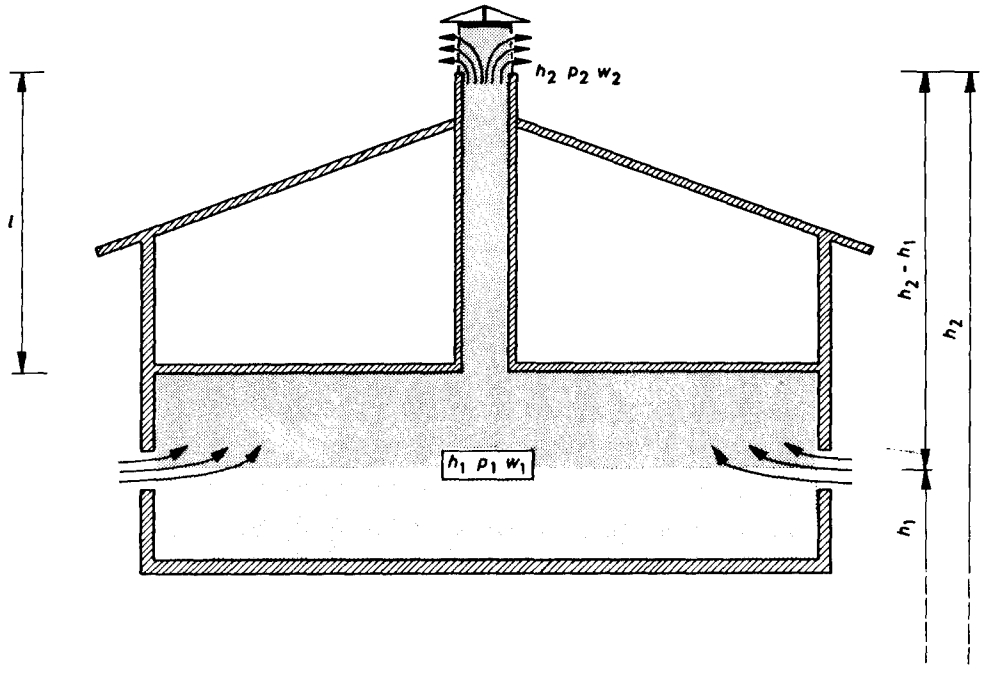


FIG. XIV. 3.

p_1 : (absolute) druk in het lokaal ter hoogte van het horizontale vlak 1; deze druk is gelijk aan de druk in de buitenlucht ter hoogte van hetzelfde horizontale vlak 1

p_2 : (absolute) druk in de trekschouw ter hoogte van het horizontale vlak 2 (dus in de uitlaatopening); deze druk is gelijk aan de druk in de buitenlucht ter hoogte van hetzelfde horizontale vlak 2

h_v : verlieshoogte tussen 1 en 2 (die gelijk is aan de verlieshoogte die zich voordoet in de trekschouw, daar in het lokaal zelf geen stromingsverliezen optreden)

t_i : luchttemperatuur in het lokaal; er wordt aangenomen dat de trekschouw goed geïsoleerd is zodat de temperatuur van de lucht in de trekschouw gelijk is aan de luchttemperatuur in het lokaal

t_u : luchttemperatuur van de buitenlucht

$\gamma_{n,i}$ en $\gamma_{n,u}$: soortelijk normgewicht van de lucht (TS), respektievelijk bij de temperaturen t_i en t_u

ρ_i en ρ_u : soortelijke massa van de lucht (SI), respektievelijk bij de temperaturen t_i en t_u

b. De grootheid "werkzame druk" of "trek"

Toepassing van de wet van Bernoulli (zie onderhavig hoofdstuk onder 2.3.9.) tussen 1 en 2 geeft (met $w_1 \approx 0$ en $h_2 - h_1 = h$) :

- in het TS :

$$p_1 - p_2 = \frac{\gamma_{n,i}}{g_n} \cdot g \cdot h + \frac{\gamma_{n,i}}{g_n} \cdot \frac{w_2^2}{2} + \frac{\gamma_{n,i}}{g_n} \cdot g \cdot h_v$$

- in het SI :

$$p_1 - p_2 = \rho_i \cdot g \cdot h + \frac{\rho_i \cdot w_2^2}{2} + \rho_i \cdot g \cdot h_v$$

Het drukverschil $p_1 - p_2$, beschouwd langs de kant van de buitenlucht, is gelijk aan de statische druk uitgeoefend op de basis door een kolom lucht van hoogte h; dus geldt ook :

- in het TS :

$$p_1 - p_2 = \frac{\gamma_{n,u}}{g_n} \cdot g \cdot h$$

- in het SI :

$$p_1 - p_2 = \rho_u \cdot g \cdot h$$

Uit bovenstaande uitdrukkingen leidt men af :

- in het TS :

$$\frac{\gamma_{n,u} - \gamma_{n,i}}{g_n} \cdot g \cdot h = \frac{\gamma_{n,i}}{g_n} \cdot \frac{w_2^2}{2} + \frac{\gamma_{n,i}}{g_n} \cdot g \cdot h_v$$

- in het SI :

$$(\rho_u - \rho_i) \cdot g \cdot h = \frac{\rho_i \cdot w_2^2}{2} + \rho_i \cdot g \cdot h_v$$

Het eerste lid van beide bovenstaande uitdrukkingen stelt de werkzame druk of trek voor, en is gelijk aan het verschil in druk uitgeoefend op de basis door respektievelijk een kolom lucht van hoogte h op temperatuur t_u en een kolom lucht van hoogte h op temperatuur t_i.

Het tweede lid toont aan, waartoe dit verschil in druk wordt gebruikt : enerzijds tot het overwinnen van de verliezen (TS : $\frac{\gamma_{n,i}}{g_n} \cdot g \cdot h_v$; SI : $\rho_i \cdot g \cdot h_v$) en anderzijds tot het kompenseren van de dynamische druk die verloren gaat bij de schouwuitlaat $\left(\text{TS} : \frac{\gamma_{n,i}}{g_n} \cdot \frac{w_2^2}{2}\text{; SI} : \frac{\rho_i \cdot w_2^2}{2}\right)$.

Wanneer de diameter van de schouw konstant blijft, is ook de snelheid w van de lucht in de trekschouw konstant. De verliezen in de trekschouw (met lengte l) splitsend in algemene verliezen en plaatselijke verliezen bekomt men :

- in het TS :

$$\frac{\gamma_{n,u} - \gamma_{n,i}}{g_n} \cdot g \cdot h = \frac{\gamma_{n,i}}{g_n} \cdot \frac{w^2}{2} + \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\gamma_{n,i}}{g_n} \cdot \frac{w^2}{2} + \Sigma\zeta \cdot \frac{\gamma_{n,i}}{g_n} \cdot \frac{w^2}{2}$$

$$= \frac{\gamma_{n,i}}{g_n} \cdot \frac{w^2}{2} \left(1 + \lambda \cdot \frac{l}{d} + \Sigma\zeta\right) \quad \left(\text{TS-eenheid} : \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}\right)$$

- in het SI :

$$(\rho_u - \rho_i) \cdot g \cdot h = \frac{\rho_i \cdot w^2}{2} + \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho_i \cdot w^2}{2} + \Sigma\zeta \cdot \frac{\rho_i \cdot w^2}{2}$$

$$= \frac{\rho_i \cdot w^2}{2} \cdot \left(1 + \lambda \cdot \frac{l}{d} + \Sigma\zeta\right) \quad \text{(SI-eenheid : Pa)}$$

c. Luchtsnelheid in de trekschouw

Uit bovenstaande uitdrukkingen leidt men verder de luchtsnelheid in de trekschouw af :

- in het TS :

$$w = \sqrt{\frac{2\,g\,.\,h}{1 + \lambda\,.\,\frac{l}{d} + \Sigma\zeta}\,.\,\frac{\gamma_{n,u} - \gamma_{n,i}}{\gamma_{n,i}}} \qquad \left(\text{TS-eenheid : } \frac{m}{s}\right)$$

- in het SI :

$$w = \sqrt{\frac{2\,g\,.\,h}{1 + \lambda\,.\,\frac{l}{d} + \Sigma\zeta}\,.\,\frac{\rho_u - \rho_i}{\rho_i}} \qquad \left(\text{SI-eenheid : } \frac{m}{s}\right)$$

2.3.14. Dynamische viskositeit en kinematische viskositeit

De kracht F die vereist is om een vloeistoflaag met oppervlakte A, te verschuiven met een relatieve snelheid w ten opzichte van een even grote vloeistoflaag die zich bevindt op een afstand d, is gelijk aan de weerstandskracht W. Men noemt dynamische viskositeit η de grootheid $\frac{W\,.\,d}{A\,.\,w}$.

De dynamische viskositeit heeft dus als dimensie :

$$\dim\left(\frac{\text{kracht x lengte}}{\text{oppervlakte x snelheid}}\right) = \dim\left(\frac{\text{kracht x lengte}}{\text{oppervlakte x } \frac{\text{lengte}}{\text{tijd}}}\right)$$

$$= \dim\left(\frac{\text{kracht x tijd}}{\text{oppervlakte}}\right) = \dim(\text{druk x tijd}) = \dim\left(\frac{\text{massa}}{\text{lengte x tijd}}\right)$$

$$\dim(\eta) = \dim\left(\frac{F\,.\,l}{A\,.\,w}\right) = \dim\left(\frac{F\,.\,l}{A\,.\,\frac{l}{t}}\right) = \dim\left(\frac{F\,.\,t}{A}\right) = \dim(p\,.\,t) = \dim\left(\frac{m}{l\,.\,t}\right)$$

Bij het gebruik van de grondeenheden en de ervan afgeleide koherente eenheden, verkrijgt men als eenheid van dynamische viskositeit :

- in het TS :

$$\frac{kgf\,.\,s}{m^2}$$

- in het SI :

$$\frac{N\,.\,s}{m^2} = Pa\,.\,s = \frac{kg\,.\,m}{s^2}\,.\,\frac{s}{m^2} = \frac{kg}{s\,.\,m}$$

De kinematische viskositeit ν is gelijk aan de dynamische viskositeit η, gedeeld door de soortelijke massa (die wordt voorgesteld door $\frac{\gamma_n}{g_n}$ in het TS en door ρ in het SI).

Men bekomt dus :

- in het TS :

$$\nu = \frac{\eta}{\frac{\gamma_n}{g_n}} = \frac{g_n \cdot \eta}{\gamma_n}$$

gebruikelijke schrijfwijze : $\nu = \frac{g \cdot \eta}{\gamma}$

- in het SI :

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

Bij het gebruik van de grondeenheden en de ervan afgeleide koherente eenheden, verkrijgt men als eenheid van kinematische viskositeit :

- in het TS :

$$\frac{\frac{kgf \cdot s}{m^2}}{\frac{kgf \cdot s^2}{m^4}} = \frac{\frac{m}{s^2} \cdot \frac{kgf \cdot s}{m^2}}{\frac{kgf}{m^3}} = \frac{m^2}{s}$$

- in het SI :

$$\frac{\frac{N \cdot s}{m^2}}{\frac{kg}{m^3}} = \frac{\frac{kg \cdot m}{s^2} \cdot \frac{s}{m^2}}{\frac{kg}{m^3}} = \frac{m^2}{s}$$

Men gaat over van de algemene groothedenvergelijking in TS-notatie $\nu = \frac{g_n \cdot \eta}{\gamma_n}$ naar de algemene groothedenvergelijking in SI-notatie, door γ_n te vervangen door $\rho \cdot g_n$:

$$\nu = \frac{g \cdot \eta}{\gamma} \qquad \text{(TS gebruikelijk)}$$

$$\nu = \frac{g_n \cdot \eta}{\gamma_n} \qquad \text{(TS korrekt)}$$

$$\nu = \frac{g_n \cdot \eta}{\rho \cdot g_n}$$

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \qquad \text{(SI)}$$

Voorbeeld 1

De dynamische viskositeit η van lucht bij een temperatuur van 20 °C (T = 293,15 K) en bij een druk gelijk aan de normale atmosferische druk (p = 10 332,274 53 $\frac{kgf}{m^2}$ = 101 325 Pa), is gelijk aan 1,855 . 10^{-6} $\frac{kgf \cdot s}{m^2}$, hetzij 18,19 . 10^{-6} Pa . s.

In tabellen vindt men deze waarden gewoonlijk als volgt :

$$10^6 \cdot \eta = 1{,}855 \frac{kgf \cdot s}{m^2} = 18{,}19 \text{ Pa} \cdot s$$

Om de kinematische viskositeit ν te kunnen berekenen, dient het soortelijk normgewicht γ_n (in het TS) of de soortelijke massa ρ (in het SI) gekend te zijn of berekend te worden. De berekening van γ_n en ρ kan gebeuren als volgt (met specifieke gaskonstante voor lucht $R^{\star}$ = 29,286 15 $\frac{kgf \cdot m}{kgf \cdot °K}$ en R = 287,199 $\frac{J}{kg \cdot K}$) :

$$\gamma_n = \frac{p}{R^{\star} \cdot T} = \frac{10\ 332{,}274\ 53 \frac{kgf}{m^2}}{29{,}286\ 15 \frac{kgf \cdot m}{kgf \cdot °K} \cdot 293{,}15\ °K} = 1{,}2035 \frac{kgf}{m^3} \qquad \text{(TS)}$$

$$\rho = \frac{p}{R \cdot T} = \frac{101\ 325 \frac{N}{m^2}}{287{,}199 \frac{J}{kg \cdot K} \cdot 293{,}15\ K} = 1{,}2035 \frac{kg}{m^3} \qquad \text{(SI)}$$

De berekening van de kinematische viskositeit ν gebeurt als volgt :

- in het TS :

$$\nu = \frac{g_n \cdot \eta}{\gamma_n} = \frac{9{,}806\ 65 \frac{m}{s^2} \cdot 1{,}855 \cdot 10^{-6} \frac{kgf \cdot s}{m^2}}{1{,}2035 \frac{kgf}{m^3}} = 15{,}11 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$$

waaruit volgt : $10^6 \nu = 15{,}11 \frac{m^2}{s}$

- in het SI :

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} = \frac{18{,}19 \cdot 10^{-6} \frac{N \cdot s}{m^2}}{1{,}2035 \frac{kg}{m^3}} = 15{,}11 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$$

waaruit volgt : $10^6 \nu = 15{,}11 \frac{m^2}{s}$

Voorbeeld 2

De kinematische viskositeit ν van water bij 20 °C (T = 293,15 K) is gelijk aan 1,004 . 10^{-6} $\frac{m^2}{s}$. In tabellen vindt men deze waarde gewoonlijk

opgegeven als volgt : $10^6\ \nu = 1{,}004\ \frac{m^2}{s}$. Het soortelijk normgewicht γ_n en de soortelijke massa ρ van water bij 20 °C zijn respektievelijk gelijk aan 998,2 $\frac{kgf}{m^3}$ (TS) en 998,2 $\frac{kg}{m^3}$ (SI).
De dynamische viskositeit η wordt berekend als volgt :

- in het TS :

$$\eta = \frac{\gamma_n \cdot \nu}{g_n} = \frac{998{,}2\ \frac{kgf}{m^3} \cdot 1{,}004 \cdot 10^{-6}\ \frac{m^2}{s}}{9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2}} = 102{,}195 \cdot 10^{-6}\ \frac{kgf \cdot s}{m^2}$$

waaruit volgt : $10^6\ \eta = 102{,}195\ \frac{kgf \cdot s}{m^2} \approx 102{,}2\ \frac{kgf \cdot s}{m^2}$

- in het SI :

$$\eta = \nu \cdot \rho = 1{,}004 \cdot 10^{-6}\ \frac{m^2}{s} \cdot 998{,}2\ \frac{kg}{m^3} = 1002{,}2 \cdot 10^{-6}\ \frac{N \cdot s}{m^2}$$

waaruit volgt : $10^6\ \eta = 1002{,}193$ Pa . s $\approx 1002{,}2$ Pa . s

2.3.15. Laminaire stroming van een vloeistof over een hellend vlak

Hier wordt het geval beschouwd van een vloeistof die in een dunne laag met dikte (hoogte) d en breedte b, laminair stroomt over een hellend vlak (dat een hoek α vormt met het horizontaal vlak).

a. Aangewende grootheden en symbolen

- voorkomend zowel in het TS als in het SI :

Q = volumestroom

g = plaatselijke versnelling van de zwaartekracht (plaatselijke zwaarteveldsterkte)

η = dynamische viskositeit = $\frac{\gamma_n \cdot \nu}{g_n}$ (TS)

$= \nu \cdot \rho$ (SI)

ν = kinematische viskositeit = $\frac{g_n \cdot \eta}{\gamma_n}$ (TS)

$= \frac{\eta}{\rho}$ (SI)

v_m = (gemiddelde) vloeistofsnelheid

- enkel voorkomend in het TS

$\dot{G}_n$ = normgewichtsstroom = $Q \cdot \gamma_n$

g_n = normversnelling = 9,806 65 $\frac{m}{s^2}$

γ_n = soortelijk normgewicht

- enkel voorkomend in het SI :

q_v = volumestroom (dikwijls ook aangeduid met Q, vroeger ook met $\dot{V}$)

q_m = massastroom (vroeger ook aangeduid met $\dot{m}$) = $q_v \cdot \rho$

ρ = soortelijke massa

b. Stromende hoeveelheden

De hoeveelheid vloeistof die stroomt door een doorsnede van de laag (loodrecht op de stromingsrichting) wordt gegeven door de volgende algemene groothedenvergelijkingen :

- in het TS :

$$\text{normgewichtsstroom } \dot{G}_n = \frac{g \cdot \gamma_n^2 \cdot d^3 \cdot b \cdot \sin\alpha}{3\, g_n \cdot \eta} = \frac{g \cdot \gamma_n \cdot d^3 \cdot b \cdot \sin\alpha}{3\,\nu}$$

Bij het gebruik van de grondeenheden en de ervan afgeleide koherente eenheden, wordt $\dot{G}_n$ uitgedrukt in $\frac{kgf}{s}$:

$$\left[\dot{G}_n\right]_{TS} = \frac{\frac{m}{s^2} \cdot \frac{kgf^2}{m^6} \cdot m^3 \cdot m}{\frac{m}{s^2} \cdot \frac{kgf \cdot s}{m^2}} = \frac{kgf}{s}$$

$$= \frac{\frac{m}{s^2} \cdot \frac{kgf}{m^3} \cdot m^3 \cdot m}{\frac{m^2}{s}} = \frac{kgf}{s}$$

$$\text{volumestroom } Q \text{ of } \dot{V} = \frac{g \cdot \gamma_n \cdot d^3 \cdot b \cdot \sin\alpha}{3\, g_n \cdot \eta}$$

$$= \frac{g \cdot d^3 \cdot b \cdot \sin\alpha}{3\,\nu}$$

$$= d \cdot b \cdot v_m$$

met $v_m = \frac{g \cdot \gamma_n \cdot d^2 \cdot \sin\alpha}{3\, g_n \cdot \eta} = \frac{g \cdot d^2 \cdot \sin\alpha}{3\,\nu}$ = gemiddelde snelheid

Bij het gebruik van de grondeenheden en de ervan afgeleide koherente eenheden, wordt Q uitgedrukt in $\frac{m^3}{s}$:

$$[Q]_{TS} = \frac{\frac{m}{s^2} \cdot \frac{kgf}{m^3} \cdot m^3 \cdot m}{\frac{m}{s^2} \cdot \frac{kgf \cdot s}{m^2}} = \frac{m^3}{s}$$

$$= \frac{\frac{m}{s^2} \cdot m^3 \cdot m}{\frac{m^2}{s}} = \frac{m^3}{s}$$

De gebruikelijke schrijfwijze in het TS was echter :

$$\dot{G} = \frac{\gamma^2 \cdot d^3 \cdot b \cdot \sin \alpha}{3 \eta}$$

$$= \frac{g \cdot \gamma \cdot d^3 \cdot b \cdot \sin \alpha}{3 \nu}$$

$$Q \text{ of } \dot{V} = \frac{\gamma \cdot d^3 \cdot b \cdot \sin \alpha}{3 \eta}$$

$$= \frac{g \cdot d^3 \cdot b \cdot \sin \alpha}{3 \nu}$$

In de uitdrukkingen waarin η voorkomt, komt bij de gebruikelijke schrijfwijze in het TS de plaatselijke versnelling van de zwaartekracht niet meer voor, daar g in de teller weggedeeld werd met g_n in de noemer. Nochtans is de zwaartekracht de oorzaak van de stroming.

- in het SI :

$$q_m = \frac{g \cdot \rho^2 \cdot d^3 \cdot b \cdot \sin \alpha}{3 \eta} = \frac{g \cdot \rho \cdot d^3 \cdot b \cdot \sin \alpha}{3 \nu}$$

Bij het gebruik van de grondeenheden en de ervan afgeleide koherente eenheden, wordt q_m uitgedrukt in $\frac{kg}{s}$:

$$[q_m]_{SI} = \frac{\frac{m}{s^2} \cdot \frac{kg^2}{m^6} \cdot m^3 \cdot m}{\frac{N \cdot s}{m^2}} = \frac{\frac{m}{s^2} \cdot \frac{kg^2}{m^6} \cdot m^3 \cdot m}{\frac{kg}{s \cdot m}} = \frac{kg}{s}$$

$$= \frac{\frac{m}{s^2} \cdot \frac{kg}{m^3} \cdot m^3 \cdot m}{\frac{m^2}{s}} = \frac{kg}{s}$$

$$q_v = \frac{g \cdot \rho \cdot d^3 \cdot b \cdot \sin \alpha}{3 \eta} = \frac{g \cdot d^3 \cdot b \cdot \sin \alpha}{3 \nu}$$

$$= d \cdot b \cdot v_m$$

met $v_m = \frac{g \cdot \rho \cdot d^2 \cdot \sin \alpha}{3 \eta} = \frac{g \cdot d^2 \cdot \sin \alpha}{3 \nu}$ = gemiddelde snelheid

Bij het gebruik van SI-eenheden, wordt q_v uitgedrukt in $\frac{m^3}{s}$:

$$\left[q_v\right]_{SI} = \frac{\frac{m}{s^2} \cdot \frac{kg}{m^3} \cdot m^3 \cdot m}{\frac{N \cdot s}{m^2}} = \frac{\frac{m}{s^2} \cdot \frac{kg}{m^3} \cdot m^3 \cdot m}{\frac{kg}{s \cdot m}} = \frac{m^3}{s}$$

$$= \frac{\frac{m}{s^2} \cdot m^3 \cdot m}{\frac{m^2}{s}} = \frac{m^3}{s}$$

c. Overgang van de algemene groothedenvergelijkingen in TS-notatie naar algemene groothedenvergelijkingen in SI-notatie

Om van de algemene groothedenvergelijkingen in TS-notatie over te gaan naar de algemene groothedenvergelijkingen in SI-notatie, vervangt men : $\dot{G}_n$ door $q_m \cdot g_n$ en γ_n door $\rho \cdot g_n$
Men bekomt aldus :

$$\dot{G} = \frac{\gamma^2 \cdot d^3 \cdot b \cdot \sin\alpha}{3\eta} = \frac{g \cdot \gamma \cdot d^3 \cdot b \cdot \sin\alpha}{3\nu} \qquad \text{(TS gebruikelijk)}$$

$$\dot{G}_n = \frac{g \cdot \gamma_n^2 \cdot d^3 \cdot b \cdot \sin\alpha}{3 g_n \cdot \eta} = \frac{g \cdot \gamma_n \cdot d^3 \cdot b \cdot \sin\alpha}{3\nu} \qquad \text{(TS korrekt)}$$

$$q_m \cdot g_n = \frac{g \cdot \rho^2 \cdot g_n^2 \cdot d^3 \cdot b \cdot \sin\alpha}{3 g_n \cdot \eta}$$

$$= \frac{g \cdot \rho \cdot g_n \cdot d^3 \cdot b \cdot \sin\alpha}{3\nu}$$

$$q_m = \frac{g \cdot \rho^2 \cdot d^3 \cdot b \cdot \sin\alpha}{3\eta} = \frac{g \cdot \rho \cdot d^3 \cdot b \cdot \sin\alpha}{3\nu} \qquad \text{(SI)}$$

$$Q \text{ of } \dot{V} = \frac{\gamma \cdot d^3 \cdot b \cdot \sin\alpha}{3\eta} = \frac{g \cdot d^3 \cdot b \cdot \sin\alpha}{3\nu} \qquad \text{(TS gebruikelijk)}$$

$$Q = \frac{g \cdot \gamma_n \cdot d^3 \cdot b \cdot \sin\alpha}{3 g_n \cdot \eta} = \frac{g \cdot d^3 \cdot b \cdot \sin\alpha}{3\nu} \qquad \text{(TS korrekt)}$$

$$q_v = \frac{g \cdot \rho \cdot g_n \cdot d^3 \cdot b \cdot \sin\alpha}{3 g_n \cdot \eta} = \frac{g \cdot d^3 \cdot b \cdot \sin\alpha}{3\nu}$$

$$q_v = \frac{g \cdot \rho \cdot d^3 \cdot b \cdot \sin\alpha}{3\eta} = \frac{g \cdot d^3 \cdot b \cdot \sin\alpha}{3\nu} \qquad \text{(SI)}$$

2.3.16. Weerstandswaarde van regelkleppen

A. Beschouwde eenhedenstelsels

a. TS

In het TS is de weerstandswaarde k_v van een regelklep (meestal genoemd : k_v-waarde) gelijk aan de volumestroom in $\frac{m^3}{h}$ van een vloeistof met een soortelijk normgewicht $\gamma_o = 1000\ \frac{kgf}{m^3}$ en met een kinematische viskositeit $\nu_o = 10^{-6}\ \frac{m^2}{s}$ (water bij ongeveer 20 °C) bij een drukverlies over de klep $\Delta p_o = 1$ at (= 1 $\frac{kgf}{cm^2}$ = 10 mWK).
De definitie luidt :

$$Q = k_v \cdot \sqrt{\frac{\frac{\Delta p}{\gamma}}{\frac{\Delta p_o}{\gamma_o}}} = k_v \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\Delta p_o} \cdot \frac{\gamma_o}{\gamma}} \qquad \text{(TS)}$$

met Δp en Δp_o in at
γ en γ_o in $\frac{kgf}{m^3}$
Q in $\frac{m^3}{h}$

Hierin wordt k_v uitgedrukt in dezelfde eenheid als Q, dus in $\frac{m^3}{h}$. Met $\gamma_o = 1000\ \frac{kgf}{m^3}$ en $\Delta p_o = 1$ at, bekomt men als "gebruiksformule" :

$$Q = k_{v(m^3/h,\ at)} \cdot \sqrt{1000} \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\gamma}}$$

met Δp in at
γ (= γ_n) in $\frac{kgf}{m^3}$
Q in $\frac{m^3}{h}$

Wanneer thans ook γ gelijkgesteld wordt aan 1000 $\frac{kgf}{m^3}$, bekomt men uiteindelijk :

$$Q = k_{v(m^3/h,at)} \cdot \sqrt{\Delta p}$$

met Δp in at
Q in m^3/h

b. MKS-stelsel en SI

Hier luidt een eerste (en verouderde) definitievergelijking :

$$Q = k_v \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\Delta p_o} \cdot \frac{\rho_o}{\rho}} \qquad \text{(MKS, SI)}$$

Hierin wordt k_v uitgedrukt in dezelfde eenheid als Q.

De volumestroom en het drukverschil worden meestal uitgedrukt :

- ofwel respektievelijk in $\frac{m^3}{h}$ en in bar; de betrokken k_v-waarde wordt dan voorgesteld door $k_{v(m^3/h,bar)}$. Met ρ_o = 1000 $\frac{kg}{m^3}$ en Δp_o = 1 bar, bekomt men als "gebruiksformule"

$$Q = k_{v(m^3/h,bar)} \cdot \sqrt{1000} \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}$$

met Δp in bar
ρ in $\frac{kg}{m^3}$
Q in $\frac{m^3}{h}$

Wanneer thans ook ρ gelijkgesteld wordt aan 1000 $\frac{kg}{m^3}$, bekomt men uiteindelijk :

$$Q = k_{v(m^3/h,bar)} \cdot \sqrt{\Delta p}$$

met Δp in bar
Q in $\frac{m^3}{h}$

- ofwel respektievelijk in $\frac{m^3}{s}$ en in Pa; de betrokken k_v-waarde wordt dan voorgesteld door $k_{v(m^3/s,Pa)}$.
Met ρ_o = 1000 $\frac{kg}{m^3}$ en Δp_o = 1 Pa, bekomt men als "gebruiksformule" :

$$Q = k_{v(m^3/s,Pa)} \cdot \sqrt{1000} \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}$$

met Δp in Pa
ρ in $\frac{kg}{m^3}$
Q in $\frac{m^3}{s}$

Wanneer thans ook ρ gelijkgesteld wordt aan 1000 $\frac{kg}{m^3}$, bekomt men uiteindelijk :

$$Q = k_{v(m^3/s,Pa)} \cdot \sqrt{\Delta p}$$

met Δp in Pa
Q in $\frac{m^3}{s}$

Met het doel :

- af te stappen van de "gebruiksformules" (getalwaardenvergelijkingen);
- de SI-eenheden konsekwent toe te passen (met de volumestroom in $\frac{m^3}{s}$ en niet in $\frac{m^3}{h}$, en met het drukverschil in Pa);
- steeds rekening te houden met de werkelijke soortelijke massa ρ van de betrokken vloeistof, werd een nieuwe definitievergelijking opgesteld :

$$q_v = Q = A_v \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \qquad \text{(SI)}$$

Bij het gebruik van SI-eenheden wordt A_v uitgedrukt in m^2 :

$$\left[A_v\right]_{SI} = \frac{\frac{m^3}{s}}{\sqrt{\frac{\frac{N}{m^2}}{\frac{kg}{m^3}}}} = \frac{\frac{m^3}{s}}{\sqrt{\frac{\frac{kg \cdot m}{m^2 \cdot s^2}}{\frac{kg}{m^3}}}} = \frac{\frac{m^3}{s}}{\sqrt{\frac{m^2}{s^2}}} = \frac{\frac{m^3}{s}}{\frac{m}{s}} = m^2$$

Wanneer men de groothedenvergelijking $q_v = A_v \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}$ vergelijkt met de groothedenvergelijking $q_v = \alpha \cdot \epsilon \cdot A_d \cdot \sqrt{\frac{2\,\Delta p}{\rho}}$ (volumestroom door een meetflens, zie onderhavig hoofdstuk onder 2.3.8.), stelt men het volgend verband vast : $A_v = \alpha \cdot \epsilon \cdot A_d \cdot \sqrt{2}$. Hieruit blijkt dat A_v niet de oppervlakte van de doorstroomopening weergeeft.

c. Angelsaksische eenheden

Wanneer men de volumestroom Q uitdrukt hetzij in $\frac{USgal}{min}$ hetzij in $\frac{UKgal}{min}$ (= $\frac{\text{imperial gallons}}{min}$) en het drukverschil Δp in psi (pound-force per square inch), bekomt men als uiteindelijke "gebruiksformules" respektievelijk :

$$Q = C_{v(UK)} \cdot \sqrt{\Delta p} \qquad \text{met} \qquad \Delta p \text{ in psi}, \quad Q \text{ in } \frac{UKgal}{min}$$

$$Q = C_{v(US)} \cdot \sqrt{\Delta p} \qquad \text{met} \qquad \Delta p \text{ in psi}, \quad Q \text{ in } \frac{USgal}{min}$$

B. Omrekeningen van weerstandswaarden

Uit het bovenstaande blijkt, dat de weerstandswaarde van een regelklep kan weergegeven worden door zes verschillende waarden :

- vijf waarden respektievelijk berekend volgens de vijf hierboven weergegeven gebruiksformules, afgeleid uit de vroegere definitievergelijking;
- één waarde afgeleid uit de nieuwe definitievergelijking.

Hierna volgt een overzicht van de hierbij aangewende eenheden, symbolen en uitdrukkingen :

eenheid van volumestroom	eenheid van druk	symbool voor de weerstandswaarde	uitdrukking
$\frac{m^3}{h}$	at = $\frac{kgf}{cm^2}$	$k_{v(m^3/h,at)}$	$Q = k_{v(m^3/h,at)} \cdot \sqrt{\Delta p}$
$\frac{m^3}{h}$	bar	$k_{v(m^3/h,bar)}$	$Q = k_{v(m^3/h,bar)} \cdot \sqrt{\Delta p}$
$\frac{UKgal}{min}$	$\frac{lbf}{in^2}$ = psi	$C_{v(UK)}$	$Q = C_{v(UK)} \cdot \sqrt{\Delta p}$
$\frac{USgal}{min}$	$\frac{lbf}{in^2}$ = psi	$C_{v(US)}$	$Q = C_{v(US)} \cdot \sqrt{\Delta p}$
$\frac{m^3}{s}$	Pa	$k_{v(m^3/s,Pa)}$	$Q = k_{v(m^3/s,Pa)} \cdot \sqrt{\Delta p}$
$\frac{m^3}{s}$	Pa	A_v	$Q = A_v \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}$

Bij de hiernavolgende omrekeningen van weerstandswaarden wordt gebruik gemaakt van volgende gegevens :

1 UKgal = 4,546 09 dm^3 (zie Hoofdstuk XV, onder 1.2.2.)

1 USgal = 3,785 411 784 dm^3 (zie Hoofdstuk XV, onder 1.2.3.)

$1 \frac{m^3}{h} = 3{,}666\ 154\ 138 \frac{UKgal}{min} = 4{,}402\ 867\ 540 \frac{USgal}{min}$

$= 0{,}000\ 277\ 777\ 777\ 8 \frac{m^3}{s}$

$1 \frac{UKgal}{min} = 0{,}272\ 765\ 4 \frac{m^3}{h} = 1{,}200\ 949\ 926 \frac{USgal}{min}$

$= 0{,}000\ 075\ 768\ 166\ 67 \frac{m^3}{s}$

$1 \frac{USgal}{min} = 0{,}227\ 124\ 707\ 0 \frac{m^3}{h} = 0{,}83\ldots\ 674\ 184\ 1\ 6 \frac{UKgal}{min}$

$0{,}000\ 063\ 090\ 196\ 40 \frac{m^3}{s}$

$1 \frac{m^3}{s} = 3600 \frac{m^3}{h} = 13\ 198{,}154\ 90 \frac{UKgal}{min} = 15\ 850{,}323\ 14 \frac{USgal}{min}$

1 at = 0,980 665 bar = 14,223 343 31 psi = 98 066,5 Pa

1 bar = 1,019 716 213 at = 14,503 773 77 psi = 100 000 Pa

1 psi = 0,070 308 957 96 at = 0,068 947 572 93 bar = 6894,757 293 Pa

(met 1 lbf = 0,453 592 37 kgf en 1 sq. inch = $(0{,}0254)^2 m^2$ = 0,000 645 16 m^2)

1 Pa = 0,000 010 197 162 13 at = 0,0[illegible]1 bar = 0,000 145 037 737 7 psi

Bij de omrekening maakt men gebruik van volgende uitdrukkingen :

$$k_v \text{ (of } C_v) = \frac{Q}{\sqrt{\Delta p}}$$

$$A_v = \frac{Q \cdot \sqrt{\rho}}{\sqrt{\Delta p}}$$

Daar, gezien de gedane vereenvoudigingen, alle k_v- en C_v-waarden gelden voor een vloeistof met γ_n = 1000 $\frac{kgf}{m^3}$ (TS) en ρ = 1000 $\frac{kg}{m^3}$, wordt hierna bij de berekening van A_v de waarde ρ = 1000 $\frac{kg}{m^3}$ aangenomen.

Als $k_{v(m^3/h,at)} = 1$ waaruit volgt : $\frac{Q}{\sqrt{\Delta p}} = \frac{1}{\sqrt{1}}$

dan is :

$k_{v(m^3/h,bar)} = \frac{1}{\sqrt{0,980\ 665}} = 1,009\ 809\ 989 \approx 1,010$

$C_{v(UK)} = \frac{3,666\ 154\ 138}{\sqrt{14,223\ 343\ 31}} = 0,972\ 097\ 606\ 7 \approx 0,972$

$C_{v(US)} = \frac{4,402\ 867\ 540}{\sqrt{14,223\ 343\ 31}} = 1,167\ 440\ 549 \approx 1,167$

$k_{v(m^3/s,Pa)} = \frac{0,000\ 277\ 777\ 777\ 8}{\sqrt{98\ 066,5}} = 0,887\ 027\ 657\ 7 \cdot 10^{-6}$

$\approx 0,887 \cdot 10^{-6}$

$A_v = 0,000\ 277\ 777\ 777\ 8 \frac{m^3}{s} \cdot \frac{\sqrt{1000\ kg/m^3}}{\sqrt{98\ 066,5\ Pa}} = 28,050\ 277\ 46 \cdot 10^{-6}\ m^2$

$\approx 28,05 \cdot 10^{-6}\ m^2$

Als $k_{v(m^3/h,bar)} = 1$ waaruit volgt : $\frac{Q}{\sqrt{\Delta p}} = \frac{1}{\sqrt{1}}$

dan is :

$k_{v(m^3/h,at)} = \frac{1}{\sqrt{1,019\ 716\ 213}} = 0,990\ 285\ 312\ 0 \approx 0,990$

$C_{v(UK)} = \frac{3,666\ 154\ 138}{\sqrt{14,503\ 773\ 77}} = 0,962\ 653\ 982\ 3 \approx 0,963$

$C_{v(US)} = \frac{4,402\ 867\ 540}{\sqrt{14,503\ 773\ 77}} = 1,156\ 099\ 229 \approx 1,156$

$k_{v(m^3/s,Pa)} = \frac{0,000\ 277\ 777\ 777\ 8}{\sqrt{100\ 000}} = 0,878\ 410\ 461\ 3 \cdot 10^{-6}$

$\approx 0,878 \cdot 10^{-6}$

$A_v = 0,000\ 277\ 777\ 777\ 8 \frac{m^3}{s} \cdot \frac{\sqrt{1000\ kg/m^3}}{\sqrt{100\ 000\ Pa}} = 27,777\ 777\ 78 \cdot 10^{-6}\ m^2$

$\approx 27,78 \cdot 10^{-6}\ m^2$

Als $C_{v(UK)} = 1$ waaruit volgt : $\frac{Q}{\sqrt{\Delta p}} = \frac{1}{\sqrt{1}}$

dan is :

$$k_{v(m^3/h,at)} = \frac{0,272\ 765\ 4}{\sqrt{0,070\ 306\ 957\ 96}} = 1,028\ 703\ 283 \approx 1,029$$

$$k_{v(m^3/h,bar)} = \frac{0,272\ 765\ 4}{\sqrt{0,068\ 947\ 572\ 93}} = 1,038\ 794\ 851 \approx 1,039$$

$$C_{v(US)} = \frac{1,200\ 949\ 926}{\sqrt{1}} = 1,200\ 949\ 926 \approx 1,20$$

$$k_{v(m^3/s,Pa)} = \frac{0,000\ 075\ 768\ 166\ 67}{\sqrt{6894,757\ 293}} = 0,912\ 488\ 264\ 1 \cdot 10^{-6}$$

$$\approx 0,912 \cdot 10^{-6}$$

$$A_v = 0,000\ 075\ 768\ 166\ 67\ \frac{m^3}{s} \cdot \frac{\sqrt{1000\ kg/m^3}}{\sqrt{6894,757\ 293\ Pa}} = 28,855\ 412\ 53 \cdot 10^{-6}\ m^2$$

$$\approx 28,86 \cdot 10^{-6}\ m^2$$

Als $C_{v(US)} = 1$ waaruit volgt : $\frac{Q}{\sqrt{\Delta p}} = \frac{1}{\sqrt{1}}$

dan is :

$$k_{v(m^3/h,at)} = \frac{0,227\ 124\ 707\ 0}{\sqrt{0,070\ 306\ 957\ 96}} = 0,856\ 574\ 667\ 5 \approx 0,857$$

$$k_{v(m^3/h,bar)} = \frac{0,227\ 124\ 707\ 0}{\sqrt{0,068\ 947\ 572\ 93}} = 0,864\ 977\ 655\ 5 \approx 0,865$$

$$C_{v(UK)} = \frac{0,832\ 674\ 184\ 6}{\sqrt{1}} = 0,832\ 674\ 184\ 6 \approx 0,833$$

$$k_{v(m^3/s,Pa)} = \frac{0,000\ 063\ 090\ 196\ 40}{\sqrt{6894,757\ 293}} = 0,759\ 605\ 421\ 3 \cdot 10^{-6}$$

$$\approx 0,760 \cdot 10^{-6}$$

$$A_v = 0,000\ 063\ 090\ 196\ 40\ \frac{m^3}{s} \cdot \frac{\sqrt{1000\ kg/m^3}}{\sqrt{6894,757\ 293\ Pa}} = 24,027\ 157\ 1 \cdot 10^{-6}\ m^2$$

$$\approx 24,03 \cdot 10^{-6}\ m^2$$

Als $10^6\ k_{v(m^3/s,Pa)} = 1$; dus als $k_{v(m^3/s,Pa)} = 1 \times 10^{-6}$

waaruit volgt : $\dfrac{Q}{\sqrt{\Delta p}} = 10^{-6} \cdot \dfrac{1}{\sqrt{1}}$

dan is :

$$k_{v(m^3/h,at)} = 10^{-6} \cdot \frac{3600}{\sqrt{0{,}000\ 010\ 197\ 162\ 13}} \approx 1{,}127\ 361$$

$$k_{v(m^3/h,bar)} = 10^{-6} \cdot \frac{3600}{\sqrt{0{,}000\ 01}} \approx 1{,}138\ 420$$

$$C_{v(UK)} = 10^{-6} \cdot \frac{13\ 198{,}154\ 90}{\sqrt{0{,}000\ 145\ 037\ 737\ 7}} \approx 1{,}095\ 905$$

$$C_{v(US)} = 10^{-6} \cdot \frac{15\ 850{,}323\ 14}{\sqrt{0{,}000\ 145\ 037\ 737\ 7}} \approx 1{,}316\ 126$$

$$10^6\ A_v = \frac{1\ \frac{m^3}{s} \cdot \sqrt{1000\ kg/m^3}}{\sqrt{1\ Pa}} = \sqrt{1000}\ m^2 \approx 31{,}623\ m^2$$

Als $10^6\ A_v = 1\ m^2$; dus als $A_v = 1 \times 10^{-6}\ m^2$

waaruit volgt : $\dfrac{Q}{\sqrt{\Delta p}} = \dfrac{A_v}{\sqrt{\rho}} = \dfrac{10^{-6}\ m^2}{\sqrt{\rho}} = \dfrac{10^{-6}\ m^2}{\sqrt{1000\ kg/m^3}}$

dan is :

$$k_{v(m^3/h,at)} = \frac{10^{-6}}{\sqrt{1000}} \cdot \frac{3600}{\sqrt{0{,}000\ 010\ 197\ 162\ 13}} \approx 0{,}035\ 650$$

$$k_{v(m^3/h,bar)} = \frac{10^{-6}}{\sqrt{1000}} \cdot \frac{3600}{\sqrt{0{,}000\ 01}} = 0{,}036\ 000$$

$$C_{v(UK)} = \frac{10^{-6}}{\sqrt{1000}} \cdot \frac{13\ 198{,}154\ 90}{\sqrt{0{,}000\ 145\ 037\ 737\ 7}} \approx 0{,}034\ 656$$

$$C_{v(US)} = \frac{10^{-6}}{\sqrt{1000}} \cdot \frac{15\ 850{,}323\ 14}{\sqrt{0{,}000\ 145\ 037\ 737\ 7}} \approx 0{,}041\ 620$$

$$10^6\ k_{v(m^3/s,Pa)} = \frac{1}{\sqrt{1000}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1}} = \frac{1}{\sqrt{1000}} \approx 0{,}031\ 623$$

Uit het bovenstaande volgt $\left(\text{met getalwaarde van } A_v = \{A_v\}_{m^2}\right)$:

getalwaarde van $k_{v(m^3/h,at)}$ = 0,990 x getalwaarde van $k_{v(m^3/h,bar)}$

= 1,029 x getalwaarde van $C_{v(UK)}$

= 0,857 x getalwaarde van $C_{v(US)}$

= 1,127 361 x 10^6 x getalwaarde van $k_{v(m^3/s,Pa)}$

= 0,035 650 x 10^6 x getalwaarde van A_v

getalwaarde van $k_{v(m^3/h,bar)}$ = 1,010 x getalwaarde van $k_{v(m^3/h,at)}$

= 1,039 x getalwaarde van $C_{v(UK)}$

= 0,865 x getalwaarde van $C_{v(US)}$

= 1,138 420 x 10^6 x getalwaarde van $k_{v(m^3/s,Pa)}$

= 0,036 000 x 10^6 x getalwaarde van A_v

getalwaarde van $C_{v(UK)}$ = 0,972 x getalwaarde van $k_{v(m^3/h,at)}$

= 0,963 x getalwaarde van $k_{v(m^3/h,bar)}$

= 0,833 x getalwaarde van $C_{v(US)}$

= 1,095 905 x 10^6 x getalwaarde van $k_{v(m^3/s,Pa)}$

= 0,034 656 x 10^6 x getalwaarde van A_v

getalwaarde van $C_{v(US)}$ = 1,167 x getalwaarde van $k_{v(m^3/h,at)}$

= 1,156 x getalwaarde van $k_{v(m^3/h,bar)}$

= 1,201 x getalwaarde van $C_{v(UK)}$

= 1,316 128 x 10^6 x getalwaarde van $k_{v(m^3/s,Pa)}$

= 0,041 620 x 10^6 x getalwaarde van A_v

10^6 x getalwaarde van $k_{v(m^3/s,Pa)}$ = 0,887 x getalwaarde van $k_{v(m^3/h,at)}$

= 0,878 x getalwaarde van $k_{v(m^3/h,bar)}$

= 0,912 x getalwaarde van $C_{v(UK)}$

= 0,760 x getalwaarde van $C_{v(US)}$

= 0,031 623 x 10^6 x getalwaarde van A_v

10^6 x getalwaarde van A_v = 28,05 x getalwaarde van $k_{v(m^3/h,at)}$

= 27,78 x getalwaarde van $k_{v(m^3/h,bar)}$

= 28,86 x getalwaarde van $C_{v(UK)}$

= 24,03 x getalwaarde van $C_{v(US)}$

= 31,623 x 10^6 x getalwaarde van $k_{v(m^3/s,Pa)}$

Voorbeeld :

Bereken aan de hand van de verschillende behandelde uitdrukkingen, het drukverlies over een klep met als weerstandswaarde $k_{v(m^3/h,at)}$ = 100, voor een vloeistof met γ_n = 1000 $\frac{kgf}{m^3}$ (TS) en ρ = 1000 $\frac{kg}{m^3}$ (SI), met als debiet

$Q = 27 \frac{m^3}{h} = 118,877\ 423\ 6 \frac{USgal}{min}$

$= 98,986\ 161\ 73 \frac{UKgal}{min}$

$= 0,0075 \frac{m^3}{s}$

Men bekomt :

$\Delta p = \frac{Q^2}{k^2_{v(m^3/h,at)}} = \frac{27^2}{100^2}$ at = 0,0729 at (= 0,729 mWK = 729 mmWK)

$= \frac{Q^2}{k^2_{v(m^3/h,bar)}} = \frac{27^2}{100,980\ 998\ 9^2}$ bar = 0,071 490 478 5 bar

$= \frac{Q^2}{C^2_{v(US)}} = \frac{118,877\ 423\ 6^2}{116,744\ 054\ 9^2}$ psi = 1,036 881 727 psi

$= \frac{Q^2}{C^2_{v(UK)}} = \frac{98,986\ 161\ 73^2}{97,209\ 760\ 67^2}$ psi = 1,036 881 727 psi

$= \frac{Q^2}{k^2_{v(m^3/s,Pa)}} = \frac{0,0075^2}{(88,702\ 765\ 77\ .\ 10^{-6})^2}$ Pa = 7149,047 850 Pa

$= \frac{Q^2\ .\ \rho}{A^2_v} = \frac{0,0075^2\ \frac{m^6}{s^2}\ .\ 1000\ \frac{kg}{m^3}}{(2805,027\ 746\ .\ 10^{-6})^2\ m^4}$ = 7149,047 850 Pa

2.3.17. Debiet van de circulatiepomp van een verwarmingskringloop

Daar het woord debiet in twee betekenissen wordt gebruikt, is het nauwkeuriger te spreken ofwel van normgewichtsstroom (TS) of massastroom (SI) ofwel van volumestroom (TS en SI). In de verwarmingstechniek bedoelt men met "debiet" van een circulatiepomp doorgaans "volumestroom". De grootheid normgewichtsstroom (TS) wordt voorgesteld door $\dot{G}_n$ en de grootheid massastroom (SI) door q_m. De grootheid volumestroom werd in het TS doorgaans voorgesteld door Q en wordt in het SI voorgesteld door q_v; om echter verwarring te vermijden met het symbool Q als symbool voor hoeveelheid warmte, zal hier ook in het TS het symbool q_v aangewend worden als symbool voor volumestroom.

Het vermogen (warmte gedeeld door tijd) dat door de verwarmingslichamen (radiatoren, konvektoren, aërothermen, ...) van een verwarmingskringloop kan worden afgegeven, wordt voorgesteld door Φ (warmtestroom).

In het TS wordt de normgewichtsstroom $\dot{G}_n$ en de volumestroom q_v gegeven respektievelijk door volgende algemene groothedenvergelijkingen :

$$\dot{G}_n = \gamma_n \cdot q_v = \frac{\Phi}{c^* \cdot \Delta t}$$

$$q_v = \frac{\dot{G}_n}{\gamma_n} = \frac{\Phi}{\gamma_n \cdot c^* \cdot \Delta t}$$

In deze uitdrukkingen stelt c^* de soortelijke warmtekapaciteit voor, met als definitie : $c^* = \frac{dQ}{G_n \cdot T}$ (met Q = hoeveelheid warmte en T = termodynamische temperatuur).

In de verwarmingstechniek worden voor water tussen 0 °C en 100 °C volgende waarden aangenomen :

$$\gamma_n = 1000 \frac{kgf}{m^3} = 1 \frac{kgf}{L}$$

$$c^* = 1 \frac{kcal}{kgf \cdot °C}$$

Wanneer γ_n wordt uitgedrukt in $\frac{kgf}{L}$ en c^* in $\frac{kcal}{kgf \cdot °C}$, bekomt men voor water als waarde van het produkt $\gamma_n \cdot c^*$:

$$\gamma_n \cdot c^* = 1 \frac{kgf}{L} \cdot 1 \frac{kcal}{kgf \cdot °C} = 1 \frac{kcal}{L \cdot °C}$$

Het feit dat de getalwaarde van c^* en van het produkt $\gamma_n \cdot c^*$, bij aanwending van de gebruikelijke eenheden, gelijk was aan 1, gaf in het TS aanleiding tot het ontstaan van volgende getalwaardenvergelijkingen :

$$\dot{G}_n = \frac{\Phi}{\Delta t}$$

met Φ in kcal/h

Δt in °C

$\dot{G}_n$ in kgf/h

$$q_v = \frac{\Phi}{\Delta t}$$

met Φ in kcal/h

Δt in °C

q_v in $\frac{L}{h}$

Voorbeeld : met Φ = 300 000 kcal/h

Δt = 15 °C

bekomt men : $\dot{G}_n = \frac{300\ 000}{15}$ = 20 000 kgf/h

$$q_v = \frac{300\ 000}{15} = 20\ 000 \text{ L/h}$$

Wanneer men zich geplaatst ziet voor de vergelijkingen $\dot{G}_n = \frac{\Phi}{\Delta t}$ en $q_v = \frac{\Phi}{\Delta t}$, kan men onmiddellijk inzien dat het niet gaat om algemene groothedenvergelijkingen, daar alvast de dimensie van het linkerlid (respektievelijk FT^{-1} en L^3T^{-1}) niet gelijk is aan de dimensie van het rechterlid (respektievelijk $LFT^{-1}\Theta^{-1}$ en $L^2MT^{-3}\Theta^{-1}$). Wat betreft dimensies van grootheden in het TS, wordt verwezen naar Hoofdstuk II, tabel II.5., en wat betreft dimensies in het SI, naar Hoofdstuk II, tabel II.3. en tabel II.4.

In het SI wordt de massastroom q_m en de volumestroom q_v gegeven respektievelijk door volgende algemene groothedenvergelijkingen :

$$q_m = \rho \cdot q_v = \frac{\Phi}{c \cdot \Delta t}$$

$$q_v = \frac{q_m}{\rho} = \frac{\Phi}{\rho \cdot c \cdot \Delta t}$$

In deze uitdrukkingen stelt c de soortelijke warmtekapaciteit voor, met als definitie : $c = \frac{dQ}{m \cdot dT}$ (met Q = hoeveelheid warmte en T = termodynamische temperatuur). Voor water geldt : $c = 4186{,}8 \frac{J}{kg \cdot K} = 4{,}1868 \frac{kJ}{kg \cdot K}$ (vergelijk met : 1 kcal = 4186,8 J = 4,1868 kJ ≈ 4,19 kJ).

Voorbeeld :

met Φ = 348 900 W = 348,9 kW (= 300 000 kcal/h)

Δt = 15 K

bekomt men :

$$q_m = \frac{\Phi}{c \cdot \Delta t} = \frac{348\ 900\ W}{4186{,}8 \frac{J}{kg \cdot K} \cdot 15\ K} = 5{,}555\ 555\ 556 \frac{kg}{s}$$

$$= 20\ 000 \frac{kg}{h}$$

$$q_v = \frac{348\ 900\ W}{1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 4186{,}8 \frac{J}{kg \cdot K} \cdot 15\ K} = 0{,}005\ 555\ 555\ 556 \frac{m^3}{s}$$

$$= 20 \frac{m^3}{h}$$

$$= 20\ 000 \frac{L}{h}$$

$$= \frac{348{,}9\ kW}{1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 4{,}1868 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot 15\ K} = 0{,}005\ 555\ 555\ 556 \frac{m^3}{s}$$

$$= 20 \frac{m^3}{h}$$

$$= 20\ 000 \frac{L}{h}$$

Als afgeronde waarde voor c wordt in de verwarmingstechniek genomen :

$$c = 4190 \frac{J}{kg \cdot K} = 4{,}19 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

Voorbeeld :

met Φ = 500 000 W = 500 kW

Δt = 15 K

bekomt men :

$$q_m = \frac{\Phi}{c \cdot \Delta t} = \frac{500\ 000\ W}{4190 \frac{J}{kg \cdot K} \cdot 15\ K} = 7{,}955\ 449\ 483 \frac{kg}{s}$$

$$= 28\ 640 \frac{kg}{h}$$

$$= \frac{500\ kW}{4{,}19 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot 15\ K} = 7{,}955\ 449\ 483 \frac{kg}{s}$$

$$= 28\ 640 \frac{kg}{h}$$

$$q_v = \frac{\Phi}{\rho \cdot c \cdot \Delta t} = \frac{500\ 000\ \text{W}}{1000\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4190\ \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 15\ \text{K}} = 0{,}007\ 955\ 449\ 483\ \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$= 28{,}640\ \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$= 28\ 640\ \frac{\text{L}}{\text{h}}$$

$$= \frac{500\ \text{kW}}{1000\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4{,}19\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 15\ \text{K}} = 0{,}007\ 955\ 449\ 483\ \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$= 28{,}640\ \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$= 28\ 640\ \frac{\text{L}}{\text{h}}$$

Om over te gaan van de behandelde algemene groothedenvergelijkingen in TS-notatie naar de overeenkomstige algemene groothedenvergelijkingen in SI-notatie, vervangt men :

$\dot{G}_n$ door $q_m \cdot g_n$

σ^* door $\frac{\sigma}{g_n}$

γ_n door $\rho \cdot g_n$

Men bekomt :

$$\dot{G}_n = \frac{\Phi}{\sigma^* \cdot \Delta t} = \gamma_n \cdot q_v \qquad \text{(TS)}$$

$$q_m \cdot g_n = \frac{\Phi}{\frac{\sigma}{g_n} \cdot \Delta t} = \rho \cdot g_n \cdot q_v$$

$$q_m = \frac{\Phi}{\sigma \cdot \Delta t} = \rho \cdot q_v \qquad \text{(SI)}$$

$$q_v = \frac{\Phi}{\gamma_n \cdot \sigma^* \cdot \Delta t} = \frac{\dot{G}_n}{\gamma_n} \qquad \text{(TS)}$$

$$q_v = \frac{\Phi}{\rho \cdot g_n \cdot \frac{\sigma}{g_n} \cdot \Delta t} = \frac{q_m \cdot g_n}{\rho \cdot g_n}$$

$$q_v = \frac{\Phi}{\rho \cdot \sigma \cdot \Delta t} = \frac{q_m}{\rho} \qquad \text{(SI)}$$

2.3.18. Warmteverliezen door luchtverversing (ventilatieverliezen)

Wat betreft de hoeveelheid (koude) lucht die in een bepaalde tijd een lokaal binnendringt (door natuurlijke of gedwongen ventilatie) en de hoeveelheid (warme) lucht die gedurende dezelfde tijd uit het lokaal verloren gaat, kunnen gelijkaardige algemene groothedenvergelijkingen worden aangewend als aangegeven bij de behandeling van het debiet van een circulatiepomp (zie onderhavig hoofdstuk onder 2.3.17.).

Met behulp van de grootheden normgewichtsstroom (TS) en massastroom (SI) bekomt men :

$$\Phi = \dot{G}_n \cdot c_p^{\star} \cdot \Delta t \qquad \text{(TS)}$$

$$\Phi = q_m \cdot c_p \cdot \Delta t \qquad \text{(SI)}$$

met Φ = ventilatieverlies (warmteverlies door ventilatie)

$\dot{G}_n$ = normgewichtsstroom van de lucht (TS)

q_m = massastroom van de lucht (SI)

$c_p^{\star} = \left(\frac{dQ}{G_n \cdot dT}\right)_p = 0{,}240\ 14\ \frac{\text{kcal}}{\text{kgf} \cdot {}^{\circ}\text{C}}$ (TS)

$c_p = \left(\frac{dQ}{m \cdot dT}\right)_p = 1005{,}4\ \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ (SI)

Δt = verschil tussen de temperatuur in het lokaal en de temperatuur van de buitenlucht

Met behulp van de grootheid volumestroom bekomt men :

$$\Phi = q_v \cdot \gamma_n \cdot c_p^{\star} \cdot \Delta t \qquad \text{(TS)}$$

$$\Phi = q_v \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta t \qquad \text{(SI)}$$

Hoewel de waarde van de grootheden q_v, γ_n (TS) en ρ (SI) varieert in funktie van de temperatuur, is het produkt $q_v \cdot \gamma_n$ (TS) en $q_v \cdot \rho$ (SI) konstant, vermits het volgende geldt (index 1 : koude lucht, index 2 : warme lucht) :

$$\dot{G}_n = q_{v,1} \cdot \gamma_{n,1} = q_{v,2} \cdot \gamma_{n,2} = q_{v,0} \cdot \gamma_{n,0} \qquad \text{(TS)}$$

$$q_m = q_{v,1} \cdot \rho_1 = q_{v,2} \cdot \rho_2 = q_{v,0} \cdot \rho_0 \qquad \text{(SI)}$$

met $q_{v,0}$ = volumestroom indien de lucht een temperatuur zou hebben (en behouden) van 0 °C (bij normale atmosferische druk)

$\gamma_{n,0}$ = 1,293 kgf/m³ = soortelijk normgewicht (TS) van lucht bij 0 °C (bij normale atmosferische druk)

ρ_0 = 1,293 kg/m³ = soortelijke massa (SI) van lucht bij 0 °C (bij normale atmosferische druk)

Bovenstaande uitdrukkingen kunnen dus ook als volgt worden weergegeven :

$$\Phi = q_{v,0} \cdot \gamma_{n,0} \cdot c_p^* \cdot \Delta t \qquad \text{(TS)}$$

$$\Phi = q_{v,0} \cdot \rho_0 \cdot c_p \cdot \Delta t \qquad \text{(SI)}$$

Indien men stelt :

$$\gamma_{n,0} \cdot c_p^* = c_p' \qquad \text{(TS)}$$

$$\rho_0 \cdot c_p = c_p' \qquad \text{(SI)}$$

bekomt men :

$$\Phi = q_{v,0} \cdot c_p' \cdot \Delta t \qquad \text{(TS en SI)}$$

met $c_p' = 1{,}293 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3} \cdot 0{,}240\,14 \frac{\text{kcal}}{\text{kgf} \cdot \text{°C}} = 0{,}3105 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3 \cdot \text{°C}}$ (TS)

$= 1{,}293 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1005{,}4 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} = 1300 \frac{\text{J}}{\text{m}^3 \cdot \text{K}}$ (SI)

Het ventilatievoud n wordt gedefinieerd als volgt (met V = volume van het lokaal) :

$$n = \frac{q_{v,0}}{V}$$

waaruit volgt :

$$q_{v,0} = n \cdot V$$

zodat men uiteindelijk bekomt :

$$\Phi = n \cdot V \cdot c_p' \cdot \Delta t \qquad \text{(TS en SI)}$$

Voorbeeld : bereken het warmteverlies door ventilatie van een lokaal als :

$$V = 900 \text{ m}^3$$

$$n = 2 \text{ h}^{-1} = \frac{2}{3600} \text{ s}^{-1}$$

$$\Delta t = 30 \text{ °C} = 30 \text{ K}$$

Men bekomt :

$$q_{v,0} = n \cdot V = \frac{2}{h} \cdot 900\ m^3 = 1800\ \frac{m^3}{h}$$

$$= \frac{2}{3600\ s} \cdot 900\ m^3 = 0{,}5\ \frac{m^3}{s}$$

$$\dot{G}_n = q_{v,0} \cdot \gamma_{n,0} = 1800\ \frac{m^3}{h} \cdot 1{,}293\ \frac{kgf}{m^3} = 2327{,}4\ \frac{kgf}{h} \quad (TS)$$

$$q_m = q_{v,0} \cdot \rho_0 = 0{,}5\ \frac{m^3}{s} \cdot 1{,}293\ \frac{kg}{m^3} = 0{,}6465\ \frac{kg}{s} \quad (SI)$$

$$\Phi = \dot{G}_n \cdot c_p^{\star} \cdot \Delta t = 2327{,}4\ \frac{kgf}{h} \cdot 0{,}240\ 14\ \frac{kcal}{kgf \cdot °C} \cdot 30\ °C = 16\ 767\ \frac{kcal}{h} \quad (TS)$$

$$\Phi = q_m \cdot c_p \cdot \Delta t = 0{,}6465\ \frac{kg}{s} \cdot 1005{,}4\ \frac{J}{kg \cdot K} \cdot 30\ K = 19\ 500\ W \quad (SI)$$

$$\Phi = n \cdot V \cdot c_p' \cdot \Delta t = \frac{2}{h} \cdot 900\ m^3 \cdot 0{,}3105\ \frac{kcal}{m^3 \cdot °C} \cdot 30\ °C = 16\ 767\ \frac{kcal}{h} \quad (TS)$$

$$\Phi = n \cdot V \cdot c_p' \cdot \Delta t = \frac{2}{3600\ s} \cdot 900\ m^3 \cdot 1300\ \frac{J}{m^3 \cdot K} \cdot 30\ K = 19\ 500\ W \quad (SI)$$

2.3.19. Vliegwiel en massatraagheidsmoment

a. Inleiding

Het draaimoment van aandrijvende zuigermachines heeft een periodiek ongelijkvormig verloop. Dit is het meest uitgesproken bij ééncilindermachines, waar het draaimoment enkel gedurende de arbeidsslag positief is, in de dode punten gelijk aan nul, en voor het overige negatief. Bij een ééncilindermachine werkend volgens het tweetakt-principe, strekt een periode (in verband met het draaimoment) zich uit over één omwenteling van de krukas, terwijl bij een ééncilindermachine werkend volgens het viertakt-principe een periode zich uitstrekt over twee omwentelingen van de krukas. Naarmate er meer cilinders aanwezig zijn (waarvan de arbeidsslagen elkaar afwisselen) zal het draaimoment gelijkmatiger worden.

De ongelijkmatigheid van het draaimoment heeft tot gevolg, dat de hoeksnelheid van de krukas zal variëren tussen een maximum hoeksnelheid ω_{max} en een minimum hoeksnelheid ω_{min}.

De gemiddelde hoeksnelheid ω_{gem} en de graad van oneenparigheid ϵ worden gedefinieerd als volgt :

$$\omega_{gem} = \frac{\omega_{max} + \omega_{min}}{2}$$

$$\epsilon = \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{\omega_{gem}}$$

Bij verhoging van de krukassnelheid wordt de kinetische energie van het vliegwiel met een bepaalde hoeveelheid verhoogd. Deze hoeveelheid kinetische ernegie wordt bij verlaging van de krukassnelheid opnieuw aangewend teneinde de betrokken vertraging tegen te gaan. De toelaatbare grootte van de graad van oneenparigheid bepaalt mede de grootte van het vereist massatraagheidsmoment.

b. Berekening van het vereist massatraagheidsmoment van een vliegwiel

Zij dG_n en dm = respektievelijk een normgewichtsdeeltje (TS) en een massadeeltje (SI) van het vliegwiel

x = de afstand van het betrokken deeltje tot aan het centrum van de as

v = de ogenblikkelijke omtreksnelheid van het betrokken deeltje = $\omega \cdot x$

v_{max} = de maximum omtreksnelheid van het betrokken deeltje = $\omega_{max} \cdot x$

v_{min} = de minimum omtreksnelheid van het betrokken deeltje = $\omega_{min} \cdot x$

J = massatraagheidsmoment

$$= \int x^2 \cdot \frac{dG_n}{g_n} \qquad \text{(TS)}$$

$$= \int x^2 \cdot dm \qquad \text{(SI)}$$

De kinetische energie ΔE die wordt opgenomen door het vliegwiel wanneer de hoeksnelheid vermeerdert van ω_{min} tot ω_{max}, en die wordt afgegeven wanneer de hoeksnelheid vermindert van ω_{max} tot ω_{min}, wordt gegeven door :

- in het TS :

$$\Delta E = \int \frac{1}{2} \cdot \frac{dG_n}{g_n} \cdot (v^2_{max} - v^2_{min})$$

$$= \frac{\omega^2_{max} - \omega^2_{min}}{2} \cdot \int x^2 \cdot \frac{dG_n}{g_n}$$

$$= J \cdot \frac{\omega^2_{max} - \omega^2_{min}}{2}$$

Bij gebruik van de grondeenheden en de hiervan afgeleide koherente eenheden, wordt E in het TS uitgedrukt in $\frac{kgf}{\frac{m}{s^2}} \cdot \frac{m^2}{s^2} = kgf \cdot m$

- in het SI :

$$\Delta E = \int \frac{1}{2} \cdot dm \cdot (v^2_{max} - v^2_{min})$$

$$= \frac{\omega^2_{max} - \omega^2_{min}}{2} \cdot \int x^2 \cdot dm$$

$$= J \cdot \frac{\omega^2_{max} - \omega^2_{min}}{2}$$

Bij gebruik van de grondeenheden en de hiervan afgeleide koherente eenheden, wordt E in het SI uitgedrukt in $kg \cdot \frac{m^2}{s^2} = kg \cdot \frac{m}{s^2} \cdot m = N \cdot m = J$.

Onder gereduceerde straal r (of traagheidsstraal r) verstaat men de straal van een cirkel (rond de as) waarin men het ganse normgewicht (TS) of de ganse massa (SI) van het vliegwiel geconcentreerd aanwezig acht en die zodanig gekozen is dat men heeft :

- in het TS :

$$\frac{G_n}{g_n} \cdot r^2 = \int x^2 \cdot \frac{dG_n}{g_n} = J$$

Bij het gebruik van de grondeenheden en de hiervan afgeleide koherente eenheden wordt J in het TS uitgedrukt in $\frac{kgf \cdot m^2}{\frac{m}{s^2}} = kgf \cdot m \cdot s^2$.

- in het SI :

$$m \cdot r^2 = \int x^2 \cdot dm = J$$

Bij het gebruik van SI-eenheden, wordt J uitgedrukt in $kg \cdot m^2$.

Derhalve bekomt men (met $D = 2\,r$ = gereduceerde diameter of traagheids-diameter) :

- in het TS :

$$\Delta E = J \cdot \frac{\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2}{2}$$

$$= \frac{G_n}{g_n} \cdot r^2 \cdot \frac{\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2}{2}$$

$$= \frac{G_n \cdot D^2}{4\,g_n} \cdot \frac{(\omega_{max} + \omega_{min}) \cdot (\omega_{max} - \omega_{min})}{2}$$

$$= \frac{G_n \cdot D^2}{4\,g_n} \cdot \omega_{gem}^2 \cdot \frac{(\omega_{max} - \omega_{min})}{\omega_{gem}}$$

$$= \epsilon \cdot \frac{G_n \cdot D^2}{4\,g_n} \cdot \omega_{gem}^2 = \epsilon \cdot J \cdot \omega_{gem}^2$$

- in het SI :

$$\Delta E = J \cdot \frac{\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2}{2}$$

$$= m \cdot r^2 \cdot \frac{\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2}{2}$$

$$= m \cdot r^2 \cdot \frac{(\omega_{max} + \omega_{min}) \cdot (\omega_{max} - \omega_{min})}{2}$$

$$= m \cdot r^2 \cdot \omega_{gem}^2 \cdot \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{\omega_{gem}}$$

$$= \epsilon \cdot m \cdot r^2 \cdot \omega_{gem}^2 = \epsilon \cdot J \cdot \omega_{gem}^2$$

Het vereist massatraagheidsmoment wordt dan gegeven door :

- in het TS :

$$J = \frac{\Delta E}{\epsilon \cdot \omega_{gem}^2} \qquad \text{(TS-eenheid : kgf . m . s}^2\text{)}$$

- in het SI :

$$J = \frac{\Delta E}{\epsilon \cdot \omega_{gem}^2} \qquad \text{(SI-eenheid : J . s}^2 = \text{N . m . s}^2 = \text{kg . m}^2\text{)}$$

De waarde van ΔE die dient gekend te zijn vooraleer J kan berekend worden, dient vooraf gezocht te worden, bijvoorbeeld op grafische wijze met behulp van een diagram dat de draaikracht geeft in funktie van de door de kruk afgelegde weg.

c. Gebruikelijke uitdrukkingen in het TS

In het TS gebruikte men niet de grootheid massatraagheidsmoment J, doch wel de waarde van het produkt $G_n \cdot D^2$ (geschreven als $G \cdot D^2$) als een kenmerkende grootheid van een vliegwiel. In Duitsland kreeg het produkt $G \cdot D^2$ de benaming "Schwungmoment".

Uit $\Delta E = \epsilon \cdot \frac{G_n \cdot D^2}{4\, g_n} \cdot \omega^2_{gem}$ leidt men af (met G_n geschreven als G en g_n als g) :

$$G \cdot D^2 = \frac{4\, g \cdot \Delta E}{\epsilon \cdot \omega^2_{gem}} = \frac{4\, g \cdot \Delta E}{\epsilon \cdot (2\pi\, n_{gem})^2}$$

Bij het gebruik van de grondeenheden en de hiervan afgeleide koherente eenheden wordt in het TS het produkt $G \cdot D^2$ uitgedrukt in kgf . m^2. Men bekomt eveneens de waarde van $G \cdot D^2$ in kgf . m^2 aan d hand van volgende getalwaardenvergelijking :

$$G \cdot D^2 = \frac{4 \times 9{,}806\ 65 \times \left\{\Delta E\right\}_{kgf.m}}{\left(\frac{2\,\pi}{60}\right)^2 \cdot \epsilon \cdot \left\{n_{gem}\right\}^2_{min^{-1}}} = 3577 \cdot \frac{\Delta E}{\epsilon \cdot n^2}$$

met ΔE in kgf . m

$n = n_{gem}$ = gemiddeld toerental uitgedrukt in min^{-1}

Voorbeeld :

Bereken in TS-eenheden en in SI-eenheden de waarde van het massatraagheidsmoment J, wanneer $G \cdot D^2$ gelijk is aan 500 kgf . m^2 (noteer dat de waarde van G en van D niet afzonderlijk gegeven is).

Men bekomt in het TS :

$$J = \frac{G_n \cdot D^2}{4\, g_n} = \frac{500\ \text{kgf} \cdot \text{m}^2}{4 \times 9{,}806\ 65\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 12{,}746\ 452\ 66\ \text{kgf} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$$

Als in het TS $G_n \cdot D^2$ gelijk is aan 500 kgf . m^2, dan is in het SI $m \cdot D^2$ gelijk aan 500 kg . m^2 :

$G_n \cdot D^2 = 500$ kgf . m^2

$m \cdot g_n \cdot D^2 = 500$ kgf . m^2

$m \cdot D^2 = 500\ \frac{\text{kgf}}{g_n} \cdot \text{m}^2$

$m \cdot D^2 = 500$ kg . m^2

Men bekomt dus in het SI :

$$J = m \cdot r^2 = \frac{m \cdot D^2}{4} = \frac{500 \text{ kg} \cdot \text{m}^2}{4} = 125 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Men bekomt dus de getalwaarde van J uitgedrukt in de SI-eenheid kg . m^2, door de getalwaarde van het produkt $G \cdot D^2$ uitgedrukt in de TS-eenheid kgf . m^2, te delen door 4.

2.3.20. Eerste hoofdwet van de termodynamika (wet van het behoud van energie), toegepast op een stationair stromend fluïdum door een open systeem

A. Formulering van de betrokken wet

Deze zeer belangrijke wet uit de termodynamika luidt :
"De toegevoerde energie, bestaande uit de som van de toegevoerde warmte en de toegevoerde technische arbeid, is gelijk aan de som van de veranderingen van de entalpie, van de kinetische energie en van de potentiële energie van plaats, van het medium dat in stationaire stroming door een open systeem vloeit".

B. Aangewende grootheden en symbolen

De betrokken grootheden en symbolen zijn weergegeven in bijgaande tabel.

Men verstaat onder A en $\frac{1}{A}$ respektievelijk het volgende :

A = het kalorisch ekwivalent van de kgf . m

$$A = \frac{\frac{1}{427} \text{ kcal}}{\text{kgf} \cdot \text{m}} = \frac{1}{427} \frac{\text{kcal}}{\text{kgf} \cdot \text{m}}$$ (voor nauwkeurige waarden, zie Hoofdstuk V, onder 2.2.1. en 2.5.)

$\frac{1}{A}$ = het mechanisch ekwivalent van de kcal, of mechanisch warmte-ekwivalent

$$\frac{1}{A} = \frac{427 \text{ kgf} \cdot \text{m}}{\text{kcal}} = 427 \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{kcal}}$$ (voor nauwkeurige waarden, zie Hoofdstuk V, onder 2.2.1. en 2.5.)

	TS		SI
	uitgedrukt in $\frac{\text{kcal}}{\text{kgf}}$	uitgedrukt in $\frac{\text{kgf . m}}{\text{kgf}} = (\text{m})$	uitgedrukt in $\frac{\text{J}}{\text{kg}}$
toegevoerde warmte	$q^{\star}_{1,2}$	$\frac{q^{\star}_{1,2}}{A}$	$q_{1,2}$
toegevoerde technische arbeid	$A \cdot w^{\star}_{t,1,2}$	$w^{\star}_{t,1,2}$	$w_{t,1,2}$
verandering van entalpie	$h^{\star}_2 - h^{\star}_1$	$\frac{h^{\star}_2 - h^{\star}_1}{A}$	$h_2 - h_1$
verandering van kinetische energie	$A \cdot \left(\frac{c_2^2 - c_1^2}{2\, g_n}\right)^{\star}$	$\left(\frac{c_2^2 - c_1^2}{2\, g_n}\right)^{\star}$	$\frac{c_2^2 - c_1^2}{2}$
verandering van potentiële energie van plaats	$A \cdot \left(\frac{g}{g_n} \cdot z_2 - \frac{g}{g_n} \cdot z_1\right)^{\star}$	$\left(\frac{g}{g_n} \cdot z_2 - \frac{g}{g_n} \cdot z_1\right)^{\star}$	$g \cdot (z_2 - z_1)$
wrijvingsarbeid	$A \cdot \psi^{\star}_{1,2}$	$\psi^{\star}_{1,2}$	$\psi_{1,2}$

N.B. : $h^{\star}, h$ = (soortelijke) entalpie

z = plaatshoogte

c = snelheid

Bij overgang naar koherente eenheden wordt A gelijk aan 1, vermits geldt :

$$1 \text{ kgf . m} = \frac{1}{427} \text{ kcal}$$

$$1 \text{ kcal} = 427 \text{ kgf . m}$$

Wanneer de waarde $q^{\star}_{1,2}$ (in het TS) of $q_{1,2}$ (in het SI) positief is, betekent dit dat warmte aan het stelsel wordt toegevoerd. Wanneer de betrokken waarde negatief is, betekent dit dat warmte wordt afgevoerd; de afgevoerde warmte wordt dan voorgesteld door $- q^{\star}_{1,2}$ (in het TS) of door $- q_{1,2}$ (in het SI).

Wanneer de waarde van $w^{\star}_{t,1,2}$ (in het TS) of van $w_{t,1,2}$ (in het SI) positief is, betekent dit dat technische arbeid door het stelsel wordt opgenomen. Wanneer de betrokken waarde negatief is, betekent dit dat door het stelsel technische arbeid wordt afgegeven; de afgegeven technische arbeid wordt dan voorgesteld door $- w^{\star}_{t,1,2}$ (in het TS) of door $- w_{t,1,2}$ (in het SI).

C. Wiskundige uitdrukking van de betrokken wet, toegepast op een stationair stromend fluïdum door een open systeem

In het TS treft men volgende uitdrukkingen aan :

$$q^{\star}_{1,2} + A \cdot w^{\star}_{t,1,2} = h^{\star}_2 - h^{\star}_1 + A \cdot \left(\frac{c_2^2 - c_1^2}{2\, g_n}\right)^{\star} + A \cdot \left(\frac{g}{g_n} \cdot z_2 - \frac{g}{g_n} \cdot z_1\right)^{\star} \qquad \text{(XIV, 9, TS)}$$

term-eenheid : $\frac{\text{kcal}}{\text{kgf}}$

ofwel :

$$\frac{q^{\star}_{1,2}}{A} + w^{\star}_{t,1,2} = \frac{h^{\star}_2 - h^{\star}_1}{A} + \left(\frac{c_2^2 - c_1^2}{2\, g_n}\right)^{\star} + \left(\frac{g}{g_n} \cdot z_2 - \frac{g}{g_n} \cdot z_1\right)^{\star} \qquad \text{(XIV, 9', TS)}$$

term-eenheid : $\frac{\text{kgf . m}}{\text{kgf}} = \text{(m)}$

Gebruikelijke schrijfwijze (zonder sterretje $\star$ en g_n geschreven als g) :

$$q_{1,2} + A \cdot w_{t,1,2} = h_2 - h_1 + A \cdot \frac{c_2^2 - c_1^2}{2\, g} + A \cdot (z_2 - z_1)$$

ofwel :

$$\frac{q_{1,2}}{A} + w_{t,1,2} = \frac{h_2 - h_1}{A} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2\, g} + z_2 - z_1$$

Verder geldt voor de ganse normgewichtsstroom $\dot{G}_n$

met $\dot{G}_n \cdot q^{\star}_{1,2} = \dot{Q}_{1,2}$ en $\dot{G}_n \cdot w^{\star}_{t,1,2} = P_{1,2}$:

$$\dot{Q}_{1,2} + A \cdot P_{1,2} = \dot{G}_n \cdot \left[h^{\star}_2 - h^{\star}_1 + A \cdot \left(\frac{c_2^2 - c_1^2}{2\, g_n} \right)^{\star} + A \cdot \left(\frac{g}{g_n} \cdot z_2 - \frac{g}{g_n} \cdot z_1 \right)^{\star} \right]$$

(XIV, 10 , TS)

term-eenheid : $\frac{\text{kcal}}{\text{s}}$

ofwel :

$$\frac{\dot{Q}_{1,2}}{A} + P_{1,2} = \dot{G}_n \cdot \left[\frac{h^{\star}_2 - h^{\star}_1}{A} + \left(\frac{c_2^2 - c_1^2}{2\, g_n} \right)^{\star} + \left(\frac{g}{g_n} \cdot z_2 - \frac{g}{g_n} \cdot z_1 \right)^{\star} \right]$$

(XIV, 10', TS)

term-eenheid : $\frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{s}}$

In het SI wordt de betrokken wet weergegeven door :

$$q_{1,2} + w_{t,1,2} = h_2 - h_1 + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g \cdot (z_2 - z_1) \qquad \text{(XIV, 9, SI)}$$

term-eenheid : $\frac{\text{J}}{\text{kg}}$

Verder geldt voor de ganse massastroom $\dot{m}$ (dikwijls ook voorgesteld door q_m), met $\dot{m} \cdot q_{1,2} = \dot{Q}_{1,2}$ en $\dot{m} \cdot w_{t,1,2} = P_{1,2}$:

$$\dot{Q}_{1,2} + P_{1,2} = \dot{m} \cdot \left[h_2 - h_1 + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g \cdot (z_2 - z_1) \right] \qquad \text{(XIV,10,SI)}$$

term-eenheid : $\frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{W}$

D. Omzettingen van de behandelde algemene groothedenvergelijkingen in TS-notatie naar algemene groothedenvergelijkingen in SI-notatie

Om van de TS-notatie rechtstreeks over te gaan naar de SI-notatie, gaat men te werk als volgt :

- groothedenvergelijking (XIV, 9, TS) :

$$q^{\star}_{1,2} + A \cdot w^{\star}_{t,1,2} = h^{\star}_2 - h^{\star}_1 + A \cdot \left(\frac{c_2^2 - c_1^2}{2\, g_n} \right)^{\star} + A \cdot \left(\frac{g}{g_n} \cdot z_2 - \frac{g}{g_n} \cdot z_1 \right)^{\star} \qquad \text{(TS)}$$

term-eenheid : $\frac{\text{kcal}}{\text{kgf}}$

$$g_n \cdot q^{\star}_{1,2} + A \cdot g_n \cdot w^{\star}_{t,1,2} = g_n \cdot (h^{\star}_2 - h^{\star}_1) + A \cdot g_n \cdot \left(\frac{c_2^2 - c_1^2}{2\, g_n}\right)^{\star} + A \cdot g_n \cdot \left(\frac{g}{g_n} \cdot z_2 - \frac{g}{g_n} \cdot z_1\right)^{\star}$$

$$q_{1,2} + w_{t,1,2} = h_2 - h_1 + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g \cdot (z_2 - z_1) \qquad \text{(SI)}$$

term-eenheid : $\frac{J}{kg}$

In de SI-notatie komt A niet meer voor, daar $q_{1,2}$ en $w_{t,1,2}$ rechtstreeks in dezelfde eenheden worden uitgedrukt, namelijk in $\frac{J}{kg}$.
In de TS-notatie komt A wel voor, teneinde rekening te houden met het feit dat $w^{\star}_{t,1,2}$ er wordt uitgedrukt in $\frac{kgf \cdot m}{kgf}$ terwijl $q^{\star}_{1,2}$ er wordt uitgedrukt in $\frac{kcal}{kgf}$.

- groothedenvergelijking (XIV, 10, TS) :

$$\dot{Q}_{1,2} + A \cdot P_{1,2} = \dot{G}_n \cdot \left[h^{\star}_2 - h^{\star}_1 + A \cdot \left(\frac{c_2^2 - c_1^2}{2\, g_n}\right)^{\star} + A \cdot \left(\frac{g}{g_n} \cdot z_2 - \frac{g}{g_n} \cdot z_1\right)^{\star} \right] \qquad \text{(TS)}$$

term-eenheid : $\frac{kcal}{s}$

$$\dot{Q}_{1,2} + A \cdot P_{1,2} = \dot{m} \cdot \left[g_n \cdot (h^{\star}_2 - h^{\star}_1) + A \cdot g_n \cdot \left(\frac{c_2^2 - c_1^2}{2\, g_n}\right)^{\star} + A \cdot g_n \cdot \left(\frac{g}{g_n} \cdot z_2 - \frac{g}{g_n} \cdot z_1\right)^{\star} \right]$$

$$\dot{Q}_{1,2} + P_{1,2} = \dot{m} \cdot \left[h_2 - h_1 + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g \cdot (z_2 - z_1) \right] \qquad \text{(SI)}$$

term-eenheid : $\frac{J}{s} = W$

In de SI-notatie komt A niet meer voor, daar $\dot{Q}_{1,2}$ en $P_{1,2}$ rechtstreeks in dezelfde eenheden worden uitgedrukt, namelijk in $\frac{J}{s} = W$.
In de TS-notatie komt A wel voor, teneinde rekening te houden met het feit dat $Q_{1,2}$ er wordt uitgedrukt in $\frac{kcal}{s}$ terwijl $P_{1,2}$ er wordt uitgedrukt in $\frac{kgf \cdot m}{s}$.

E. Toepassingen van de eerste hoofdwet van de termodynamika

a. Adiabatische expansie in een turbine

Daar $q^{\star}_{1,2} = 0$ (TS) en $q_{1,2} = 0$ (SI), en verder de verandering van de kinetische energie en de potentiële energie van plaats, meestal mag verwaarloosd worden, bekomt men voor de technische arbeid die wordt afgegeven aan de rotor van de turbine, en voor het betrokken vermogen :

- in het TS :

$$- w^{\star}_{t,1,2} = \frac{h^{\star}_1 - h^{\star}_2}{A} \qquad \text{eenheid : } \frac{\text{kgf . m}}{\text{kgf}} = \text{(m)}$$

$$- P_{1,2} = - w^{\star}_{t,1,2} \cdot \dot{G}_n = \frac{\dot{G}_n \cdot (h^{\star}_1 - h^{\star}_2)}{A} \qquad \text{eenheid : } \frac{\text{kgf . m}}{\text{s}}$$

- in het SI :

$$- w_{t,1,2} = h_1 - h_2 \qquad \text{eenheid : } \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$- P_{1,2} = - w_{t,1,2} \cdot \dot{m} = \dot{m} \cdot (h_1 - h_2) \qquad \text{eenheid : } \frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{W}$$

b. Adiabatische kompressie in turbokompressoren

Daar $q^{\star}_{1,2} = 0$ (TS) en $q_{1,2} = 0$ (SI), en verder de verandering van de kinetische energie en de potentiële energie van plaats, meestal mag verwaarloosd worden, bekomt men voor de technische arbeid, door de rotor afgegeven aan het fluïdum, en voor het betrokken vermogen :

- in het TS :

$$w^{\star}_{t,1,2} = \frac{h^{\star}_2 - h^{\star}_1}{A} \qquad \text{eenheid : } \frac{\text{kgf . m}}{\text{kgf}} = \text{(m)}$$

$$P_{1,2} = \dot{G}_n \cdot w^{\star}_{t,1,2} = \frac{\dot{G}_n \cdot (h^{\star}_2 - h^{\star}_1)}{A} \qquad \text{eenheid : } \frac{\text{kgf . m}}{\text{s}}$$

- in het SI :

$$w_{t,1,2} = h_2 - h_1 \qquad \text{eenheid : } \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$P_{1,2} = \dot{m} \cdot w_{t,1,2} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1) \qquad \text{eenheid : } \frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{W}$$

c. Niet-adiabatische kompressie in (gekoelde) zuigerkompressoren

Met verwaarlozing van de kinetische energie en de potentiële energie van plaats, bekomt men voor de technische arbeid die door het fluïdum wordt opgenomen, en voor het betrokken vermogen :

- in het TS :

$$w^{\star}_{t,1,2} = \frac{h^{\star}_2 - h^{\star}_1}{A} - \frac{q^{\star}_{1,2}}{A} = \frac{h^{\star}_2 - h^{\star}_1}{A} + \frac{-\,q^{\star}_{1,2}}{A} \qquad \text{eenheid : } \frac{\text{kgf . m}}{\text{kgf}} = \text{(m)}$$

$$P_{1,2} = \dot{G}_n \cdot w^{\star}_{t,1,2} = \dot{G}_n \cdot \left(\frac{h^{\star}_2 - h^{\star}_1}{A} + \frac{-\,q^{\star}_{1,2}}{A} \right) \qquad \text{eenheid : } \frac{\text{kgf . m}}{\text{s}}$$

- in het SI :

$$w_{t,1,2} = h_2 - h_1 - q_{1,2} = h_2 - h_1 + (-\,q_{1,2}) \qquad \text{eenheid : } \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$P_{1,2} = \dot{m} \cdot w_{t,1,2} = \dot{m} \cdot \left[h_2 - h_1 + (-\,q_{1,2}) \right] \qquad \text{eenheid : } \frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{W}$$

Daar door het fluïdum warmte wordt afgegeven aan de omgeving, zijn $q^{\star}_{1,2}$ (in het TS) en $q_{1,2}$ (in het SI) negatief, zodat $-\,q^{\star}_{1,2}$ (in het TS) en $-\,q_{1,2}$ (in het SI) positief zijn.

d. Adiabatische stroming

Daar $q^{\star}_{1,2} = 0$ (TS) en $q_{1,2} = 0$ (SI)

$w^{\star}_{t,1,2} = 0$ (TS) en $w_{t,1,2} = 0$ (SI)

bekomt men (met verwaarlozing van de verandering van de potentiële energie van plaats) :

- in het TS :

$$\frac{h^{\star}_2 - h^{\star}_1}{A} + \left(\frac{c_2^2 - c_1^2}{2\, g_n} \right)^{\star} = 0$$

- in het SI :

$$h_2 - h_1 + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} = 0$$

Bovenstaande uitdrukkingen zijn een weergave van de regel, die zegt dat bij adiabatische stroming de toename van de kinetische energie gelijk is aan de afname van de entalpie van het fluïdum; dit wordt weergegeven als volgt :

- in het TS :

$$\left(\frac{c_2^2 - c_1^2}{2\,g_n}\right)^{\star} = \frac{h_1^{\star} - h_2^{\star}}{A} \qquad \text{eenheid : } \frac{\text{kgf . m}}{\text{kgf}} = (\text{m})$$

- in het SI :

$$\frac{c_2^2 - c_1^2}{2} = h_1 - h_2 \qquad \text{eenheid : } \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

Wanneer $c_2 = c_1$, heeft men te doen met een toestandsverandering waarbij de eind-entalpie gelijk is aan de begin-entalpie, vermits men dan bekomt :

- in het TS :

$$h_2^{\star} = h_1^{\star}$$

- in het SI :

$$h_2 = h_1$$

Wanneer c_2 groter is dan c_1, bekomt men een verlaging van de entalpie. In het geval dat c_2 veel groter is dan c_1, mag c_1 verwaarloosd worden ten opzichte van c_2 en wordt c_2 gegeven door :

- in het TS :

$$c_2 = \sqrt{2\,g_n \cdot \frac{h_1^{\star} - h_2^{\star}}{A}}$$

- in het SI :

$$c_2 = \sqrt{2\,(h_1 - h_2)}$$

Bij het gebruik van de grondeenheden en van de er van afgeleide coherente eenheden, bekomt men in beide gevallen $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ als eenheid van c_2.

In het TS treft men ook volgende getalwaardenvergelijking aan :
(met 1 kcal = 4186,8 J = 426,935 kgf . m)

$$c_2 = \sqrt{2 \times 9{,}806\,65 \times 426{,}935} \cdot \sqrt{h_1^{\star} - h_2^{\star}}$$
$$\approx 91{,}51 \cdot \sqrt{h_1^{\star} - h_2^{\star}}$$

met $h_1^{\star}$ en $h_2^{\star}$ in $\frac{\text{kcal}}{\text{kgf}}$

c_2 in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$

Voorbeeld :

Bereken de uitstroomsnelheid van stoom uit een straalpijp, wanneer het verschil tussen de entalpie vóór de straalpijp en de entalpie na de straalpijp gelijk is aan :

$$h_1^* - h_2^* = 40{,}6 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kgf}}$$

$$h_1 - h_2 = 170\ 000 \ \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 170 \ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Men bekomt :

- in het TS :

volgens de algemene groothedenvergelijking :

$$c_2 = \sqrt{2\, g_n \cdot \frac{h_1^* - h_2^*}{A}} = \sqrt{2 \times 9{,}806\ 65 \ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times \frac{40{,}6 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kgf}}}{\frac{1}{427} \ \frac{\text{kcal}}{\text{kgf . m}}}}$$

$$= 583 \ \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

volgens de getalwaardenvergelijking :

$$c_2 = 91{,}51 \ \sqrt{h_1^* - h_2^*} = 91{,}51 \cdot \sqrt{40{,}6} = 583 \ \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

- in het SI :

$$c_2 = \sqrt{2\,(h_1 - h_2)} = \sqrt{2 \times 170\ 000 \ \frac{\text{J}}{\text{kg}}} = 583 \ \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

e. Afleiding van de wet van Bernoulli

De wet van Bernoulli veronderstelt een stroming waarvoor geldt :

$w_{t,1,2}^*$ of $w_{t,1,2} = 0$

dv^* of dv = nul (fluïdum niet samendrukbaar)

dus $v^* = \frac{1}{\gamma_n}$ = konstant (TS)

$v = \frac{1}{\rho}$ = konstant (SI)

Het is van geen belang of $q_{1,2}^*$ of $q_{1,2}$ al dan niet gelijk is aan nul.

Met u^* = inwendige energie (TS) (eenheid : $\frac{\text{kcal}}{\text{kgf}}$)

u = inwendige energie (SI) (SI-eenheid : $\frac{\text{J}}{\text{kg}}$) ,

geldt in de termodynamika :

- in het TS :

$$h^{\star} = u^{\star} + A \cdot p \cdot v^{\star} \qquad \left(\text{eenheid : } \frac{\text{kcal}}{\text{kgf}}\right)$$

- in het SI :

$$h = u + p \cdot v \qquad \left(\text{SI-eenheid : } \frac{\text{J}}{\text{kg}}\right)$$

De afleiding van de wet van Bernoulli uit de eerste hoofdwet (toegepast op een stationair stromend fluïdum door een open systeem) gebeurt als volgt :

- in het TS :

Uit vergelijking (XIV, 9', TS) volgt (met $w^{\star}_{t,1,2} = 0$) :

$$\frac{h^{\star}_2 - h^{\star}_1}{A} + \left(\frac{c_2^2 - c_1^2}{2\,g_n}\right)^{\star} + \left(\frac{g}{g_n} \cdot z_2 - \frac{g}{g_n} \cdot z_1\right)^{\star} = \frac{q^{\star}_{1,2}}{A}$$

$$\frac{u^{\star}_2 - u^{\star}_1}{A} + p_2 \cdot v^{\star}_2 - p_1 \cdot v^{\star}_1 + \left(\frac{c_2^2 - c_1^2}{2\,g_n}\right)^{\star} + \left(\frac{g}{g_n} \cdot z_2 - \frac{g}{g_n} \cdot z_1\right)^{\star} = \frac{q^{\star}_{1,2}}{A}$$

Wanneer $dv^{\star} = 0$, heeft men ook : $v^{\star}_2 = v^{\star}_1 = v^{\star} = \frac{1}{\gamma_n}$, zodat men verder bekomt :

$$\frac{u^{\star}_2 - u^{\star}_1}{A} + \left(\frac{p_2 - p_1}{\gamma_n}\right)^{\star} + \left(\frac{c_2^2 - c_1^2}{2\,g_n}\right)^{\star} + \left(\frac{g}{g_n} \cdot z_2 - \frac{g}{g_n} \cdot z_1\right)^{\star} = \frac{q^{\star}_{1,2}}{A}$$

$$\left(\frac{g}{g_n} \cdot z_1\right)^{\star} + \left(\frac{p_1}{\gamma_n}\right)^{\star} + \left(\frac{c_1^2}{2\,g_n}\right)^{\star} =$$

$$\left(\frac{g}{g_n} \cdot z_2\right)^{\star} + \left(\frac{p_2}{\gamma_n}\right)^{\star} + \left(\frac{c_2^2}{2\,g_n}\right)^{\star} + \frac{u^{\star}_2 - u^{\star}_1}{A} - \frac{q^{\star}_{1,2}}{A}$$

Om de term $\frac{u^{\star}_2 - u^{\star}_1}{A} - \frac{q^{\star}_{1,2}}{A}$ te verklaren doen we beroep op volgende vergelijking uit de termodynamika :

$$q^{\star}_{1,2} + A \cdot \psi^{\star}_{1,2} = h^{\star}_2 - h^{\star}_1 - A \cdot \int_1^2 v^{\star} \cdot dp = u^{\star}_2 - u^{\star}_1 + A \cdot \int_1^2 p \cdot dv^{\star}$$

waarin $\psi^{\star}_{1,2}$ = wrijvingsarbeid per normgewicht (uitgedrukt in $\frac{\text{kgf . m}}{\text{kgf}}$).

Met $dv = 0$, wordt deze vergelijking in dit geval herleid tot :

$$A \cdot \psi^{\star}_{1,2} = u^{\star}_2 - u^{\star}_1 - q^{\star}_{1,2}$$

$$\psi^{\star}_{1,2} = \frac{u^{\star}_2 - u^{\star}_1}{A} - \frac{q^{\star}_{1,2}}{A}$$

De wrijvingsarbeid per normgewicht werd in de hoger behandelde wet van Bernoulli (zie onderhavig hoofdstuk onder 2.3.9.) voorgesteld door $\left(\frac{g}{g_n} \cdot h_v\right)^{\star}$, zodat voor de hier beschouwde stroming (met $w^{\star}_{t,1,2} = 0$ en $dv^{\star} = 0$), geldt :

$$\psi^{\star}_{1,2} = \frac{u^{\star}_2 - u^{\star}_1}{A} - \frac{q^{\star}_{1,2}}{A} = \left(\frac{g}{g_n} \cdot h_v\right)^{\star}$$

Uiteindelijk bekomt men dus de wiskundige uitdrukking van de hoger behandelde wet van Bernoulli, zie vergelijking (XIV, 2, TS) :

$$\left(\frac{g}{g_n} \cdot z_1\right)^{\star} + \left(\frac{p_1}{\gamma_n}\right)^{\star} + \left(\frac{c_1^2}{2\,g_n}\right)^{\star} = \left(\frac{g}{g_n} \cdot z_2\right)^{\star} + \left(\frac{p_2}{\gamma_n}\right)^{\star} + \left(\frac{c_2^2}{2\,g_n}\right)^{\star} + \left(\frac{g}{g_n} \cdot h_v\right)^{\star}$$

- in het SI :

Uit vergelijking (XIV, 9, SI) volgt (met $w_{t,1,2} = 0$) :

$$h_2 - h_1 + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g \cdot (z_2 - z_1) = q_{1,2}$$

$$u_2 - u_1 + p_2 \cdot v_2 - p_1 \cdot v_1 + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g \cdot (z_2 - z_1) = q_{1,2}$$

Wanneer $dv = 0$, heeft men ook : $v_2 = v_1 = v = \frac{1}{\rho}$, zodat men verder bekomt :

$$u_2 - u_1 + \frac{p_2 - p_1}{\rho} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g \cdot (z_2 - z_1) = q_{1,2}$$

$$g \cdot z_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{c_1^2}{2} = g \cdot z_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{c_2^2}{2} + u_2 - u_1 - q_{1,2}$$

Om de term $u_2 - u_1 - q_{1,2}$ te verklaren, doen we beroep op de volgende vergelijking uit de termodynamika :

$$q_{1,2} + \psi_{1,2} = h_2 - h_1 - \int_1^2 v \cdot dp = u_2 - u_1 + \int_1^2 p \cdot dv$$

waarin $\psi_{1,2}$ = wrijvingsarbeid per massa (uitgedrukt in $\frac{J}{kg}$).

Met $dv = 0$, wordt deze vergelijking in dit geval herleid tot :

$$\psi_{1,2} = u_2 - u_1 - q_{1,2}$$

De wrijvingsarbeid per massa werd in de hoger behandelde wet van Bernoulli (zie onderhavig hoofdstuk onder 2.3.9.) voorgesteld door $g \cdot h_v$, zodat voor de hier beschouwde stroming (met $w_{t,1,2} = 0$ en $dv = 0$) geldt :

$$\psi_{1,2} = u_2 - u_1 - q_{1,2} = g \cdot h_v$$

Uiteindelijk bekomt men dus de wiskundige uitdrukking van de hoger behandelde wet van Bernoulli, zie vergelijking (XIV, 2, SI) :

$$g \cdot z_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{c_1^2}{2} = g \cdot z_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{c_2^2}{2} + g \cdot h_v$$

f. Verband tussen sommige grootheden van mechanische aard in verband met een stationaire stroming door een open systeem

Dit verband wordt weergegeven door :

- in het TS :

$$\int_1^2 v^{\star} \cdot dp + \psi_{1,2}^{\star} = w_{t,1,2}^{\star} - \left(\frac{c_2 - c_1}{2\, g_n}\right)^{\star} - \left(\frac{g}{g_n} \cdot z_2 - \frac{g}{g_n} \cdot z_1\right)^{\star} \qquad \text{(XIV, 11, TS)}$$

$$= \frac{h_2^{\star} - h_1^{\star}}{A} - \frac{q_{1,2}^{\star}}{A}$$

$$= \frac{u_2^{\star} - u_1^{\star}}{A} + p_2 \cdot v_2^{\star} - p_1 \cdot v_1^{\star} - \frac{q_{1,2}^{\star}}{A}$$

term-eenheid : $\frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{kgf}} = (\text{m})$

- in het SI :

$$\int_1^2 v \cdot dp + \psi_{1,2} = w_{t,1,2} - \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} - g \cdot (z_2 - z_1) \qquad \text{(XIV, 11, SI)}$$

$$= h_2 - h_1 - q_{1,2}$$

$$= u_2 - u_1 + p_2 \cdot v_2 - p_1 \cdot v_1 - q_{1,2}$$

term-eenheid : $\frac{\text{J}}{\text{kg}}$

Hieruit kan rechtstreeks de wet van Bernoulli afgeleid worden :

- in het TS :

met $v^{\star} = \frac{1}{\gamma_n}$ = konstant en $w_{t,1,2}^{\star} = 0$ bekomt men volgens vergelijking (XIV, 11, TS) :

$$v^{\star} \cdot (p_2 - p_1) + \psi^{\star}_{1,2} + \left(\frac{c_2^2 - c_1^2}{2\, g_n}\right)^{\star} + \left(\frac{g}{g_n} \cdot z_2 - \frac{g}{g_n} \cdot z_1\right)^{\star} = 0$$

$$\left(\frac{p_1}{\gamma_n}\right)^{\star} + \left(\frac{c_1^2}{2\, g_n}\right)^{\star} + \left(\frac{g}{g_n} \cdot z_1\right)^{\star} = \left(\frac{p_2}{\gamma_n}\right)^{\star} + \left(\frac{c_2^2}{2\, g_n}\right)^{\star} + \left(\frac{g}{g_n} \cdot z_2\right)^{\star} + \psi^{\star}_{1,2} = 0$$

term-eenheid : $\frac{\text{kgf . m}}{\text{kgf}} = (\text{m})$

- in het SI :

met $v = \frac{1}{\rho}$ = konstant en $w_{t,1,2} = 0$ bekomt men volgens vergelijking (XIV, 11, SI) :

$$v \cdot (p_2 - p_1) + \psi_{1,2} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g \cdot (z_2 - z_1) = 0$$

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{c_1^2}{2} + g \cdot z_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{c_2^2}{2} + g \cdot z_2 + \psi_{1,2}$$

term-eenheid : $\frac{\text{J}}{\text{kg}}$

De grootheid $\psi^{\star}_{1,2}$ respektievelijk $\psi_{1,2}$ stelt het verlies aan stromingsenergie respektievelijk per normgewicht en per massa voor. Bij de behandeling van de wet van Bernoulli (zie onderhavig hoofdstuk onder 2.3.9.) werden deze grootheden voorgesteld respektievelijk door $(\frac{g}{g_n} \cdot h_v)^{\star}$ en $g \cdot h_v$; zie respektievelijk de uitdrukkingen (XIV, 2, TS) en (XIV, 2, SI) in onderhavig hoofdstuk onder 2.3.9.

2.3.21. Temperatuurvereffeningskoëfficiënt

De temperatuurvereffeningskoëfficiënt a (vroeger genoemd temperatuurgeleidingskoëfficiënt) is een grootheid die voorkomt bij de studie van de niet-stationaire warmtestroming. Als algemene groothedenvergelijking geldt :

- in het TS :

$$a = \frac{\lambda}{c^{\star} \cdot \gamma_n}$$

gebruikelijke schrijfwijze : $a = \frac{\lambda}{c \cdot \gamma}$

met λ = warmtegeleidingskoëfficiënt

$c^{\star}$ = soortelijke warmtekapaciteit

γ_n = soortelijk normgewicht

Gebruikelijke eenheden in het TS :

$$[\lambda] = \frac{\text{kcal}}{\text{m . h . °C}} \qquad [c^{\star}] = \frac{\text{kcal}}{\text{kgf . °C}} \qquad [\gamma_n] = \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$$

$$[a] = \frac{\frac{\text{kcal}}{\text{m . h . °C}}}{\frac{\text{kcal}}{\text{kgf . °C}} \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}} = \frac{\text{m}^2}{\text{h}}$$

- in het SI :

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$$

met λ = warmtegeleidingskoëfficiënt

c = soortelijke warmtekapaciteit

ρ = soortelijke massa

Bij het gebruik van SI-eenheden bekomt men :

$$[\lambda] = \frac{\text{J}}{\text{m . s . K}} = \frac{\text{W}}{\text{m . K}} \qquad [c] = \frac{\text{J}}{\text{kg . K}} \qquad [\rho] = \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$[a] = \frac{\frac{\text{J}}{\text{m . s . K}}}{\frac{\text{J}}{\text{kg . K}} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Tussen de betrokken eenheden (waarin a wordt uitgedrukt) bestaat volgend verband :

$$1\ \frac{\text{m}^2}{\text{h}} = 1\ \frac{\text{m}^2}{3600\ \text{s}} = \frac{1}{3600}\ \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Om over te gaan van de algemene groothedenvergelijking in TS-notatie naar de algemene groothedenvergelijking in SI-notatie, vervangt men

$c^{\star}$ door $\frac{c}{g_n}$

γ_n door $\rho \cdot g_n$

Men bekomt :

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \gamma} \qquad \text{(TS gebruikelijk)}$$

$$a = \frac{\lambda}{c^{\star} \cdot \gamma_n} \qquad \text{(TS korrekt)}$$

$$a = \frac{\lambda}{\frac{c}{g_n} \cdot \rho \cdot g_n}$$

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$$

(SI)

2.3.22. Warmte-indringingskoëfficiënt

Wanneer men blootvoets op een vloer staat, stelt zich een kontakttemperatuur (voetzooltemperatuur) in die afhankelijk is van de warmte-indringingskoëfficiënt b van het materiaal waaruit de vloer bestaat.

Als algemene groothedenvergelijking geldt :

- in het TS :

$$b = \sqrt{\lambda \cdot c^{\star} \cdot \gamma_n}$$

gebruikelijke schrijfwijze :

$$b = \sqrt{\lambda \cdot c \cdot \gamma}$$

met λ = warmtegeleidingskoëfficiënt

$c^{\star}$ = soortelijke warmtekapaciteit

γ_n = soortelijk normgewicht

Gebruikelijke eenheden in het TS :

$$[\lambda] = \frac{\text{kcal}}{\text{m . h . °C}} \qquad [c^{\star}] = \frac{\text{kcal}}{\text{kgf . °C}} \qquad [\gamma_n] = \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$$

$$[b] = \sqrt{\frac{\text{kcal}^2}{\text{m}^4 \cdot \text{°C}^2 \cdot \text{h}}} = \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{°C} \cdot \sqrt{\text{h}}} = \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{h}^{1/2}}$$

- in het SI :

$$b = \sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho}$$

met λ = warmtegeleidingskoëfficiënt

c = soortelijke warmtekapaciteit

ρ = soortelijke massa

Bij het gebruik van SI-eenheden bekomt men :

$$[\lambda] = \frac{\text{J}}{\text{m . s . K}} = \frac{\text{W}}{\text{m . K}} \qquad [c] = \frac{\text{J}}{\text{kg . K}} \qquad [\rho] = \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$[b] = \sqrt{\frac{\text{J}^2}{\text{m}^4 \cdot \text{s} \cdot \text{K}^2}} = \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \sqrt{\text{s}}} = \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{1/2}} = \frac{\text{W} \cdot \sqrt{\text{s}}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} = \frac{\text{W} \cdot \text{s}^{1/2}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Tussen de betrokken eenheden (waarin b wordt uitgedrukt) bestaat volgend verband :

$$1\ \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2\ .\ ^\circ\text{C}\ .\ \text{h}^{1/2}} = \frac{4186{,}8\ \text{J}}{\text{m}^2\ .\ \text{K}\ .\ \sqrt{3600\ \text{s}}} = \frac{4186{,}8}{60}\ \frac{\text{J}}{\text{m}^2\ .\ \text{K}\ .\ \text{s}^{1/2}}$$

$$= 69{,}78\ \frac{\text{J}}{\text{m}^2\ .\ \text{K}\ .\ \text{s}^{1/2}} = 69{,}78\ \frac{\text{W}\ .\ \text{s}^{1/2}}{\text{m}^2\ .\ \text{K}}$$

Om over te gaan van de algemene groothedenvergelijking in TS-notatie naar de algemene groothedenvergelijking in SI-notatie, vervangt men :

$$c^* \text{ door } \frac{c}{g_n}$$

$$\gamma_n \text{ door } \rho\ .\ g_n$$

Men bekomt :

$$b = \sqrt{\lambda\ .\ c\ .\ \gamma} \qquad \text{(TS gebruikelijk)}$$

$$b = \sqrt{\lambda\ .\ c^*\ .\ \gamma_n} \qquad \text{(TS korrekt)}$$

$$b = \sqrt{\lambda\ .\ \frac{c}{g_n}\ .\ \rho\ .\ g_n} \qquad \downarrow$$

$$b = \sqrt{\lambda\ .\ c\ .\ \rho} \qquad \text{(SI)}$$

2.3.23. Dimensieloze kengrootheden

A. Inleiding

a. Het begrip dimensieloze kengrootheid

Dimensieloze kengrootheden (of dimensieloze parameters) zijn grootheden die een fysisch proces karakteriseren, en die bestaan uit een verhouding van een grootheid of een produkt van meerdere grootheden tot een andere grootheid of een produkt van andere grootheden (zie ook Hoofdstuk II, onder 12.).

Het feit dat deze kengrootheden dimensieloos zijn (met als eenheid het getal 1) en dus weergegeven worden door een getal, betekent dat zij voor een welbepaald fysisch proces een welbepaalde waarde hebben afhankelijk van de gegeven omstandigheden, wat ook het toegepaste eenheden-

stelsel moge zijn (op voorwaarde dat alle eenheden weggedeeld worden, hetgeen steeds het geval is bij aanwending van onderling koherente eenheden).

Hierna zullen enkele dimensieloze kengrootheden behandeld worden, met opgave van de definitievergelijking in TS-notatie en van de definitievergelijking in SI-notatie. Telkens zal aangetoond worden dat de betrokken kengrootheid werkelijk dimensieloos is, aan de hand van de eenheden van de grootheden die er bij te pas komen.

Twee van de tien behandelde dimensieloze kengrootheden horen eigenlijk niet thuis in onderhavig hoofdstuk (dat als titel draagt : "Van normgewicht in het TS naar massa in het SI"), daar in hun definitievergelijking noch de grootheid normgewicht, noch de grootheid massa voorkomt; het gaat om de kengrootheid van Froude en de kengrootheid van Nusselt.

b. Grootheden die voorkomen in de definitievergelijking van de dimensieloze kengrootheden die hierna zullen behandeld worden

- Grootheden en symbolen die voorkomen zowel in het TS als in het SI :
  - a = temperatuurvereffeningskoëfficiënt
  - g = plaatselijke versnelling van de zwaartekracht (plaatselijke zwaarteveldsterkte)
  - l = een karakteristieke lengte (kan ook een diameter of een dikte zijn)
  - p = druk
  - t = een karakteristiek tijdsinterval
  - v = een karakteristieke snelheid
  - α = warmteoverdrachtskoëfficiënt
  - β = volumeuitzettingskoëfficiënt
  - $\Delta\vartheta$ = een karakteristiek temperatuurverschil
  - λ = warmtegeleidingskoëfficiënt
  - η = dynamische viskositeit
  - ν = kinematische viskositeit
- Grootheden en symbolen die voorkomen enkel in het TS :
  - $c_p^{\star} = \left(\frac{dQ}{G_n \cdot dT}\right)_p$ = soortelijke warmtekapaciteit bij konstante druk; gebruikelijke schrijfwijze : c_p
  - g_n = normversnelling; gebruikelijke schrijfwijze : g

γ_n = soortelijk normgewicht; gebruikelijke schrijfwijze : γ

- Grootheden en symbolen die voorkomen enkel in het SI :

$c_p = \left(\frac{dQ}{m \cdot dT}\right)_p$ = soortelijke warmtekapaciteit bij konstante druk

ρ = soortelijke massa (volumieke massa)

c. Eenheden

Wat de betrokken grootheden betreft, wordt hierna de gebruikelijke eenheid in het TS en de SI-eenheid opgegeven.

De betrokken grootheden zijn weergegeven in bijgaande tabel.

B. Enkele dimensieloze kengrootheden (dimensieloze parameters)

a. Kengrootheid van Euler *Eu*

Definitievergelijking :

- in TS-notatie :

$$Eu = \frac{p}{\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot v^2} = \frac{g_n \cdot p}{\gamma_n \cdot v^2}$$

gebruikelijke schrijfwijze :

$$Eu = \frac{p}{\frac{\gamma}{g} \cdot v^2} = \frac{g \cdot p}{\gamma \cdot v^2}$$

Eenheden in het TS : $\dfrac{\frac{m}{s^2} \times \frac{kgf}{m^2}}{\frac{kgf}{m^3} \times \frac{m^2}{s^2}} = 1$

- in SI-notatie :

$$Eu = \frac{p}{\rho \cdot v^2}$$

SI-eenheden : $\dfrac{Pa}{\frac{kg}{m^3} \times \frac{m^2}{s^2}} = \dfrac{\frac{kg}{m \cdot s^2}}{\frac{kg}{m^3} \times \frac{m^2}{s^2}} = 1$

grootheid en symbool		eenheden	
		gebruikelijke eenheid in het TS	SI-eenheid
temperatuurvereffenings-koëfficiënt	a	$\frac{m^2}{h}$	$\frac{m^2}{s}$
plaatselijke versnelling van de zwaartekracht	g	$\frac{m}{s^2}$	$\frac{m}{s^2}$
lengte	l	m	m
druk	p	$\frac{kgf}{m^2}$	Pa
tijd	t	h, s	s
snelheid	v	$\frac{m}{s}$	$\frac{m}{s}$
warmteoverdrachts-koëfficiënt	α	$\frac{kcal}{m^2 \cdot h \cdot °C}$	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
volumeuitzettings-koëfficiënt	β	$\frac{1}{°C}$ (of $\frac{1}{°K}$)	$\frac{1}{K}$
temperatuurverschil	$\Delta\theta$	°C (of °K)	K
warmtegeleidings-koëfficiënt	λ	$\frac{kcal}{m \cdot h \cdot °C}$	$\frac{W}{m \cdot K}$
dynamische viskositeit	η	$\frac{kgf \cdot s}{m^2}$	$\frac{N \cdot s}{m^2} = Pa \cdot s = \frac{kg}{s \cdot m}$
kinematische viskositeit	ν	$\frac{m^2}{s}$	$\frac{m^2}{s}$
soortelijke warmtekapaciteit (TS)	c^*_p	$\frac{kcal}{kgf \cdot °C}$	-
normversnelling (TS)	g_n	$\frac{m}{s^2}$	-
soortelijk normgewicht (TS)	γ_n	$\frac{kgf}{m^3}$	-
soortelijke warmtekapaciteit (SI)	c_p	-	$\frac{J}{kg \cdot K}$
soortelijke massa (SI)	ρ	-	$\frac{kg}{m^3}$

b. Kengrootheid van Fourier *Fo*

Definitievergelijking :

- in TS-notatie :

$$Fo = \frac{a \cdot t}{l^2} = \frac{\lambda \cdot t}{c_p^{\star} \cdot \gamma_n \cdot l^2}$$

gebruikelijke schrijfwijze :

$$Fo = \frac{a \cdot t}{l^2} = \frac{\lambda \cdot t}{c_p \cdot \gamma \cdot l^2}$$

Eenheden in het TS in verband met $\frac{a \cdot t}{l^2}$: $\frac{\frac{m^2}{h} \times h}{m^2} = \frac{\frac{m^2}{s} \times s}{m^2} = 1$

Overeenstemmende eenheden voor a en t zijn respektievelijk ofwel $\frac{m^2}{h}$ en h, ofwel $\frac{m^2}{s}$ en s, waarbij volgende eenhedenvergelijkingen gelden :

$$1 \frac{m^2}{h} = 1 \frac{m^2}{3600\ s} = \frac{1}{3600} \frac{m^2}{s}$$

$$1\ h = 3600\ s$$

Eenheden in het TS in verband met $\frac{\lambda \cdot t}{c_p^{\star} \cdot \gamma_n \cdot l^2}$:

$$\frac{\frac{kcal}{m \cdot h \cdot °C} \times h}{\frac{kcal}{kgf \cdot °C} \times \frac{kgf}{m^3} \times m^2} = \frac{\frac{kcal}{m \cdot s \cdot °C} \times s}{\frac{kcal}{kgf \cdot °C} \times \frac{kgf}{m^3} \times m^2} = 1$$

Overeenstemmende eenheden voor λ en t zijn ofwel $\frac{kcal}{m \cdot h \cdot °C}$ en h, ofwel $\frac{kcal}{m \cdot s \cdot °C}$ en s, waarbij volgende eenhedenvergelijkingen gelden :

$$1 \frac{kcal}{m \cdot h \cdot °C} = 1 \frac{kcal}{m \cdot 3600\ s \cdot °C} = \frac{1}{3600} \frac{kcal}{m \cdot s \cdot °C}$$

$$1\ h = 3600\ s$$

- in SI-notatie :

$$Fo = \frac{a \cdot t}{l^2} = \frac{\lambda \cdot t}{c_p \cdot \rho \cdot l^2}$$

SI-eenheden in verband met $\frac{a \cdot t}{l^2}$: $\frac{\frac{m^2}{s} \times s}{m^2} = 1$

SI-eenheden in verband met $\frac{\lambda \cdot t}{c_p \cdot \rho \cdot l^2}$: $\frac{\frac{W}{m \cdot K} \times s}{\frac{J}{kg \cdot K} \times \frac{kg}{m^3} \times m^2} = 1$

c. Kengrootheid van Froude *Fr*

De kengrootheid van Froude wordt zowel in het TS als in het SI weergegeven door dezelfde definitievergelijking :

$$Fr = \frac{v^2}{g \cdot l}$$

Eenheden in het TS : $\dfrac{\frac{m^2}{s^2}}{\frac{m}{s^2} \times m} = 1$

SI-eenheden : $\dfrac{\frac{m^2}{s^2}}{\frac{m}{s^2} \times m} = 1$

d. Kengrootheid van Grashof *Gr*

Definitievergelijking :

- in TS-notatie :

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta}{\nu^2} = \frac{g \cdot \beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta \cdot \gamma_n^2}{g_n^2 \cdot \eta^2}$$

gebruikelijke schrijfwijze :

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta}{\nu^2} = \frac{\beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta \cdot \gamma^2}{g \cdot \eta^2}$$

Eenheden in het TS in verband met $\dfrac{g \cdot \beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta}{\nu^2}$:

$$\frac{\frac{m}{s^2} \times \frac{1}{°C} \times m^3 \times °C}{\frac{m^4}{s^2}} = 1$$

Eenheden in het TS in verband met $\dfrac{g \cdot \beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta \cdot \gamma_n^2}{g_n^2 \cdot \eta^2}$:

$$\frac{\frac{m}{s^2} \times \frac{1}{°C} \times m^3 \times °C \times \frac{kgf^2}{m^6}}{\frac{m^2}{s^4} \times \frac{kgf^2 \cdot s^2}{m^4}} = 1$$

- in SI-notatie :

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta}{\nu^2} = \frac{g \cdot \beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta \cdot \rho^2}{\eta^2}$$

SI-eenheden in verband met $\frac{g \cdot \beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta}{\nu^2}$:

$$\frac{\frac{m}{s^2} \times \frac{1}{K} \times m^3 \times K}{\frac{m^4}{s^2}} = 1$$

SI-eenheden in verband met $\frac{g \cdot \beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta \cdot \rho^2}{\eta^2}$:

$$\frac{\frac{m}{s^2} \times \frac{1}{K} \times m^3 \times K \times \frac{kg^2}{m^6}}{\frac{kg^2}{s^2 \cdot m^2}} = 1$$

e. Kengrootheid van Nusselt *Nu*

De kengrootheid van Nusselt wordt zowel in het TS als in het SI weergegeven door dezelfde definitievergelijking :

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$$

Eenheden in het TS : $\frac{\frac{kcal}{m^2 \cdot h \cdot °C} \times m}{\frac{kcal}{m \cdot h \cdot °C}} = \frac{\frac{kcal}{m^2 \cdot s \cdot °C} \times m}{\frac{kcal}{m \cdot s \cdot °C}} = 1$

Overeenstemmende eenheden voor α en λ zijn respektievelijk ofwel $\frac{kcal}{m^2 \cdot h \cdot °C}$ en $\frac{kcal}{m \cdot h \cdot °C}$, ofwel $\frac{kcal}{m^2 \cdot s \cdot °C}$ en $\frac{kcal}{m \cdot s \cdot °C}$, waarbij volgende eenheden vergelijkingen gelden :

$$1 \frac{kcal}{m^2 \cdot h \cdot °C} \quad 1 \frac{kcal}{m^2 \cdot 3600\ s \cdot °C} = \frac{1}{3600} \frac{kcal}{m^2 \cdot s \cdot °C}$$

$$1 \frac{kcal}{m \cdot h \cdot °C} = 1 \frac{kcal}{m \cdot 3600\ s \cdot °C} = \frac{1}{3600} \frac{kcal}{m \cdot s \cdot °C}$$

SI-eenheden : $\frac{\frac{W}{m^2 \cdot K} \times m}{\frac{W}{m \cdot K}} = 1$

f. Kengrootheid van Péclet *Pe*

Definitievergelijking :

- in TS-notatie :

$$Pe = \frac{v \cdot l}{a} = \frac{v \cdot l \cdot \gamma_n \cdot c_p^*}{\lambda}$$

gebruikelijke schrijfwijze :

$$Pe = \frac{v \cdot l}{a} = \frac{v \cdot l \cdot \gamma \cdot c_p}{\lambda}$$

Eenheden in het TS in verband met $\frac{v \cdot l}{a}$: $\frac{\frac{m}{s} \times m}{\frac{m^2}{s}} = 1$

In het TS vindt men de temperatuurvereffeningskoëfficiënt a in tabellen meestal uitgedrukt in $\frac{m^2}{h}$; bij het bepalen van de kengrootheid van Péclet dient men a omwille van de koherentie uit te drukken in $\frac{m^2}{s}$.
De betrokken eenhedenvergelijking luidt :

$$1 \frac{m^2}{h} = 1 \frac{m^2}{3600\ s} = \frac{1}{3600} \frac{m^2}{s}$$

Eenheden in het TS in verband met $\frac{v \cdot l \cdot \gamma_n \cdot c_p^{\star}}{\lambda}$:

$$\frac{\frac{m}{s} \times m \times \frac{kgf}{m^3} \times \frac{kcal}{kgf \cdot °C}}{\frac{kcal}{m \cdot s \cdot °C}} = 1$$

In het TS vindt men de warmtegeleidingskoëfficiënt λ in tabellen meestal uitgedrukt in $\frac{kcal}{m \cdot h \cdot °C}$; bij het bepalen van de kengrootheid van Péclet dient men λ omwille van de koherentie uit te drukken in $\frac{kcal}{m \cdot s \cdot °C}$. De betrokken eenhedenvergelijking luidt :

$$1 \frac{kcal}{m \cdot h \cdot °C} = 1 \frac{kcal}{m \cdot 3600\ s \cdot °C} = \frac{1}{3600} \frac{kcal}{m \cdot s \cdot °C}$$

- in SI-notatie :

$$Pe = \frac{v \cdot l}{a} = \frac{v \cdot l \cdot \rho \cdot c_p}{\lambda}$$

SI-eenheden in verband met $\frac{v \cdot l}{a}$: $\frac{\frac{m}{s} \times m}{\frac{m^2}{s}} = 1$

SI-eenheden in verband met $\frac{v \cdot l \cdot \rho \cdot c_p}{\lambda}$: $\frac{\frac{m}{s} \times m \times \frac{kg}{m^3} \times \frac{J}{kg \cdot K}}{\frac{W}{m \cdot K}} = 1$

g. Kengrootheid van Prandtl *Pr*

Definitievergelijking :

- in TS-notatie :

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\eta \cdot g_n \cdot c_p^{\star}}{\lambda}$$

gebruikelijke schrijfwijze :

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\eta \cdot g \cdot c_p}{\lambda}$$

Eenheden in het TS in verband met $\frac{\nu}{a}$: $\frac{\frac{m^2}{s}}{\frac{m^2}{s}} = 1$

In het TS vindt men de temperatuurvereffeningskoëfficiënt a in tabellen meestal uitgedrukt in $\frac{m^2}{h}$; bij het bepalen van de kengrootheid van Prandtl dient men omwille van de koherentie a uit te drukken in $\frac{m^2}{s}$.
De betrokken eenhedenvergelijking luidt :

$$1\ \frac{m^2}{h} = 1\ \frac{m^2}{3600\ s} = \frac{1}{3600}\ \frac{m^2}{s}$$

Eenheden in het TS in verband met $\frac{\eta \cdot g_n \cdot c_p^{\star}}{\lambda}$:

$$\frac{\frac{kgf \cdot s}{m^2} \times \frac{m}{s^2} \times \frac{kcal}{kgf \cdot °C}}{\frac{kcal}{m \cdot s \cdot °C}} = 1$$

In het TS vindt men de warmtegeleidingskoëfficiënt λ in tabellen meestal uitgedrukt in $\frac{kcal}{m \cdot h \cdot °C}$; bij het bepalen van de kengrootheid van Prandtl dient men λ omwille van de koherentie uit te drukken in $\frac{kcal}{m \cdot s \cdot °C}$. De betrokken eenhedenvergelijking luidt :

$$1\ \frac{kcal}{m \cdot h \cdot °C} = 1\ \frac{kcal}{m \cdot 3600\ s \cdot °C} = \frac{1}{3600}\ \frac{kcal}{m \cdot s \cdot °C}$$

- in SI-notatie : $Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda}$

SI-eenheden in verband met $\frac{\nu}{a}$: $\frac{\frac{m^2}{s}}{\frac{m^2}{s}} = 1$

SI-eenheden in verband met $\frac{\eta \cdot c_p}{\lambda}$: $\frac{\frac{kg}{s \cdot m} \times \frac{J}{kg \cdot K}}{\frac{W}{m \cdot K}} = 1$

h. Kengrootheid van Rayleigh *Ra*

Definitievergelijking :

- in TS-notatie :

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta}{\nu \cdot a} = \frac{g \cdot \beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta \cdot \gamma_n^2 \cdot c_p^{\star}}{g_n \cdot \eta \cdot \lambda}$$

gebruikelijke schrijfwijze :

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta}{\nu \cdot a} = \frac{\beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta \cdot \gamma^2 \cdot c_p}{\eta \cdot \lambda}$$

Eenheden in het TS in verband met $\frac{g \cdot \beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta}{\nu \cdot a}$

$$\frac{\frac{m}{s^2} \times \frac{1}{°C} \times m^3 \times °C}{\frac{m^2}{s} \times \frac{m^2}{s}} = 1$$

In het TS vindt men de temperatuurvereffeningskoëfficiënt a in tabellen meestal uitgedrukt in $\frac{m^2}{h}$; bij het bepalen van de kengrootheid van Rayleigh dient men a omwille van de koherentie uit te drukken in $\frac{m^2}{s}$.
De betrokken eenhedenvergelijking luidt :

$$1 \frac{m^2}{h} = 1 \frac{m^2}{3600\ s} = \frac{1}{3600} \frac{m^2}{s}$$

Eenheden in het TS in verband met $\frac{g \cdot \beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta \cdot \gamma_n^2 \cdot c_p^{\star}}{g_n \cdot \eta \cdot \lambda}$

$$\frac{\frac{m}{s^2} \times \frac{1}{°C} \times m^3 \times °C \times \frac{kgf^2}{m^6} \times \frac{kcal}{kgf \cdot °C}}{\frac{m}{s^2} \times \frac{kgf \cdot s}{m^2} \times \frac{kcal}{m \cdot s \cdot °C}} = 1$$

In het TS vindt men de warmtegeleidingskoëfficiënt λ meestal uitgedrukt in $\frac{kcal}{m \cdot h \cdot °C}$; bij het bepalen van de kengrootheid van Rayleigh dient men omwille van de koherentie λ uit te drukken in $\frac{kcal}{m \cdot s \cdot °C}$.
De betrokken eenhedenvergelijking luidt :

$$1 \frac{kcal}{m \cdot h \cdot °C} = 1 \frac{kcal}{m \cdot 3600\ s \cdot °C} = \frac{1}{3600} \frac{kcal}{m \cdot s \cdot °C}$$

- in SI-notatie :

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta}{\nu \cdot a} = \frac{g \cdot \beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta \cdot \rho^2 \cdot c_p}{\eta \cdot \lambda}$$

SI-eenheden in verband met $\frac{g \cdot \beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta}{\nu \cdot a}$: $\frac{\frac{m}{s^2} \times \frac{1}{K} \times m^3 \times K}{\frac{m^2}{s} \times \frac{m^2}{s}} = 1$

SI-eenheden in verband met $\frac{g \cdot \beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta \cdot \rho^2 \cdot c_p}{\eta \cdot \lambda}$:

$$\frac{\frac{m}{s^2} \times \frac{1}{K} \times m^3 \times K \times \frac{kg^2}{m^6} \times \frac{J}{kg \cdot K}}{\frac{kg}{s \cdot m} \times \frac{W}{m \cdot K}} = 1$$

i. Kengrootheid van Reynolds *Re*

Definitievergelijking :

- in TS-notatie :

$$Re = \frac{v \cdot l}{\nu} = \frac{v \cdot l \cdot \gamma_n}{\eta \cdot g_n}$$

gebruikelijke schrijfwijze :

$$Re = \frac{v \cdot l}{\nu} = \frac{v \cdot l \cdot \gamma}{\eta \cdot g}$$

Eenheden in het TS in verband met $\frac{v \cdot l}{\nu}$: $\frac{\frac{m}{s} \times m}{\frac{m^2}{s}} = 1$

Eenheden in het TS in verband met $\frac{v \cdot l \cdot \gamma_n}{\eta \cdot g_n}$: $\frac{\frac{m}{s} \times m \times \frac{kgf}{m^3}}{\frac{kgf \cdot s}{m^2} \times \frac{m}{s^2}} = 1$

- in SI-notatie :

$$Re = \frac{v \cdot l}{\nu} = \frac{v \cdot l \cdot \rho}{\eta}$$

SI-eenheden in verband met $\frac{v \cdot l}{\nu}$: $\frac{\frac{m}{s} \times m}{\frac{m^2}{s}} = 1$

SI-eenheden in verband met $\frac{v \cdot l \cdot \rho}{\eta}$: $\frac{\frac{m}{s} \times m \times \frac{kg}{m^3}}{\frac{kg}{s \cdot m}} = 1$

j. Kengrootheid van Stanton St

Definitievergelijking :

- in TS-notatie :

$$St = \frac{\alpha \cdot a}{\lambda \cdot v} = \frac{\alpha}{c_p^{\star} \cdot \gamma_n \cdot v}$$

gebruikelijke schrijfwijze :

$$St = \frac{\alpha \cdot a}{\lambda \cdot v} = \frac{\alpha}{c_p \cdot \gamma \cdot v}$$

Eenheden in het TS in verband met $\frac{\alpha \cdot a}{\lambda \cdot v}$:

$$\frac{\frac{kcal}{m^2 \cdot h \cdot °C} \times \frac{m^2}{s}}{\frac{kcal}{m \cdot h \cdot °C} \times \frac{m}{s}} = \frac{\frac{kcal}{m^2 \cdot s \cdot °C} \times \frac{m^2}{s}}{\frac{kcal}{m \cdot s \cdot °C} \times \frac{m}{s}} = 1$$

In het TS vindt men de temperatuurvereffeningskoëfficiënt a in tabellen meestal uitgedrukt in $\frac{m^2}{h}$; bij het bepalen van de kengrootheid van Stanton dient men omwille van de koherentie a uit te drukken in $\frac{m^2}{s}$. De betrokken eenhedenvergelijking luidt :

$$1 \frac{m^2}{h} = 1 \frac{m^2}{3600\ s} = \frac{1}{3600} \frac{m^2}{s}$$

Overeenstemmende eenheden voor α en λ zijn respektievelijk ofwel $\frac{kcal}{m^2 \cdot h \cdot °C}$ en $\frac{kcal}{m \cdot h \cdot °C}$, ofwel $\frac{kcal}{m^2 \cdot s \cdot °C}$ en $\frac{kcal}{m \cdot s \cdot °C}$ waarbij volgende eenhedenvergelijkingen gelden :

$$1 \frac{kcal}{m^2 \cdot h \cdot °C} = 1 \frac{kcal}{m^2 \cdot 3600\ s \cdot °C} = \frac{1}{3600} \frac{kcal}{m^2 \cdot s \cdot °C}$$

$$1 \frac{kcal}{m \cdot h \cdot °C} = 1 \frac{kcal}{m \cdot 3600\ s \cdot °C} = \frac{1}{3600} \frac{kcal}{m \cdot s \cdot °C}$$

Eenheden in het TS in verband met $\frac{\alpha}{c_p^{\star} \cdot \gamma_n \cdot v}$: $\frac{\frac{kcal}{m^2 \cdot s \cdot °C}}{\frac{kcal}{kgf \cdot °C} \times \frac{kgf}{m^3} \times \frac{m}{s}} = 1$

In het TS vindt men de warmteoverdrachtskoëfficiënt α in tabellen meestal uitgedrukt in $\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot {}^\circ\text{C}}$; bij het bepalen van de kengrootheid van Stanton dient men hier omwille van de koherentie α uit te drukken in $\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot {}^\circ\text{C}}$. De betrokken eenhedenvergelijking luidt :

$$1 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot {}^\circ\text{C}} = 1 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot 3600\ \text{s} \cdot {}^\circ\text{C}} = \frac{1}{3600} \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot {}^\circ\text{C}}$$

- in SI-notatie :

$$St = \frac{\alpha \cdot a}{\lambda \cdot v} = \frac{\alpha}{c_p \cdot \rho \cdot v}$$

SI-eenheden in verband met $\frac{\alpha \cdot a}{\lambda \cdot v}$: $\dfrac{\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \times \frac{\text{m}^2}{\text{s}}}{\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \times \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 1$

SI-eenheden in verband met $\frac{\alpha}{c_p \cdot \rho \cdot v}$: $\dfrac{\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}}{\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \times \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 1$

C. Overzicht van de behandelde dimensieloze kengrootheden

TS-notatie	SI-notatie
$Eu = \dfrac{p}{\frac{\gamma_n}{g_n} \cdot v^2} = \dfrac{g_n \cdot p}{\gamma_n \cdot v^2}$ $\left(= \dfrac{p}{\frac{\gamma}{g} \cdot v^2} = \dfrac{g \cdot p}{\gamma \cdot v^2} \right)$	$Eu = \dfrac{p}{\rho \cdot v^2}$
$Fo = \dfrac{a \cdot t}{l^2} = \dfrac{\lambda \cdot t}{c_p \cdot \gamma_n \cdot l^2}$ $\left(= \dfrac{\lambda \cdot t}{c_p \cdot \gamma \cdot l^2} \right)$	$Fo = \dfrac{a \cdot t}{l^2} = \dfrac{\lambda \cdot t}{c_p \cdot \rho \cdot l^2}$
$Fr = \dfrac{v^2}{g \cdot l}$	$Fr = \dfrac{v^2}{g \cdot l}$

$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta}{\nu^2}$ $= \frac{g \cdot \beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta \cdot \gamma_n^2}{g_n^2 \cdot \eta^2}$ $\left(= \frac{\beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta \cdot \gamma^2}{g \cdot \eta^2} \right)$	$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta}{\nu^2}$ $= \frac{g \cdot \beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta \cdot \rho^2}{\eta^2}$
$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$	$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$
$Pe = \frac{v \cdot l}{a} = \frac{v \cdot l \cdot \gamma_n \cdot c_p^{\star}}{\lambda}$ $\left(= \frac{v \cdot l \cdot \gamma \cdot c_p}{\lambda} \right)$	$Pe = \frac{v \cdot l}{a} = \frac{v \cdot l \cdot \rho \cdot c_p}{\lambda}$
$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\eta \cdot g_n \cdot c_p^{\star}}{\lambda}$ $\left(= \frac{\eta \cdot g \cdot c_p}{\lambda} \right)$	$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda}$
$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta}{\nu \cdot a}$ $= \frac{g \cdot \beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta \cdot \gamma_n^2 \cdot c_p^{\star}}{g_n \cdot \eta \cdot \lambda}$ $\left(= \frac{\beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta \cdot \gamma^2 \cdot c_p}{\eta \cdot \lambda} \right)$	$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta}{\nu \cdot a}$ $= \frac{g \cdot \beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta \cdot \rho^2 \cdot c_p}{\eta \cdot \lambda}$
$Re = \frac{v \cdot l}{\nu} = \frac{v \cdot l \cdot \gamma_n}{\eta \cdot g_n}$ $\left(= \frac{v \cdot l \cdot \gamma}{\eta \cdot g} \right)$	$Re = \frac{v \cdot l}{\nu} = \frac{v \cdot l \cdot \rho}{\eta}$
$St = \frac{\alpha \cdot a}{\lambda \cdot v} = \frac{\alpha}{c_p^{\star} \cdot \gamma_n \cdot v}$ $\left(= \frac{\alpha}{c_p \cdot \gamma \cdot v} \right)$	$St = \frac{\alpha \cdot a}{\lambda \cdot v} = \frac{\alpha}{c_p \cdot \rho \cdot v}$

D. Overgang van TS-notatie naar SI-notatie wat betreft de behandelde definitievergelijkingen van dimensieloze kengrootheden

Om over te gaan van de (korrekt geschreven) definitievergelijking in TS-notatie naar de definitievergelijking in SI-notatie, vervangt men :

γ_n door $\rho \cdot g_n$

$\overset{\star}{c}_p$ door $\frac{c_p}{g_n}$

Voorbeeld :

$$Ra = \frac{\beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta \cdot \gamma^2 \cdot c_p}{\eta \cdot \lambda}$$ (TS gebruikelijk)

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta \cdot \gamma_n^2 \cdot \overset{\star}{c}_p}{g_n \cdot \eta \cdot \lambda}$$ (TS korrekt)

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta \cdot \rho^2 \cdot g_n^2 \cdot \frac{c_p}{g_n}}{g_n \cdot \eta \cdot \lambda}$$

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta \cdot \rho^2 \cdot c_p}{\eta \cdot \lambda}$$ (SI)

E. Opmerkingen

Wat betreft de TS-notatie, was de gebruikelijke schrijfwijze (in de overzichtstabel aangegeven tussen haakjes) te vermijden om volgende redenen :

a. Wat betreft het symbool g, wist men niet meer of het ging om de plaatselijke versnelling van de zwaartekracht of om de normversnelling .

Voorbeelden :

$Re = \frac{v \cdot l \cdot \gamma}{\eta \cdot g}$ met g = normversnelling (= g_n)

$Eu = \frac{g \cdot p}{\gamma \cdot v^2}$ met g = normversnelling (= g_n)

$Fr = \frac{v^2}{g \cdot l}$ met g = plaatselijke versnelling

b. In de gevallen waarin een g (plaatselijke versnelling) werd weggedeeld met een g_n (normversnelling), had men te maken met een minder nauwkeurige uitdrukking .

Voorbeelden :

$$Gr = \frac{\beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta \cdot \gamma^2}{g \cdot \eta^2} \qquad \text{(de overblijvende } g = g_n\text{)}$$

$$Ra = \frac{\beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta \cdot \gamma^2 \cdot c_p}{\eta \cdot \lambda}$$

c. Er kon niet meer uitgemaakt worden of het ging om een fysisch proces waarin de plaatselijke versnelling van de zwaartekracht (plaatselijke zwaarteveldsterkte) al dan niet een rol speelde. Van de tien behandelde dimensieloze kengrootheden hebben enkel de kengrootheid van Froude *Fr*, de kengrootheid van Grashof *Gr* en de kengrootheid van Rayleigh *Ra* betrekking op een fysisch proces waarin de plaatselijke versnelling van de zwaartekracht (plaatselijke zwaarteveldsterkte) een rol speelt.
In de uitdrukking die *Fr* weergeeft kwam er wel een g voor maar uiteindelijk wist men niet meer om welke g het precies ging (de plaatselijke versnelling of de normversnelling).
Bij de gebruikelijke schrijfwijze in TS-notatie van de dimensieloze kengrootheden *Gr* en *Ra* kwam de plaatselijke versnelling van de zwaartekracht g (plaatselijke zwaarteveldsterkte) echter niet meer voor.
Wanneer men zich er niet van bewust was dat de grootheid g die voorkomt in de uitdrukking $Gr = \frac{\beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta \cdot \gamma^2}{g \cdot \eta^2}$ de normversnelling vertegenwoordigt, kon men (verkeerdelijk) veronderstellen, dat de dimensieloze kengrootheid *Gr* omgekeerd evenredig is met de plaatselijke versnelling van de zwaartekracht. Indien men zich er wel van bewust was dat g hier de normversnelling vertegenwoordigt, kon men (verkeerdelijk) veronderstellen, dat *Gr* niet afhankelijk is van de plaatselijke versnelling van de zwaartekracht. In werkelijkheid echter is *Gr* recht evenredig met de plaatselijke versnelling van de zwaartekracht, zoals blijkt uit de korrekte schrijfwijze.
In de uitdrukking $Ra = \frac{\beta \cdot l^3 \cdot \Delta\theta \cdot \gamma^2 \cdot c_p}{\eta \cdot \lambda}$ komt g helemaal niet meer voor; men kon daardoor (verkeerdelijk) veronderstellen dat de kengrootheid *Ra* niet afhankelijk is van de plaatselijke versnelling van de zwaar-

tekracht. In werkelijkheid echter is Ra recht evenredig met de plaatselijke versnelling van de zwaartekracht, zoals blijkt uit de korrekte schrijfwijze.

Bij de SI-notatie is alles veel eenvoudiger : de grootheid "normversnelling" g_n komt er nooit voor, en de grootheid "plaatselijke versnelling van de zwaartekracht" g (of plaatselijke zwaarteveldsterkte) komt enkel voor in die gevallen waarin de plaatselijke versnelling van de zwaartekracht (of plaatselijke zwaarteveldsterkte) een rol speelt.

HOOFDSTUK XV

ANGELSAKSISCHE EENHEDEN EN EENHEDENSTELSELS

1. De eenheden yard, pound, gallon en bushel

1.1. De eenheden yard en pound

1.1.1. De eenheden yard en pound in Groot-Brittannië (UK)

In Engeland werden de oude yard-standaarden van Hendrik VII (1496) en Elisabeth I (1588), die als "eindmaten" uitgevoerd waren, in 1758 vervangen door een "puntmaat" : de yard werd thans gedefinieerd als de afstand tussen twee punten op een daartoe vervaardigde staaf. Eveneens in 1758 werd de troy pound gedefinieerd als de massa van een daartoe vervaardigde cilinder uit messing. In 1824 bepaalt het Engelse parlement, dat 1 yard gelijk is aan 0,914 383 4 meter en 1 troy pound gelijk aan 372,3986 gram. Het legt tevens wettelijk vast dat 1 troy pound gelijk is aan 5760 grains. Beide standaarden, die niet alleen de grootte van de yard en de troy pound weergeven, doch er tevens de definitie van zijn, werden in 1834 bij de brand van het parlementsgebouw vernietigd.

In 1845 werd een reeks nieuwe staven vervaardigd, waarop telkens de yard werd weergegeven als de lengte tussen 2 streepjes. Eén ervan werd uitgekozen als de "Imperial Standard Yard". Als nieuwe standaard voor gewicht (in de zin van massa) kwam niet meer de vroegere troy pound in aanmerking, doch de voorkeur werd thans gegeven aan de avoirdupois pound, die gelijkgesteld werd aan 7000 grains. Deze "Imperial Standard Avoirdupois Pound" werd in 1844 vervaardigd uit platina.

Zowel de "Imperial Standard Yard" als de "Imperial Standard Pound" verkregen in Engeland een wettelijk karakter door de "Weights and Measures Standards Act" van 1855.

Vergelijkende metingen tussen de imperial standard yard en de meter gaven volgende resultaten :

	imp. stand. yard in m	imp. inch in mm	meter in imp. inch
1895	0,914 399 2	25,399 978	39,370 113
1922	0,914 398 4	25,399 956	39,370 147
1932	0,914 398 2	25,399 950	39,370 156
1947	0,914 397 5	25,399 931	39,370 186

Later werden in Groot-Brittannië volgende omzettingen toegepast :

- als wettelijke omrekening voor de handel (sinds 1898) :

  1 meter = 39,370 113 imp. inches

  1 imp . inch (of UK inch) = 25,399 978 mm

- voor wetenschappelijk onderzoek (sinds 1922) :

  1 meter = 39,370 147 imp. inches

  1 imp. inch (of UK inch) = 25,399 956 mm

- in het kader van de normalisatie voor industriële doeleinden (in 1930 aangenomen door het British Standards Institution) :

  1 inch = 25,4 mm

  1 yard = 0,9144 m

Vergelijkende metingen tussen de imperial standard avoirdupois pound en het internationale prototype van het kilogram gaven volgende resultaten :

	imp. stand. pound in kg	kilogram in imp. lb
1883	0,453 592 43	2,204 622 330
1883	0,453 592 427 7	2,204 622 341
1922	0,453 592 343	2,204 622 753
1933	0,453 592 338	2,204 622 777

N.B. : Het symbool lb voor pound is afgeleid van het Latijnse of Spaanse woord "libra" = pond.

Later werden in Groot-Brittannië volgende omzettingen toegepast :

- voor wettelijke omrekeningen voor de handel (sinds 1898) :

  1 imp. pound = 0,453 592 43 kg

  1 kg = 2,204 622 330 imp. pounds

- voor wetenschappelijk onderzoek (sinds 1933) :

1 imp. pound = 0,453 592 338 kg

1 kg = 2,204 622 777 imp. pounds

1.1.2. De eenheden yard en pound in de Verenigde Staten van Noord-Amerika (USA)

In de Verenigde Staten van Noord-Amerika (USA) bestond omstreeks 1830-1835 een strekking om de yard te laten definiëren door een materiële standaard die met de toenmalige Engelse yard zou overeenstemmen. Een voorstel in deze zin kon echter geen officiële bekrachtiging krijgen.

In 1828 werd in de USA een in 1827 uit Londen meegebrachte kopie in messing van de Engelse troy pound uit 1758 door de Mint Act aangenomen als wettelijke standaard voor munten en edelmetalen. Daarentegen werd, in uitvoering van het senaatsbesluit van 29 mei 1830, als eenheid van massa aangenomen, niet de troy pound, doch de avoirdupois pound die gelijk was aan 7000 grains en die gedefinieerd werd als $\frac{7000}{5760}$ troy pound.

Door de wet van 1866 werd echter het metriek stelsel in de USA als wettelijk stelsel aangenomen, en werd zowel de yard en de pound gedefinieerd, niet door een materiële standaard, doch door een vaste verhouding respektievelijk met de meter en het kilogram. Dit werd in 1893 bevestigd door de zogenaamde "Mendenhall Order" waarin als definitievergelijkingen werden aangegeven :

$$1 \text{ US yard} = \frac{3600}{3937} \text{ meter} = 0,914\ 401\ 829 \text{ m}$$

$$1 \text{ US pound avoirdupois} = \frac{1}{2,2046} \text{ kilogram}$$

In de praktijk echter werd in de USA het metriek stelsel dat wettelijk erkend was, niet gebruikt, maar wel een stelsel van eenheden dat gesteund was op de eenheden yard en pound en dat nooit formeel gelegaliseerd werd.

Later werden in de Verenigde Staten van Noord-Amerika (USA) volgende omzettingen toegepast :

- als wettelijke omrekening (volgens de wet van 1866 en de Mendenhall Order van 1893) :

1 meter = 39,37 US inches (exact)

1 US inch = 25,400 050 8 mm

- in het kader van de normalisatie voor industriële doeleinden (in 1933 aangenomen door de American Standards Association) :

1 inch = 25,4 mm

1 yard = 0,9144 m

Wat betreft de pound, erkende het NBS (National Bureau of Standards, Washington) volgende definitievergelijkingen voor de pound :

1 US pound = 0,453 592 427 7 kg

1 kg = 2,204 622 341 US pounds

Deze waarden stemmen overeen met de waarden die in 18 3 in Groot-Brittannië werden bekomen bij één der vergelijkende metingen betreffende de imperial pound en het internationale prototype van het kilogram.

1.1.3. Streven naar eenheid inzake de eenheden yard en pound

In 1959 werd door Australië, Canada, Nieuw Zeeland, Zuid-Afrikaanse Unie, Groot-Brittannië en de Verenigde Staten van Noord-Amerika voorgesteld, bij alle precisiemetingen voor wetenschap en techniek, eenzelfde yard en eenzelfde pound aan te wenden, met als definitie :

1 yard = 0,9144 m (exact)

1 pound = 0,453 592 37 kg (exact)

Hieruit volgt :

$$1 \text{ inch} = \frac{1}{36} \text{ yard} = \frac{0{,}9144 \text{ m}}{36} = 0{,}0254 \text{ m} \quad (= \frac{1}{12} \text{ foot}) \qquad \text{(exact)}$$

$$1 \text{ grain} = \frac{1}{7000} \text{ pound} = \frac{0{,}453\ 592\ 37 \text{ kg}}{7000} = 0{,}000\ 064\ 798\ 91 \text{ kg} \qquad \text{(exact)}$$

Een uitzondering is gemaakt voor de US survey foot, die gedefinieerd blijft door een in 1866 vastgelegde verhouding :

1 meter = 39,37 inches (exact)

waaruit volgt : 1 US survey foot $= \frac{12}{39{,}37}$ m = 0,304 800 61 m

$= \frac{1}{0{,}999\ 998}$ ft

= 1,000 002 ft

De US survey foot wordt enkel gebruikt in verband met de opmeting van het grondgebied.

1.1.4. Enkele oppervlakte- en ruimtematen, afgeleid uit de verschillende definities van de eenheden inch, foot en yard (met 1 foot = 12 inches en 1 yard = 3 feet = 36 inches)

1 UK square inch = $(2{,}539\ 997\ 8)^2$ cm^2 = 6,451 588 824 cm^2
ofwel = $(2{,}539\ 995\ 6)^2$ cm^2 = 6,451 577 648 cm^2
1 US square inch = $(2{,}540\ 005\ 08)^2$ cm^2 = 6,451 625 806 cm^2
1 square inch = $(2{,}54)^2$ cm^2 = 6,451 6 cm^2

1 UK square foot = $(3{,}047\ 997\ 360)^2$ dm^2 = 9,290 287 907 dm^2
ofwel = $(3{,}047\ 994\ 720)^2$ dm^2 = 9,290 271 813 dm^2
1 US square foot = $(3{,}048\ 006\ 096)^2$ dm^2 = 9,290 341 161 dm^2
1 square foot = $(3{,}048)^2$ dm^2 = 9,290 304 dm^2

1 UK square yard = $(0{,}914\ 399\ 208\ 0)^2$ m^2 = 0,836 125 911 6 m^2
ofwel = $(0{,}914\ 398\ 416\ 0)^2$ m^2 = 0,836 124 463 2 m^2
1 US square yard = $(0{,}914\ 401\ 828\ 8)^2$ m^2 = 0,836 130 704 5 m^2
1 square yard = $(0{,}9144)^2$ m^2 = 0,836 127 36 m^2

---

1 UK cubic inch = $(2{,}539\ 997\ 8)^3$ cm^3 = 16,387 021 42 cm^3
ofwel = $(2{,}539\ 995\ 6)^3$ cm^3 = 16,386 978 84 cm^3
1 US cubic inch = $(2{,}540\ 005\ 08)^3$ cm^3 = 16,387 162 32 cm^3
1 cubic inch = $(2{,}54)^3$ cm^3 = 16,387 064 cm^3

1 UK cubic foot = $(3{,}047\ 997\ 360)^3$ dm^3 = 28,316 773 01 dm^3
ofwel = $(3{,}047\ 994\ 720)^3$ dm^3 = 28,316 699 43 dm^3
1 US cubic foot = $(3{,}048\ 006\ 096)^3$ dm^3 = 28,317 016 49 dm^3
1 cubic foot = $(3{,}048)^3$ dm^3 = 28,316 846 59 dm^3

1 UK cubic yard = $(0{,}914\ 399\ 208\ 0)^3$ m^3 = 0,764 552 871 4 m^3
ofwel = $(0{,}914\ 398\ 416\ 0)^3$ m^3 = 0,764 550 884 7 m^3
1 US cubic yard = $(0{,}914\ 401\ 828\ 8)^3$ m^3 = 0,764 559 445 3 m^3
1 cubic yard = $(0{,}9144)^3$ m^3 = 0,764 554 858 m^3

1.2. De inhoudsmaat gallon in Groot-Brittannië (UK) en de Verenigde Staten van Noord-Amerika (USA)

1.2.1. Onderscheid inzake het toepassingsgebied

De imperial gallon of UK gallon (Groot-Brittannië) wordt gebruikt zowel voor vaste als voor vloeibare stoffen; de US gallon (Verenigde Staten) daarentegen wordt enkel gebruikt voor vloeistoffen.

1.2.2. Imperial gallon (of UK gallon)

In 1898 gold :

1 imperial gallon = 4,545 963 1 L

= 4,546 090 387 dm^3

In 1951 stelde het National Physical Laboratory van Teddington voorop :

1 imperial gallon = 4,545 96 L

= 4,546 087 287 dm^3

Wat betreft de eenheid liter (L), zie Hoofdstuk III, onder 2.2.2.

In de Weights and Measures Act van 1963 staat de imperial gallon (of UK gallon) gedefinieerd als volgt :

"The UK gallon (imperial gallon) is the space occupied by 10 pounds weight of distilled water of density 0.999 859 gramme per millilitre weighed in air of density 0.001 217 gramme per millilitre against weights of density 8.136 grammes per millilitre".

Deze definitie is gesteund op het gelijkstellen van het schijnbaar gewicht (kracht) van het water enerzijds en van het gewichtsstuk anderzijds. Het schijnbaar gewicht is hier gelijk aan het werkelijk gewicht, min de opwaartse kracht die gelijk is aan het gewicht (kracht) van de lucht die een even groot volume inneemt als respektievelijk de betrokken hoeveelheid water en het gewichtsstuk.

Zij : m_G = massa van het gewichtsstuk = 10 pounds = 10 x 0,453 592 37 kg

ρ_G = soortelijke massa van het gewichtsstuk (hier uitgedrukt in $\frac{g}{mL} = \frac{kg}{L}$) = 8,136 $\frac{g}{mL}$ = 8,136 $\frac{kg}{L}$

V_G = volume (in liter) ingenomen door het gewichtsstuk = $\frac{m_G}{\rho_G}$

m_W = massa (in kg) van de betrokken hoeveelheid water

ρ_W = soortelijke massa van het water (hier uitgedrukt in $\frac{g}{mL} = \frac{kg}{L}$)
$= 0{,}998\ 859\ \frac{g}{mL} = 0{,}998\ 859\ \frac{kg}{L}$

V_W = volume (in liter) ingenomen door de betrokken hoeveelheid water $= \frac{m_W}{\rho_W}$

ρ_L = soortelijke massa van de lucht (hier uitgedrukt in $\frac{g}{mL} = \frac{kg}{L}$)
$= 0{,}001\ 217\ \frac{g}{mL} = 0{,}001\ 217\ \frac{kg}{L}$

g = plaatselijke versnelling van de zwaartekracht (plaatselijke zwaarteveldsterkte)

De gelijkheid van beide schijnbare gewichten wordt weergegeven door :

$$m_W \cdot g - V_W \cdot \rho_L \cdot g = m_G \cdot g - V_G \cdot \rho_L \cdot g$$

$$V_W \cdot \rho_W \cdot g - V_W \cdot \rho_L \cdot g = m_G \cdot g - \frac{m_G}{\rho_G} \cdot \rho_L \cdot g$$

Hieruit volgt :

$$V_W \text{ (in liter)} = \frac{m_G \cdot g - \frac{m_G}{\rho_G} \cdot \rho_L \cdot g}{\rho_W \cdot g - \rho_L \cdot g} = \frac{m_G}{\rho_G} \cdot \frac{\rho_G - \rho_L}{\rho_W - \rho_L}$$

Daar in 1963 nog gold : 1 liter = 1,000 028 dm^3 (zie Hoofdstuk III, onder 2.2.2.) bekomen we als inhoud in dm^3 van 1 UK gallon :

$$1 \text{ UKgal} = 1{,}000\ 028 \cdot \frac{m_G}{\rho_G} \cdot \frac{\rho_G - \rho_L}{\rho_W - \rho_L}$$

$$= \frac{1{,}000\ 028 \times 10 \times 0{,}453\ 592\ 37 \times (8{,}136 - 0{,}001\ 217)}{8{,}136 \times (0{,}998\ 859 - 0{,}001\ 217)}\ dm^3$$

$$= 1{,}000\ 028\ \frac{dm^3}{L} \cdot 4{,}545\ 964\ 591\ L = 4{,}546\ 091\ 879\ dm^3$$

In 1976 werd de UK gallon wettelijk per definitie gelijkgesteld aan exact 4,546 09 dm^3 (Units of Measurement Regulations 1976).

1.2.3. US gallon

In de Verenigde Staten werd de US gallon als volgt bepaald :

1 US gallon = 231 US cubic inches

Dit geeft :

- met 1 US inch = 0,254 000 508 dm :

$$1 \text{ US gallon} = 231 \times (0{,}254\ 000\ 508)^3\ dm^3$$

$$= 3{,}785\ 434\ 496\ dm^3$$

- met 1 inch = 0,254 dm :

$$1 \text{ US gallon} = 231 \times (0{,}254)^3 \text{ dm}^3$$
$$= 3{,}785\ 411\ 784 \text{ dm}^3$$

1.3. De inhoudsmaat bushel in Groot-Brittannië (UK) en de Verenigde Staten van Noord-Amerika (USA)

1.3.1. Onderscheid inzake het toepassingsgebied

De "imperial bushel" wordt, evenals de imperial gallon (UK gallon) gebruikt voor vaste en vloeibare stoffen; de "US bushel" daarentegen wordt enkel gebruikt voor vaste stoffen ("dry bushel", "stricken bushel", "struck bushel").

1.3.2. Imperial bushel (of UK bushel)

Definitie : 1 imperial bushel = 8 imperial gallons

Dit geeft :

- met 1 UKgal = 4,546 090 387 dm^3 (1898)

$$1 \text{ imperial bushel} = 36{,}368\ 723\ 10 \text{ dm}^3$$

- met 1 UKgal = 4,546 087 287 dm^3 (1951)

$$1 \text{ imperial bushel} = 36{,}368\ 698\ 30 \text{ dm}^3$$

- met 1 UKgal = 4,546 091 879 dm^3 (1963)

$$1 \text{ imperial bushel} = 36{,}368\ 735\ 03 \text{ dm}^3$$

- met 1 UKgal = 4,546 09 dm^3 (1976)

$$1 \text{ imperial bushel} = 36{,}368\ 72 \text{ dm}^3$$

1.3.3. US bushel

Definitie : 1 US bushel = 2150,42 US cubic inches

Dit geeft :

- met 1 US inch = 0,254 000 508 dm :

$$1 \text{ US bushel} = 2150{,}42 \times (0{,}254\ 000\ 508)^3 \text{ dm}^3$$
$$= 35{,}239\ 281\ 60 \text{ dm}^3$$

- met 1 inch = 0,254 dm :

$$1 \text{ US bushel} = 2150{,}42 \times (0{,}254)^3 \text{ dm}^3$$
$$= 35{,}239\ 070\ 17 \text{ dm}^3$$

Opmerking

De "international corn bushel" is geen *inhoudsmaat*, doch een eenheid van *massa* :

1 international corn bushel = 60 pounds = 60 lb
= 27,2155 kg

2. Veelvouden en delen van de eenheden pound, yard, square yard, cubic yard, gallon en US (dry) bushel

2.1. Veelvouden en delen van de eenheid pound

Basis : 1 pound = 1 lb = 0,453 592 37 kilogram
= 7000 grains

a. avoirdupois-stelsel

1 grain = 1 gr = $\frac{1}{7000}$ pound
= 0,000 064 798 91 kg = 0,064 798 91 g = 64,798 91 mg (exact)

1 dram = 1 dr
= (in USA) 1 avoirdupois dram = 1 dr avdp
= $\frac{1}{256}$ pound
= 0,001 771 845 195 kg = 1,771 845 195 g

1 ounce = 1 oz
= (in USA) 1 avoirdupois ounce = 1 oz avdp
= $\frac{1}{16}$ pound = 437,5 grains
= 0,028 349 523 13 kg = 28,349 523 13 g

1 pound = 1 lb = 0,453 592 37 kg = 7000 grains	(exact)

1 stone (UK) = 14 pounds
= 6,350 293 18 kg

1 quarter (UK) = 1 qr = 28 pounds = 12,700 586 36 kg

1 cental (UK) = 1 ctl
= (in USA) 1 short hundredweight = 1 sh cwt
= 100 pounds
= 45,359 237 kg

1 hundredweight (UK) = (1 centweight) = 1 cwt
= (in USA) 1 long hundredweight = 1 l cwt
= 112 pounds
= 50,802 345 44 kg

1 ton (UK) = (in USA) 1 long ton (gross ton) = 1 l ton = 1 UKton
= 2240 pounds
= 1016,046 909 kg

1 short ton (USA) = 1 sh ton = 2000 pounds = 1 USton
= 907,184 74 kg

Opmerkingen

- In Groot-Brittannië geldt :
  1 ton = 1 UK ton = 2240 pounds
  1 hundredweight = 1 UK hundredweight = 112 pounds
- In de USA wordt met "ton" en "hundredweight" (zonder andere vermelding) steeds "short ton" en "short hundredweight" bedoeld :
  1 ton = 1 US ton = 2000 pounds
  1 hundredweight = 1 US hundredweight = 100 pounds
- Meer gespecialiseerde eenheden van massa zijn :
  1 assay ton (UK) = 32,667 g = 32 667 mg = (UKton/oz tr) mg
  1 assay ton (US) = 29,166 g = 29 166 mg = (USton/oz t) mg
- De eenheden "registerton" en "shipping ton" zijn eenheden van *volume* (en dus niet van *massa*) :
  1 registerton = 100 ft^3 ≈ 2,832 m^3
  1 shipping ton (USA) = 1,132 6t m^3
- De eenheid "ton of refrigeration" is een eenheid van *vermogen* :
  1 (standard) (commercial) ton of refrigeration = 1 TR
  = 12 000 Btu/h
  ≈ 3516,85 W

b. troy-stelsel (alleen gebruikt voor edelmetalen en edelstenen)

1 pennyweight (in USA = 1 pennyweight = 1 dwt)

$$= \frac{24}{7000} \text{ pound} = 24 \text{ grains}$$

$$= 1{,}555\ 173\ 84 \text{ g}$$

1 troy ounce = 1 oz tr (in USA : 1 oz t)

$$= \frac{480}{7000} \text{ pound} = 480 \text{ grains}$$

$$= 31{,}103\ 476\ 8 \text{ g}$$

1 troy pound (USA) = 1 lb t = $\frac{5760}{7000}$ pound = 5760 grains

$$= 0{,}373\ 241\ 721\ 6 \text{ kg} = 373{,}241\ 721\ 6 \text{ g}$$

c. apothecaries-stelsel (voor apoteek-gebruik)

1 scruple (in USA = 1 apothecaries'scruple = 1 s ap)

$$= \frac{20}{7000} \text{ pound} = 20 \text{ grains}$$

$$= 1{,}295\ 978\ 2 \text{ g}$$

1 drachm (in USA = 1 apothecaries'dram = 1 dr ap)

$$= \frac{60}{7000} \text{ pound} = 60 \text{ grains}$$

$$= 3{,}887\ 934\ 6 \text{ g}$$

1 apothecaries'ounce = 1 oz apoth (in UK) = 1 oz ap (in USA)

$$= \frac{480}{7000} \text{ pound} = 480 \text{ grains} = 31{,}103\ 476\ 8 \text{ g}$$

1 apothecaries'pound (USA) = 1 lb ap = $\frac{5760}{7000}$ pound = 5760 grains

$$= 0{,}373\ 241\ 721\ 6 \text{ kg}$$

$$= 373{,}241\ 721\ 6 \text{ g}$$

Opmerkingen

- In Groot-Brittannië (UK) zijn de apothecaries'units (scruple, drachm and apothecaries'ounce) onwettelijk sinds 1 januari 1971.

- De apothecaries'ounce en de troy ounce zijn aan elkaar gelijk, doch verschillen van de avoirdupois ounce.
- De grain heeft dezelfde waarde in het avoirdupois-stelsel, het troy-stelsel en het apothecaries-stelsel :

  1 grain = 64,798 91 mg = 0,064 798 91 g (exact)

2.2. Veelvouden en delen van de eenheid yard

Basis : 1 yard = 1 yd = 0,9144 m (exact)

Dit is de wettelijke definitie van de yard sinds 1959 in de Verenigde Staten van Noord-Amerika (USA) en sinds 1963 in Groot-Brittannië (UK)

a. Veel gebruikte veelvouden en delen van de eenheid yard

1 inch = 1 in = $\frac{1}{36}$ yard = 0,0254 m = 2,54 cm = 25,4 mm (exact)

1 foot = 1 ft = $\frac{1}{3}$ yard = 0,3048 m = 30,48 cm (exact)

1 yard = 1 yd = 0,9144 m (exact)

1 chain = 1 ch = 22 yards = 66 ft = 20,1168 m (exact)
(in USA : Gunter's chain)

1 furlong = 1 fur = 220 yards = 10 chains = 201,168 m (exact)

1 mile (in USA : 1 statute mile = 1 mi) = 1760 yards = 8 furlongs
= 1609,344 m = 1,609 344 km (exact)

Opmerkingen

- De imperial nautical mile (UK nautical mile) = 6080 ft = 1853,184 m
- De US nautical mile = 1853,248 m
- De telegraph nautical mile = 6087 ft = 1855,3176 m
- De internationale zeemijl (international nautical mile) = 1852 meter (exact)

- De geografische mijl is $\frac{1}{15}$ deel van de gemiddelde lengte van een meridiaangraad. Door de International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) werd in 1924 een standaardmodel voor de geometrie van de aarde aangenomen waarin de lengte van een meridiaankwadrant 10 002 288 m is. De geografische mijl is hiermee gelijk aan :

$$\frac{10\ 002\ 288\ m}{15 \times 90} \approx 7409{,}1\ m$$

De gebruikelijke zeemijl was tot 1929 gelijk aan $\frac{1}{4}$ deel van de geografische mijl (1 zeemijl = 1 meridiaanboogminuut). In 1929 is door de International Hydrographic Conference de internationale zeemijl vastgesteld op 1852 m exact.

b. Minder courante veelvouden en delen van de eenheid yard

1 milli-inch = 1 mil = $\frac{1}{36\ 000}$ yard = 0,000 025 4 m = 0,0254 mm = 25,4 µm

1 point (USA) = $\frac{1}{2592}$ yard = $\frac{1}{72}$ in = 0,352 778 mm

1 line (USA) = $\frac{1}{1440}$ yard = $\frac{1}{40}$ in = 0,635 mm (exact)

1 line or ligne = $\frac{1}{432}$ yard = $\frac{1}{12}$ in = 2,116 67 mm

1 hand (USA) = $\frac{1}{9}$ yard = 4 in = 0,1016 m = 10,16 cm (exact)

1 link (USA) = 1 li = $\frac{22}{100}$ yard = $\frac{1}{100}$ chain = 0,201 168 m = 20,1168 cm (exact)

1 span (USA) = $\frac{1}{4}$ yard = 0,2286 m = 22,86 cm (exact)

1 fathom = 1 fm (USA : fath) = 2 yards = 6 ft = 1,8288 m (exact)

1 rod = 1 rd = 5,5 yards = 5,0292 m (exact)
(N.B. : in Groot-Brittannië zijn "pole" en "perch" synoniemen van "rod")

1 engineer's chain = 1 Ramsden's chain = $\frac{100}{3}$ yards = 100 ft = 30,48 m (exact)

2.3. Veelvouden en delen van de eenheid square yard

Basis : 1 square yard = 1 yd^2 = $(0,9144)^2$ m^2 = 0,836 127 36 m^2 (exact)

1 circular mil = $\frac{\pi}{4} \cdot (\frac{1}{1000} \cdot \frac{1}{36}\ yd)^2$

= $\frac{\pi}{4} \cdot (\frac{1}{1000}\ in)^2$

= 7,853 98 . 10^{-7} in^2

= 5,067 07 . 10^{-10} m^2

= 5,067 07 . 10^{-4} mm^2

1 square inch = 1 in^2 = $\frac{1}{1296}$ square yard

= 0,000 645 16 m^2 (exact)

= 6,4516 cm^2 (exact)

1 square link (USA) = 1 sq li = $\frac{484}{10\ 000}$ square yard

= 0,040 468 564 22 m^2

= 4,046 856 422 dm^2

1 square foot = 1 ft^2 = $\frac{1}{9}$ square yard

= 144 square inches

= 0,092 903 04 m^2 (exact)

= 9,290 304 dm^2 (exact)

1 square yard = 1 yd^2 = 9 square feet

= 0,836 127 36 m^2 (exact)

= 83,612 736 dm^2 (exact)

1 square rod = 1 sq rd = $\frac{121}{4}$ square yards

= 25,292 852 64 m^2 (exact)

(N.B. : in Groot-Brittannië zijn "square pole" en "square perch" synoniemen van "square rod")

1 square chain (USA) = 1 sq ch = 484 square yards

= 404,685 642 2 m^2

1 rood (UK) = 1210 square yards
= 1011,714 106 m^2

1 acre = 4840 square yards
= 4 roods
= 4046,856 422 m^2

1 square mile = 3 097 600 square yards
= 640 acres
= 2,589 988 11 . 10^6 m^2
= 2,589 988 11 km^2

2.4. Veelvouden en delen van de eenheid cubic yard

Basis : 1 cubic yard = 1 yd^3 = $(0,9144)^3$ m^3 = 0,764 554 858 0 m^3

1 cubic inch = 1 in^3 = $\frac{1}{46\ 656}$ yd^3 = $\frac{1}{1728}$ ft^3
= 0,000 016 387 064 m^3 (exact)
= 16,387 064 cm^3 (exact)

1 board foot = 1 fbm (feet board measure)
= $\frac{1}{324}$ yd^3 = $\frac{1}{12}$ ft^3 = 1 ft^2 . 1 in = 144 in^3
= 0,002 359 737 216 m^3
= 2,359 737 216 dm^3

1 cubic foot = 1 ft^3 = $\frac{1}{27}$ yd^3
= 0,028 316 846 59 m^3
= 28,316 846 59 dm^3

1 cubic yard = 1 yd^3 = 27 ft^3
= 0,764 554 858 m^3

1 registerton = $\frac{100}{27}$ yd^3 = 100 ft^3
= 2,831 684 659 m^3

1 cord = 1 cd = $\frac{128}{27}$ yd^3 = 128 ft^3

= 3,624 556 364 m^3

1 standard = $\frac{165}{27}$ yd^3 = 165 ft^3

= 4,672 279 687 m^3

2.5. Veelvouden en delen van de inhoudsmaten UK gallon en US gallon

a. Groot-Brittannië (UK)

De volgende maten gelden (in Groot-Brittannië) voor vloeistoffen, droge stoffen en apoteek-gebruik.

Basis : 1 UK gallon = 4,546 09 dm^3 (volgens de definitie van 1976)

1 minim = 1 min = $\frac{1}{76\,800}$ UKgal = 59,193 880 21 mm^3

1 fluid scruple = $\frac{1}{3840}$ UKgal = 1,183 877 604 cm^3

1 fluid drachm = 1 fl dr = $\frac{1}{1280}$ UKgal = 3,551 632 813 cm^3

1 fluid ounce = 1 fl oz = $\frac{1}{160}$ UKgal = 28,413 062 5 cm^3

1 gill = $\frac{1}{32}$ UKgal = 142,065 312 5 cm^3

1 pint = $\frac{1}{8}$ UKgal = 568,261 25 cm^3

1 quart = $\frac{1}{4}$ UKgal = 1,136 522 5 dm^3

1 UK gallon = 1 UKgal = 4,546 09 dm^3 (exact, definitie van 1976)

1 peck = 2 UKgal = 9,092 18 dm^3

1 bushel = 8 UKgal = 36,368 72 dm^3

1 cran (used in UK fishing industry) = 37,5 UKgal = 170,478 375 dm^3

1 quarter = 64 UKgal = 290,949 76 dm^3

1 chaldron = 288 UKgal = 1,309 273 92 m^3

b. Verenigde Staten van Noord-Amerika (USA)

De volgende maten gelden (in de Verenigde Staten van Noord-Amerika) alleen voor vloeistoffen en apoteekgebruik.

Basis : 1 US gallon = 3,785 411 784 dm^3

1 minim = 1 min = $\frac{1}{61\ 440}$ USgal = 61,611 519 92 mm^3

1 fluid dram (liquid dram) = 1 fl dr = $\frac{1}{1024}$ USgal = 3,696 691 195 cm^3

1 fluid ounce (liquid ounce) = 1 fl oz = $\frac{1}{128}$ USgal = 29,573 529 56 cm^3

1 gill = 1 gi = $\frac{1}{32}$ USgal = 118,294 118 3 cm^3

1 liquid pint = 1 liq pt = $\frac{1}{8}$ USgal = 0,473 176 473 0 dm^3

1 liquid quart = 1 liq qt = $\frac{1}{4}$ USgal = 0,946 352 946 0 dm^3

1 US gallon = 1 USgal = 3,785 411 784 dm^3

1 barrel (petroleum) = 1 bbl = 42 USgal = 9702 US cubic inches

- met 1 US inch = 0,254 000 508 dm

(waaruit volgt : 1 USgal = 3,785 434 496 dm^3) :

1 barrel = 9702 x $(0,254\ 000\ 508)^3$ dm^3

= 158,988 248 8 dm^3 ≈ 158,988 dm^3

- met 1 inch = 0,254 dm (waaruit volgt : 1 USgal = 3,785 411 784 dm^3) :

1 barrel = 9702 x $(0,254)^3$ dm^3

= 158,987 294 9 dm^3 ≈ 158,987 dm^3

Opmerking

In Groot-Brittannië treft men ook voor bepaalde toepassingen andere waarden aan van de inhoudsmaat barrel :

- the wine barrel is nominally 31,5 UKgal
- the beer barrel is nominally 36 UKgal

2.6. Veelvouden en delen van de inhoudsmaat US (dry) bushel

De volgende maten gelden (in de Verenigde Staten van Noord-Amerika) uitsluitend voor droge stoffen.

Basis : 1 US (dry) bushel = 35,239 070 17 dm^3

1 dry pint = 1 dry pt = $\frac{1}{64}$ bushel = 0,550 610 471 4 dm^3

1 dry quart = 1 dry qt = $\frac{1}{32}$ bushel = 1,101 220 943 dm^3

1 peck = 1 pk = $\frac{1}{4}$ bushel = 8,809 767 543 dm^3

1 dry bushel = 1 dry bu = 35,239 070 17 dm^3

1 dry barrel = 1 bbl (dry) $\approx \frac{105}{32}$ bushels = 115,628 199 dm^3

Een meer exacte definitie van dry barrel is :

1 dry barrel = 7056 US cubic inches

Dit geeft :

- met 1 US inch = 0,254 000 508 dm

$$1 \text{ dry barrel} = 7056 \times (0{,}254\ 000\ 508)^3\ dm^3$$
$$= 115{,}627\ 817\ 3\ dm^3 \approx 115{,}628\ dm^3$$

- met 1 inch = 0,254 dm

$$1 \text{ dry barrel} = 7056 \times (0{,}254)^3\ dm^3$$
$$= 115{,}627\ 123\ 6\ dm^3 \approx 115{,}627\ dm^3$$

Opmerking

De hierboven weergegeven dry barrel (bbl) "is the standard barrel in the USA for fruits, vegetables and dried commodities,with the exception of cranberries. Cranberries are sold in the USA by reference to a standard cranberry barrel containing 5826 cubic inches".

2.7. Verband tussen sommige Britse (UK) en Amerikaanse (US) inhoudsmaten

In de Britse norm "BS 350 : Part 1 : 1974, Conversion factors and tables, Part 1. Basis of tables. Conversion factors", treft men volgende tabel aan :

1 UK minim = 0,960 760 US minim
1 UK fluid drachm = 0,960 760 US fluid dram (liquid dram)
1 UK fluid ounce = 0,960 760 US fluid ounce (liquid ounce)
1 UK gill = 1,200 95 US gill
1 UK pint = 1,200 95 US liquid pint
1 UK quart = 1,200 95 US liquid quart
1 UK gallon = 1,200 95 US gallon
1 UK pint = 1,032 06 US dry pint
1 UK quart = 1,032 06 US dry quart
1 UK peck = 1,032 06 US peck
1 UK bushel = 1,032 06 US bushel

---

1 US minim = 1,040 84 UK minim
1 US fluid dram (liquid dram) = 1,040 84 UK fluid drachm
1 US fluid ounce (liquid ounce) = 1,040 84 UK fluid ounce
1 US gill = 0,832 674 UK gill
1 US liquid pint = 0,832 674 UK pint
1 US liquid quart = 0,832 674 UK quart
1 US gallon = 0,832 674 UK gallon
1 US dry pint = 0,968 939 UK pint
1 US dry quart = 0,968 939 UK quart
1 US peck = 0,968 939 UK peck
1 US bushel = 0,968 939 UK bushel

3. Angelsaksische (Britse) eenheden die in bepaalde landen van de Europese Ekonomische Gemeenschap (EEG) tijdelijk erkend blijven

De betrokken eenheden werden behandeld in Hoofdstuk XII, onder 2.

4. Angelsaksische eenhedenstelsels

4.1. Inleiding

Parallel met het MKS-stelsel (dat later is uitgegroeid tot het SI; basisgrootheden : lengte, *massa*, tijd) en het TS (basisgrootheden : lengte, *kracht*, tijd) die op het Europese vasteland ontstonden, ontwikkelde zich in de Angelsaksische landen (Groot-Brittannië, Verenigde Staten van Noord-Amerika) enerzijds het "English absolute system" (basisgrootheden : lengte, *massa*, tijd) en het "English gravitational system" (basisgrootheden : lengte, *kracht*, tijd).

4.2. English absolute system of ft-lb-s-stelsel

Het English absolute system (ft-lb-s-stelsel) heeft dezelfde basisgrootheden als het MKS-stelsel (zie Hoofdstuk III, onder 6.1.); de grondeenheden zijn respektievelijk :

	lengte	massa	tijd
MKS-stelsel	meter (m)	kilogram (kg)	sekonde (s)
ft-lb-s-stelsel	foot (ft)	pound (lb)	second (s)

In beide stelsels is de eenheid van kracht een afgeleide eenheid :
MKS-stelsel :

$$\text{eenheid van kracht} = 1\ \text{kg} \cdot 1\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1\ \text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1\ \text{newton} = 1\ \text{N}$$

ft-lb-s-stelsel :

$$\text{eenheid van kracht} = 1\ \text{lb} \cdot 1\ \frac{\text{ft}}{\text{s}^2} = 1\ \text{lb} \cdot \frac{\text{ft}}{\text{s}^2} = 1\ \text{poundal} = 1\ \text{pdl}$$

Als eenheden van druk, arbeid en vermogen bekomt mer :

	kracht	druk	arbeid	vermogen
MKS-stelsel	$\frac{kg \cdot m}{s^2} = N$	$\frac{N}{m^2} = Pa$	$N \cdot m = J$	$\frac{N \cdot m}{s} = \frac{J}{s} = W$
ft-lb-s-stelsel	$\frac{lb \cdot ft}{s^2} = pdl$	$\frac{pdl}{ft^2}$	$ft \cdot pdl$	$\frac{ft \cdot pdl}{s}$

4.3. English gravitational system of ft-lbf-s-stelsel

Het English gravitational system (ft-lbf-s-stelsel) heeft dezelfde basisgrootheden als het TS (zie Hoofdstuk XI, onder 1.); de grondeenheden zijn respektievelijk :

	lengte	kracht	tijd
TS	meter (m)	kilogramkracht (kgf)	sekonde (s)
ft-lbf-s-stelsel	foot (ft)	pound-force (lbf)	second (s)

Een kilogramkracht (kgf) is gelijk aan het werkelijk gewicht van het standaardkilogram (zijnde de eenheid van massa in het MKS-stelsel) bij een versnelling (zwaarteveldsterkte) gelijk aan de normversnelling. Een kilogramkracht (kgf) is ook gelijk aan de kracht die aan een massa van 1 kilogram een versnelling geeft gelijk aan de normversnelling, zijnde 9,806 65 $\frac{m}{s^2}$, en ook gelijk aan de kracht die aan een massa van 9,806 65 kg een versnelling geeft van 1 $\frac{m}{s^2}$ (zie Hoofdstuk XI, onder 2. en 4.2.).

Een pound-force (lbf) (in de USA soms pound-weight genoemd, eveneens met symbool lbf), is gelijk aan het werkelijk gewicht van een massa van 1 pound (zijnde de eenheid van massa in het ft-lb-s-stelsel) bij een versnelling (zwaarteveldsterkte) gelijk aan de normversnelling. Een pound-force is ook gelijk aan de kracht die aan een massa van 1 pound een versnelling geeft gelijk aan de normversnelling, zijnde 32,174 048 56 $\frac{ft}{s^2}$, en ook gelijk aan de kracht die aan een massa van 32,174 048 56 lb een versnelling geeft van 1 $\frac{ft}{s^2}$.

De eenheid van kracht in het TS is 9,806 65 maal zo groot als 1 newton :

$$1 \text{ kgf} = 1 \text{ kg} \cdot 9{,}806\ 65\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 9{,}806\ 65 \text{ N}$$

Op een analoge wijze geldt, dat 1 lbf 32,174 048 56 maal zo groot is als 1 poundal :

$$1 \text{ lbf} = 1 \text{ lb} \cdot 32{,}174\ 048\ 56\ \frac{\text{ft}}{\text{s}^2} = 32{,}174\ 048\ 56 \text{ pdl}$$

Zowel in het TS als in het ft-lbf-s-stelsel is de eenheid van massa een afgeleide eenheid.

De logisch afgeleide eenheid van massa in het TS is gelijk aan (zie Hoofdstuk XI, onder 4.) :

$$\frac{\text{eenheid van kracht}}{\text{eenheid van versnelling}} = \frac{1 \text{ kgf}}{1\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 1\ \frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}$$

Deze TS-eenheid van massa is een massa die, uitgedrukt in MKS- of SI-eenheden, gelijk is aan 9,806 65 kg; deze massa wordt in Duitsland "Kilohyl" (khyl) genoemd, en in de Angelsaksische landen "slug metric" :

$$1\ \frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}} = \left\{ g_n \right\}_{\text{m/s}^2} \text{kg} = 9{,}806\ 65 \text{ kg} = 1 \text{ khyl} = 1 \text{ slug metric}$$

De logisch afgeleide eenheid van massa in het ft-lbf-s-stelsel is gelijk aan :

$$\frac{\text{eenheid van kracht}}{\text{eenheid van versnelling}} = \frac{1 \text{ lbf}}{1\ \frac{\text{ft}}{\text{s}^2}} = 1\ \frac{\text{lbf} \cdot \text{s}^2}{\text{ft}}$$

Deze eenheid van massa is gelijk aan de massa van een lichaam, dat onder invloed van een kracht van 1 lbf, een versnelling krijgt van 1 $\frac{\text{ft}}{\text{s}^2}$. Vermits een massa van 1 lb onder invloed van een kracht gelijk aan 1 lbf, een versnelling krijgt gelijk aan de normversnelling, zijnde 32,174 048 56 $\frac{\text{ft}}{\text{s}^2}$, zal een massa van 32,174 048 56 lb, onder invloed van een kracht gelijk aan 1 lbf, een versnelling krijgen die 32,174 048 56 maal kleiner is, dus een versnelling van 1 $\frac{\text{ft}}{\text{s}^2}$. De betrokken massa wordt in de Angelsaksische landen "slug" genoemd. Een slug is dus een massa

die, uitgedrukt in eenheden van het ft-lb-s-stelsel, gelijk is aan 32,174 048 56 lb :

$$1 \text{ slug} = 1 \frac{\text{lbf} \cdot \text{s}^2}{\text{ft}} = \left\{ g_n \right\}_{\text{ft/s}^2} \text{ lb} = 32{,}174\ 048\ 56 \text{ lb}$$

Als eenheden van druk, arbeid en vermogen bekomt men :

	kracht	druk	arbeid	vermogen
TS	kgf	$\frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$	kgf . m	$\frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{s}}$
ft-lbf-s-stelsel	lbf	$\frac{\text{lbf}}{\text{ft}^2}$	ft . lbf	$\frac{\text{ft} \cdot \text{lbf}}{\text{s}}$

Als niet-koherente afgeleide eenheden van vermogen en van arbeid kent men in beide technische stelsels respektievelijk nog :

	vermogen	arbeid
TS	1 pk = 75 $\frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{s}}$	1 pk . h = 270 000 kgf . m
ft-lbf-s-stelsel	1 hp = 550 $\frac{\text{ft} \cdot \text{lbf}}{\text{s}}$	1 hp . h = 1 980 000 ft . lbf

pk = paardekracht = metric horsepower

pk . h = paardekracht uur

hp = horsepower

hp . h = horsepower hour

4.4. Opmerkingen betreffende de benaming en het symbool van de eenheid van massa in het English absolute system (ft-lb-s-stelsel) en van de eenheid van kracht in het English gravitational system (ft-lbf-s-stelsel)

Vroeger (tot ± 1950) werd de benaming "pound" met symbool lb aangewend zowel om in het ft-lb-s-stelsel de eenheid van massa aan te duiden als om in het ft-lbf-s-stelsel de eenheid van kracht aan te duiden. Deze eenheid van kracht uit het ft-lbf-s-stelsel is gelijk aan het werkelijk gewicht van een massa van 1 pound (eenheid van massa uit het ft-lb-s-stelsel) bij een versnelling van de zwaartekracht (zwaarteveld-

sterkte) gelijk aan de normversnelling $g_n = 32{,}174\ 048\ 56\ \frac{ft}{s^2}$. Zowel voor de eenheid van massa in het ft-lb-s-stelsel als voor de eenheid van kracht in het ft-lbf-s-stelsel, gebruikte men dezelfde benaming (pound) en hetzelfde symbool (lb). Nochtans zijn massa en kracht twee totaal verschillende grootheden, en het kan alleen maar tot verwarring leiden, hiervoor eenzelfde benaming en eenzelfde symbool te gebruiken. Om de zaak nog wat ingewikkelder te maken, kan hieraan nog worden toegevoegd, dat oorspronkelijk de pound in Groot-Brittannië als een eenheid van kracht (gewicht) werd gedefinieerd, terwijl in de Verenigde Staten van Noord-Amerika de pound van den beginne af werd gedefinieerd als een eenheid van massa.

Na 1950 werd hieraan verholpen door het invoeren van de benamingen pound (mass) en pound-force, elk met eigen symbolen, waarvan de volgende thans het meest worden gebruikt :

- eenheid van massa (ft-lb-s-stelsel) : pound met als symbool : lb;
- eenheid van kracht (ft-lbf-s-stelsel) : pound-force, met als symbool : lbf (in de USA gebruikt men soms de benaming "pound-weight" naast de benaming "pound-force"; het symbool blijft echter lbf).

Deze ontwikkeling is volledig gelijklopend met de ontwikkeling die zich heeft voorgedaan in het TS en het MKS-stelsel op het Europese vasteland (zie Hoofdstuk XI, onder 3.1. en Hoofdstuk XIII, onder 4.). Tot vóór 1950 werd de benaming "kilogram" met symbool kg aangewend zowel om in het MKS-stelsel de eenheid van massa aan te duiden als om in het TS de eenheid van kracht aan te duiden. Deze eenheid van kracht uit het TS is gelijk aan het werkelijk gewicht van het standaardkilogram (eenheid van massa uit het MKS-stelsel) bij een versnelling van de zwaartekracht (zwaarteveldsterkte) gelijk aan de normversnelling $g_n = 9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2}$. Zowel voor de eenheid van massa in het MKS-stelsel als voor de eenheid van kracht in het TS gebruikte men dezelfde benaming (kilogram) en hetzelfde symbool (kg). Na 1950 werd hieraan verholpen door de benamingen kilogram en kilogramkracht, elk met eigen symbolen, waarvan de volgende thans het meest worden gebruikt :

- eenheid van massa (MKS-stelsel, SI) : kilogram, met als symbool : kg;
- eenheid van kracht (MKS) : kilogramkracht, met als symbool kgf (van het Franse kilogramme-force).

5. Omzettingen van Angelsaksische eenheden

Bij de omzetting van de hiernavolgende Angelsaksische eenheden, wordt niet rechtstreeks het resultaat gegeven, doch wordt ook aangetoond hoe men tot dit resultaat komt. Hierdoor krijgt men een inzicht in de wijze waarop dergelijke omzettingen uitgevoerd worden, hetgeen de aandachtige lezer zal toelaten zelf andere omzettingen uit te voeren dan degene die hierna weergegeven zijn.

5.1. Lengte (E : length) (zie ook onderhavig hoofdstuk onder 2.2.)

1 inch = 1 in = 0,0254 m (exact)

1 foot = 1 ft = 12 in = 0,3048 m (exact)

1 yard = 1 yd = 3 ft = 36 in = 0,9144 m (exact)

1 chain = 22 yd = 20,1168 m (exact)

1 furlong = 10 chains = 201,168 m (exact)

1 mile = 8 furlongs = 1609,344 m (exact)

5.2. Oppervlakte (E : area) (zie ook onderhavig hoofdstuk onder 2.3.)

1 square inch = 1 in^2 = 0,000 645 16 m^2 (exact)

1 square foot = 1 ft^2 = 144 in^2 = 0,092 903 04 m^2 (exact)

1 square yard = 1 yd^2 = 9 ft^2 = 0,836 127 36 m^2 (exact)

1 rood = 1210 yd^2 = 1011,714 106 m^2

1 acre = 4 roods = 4840 yd^2 = 4046,856 422 m^2

1 square mile = 1 $mile^2$ = 640 acres = 2 589 988,11 m^2

5.3. Volume (E : volume), inhoud (E : capacity) (zie ook onderhavig hoofdstuk onder 2.4., 2.5. en 2.6.)

1 cubic inch = 1 in^3 = 0,000 016 387 064 m^3

1 cubic foot = 1 ft^3 = 1728 in^3 = 0,028 316 846 59 m^3

1 cubic yard = 1 yd^3 = 27 ft^3 = 0,764 554 858 m^3

1 UK gallon = 1 UKgal = 0,004 546 09 m^3

1 US gallon = 1 USgal = 0,003 785 411 784 m^3

5.4. Massa (E : mass) (zie ook onderhavig hoofdstuk onder 2.1.)

1 pound = 1 lb = 0,453 592 37 kg (exact)

$$1 \text{ slug} = 1 \frac{\text{lbf} \cdot \text{s}^2}{\text{ft}} = \left\{ g_n \right\}_{\text{ft/s}^2} \text{lb} = 32{,}174\ 048\ 56 \text{ lb}$$

$$= \frac{0{,}453\ 592\ 37 \text{ kg} \cdot 9{,}806\ 65 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{s}^2}{0{,}3048 \text{ m}} = 14{,}593\ 902\ 94 \text{ kg}$$

$$= \frac{0{,}453\ 592\ 37 \text{ kgf} \cdot \text{s}^2}{0{,}3048 \text{ m}} = 1{,}488\ 163\ 944 \frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}$$

$$= 1{,}488\ 163\ 944 \text{ slug metric}$$

5.5. Soortelijke massa (E : density) en soortelijk (norm)gewicht

a. Soortelijke massa in het stelsel met massa als basisgrootheid (ft-lb-s-stelsel)

$$1 \frac{\text{pound}}{\text{cubic foot}} = 1 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} = \frac{0{,}453\ 592\ 37 \text{ kg}}{(0{,}3048)^3 \text{ m}^3} = 16{,}018\ 463\ 38 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{(SI)}$$

$$1 \frac{\text{pound}}{\text{cubic inch}} = 1 \frac{\text{lb}}{\text{in}^3} = \frac{0{,}453\ 592\ 37 \text{ kg}}{(0{,}0254)^3 \text{ m}^3} = 27\ 679{,}904\ 71 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{(SI)}$$

$$1 \frac{\text{ounce}}{\text{cubic foot}} = 1 \frac{\text{oz}}{\text{ft}^3} = \frac{0{,}028\ 349\ 523\ 13 \text{ kg}}{(0{,}3048)^3 \text{ m}^3} = 1{,}001\ 153\ 961 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{(SI)}$$

$$1 \frac{\text{ounce}}{\text{cubic inch}} = 1 \frac{\text{oz}}{\text{in}^3} = \frac{0{,}028\ 349\ 523\ 13 \text{ kg}}{(0{,}0254)^3 \text{ m}^3} = 1729{,}994\ 045 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{(SI)}$$

$$1\ \frac{\text{UK ton}}{\text{cubic yard}} = 1\ \frac{\text{UKton}}{\text{yd}^3} = \frac{2240\ \text{lb}}{\text{yd}^3} = \frac{1016{,}046\ 909\ \text{kg}}{(0{,}9144)^3\ \text{m}^3} = 1328{,}939\ 184\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \qquad \text{(SI)}$$

$$1\ \frac{\text{US ton}}{\text{cubic yard}} = 1\ \frac{\text{USton}}{\text{yd}^3} = \frac{2000\ \text{lb}}{\text{yd}^3} = \frac{907{,}184\ 74\ \text{kg}}{(0{,}9144)^3\ \text{m}^3} = 1186{,}552\ 842\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \qquad \text{(SI)}$$

$$1\ \frac{\text{pound}}{\text{UK gallon}} = 1\ \frac{\text{lb}}{\text{UKgal}} = \frac{0{,}453\ 592\ 37\ \text{kg}}{0{,}004\ 546\ 09\ \text{m}^3} = 99{,}776\ 372\ 66\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \qquad \text{(SI)}$$

$$1\ \frac{\text{pound}}{\text{US gallon}} = 1\ \frac{\text{lb}}{\text{USgal}} = \frac{0{,}453\ 592\ 37\ \text{kg}}{0{,}003\ 785\ 411\ 784\ \text{m}^3} = 119{,}826\ 427\ 3\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \qquad \text{(SI)}$$

b. Soortelijke massa in het stelsel met kracht als basisgrootheid (ft-lbf-s-stelsel)

$$1\ \frac{\text{slug}}{\text{cubic foot}} = \frac{1\ \frac{\text{lbf . s}^2}{\text{ft}}}{\text{ft}^3} = 1\ \frac{\text{lbf . s}^2}{\text{ft}^4}$$

$$= \frac{0{,}453\ 592\ 37\ \text{kgf . 1 s}^2}{(0{,}3048)^4\ \text{m}^4} = 52{,}554\ 013\ 70\ \frac{\text{kgf . s}^2}{\text{m}^4} \qquad \text{(TS)}$$

$$= \frac{14{,}593\ 902\ 94\ \text{kg}}{(0{,}3048)^3\ \text{m}^3} = 515{,}378\ 818\ 5\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \qquad \text{(SI)}$$

$$= \frac{32{,}174\ 048\ 56\ \text{lb}}{\text{ft}^3} = 32{,}174\ 048\ 56\ \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \qquad \text{(ft-lb-s-stelsel)}$$

c. Soortelijk (norm)gewicht in het stelsel met kracht als basisgrootheid (ft-lbf-s-stelsel)

$$1\ \frac{\text{pound-force}}{\text{cubic foot}} = 1\ \frac{\text{lbf}}{\text{ft}^3} = \frac{0{,}453\ 592\ 37\ \text{kgf}}{(0{,}3048)^3\ \text{m}^3} = 16{,}018\ 463\ 38\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3} \qquad \text{(TS)}$$

$$1\ \frac{\text{pound-force}}{\text{cubic inch}} = 1\ \frac{\text{lbf}}{\text{in}^3} = \frac{0{,}453\ 592\ 37\ \text{kgf}}{(0{,}0254)^3\ \text{m}^3} = 27\ 679{,}904\ 71\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3} \qquad \text{(TS)}$$

$$1\ \frac{\text{ounce-force}}{\text{cubic foot}} = 1\ \frac{\text{ozf}}{\text{ft}^3} = \frac{0{,}028\ 349\ 523\ 13\ \text{kgf}}{(0{,}3048)^3\ \text{m}^3} = 1{,}001\ 153\ 961\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3} \qquad \text{(TS)}$$

$$1\ \frac{\text{ounce-force}}{\text{cubic inch}} = 1\ \frac{\text{ozf}}{\text{in}^3} = \frac{0{,}028\ 349\ 523\ 13\ \text{kgf}}{(0{,}0254)^3\ \text{m}^3} = 1729{,}994\ 045\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3} \qquad \text{(TS)}$$

$$1\ \frac{\text{UK ton-force}}{\text{cubic yard}} = 1\ \frac{\text{UKtonf}}{\text{yd}^3} = \frac{2240\ \text{lbf}}{\text{yd}^3} = \frac{1016{,}046\ 909\ \text{kgf}}{(0{,}9144)^3\ \text{m}^3} = 1328{,}939\ 184\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3} \qquad \text{(TS)}$$

$$1\ \frac{\text{US ton-force}}{\text{cubic yard}} = 1\ \frac{\text{UStonf}}{\text{yd}^3} = \frac{2000\ \text{lbf}}{\text{yd}^3} = \frac{907{,}184\ 74\ \text{kgf}}{(0{,}9144)^3\ \text{m}^3} = 1186{,}552\ 842\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3} \quad \text{(TS)}$$

$$1\ \frac{\text{pound-force}}{\text{UK gallon}} = 1\ \frac{\text{lbf}}{\text{UKgal}} = \frac{0{,}453\ 592\ 37\ \text{kgf}}{0{,}004\ 546\ 09\ \text{m}^3} = 99{,}776\ 372\ 66\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3} \quad \text{(TS)}$$

$$1\ \frac{\text{pound-force}}{\text{US gallon}} = 1\ \frac{\text{lbf}}{\text{USgal}} = \frac{0{,}453\ 592\ 37\ \text{kgf}}{0{,}003\ 785\ 411\ 784\ \text{m}^3} = 119{,}826\ 427\ 3\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3} \quad \text{(TS)}$$

5.6. Soortelijk volume (E : specific volume)

a. Soortelijk volume in het stelsel met massa als basisgrootheid (ft-lb-s-stelsel)

$$1\ \frac{\text{cubic foot}}{\text{pound}} = 1\ \frac{\text{ft}^3}{\text{lb}} = \frac{(0{,}3048)^3\ \text{m}^3}{0{,}453\ 592\ 37\ \text{kg}} = 0{,}062\ 427\ 960\ 57\ \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad \text{(SI)}$$

$$1\ \frac{\text{cubic inch}}{\text{pound}} = 1\ \frac{\text{in}^3}{\text{lb}} = \frac{(0{,}0254)^3\ \text{m}^3}{0{,}453\ 592\ 37\ \text{kg}} = 0{,}000\ 036\ 127\ 292\ \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad \text{(SI)}$$

$$1\ \frac{\text{cubic foot}}{\text{ounce}} = 1\ \frac{\text{ft}^3}{\text{oz}} = \frac{(0{,}3048)^3\ \text{m}^3}{0{,}028\ 349\ 523\ 13\ \text{kg}} = 0{,}998\ 847\ 369\ \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad \text{(SI)}$$

$$1\ \frac{\text{UK gallon}}{\text{pound}} = 1\ \frac{\text{UKgal}}{\text{lb}} = \frac{0{,}004\ 546\ 09\ \text{m}^3}{0{,}453\ 592\ 37\ \text{kg}} = 0{,}010\ 022\ 412\ 85\ \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad \text{(SI)}$$

$$1\ \frac{\text{US gallon}}{\text{pound}} = 1\ \frac{\text{USgal}}{\text{lb}} = \frac{0{,}003\ 785\ 411\ 784\ \text{m}^3}{0{,}453\ 592\ 37\ \text{kg}} = 0{,}008\ 345\ 404\ 452\ \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad \text{(SI)}$$

b. Soortelijk volume in het stelsel met kracht als basisgrootheid (ft-lbf-s-stelsel)

$$1\ \frac{\text{cubic foot}}{\text{pound-force}} = 1\ \frac{\text{ft}^3}{\text{lbf}} = \frac{(0{,}3048)^3\ \text{m}^3}{0{,}453\ 592\ 37\ \text{kgf}} = 0{,}062\ 427\ 960\ 57\ \frac{\text{m}^3}{\text{kgf}} \quad \text{(TS)}$$

$$1\ \frac{\text{cubic inch}}{\text{pound-force}} = 1\ \frac{\text{in}^3}{\text{lbf}} = \frac{(0{,}0254)^3\ \text{m}^3}{0{,}453\ 592\ 37\ \text{kgf}} = 0{,}000\ 036\ 127\ 292\ \frac{\text{m}^3}{\text{kgf}} \quad \text{(TS)}$$

$$1\ \frac{\text{cubic foot}}{\text{ounce-force}} = 1\ \frac{\text{ft}^3}{\text{ozf}} = \frac{(0{,}3048)^3\ \text{m}^3}{0{,}028\ 349\ 523\ 13\ \text{kgf}} = 0{,}998\ 847\ 369\ \frac{\text{m}^3}{\text{kgf}} \quad \text{(TS)}$$

5.7. Koncentratie (E : concentration, in the sense of the mass of a substance per unit volume of a solution, or the like)

$$1\ \frac{\text{grain}}{\text{cubic foot}} = 1\ \frac{\text{gr}}{\text{ft}^3} = \frac{0{,}000\ 064\ 798\ 91\ \text{kg}}{(0{,}3048)^3\ \text{m}^3} = 0{,}002\ 288\ 351\ 911\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$1\ \frac{\text{grain}}{\text{UK gallon}} = 1\ \frac{\text{gr}}{\text{UKgal}} = \frac{0{,}000\ 064\ 798\ 91\ \text{kg}}{0{,}004\ 546\ 09\ \text{m}^3} = 0{,}014\ 253\ 767\ 52\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$1\ \frac{\text{grain}}{\text{US gallon}} = 1\ \frac{\text{gr}}{\text{USgal}} = \frac{0{,}000\ 064\ 798\ 91\ \text{kg}}{0{,}003\ 785\ 411\ 784\ \text{m}^3} = 0{,}017\ 118\ 061\ 05\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$1\ \frac{\text{ounce}}{\text{UK gallon}} = 1\ \frac{\text{oz}}{\text{UKgal}} = \frac{0{,}028\ 349\ 523\ 13\ \text{kg}}{0{,}004\ 546\ 09\ \text{m}^3} = 6{,}236\ 023\ 293\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$1\ \frac{\text{ounce}}{\text{US gallon}} = 1\ \frac{\text{oz}}{\text{USgal}} = \frac{0{,}028\ 349\ 523\ 13\ \text{kg}}{0{,}003\ 785\ 411\ 784\ \text{m}^3} = 7{,}489\ 151\ 709\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Voor het weergeven van de koncentratie van een opgeloste stof worden dikwijls, ook buiten de engelstalige landen, de volgende aanduidingen gebruikt:
ppm = parts per million (delen per miljoen)
ppb = parts per billion (1 billion (US) = 10^9; 1 billion (UK) = 10^{12})

Definitie : aantal ppm, aantal ppb (US) en aantal ppb (UK)

$= \frac{m_B}{m_M} \times$ respektievelijk 10^6, 10^9 en 10^{12}

met m_B = massa van de opgeloste stof
m_M = massa van de oplossing (mengsel)

Hieruit leidt men af :

1 ppm $\hat{=}$ 1 $\frac{\text{mg}}{\text{kg}}$

1 ppb (US) $\hat{=}$ 1 $\frac{\mu\text{g}}{\text{kg}}$

1 ppb (UK) $\hat{=}$ 1 $\frac{\text{ng}}{\text{kg}}$

Wanneer het oplosmiddel water is, en de hoeveelheid opgeloste stof verder zo klein is dat de soortelijke massa van de oplossing gelijkgesteld mag worden aan 1 kg/L, geldt ook :

1 ppm $\hat{\approx}$ 1 $\frac{mg}{L}$ = 1 $\frac{g}{m^3}$

1 ppb (US) $\hat{\approx}$ 1 $\frac{\mu g}{L}$ = 1 $\frac{mg}{m^3}$

1 ppb (UK) $\hat{\approx}$ 1 $\frac{ng}{L}$ = 1 $\frac{\mu g}{m^3}$

Bij het weergeven van de koncentratie van een bepaald gas in een gasmengsel worden de aanduidingen ppm en ppb ook gebruikt, maar dan meestal in de volgende betekenis :

aantal ppm, aantal ppb (US) en aantal ppb (UK) =

$\frac{\text{partieel volume van een komponent}}{\text{totaal volume van het gasmengsel}}$ x respektievelijk 10^6, 10^9 en 10^{12}

Hieruit leidt men af (voor gasmengsels, indien ppm en ppb in deze betekenis worden aangewend) :

1 ppm $\hat{=}$ 1 $\frac{cm^3}{m^3}$

1 ppb (US) $\hat{=}$ 1 $\frac{mm^3}{m^3}$

1 ppb (UK) $\hat{=}$ 1 $\frac{\mu m^3}{m^3}$

5.8. Tijd (E : time)

1 hour = 1 h = 60 min = 3600 s

1 minute = 1 min = 60 s

5.9. Snelheid (E : linear velocity, speed)

1 $\frac{foot}{second}$ = 1 FPS = 1 fps = 1 $\frac{ft}{s}$

= 0,3048 $\frac{m}{s}$ = 1097, 28 $\frac{m}{h}$ = 1,097 28 $\frac{km}{h}$ (exact)

1 $\frac{foot}{minute}$ = 1 FPM = 1 fpm = 1 $\frac{ft}{min}$

= $\frac{0,3048 \text{ m}}{60 \text{ s}}$ = 0,005 08 $\frac{m}{s}$ = 18,288 $\frac{m}{h}$ = 0,018 288 $\frac{km}{h}$ (exact)

1 $\frac{mile}{hour}$ = 1 mph = $\frac{1609,344 \text{ m}}{h}$ = 1,609 344 $\frac{km}{h}$ = 0,447 04 $\frac{m}{s}$ (exact)

1 (internationaal) knot = 1 (internationale) knoop

= 1 internationale zeemijl per uur

= 1852 $\frac{m}{h}$ = 1,852 $\frac{km}{h}$ = 0,514 444 444 4 $\frac{m}{s}$

1 UK knot = 1 imperial nautical mile per hour = 6080 ft/h

$$= 1853{,}184\ \frac{m}{h} = 1{,}853\ 184\ \frac{km}{h} = 0{,}514\ 773\ 333\ 3\ \frac{m}{s}$$

1 US knot = 1 US nautical mile per hour

$$= 1853{,}248\ \frac{m}{h} = 1{,}853\ 248\ \frac{km}{h} = 0{,}514\ 791\ 111\ 1\ \frac{m}{s}$$

5.10. Versnelling (E : acceleration)

$$1\ \frac{ft}{s^2} = 0{,}3048\ \frac{m}{s^2} \qquad \text{(exact)}$$

Normversnelling g_n (E : standard acceleration due to gravity) :

$$g_n = 9{,}806\ 65\ \frac{m}{s^2} = 9{,}806\ 65\ \frac{N}{kg} \qquad \text{(exact)}$$

$$= \frac{9{,}806\ 65}{0{,}3048}\ \frac{ft}{s^2} = 32{,}174\ 048\ 56\ \frac{ft}{s^2} = 32{,}174\ 048\ 56\ \frac{pdl}{lb}$$

$$= 386{,}088\ 582\ 7\ \frac{in}{s^2}$$

5.11. Kracht (E : force)

a. Kracht in het stelsel met massa als basisgrootheid (ft-lb-s-stelsel)

1 poundal = 1 pdl = 1 lb . $1\ \frac{ft}{s^2} = 1\ \frac{lb\ .\ ft}{s^2}$

$$= 0{,}453\ 592\ 37\ kg\ .\ \frac{0{,}3048\ m}{s^2}$$

$$= 0{,}138\ 254\ 954\ 4\ N \qquad \text{(SI)}$$

$$= \frac{1}{\{g_n\}_{ft/s^2}}\ lbf = \frac{1}{32{,}174\ 048\ 56}\ lbf$$

$$= 0{,}031\ 080\ 950\ 17\ lbf \qquad \text{(ft-lbf-s-stelsel)}$$

$$= 0{,}031\ 080\ 950\ 17 \times 0{,}453\ 592\ 37\ kgf$$

$$= 0{,}014\ 098\ 081\ 85\ kgf \qquad \text{(TS)}$$

b. Kracht in het stelsel met kracht als basisgrootheid (ft-lbf-s-stelsel)

1 pound-force (UK en USA; in USA ook : pound-weight) = 1 lbf

= 0,453 592 37 kgf (TS)

= 0,453 592 37 kg . 9,806 65 $\frac{m}{s^2}$

= 4,448 221 615 N (SI)

= $\left\{g_n\right\}_{ft/s^2}$ pdl

= 32,174 048 56 pdl (ft-lb-s-stelsel)

1 grain-force (UK en USA; in USA ook grain-weight) = $\frac{1}{7000}$ lbf

= $\frac{0,453\ 592\ 37}{7000}$ kgf

= 0,000 064 798 910 00 kgf (TS)

= 0,000 064 798 91 kg . 9,806 65 $\frac{m}{s^2}$

= 0,000 635 460 230 8 N (SI)

= $\frac{32,174\ 048\ 56}{7000}$ pdl

= 0,004 596 292 651 pdl (ft-lb-s-stelsel)

1 ounce-force (UK en USA; in USA ook ounce-weight) = 1 ozf = $\frac{1}{16}$ lbf

= $\frac{0,453\ 592\ 37}{16}$ kgf

= 0,028 349 523 13 kgf (TS)

= 0,028 349 523 13 kg . 9,806 65 $\frac{m}{s^2}$

= 0,278 013 851 N (SI)

= $\frac{32,174\ 048\ 56}{16}$ pdl

= 2,010 878 035 pdl (ft-lb-s-stelsel)

1 kip (USA only) = 1000 lbf = 1 kilopound-force = 1 klbf
(kip = kilo-imperial-pound)

= 453,592 37 kgf (TS)

= 4448,221 615 N (SI)

= 32 174,048 56 pdl (ft-lb-s-stelsel)

1 US ton-force = 1 short ton-weight (USA) = 2000 l: f

= 2000 x 0,453 592 37 kgf

= 907,184 740 kgf (TS)

= 907,184 74 kg . 9,806 65 $\frac{m}{s^2}$

= 8896,443 231 N (SI)

= 2000 x 32,174 048 56 pdl

= 64 348,097 12 pdl

(ft-lb-s-stelsel)

1 UK ton-force = 1 tonf = 1 long ton-weight (USA) = 2240 lbf

= 2240 x 0,453 572 37 kgf

= 1016,046 909 kgf (TS)

= 1016,046 909 kg . 9,806 65 $\frac{m}{s^2}$

= 9964,016 420 N (SI)

= 2240 x 32,174 048 56 pdl

= 72 069,868 77 pdl (ft-lb-s-stelsel)

5.12. Druk (E : pressure); spanning (E : stress)

$1 \frac{pdl}{ft^2} = \frac{0,138\ 254\ 954\ 4\ N}{(0,3048)^2\ m^2} = 1,488\ 163\ 944\ Pa$

$= 0,014\ 881\ 639\ 44\ mbar$

$= \frac{0,031\ 080\ 950\ 17\ lbf}{ft^2} = 0,031\ 080\ 950\ 17 \frac{lbf}{ft^2}$

$= \frac{0,031\ 080\ 950\ 17\ lbf}{(12)^2\ in^2} = 0,000\ 215\ 839\ 931\ 7 \frac{lbf}{in^2}$ $\left(1 \frac{lbf}{in^2} = 1\ psi\right)$

$= \frac{0,014\ 098\ 081\ 85\ kgf}{(0,3048)^2\ m^2} = 0,151\ 750\ 490\ 1 \frac{kgf}{m^2}$ $\left(1 \frac{kgf}{m^2} = 1\ mmWK\right)$

$= 0,000\ 015\ 175\ 049\ 01 \frac{kgf}{cm^2}$ $\left(1 \frac{kgf}{cm^2} = 1\ at\right)$

$$1\ \frac{lbf}{ft^2} = \frac{4,448\ 221\ 615\ N}{(0,3048)^2\ m^2} = 47,880\ 258\ 98\ Pa$$

$$= 0,478\ 802\ 589\ 8\ mbar$$

$$= \frac{1\ lbf}{(12)^2\ in^2} = 0,006\ 944\ 444\ 444\ 4\ \frac{lbf}{in^2} \qquad (1\ \frac{lbf}{in^2} = 1\ psi)$$

$$= \frac{32,174\ 048\ 56\ pdl}{ft^2} = 32,174\ 048\ 56\ \frac{pdl}{ft^2}$$

$$= \frac{0,453\ 592\ 37\ kgf}{(0,3048)^2\ m^2} = 4,882\ 427\ 636\ \frac{kgf}{m^2} \qquad (1\ \frac{kgf}{m^2} = 1\ mmWK)$$

$$= 0,000\ 488\ 242\ 763\ 6\ \frac{kgf}{cm^2} \qquad (1\ \frac{kgf}{cm^2} = 1\ at)$$

$$1\ \frac{lbf}{in^2} = 1\ psi = \frac{4,448\ 221\ 615\ N}{(0,0254)^2\ m^2} = 6894,757\ 293\ Pa$$

$$= 68,947\ 572\ 93\ mbar$$

$$= \frac{1\ lbf}{(\frac{1}{12})^2\ ft^2} = 144\ \frac{lbf}{ft^2}$$

$$= \frac{32,174\ 048\ 56\ pdl}{(\frac{1}{12})^2\ ft^2} = 4633,062\ 993\ \frac{pdl}{ft^2}$$

$$= \frac{0,453\ 592\ 37\ kgf}{(0,0254)^2\ m^2} = 703,069\ 579\ 6\ \frac{kgf}{m^2} \qquad (1\ \frac{kgf}{m^2} = 1\ mmWK)$$

$$= 0,070\ 306\ 957\ 96\ \frac{kgf}{cm^2} \qquad (1\ \frac{kgf}{cm^2} = 1\ at)$$

Opmerkingen

- Voor het weergeven van een overdruk (gauge pressure) in $\frac{\text{pound}}{\text{square inch}}$, werd dikwijls het symbool psig gebruikt in plaats van psi.
- Voor het weergeven van een absolute druk (absolute pressure) in $\frac{\text{pound}}{\text{square inch}}$, werd dikwijls het symbool psia gebruikt in plaats van psi.

$$1\ ksi\ (USA) = 1\ \frac{kip}{in^2} = 1000\ \frac{lbf}{in^2} = 1000\ psi$$

$$1\ \frac{\text{ounce-force}}{\text{square foot}} = 1\ \frac{\text{ozf}}{\text{ft}^2}\quad (\text{in USA ook : } 1\ \frac{\text{ounce-weight}}{\text{square foot}})$$

$$= \frac{0{,}278\ 013\ 851\ 0\ \text{N}}{(0{,}3048)^2\ \text{m}^2} = 2{,}992\ 516\ 187\ \text{Pa}$$

$$= 0{,}029\ 925\ 161\ 87\ \text{mbar}$$

$$= \frac{\frac{1}{16}\ \text{lbf}}{\text{ft}^2} = 0{,}0625\ \frac{\text{lbf}}{\text{ft}^2}$$

$$= \frac{\frac{1}{16}\ \text{lbf}}{(12)^2\ \text{in}^2} = 0{,}000\ 434\ 027\ 777\ 8\ \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2} \qquad (1\ \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2} = 1\ \text{psi})$$

$$= \frac{2{,}010\ 878\ 035\ \text{pdl}}{\text{ft}^2} = 2{,}010\ 878\ 035\ \frac{\text{pdl}}{\text{ft}^2}$$

$$= \frac{0{,}028\ 349\ 523\ 13\ \text{kgf}}{(0{,}3048)^2\ \text{m}^2} = 0{,}305\ 151\ 727\ 3\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} \qquad (1\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} = 1\ \text{mmWK})$$

$$= 0{,}000\ 030\ 515\ 172\ 73\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \qquad (1\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} = 1\ \text{at})$$

$$1\ \frac{\text{ounce-force}}{\text{square inch}} = 1\ \frac{\text{ozf}}{\text{in}^2}\quad (\text{in USA ook : } 1\ \frac{\text{ounce-weight}}{\text{square inch}})$$

$$= \frac{0{,}278\ 013\ 851\ 0\ \text{N}}{(0{,}0254)^2\ \text{m}^2} = 430{,}922\ 330\ 9\ \text{Pa}$$

$$= 4{,}309\ 223\ 309\ \text{mbar}$$

$$= \frac{\frac{1}{16}\ \text{lbf}}{(\frac{1}{12})^2\ \text{ft}^2} = 9\ \frac{\text{lbf}}{\text{ft}^2}$$

$$= \frac{\frac{1}{16}\ \text{lbf}}{\text{in}^2} = 0{,}0625\ \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2} \qquad (1\ \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2} = 1\ \text{psi})$$

$$= \frac{2{,}010\ 878\ 035\ \text{pdl}}{(\frac{1}{12})^2\ \text{ft}^2} = 289{,}566\ 437\ 0\ \frac{\text{pdl}}{\text{ft}^2}$$

$$= \frac{0{,}028\ 349\ 523\ 13\ \text{kgf}}{(0{,}0254)^2\ \text{m}^2} = 43{,}941\ 848\ 74\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} \qquad (1\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} = 1\ \text{mmWK})$$

$$= 0{,}004\ 394\ 184\ 874\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \qquad (1\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} = 1\ \text{at})$$

$$1\ \frac{\text{UK ton-force}}{\text{square foot}} = 1\ \frac{\text{UKtonf}}{\text{ft}^2} = 1\ \frac{\text{long ton (weight)}}{\text{square foot}}\ \text{(USA)}$$

$$= \frac{9964{,}016\ 420\ \text{N}}{(0{,}3048)^2\ \text{m}^2} = 107\ 251{,}7801\ \text{Pa}$$

$$= 1072{,}517\ 801\ \text{mbar} = 1{,}072\ 517\ 801\ \text{bar}$$

$$= 2240\ \frac{\text{lbf}}{\text{ft}^2}$$

$$= \frac{2240\ \text{lbf}}{(12)^2\ \text{in}^2} = 15{,}555\ 555\ 56\ \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2} \qquad \left(1\ \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2} = 1\ \text{psi}\right)$$

$$= \frac{72\ 069{,}868\ 77\ \text{pdl}}{\text{ft}^2} = 72\ 069{,}868\ 77\ \frac{\text{pdl}}{\text{ft}^2}$$

$$= \frac{1016{,}046\ 909\ \text{kgf}}{(0{,}3048)^2\ \text{m}^2} = 10\ 936{,}637\ 91\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} \qquad \left(1\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} = 1\ \text{mmWK}\right)$$

$$= 1{,}093\ 663\ 791\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \qquad \left(1\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} = 1\ \text{at}\right)$$

$$1\ \frac{\text{UK ton-force}}{\text{square inch}} = 1\ \frac{\text{UKtonf}}{\text{in}^2} = 1\ \frac{\text{long ton (weight)}}{\text{square inch}}\ \text{(USA)}$$

$$= \frac{9964{,}016\ 420\ \text{N}}{(0{,}0254)^2\ \text{m}^2} = 15\ 444\ 256{,}34\ \text{Pa}$$

$$= 154\ 442{,}5634\ \text{mbar} = 154{,}442\ 563\ 4\ \text{bar}$$

$$= \frac{2240\ \text{lbf}}{\left(\frac{1}{12}\right)^2\ \text{ft}^2} = 322\ 560\ \frac{\text{lbf}}{\text{ft}^2}$$

$$= \frac{2240\ \text{lbf}}{\text{in}^2} = 2240\ \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2} \qquad \left(1\ \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2} = 1\ \text{psi}\right)$$

$$= \frac{72\ 069{,}868\ 77\ \text{pdl}}{\left(\frac{1}{12}\right)^2\ \text{ft}^2} = 10\ 378\ 061{,}10\ \frac{\text{pdl}}{\text{ft}^2}$$

$$= \frac{1016{,}046\ 909\ \text{kgf}}{(0{,}0254)^2\ \text{m}^2} = 1\ 574\ 875{,}359\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} \qquad \left(1\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} = 1\ \text{mmWK}\right)$$

$$= 157{,}487\ 585\ 9\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \qquad \left(1\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} = 1\ \text{at}\right)$$

$$1\ \frac{\text{US ton-force}}{\text{square foot}} = 1\ \frac{\text{short ton (weight)}}{\text{square foot}}\ \text{(USA)}$$

$$= \frac{8896{,}443\ 231\ \text{N}}{(0{,}3048)^2\ \text{m}^2} = 95\ 760{,}517\ 97\ \text{Pa}$$

$$= 957{,}605\ 179\ 7\ \text{mbar} = 0{,}957\ 605\ 179\ 7\ \text{bar}$$

$$= \frac{2000\ \text{lbf}}{\text{ft}^2} = 2000\ \frac{\text{lbf}}{\text{ft}^2}$$

$$= \frac{2000\ \text{lbf}}{(12)^2\ \text{in}^2} = 13{,}888\ 888\ 89\ \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2} \qquad \left(1\ \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2} = 1\ \text{psi}\right)$$

$$= \frac{64\ 348{,}097\ 12\ \text{pdl}}{\text{ft}^2} = 64\ 348{,}097\ 12\ \frac{\text{pdl}}{\text{ft}^2}$$

$$= \frac{907{,}184\ 740\ 0\ \text{kgf}}{(0{,}3048)^2\ \text{m}^2} = 9764{,}855\ 273\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} \qquad \left(1\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} = 1\ \text{mmWK}\right)$$

$$= 0{,}976\ 485\ 527\ 3\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \qquad \left(1\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} = 1\ \text{at}\right)$$

$$1\ \frac{\text{US ton-force}}{\text{square inch}} = 1\ \frac{\text{short ton (weight)}}{\text{square inch}}\ \text{(USA)}$$

$$= \frac{8896{,}443\ 231\ \text{N}}{(0{,}0254)^2\ \text{m}^2} = 13\ 789\ 514,\ 59\ \text{Pa}$$

$$= 137\ 895{,}1459\ \text{mbar} = 137{,}895\ 145\ 9\ \text{bar}$$

$$= \frac{2000\ \text{lbf}}{\left(\frac{1}{12}\right)^2\ \text{ft}^2} = 288\ 000\ \frac{\text{lbf}}{\text{ft}^2}$$

$$= \frac{2000\ \text{lbf}}{\text{in}^2} = 2000\ \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2} \qquad \left(1\ \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2} = 1\ \text{psi}\right)$$

$$= \frac{64\ 348{,}097\ 12\ \text{pdl}}{\left(\frac{1}{12}\right)^2\ \text{ft}^2} = 9\ 266\ 125{,}985\ \frac{\text{pdl}}{\text{ft}^2}$$

$$= \frac{907{,}184\ 740\ 0\ \text{kgf}}{(0{,}0254)^2\ \text{m}^2} = 1\ 406\ 139{,}159\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} \qquad \left(1\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} = 1\ \text{mmWK}\right)$$

$$= 140{,}613\ 915\ 9\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \qquad \left(1\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} = 1\ \text{at}\right)$$

1 (conventional) inch of water = 1 inH_2O = 25,4 mm waterkolom

(met ρ = 1000 $\frac{kg}{m^3}$)

= 0,0254 m . 1000 $\frac{kg}{m^3}$. 9,806 65 $\frac{m}{s^2}$ = 249,088 910 Pa

= 2,490 889 1 mbar

= 0,0254 m . 1000 $\frac{kgf}{m^3}$ = 25,4 $\frac{kgf}{m^2}$ (1 $\frac{kgf}{m^2}$ = 1 mmWK)

= 0,002 54 $\frac{kgf}{cm^2}$ (1 $\frac{kgf}{cm^2}$ = 1 at)

$$= \frac{1}{12}\ \text{ft} \cdot \frac{\frac{1000}{0,453\ 592\ 37}\ \text{lbf}}{(\frac{1}{0,3048})^3\ \text{ft}^3} = 5,202\ 330\ 04\ \frac{\text{lbf}}{\text{ft}^2}$$

$$= 1\ \text{in} \cdot \frac{\frac{1000}{0,453\ 592\ 37}\ \text{lbf}}{(\frac{1}{0,0254})^3\ \text{in}^3} = 0,036\ 127\ 292\ \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2} \quad (1\ \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2} = 1\ \text{psi})$$

$$= \frac{1}{12}\ \text{ft} \cdot \frac{\frac{1000}{0,453\ 592\ 37}\ \text{lb}}{(\frac{1}{0,3048})^3\ \text{ft}^3} \cdot 32,174\ 048\ 56\ \frac{\text{ft}}{\text{s}^2} = 167,380\ 019\ 6\ \frac{\text{pdl}}{\text{ft}^2}$$

1 (conventional) foot of water = 1 ftH_2O = 0,3048 meter waterkolom

(met ρ = 1000 $\frac{kg}{m^3}$)

= 0,3048 m . 1000 $\frac{kg}{m^3}$. 9,806 65 $\frac{m}{s^2}$ = 2989,066 920 Pa

= 29,890 669 20 mbar

= 0,3048 m . 1000 $\frac{kgf}{m^3}$ = 304,8 $\frac{kgf}{m^2}$ (1 $\frac{kgf}{m^2}$ = 1 mmWK)

= 0,03048 $\frac{kgf}{cm^2}$ (1 $\frac{kgf}{cm^2}$ = 1 at)

$$= 1\ \text{ft} \cdot \frac{\frac{1000}{0,453\ 592\ 37}\ \text{lbf}}{(\frac{1}{0,3048})^3\ \text{ft}^3} = 62,427\ 960\ 57\ \frac{\text{lbf}}{\text{ft}^2}$$

$$= 12\ \text{in} \cdot \frac{\frac{1000}{0,453\ 592\ 37}\ \text{lbf}}{(\frac{1}{0,0254})^3\ \text{in}^3} = 0,433\ 527\ 504\ \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2} \quad (1\ \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2} = 1\ \text{psi})$$

$$= 1\ \text{ft} \cdot \frac{\frac{1000}{0,453\ 592\ 37}\ \text{lb}}{(\frac{1}{0,3048})^3\ \text{ft}^3} \cdot 32,174\ 048\ 56\ \frac{\text{ft}}{\text{s}^2} = 2008,560\ 235\ \frac{\text{pdl}}{\text{ft}^2}$$

1 (conventional) inch of mercury = 1 inHg = 25,4 mm kwikkolom

(met ρ = 13 595,1 $\frac{kg}{m^3}$)

= 0,0254 m . 13 595,1 $\frac{kg}{m^3}$. 9,806 65 $\frac{m}{s^2}$ = 3386,388 640 Pa

= 33,863 886 4 mbar

= 0,0254 m . 13 595,1 $\frac{kgf}{m^3}$ = 345,315 54 $\frac{kgf}{m^2}$ (1 $\frac{kgf}{m^2}$ = 1 mmWK)

= 0,034 531 554 $\frac{kgf}{cm^2}$ (1 $\frac{kgf}{cm^2}$ = 1 at)

= $\frac{1}{12}$ ft . $\frac{\frac{13\ 595,1}{0,453\ 592\ 37}\ lbf}{(\frac{1}{0,3048})^3\ ft^3}$ = 70,726 197 24 $\frac{lbf}{ft^2}$

= 1 in . $\frac{\frac{13\ 595,1}{0,453\ 592\ 37}\ lbf}{(\frac{1}{0,0254})^3\ in^3}$ = 0,491 154 147 5 $\frac{lbf}{in^2}$ (1 $\frac{lbf}{in^2}$ = 1 psi)

= $\frac{1}{12}$ ft . $\frac{\frac{13\ 595,1}{0,453\ 592\ 37}\ lb}{(\frac{1}{0,3048})^3\ ft^3}$. 32,174 048 56 $\frac{ft}{s^2}$ = 2275,548 104 $\frac{pdl}{ft^2}$

1 atm = normale atmosferische druk (E : standard atmosphere)

= 101 325 Pa = 760 Torr

= 759,999 891 8 mmHg

= 1013,25 mbar = 1,013 25 bar

= $\frac{101\ 325}{1,488\ 163\ 944}$ $\frac{pdl}{ft^2}$ = 68 087,256 39 $\frac{pdl}{ft^2}$

= $\frac{101\ 325}{47,880\ 258\ 98}$ $\frac{lbf}{ft^2}$ = 2116,216 624 $\frac{lbf}{ft^2}$

= $\frac{101\ 325}{6894,757\ 293}$ $\frac{lbf}{in^2}$ = 14,695 948 78 $\frac{lbf}{in^2}$ (1 $\frac{lbf}{in^2}$ = 1 psi)

= $\frac{101\ 325}{2,992\ 516\ 187}$ $\frac{ozf}{ft^2}$ = 33 859,465 97 $\frac{ozf}{ft^2}$

= $\frac{101\ 325}{430,922\ 330\ 9}$ $\frac{ozf}{in^2}$ = 235,135 180 4 $\frac{ozf}{in^2}$

= $\frac{101\ 325}{249,088\ 910}$ inH_2O = 406,782 461 7 inH_2O (met ρ = 1000 $\frac{kg}{m^3}$)

= $\frac{101\ 325}{2989,066\ 920}$ ftH_2O = 33,898 538 48 ftH_2O (met ρ = 1000 $\frac{kg}{m^3}$)

= $\frac{101\ 325}{3386,388\ 640}$ inHg = 29,921 255 58 inHg (met ρ = 13 595,1 $\frac{kg}{m^3}$)

1 at = 1 technical atmosphere = 1 $\frac{kgf}{cm^2}$ = 98 066,5 Pa

= $\frac{1}{0,000\ 015\ 175\ 049\ 01}$ $\frac{pdl}{ft^2}$ = 65 897,645 49 $\frac{pdl}{ft^2}$

= $\frac{1}{0,000\ 488\ 242\ 763\ 6}$ $\frac{lbf}{ft^2}$ = 2048,161 436 $\frac{lbf}{ft^2}$

= $\frac{1}{0,070\ 306\ 957\ 96}$ $\frac{lbf}{in^2}$ = 14,223 343 31 $\frac{lbf}{in^2}$ (1 $\frac{lbf}{in^2}$ = 1 psi)

= $\frac{1}{0,000\ 030\ 515\ 172\ 73}$ $\frac{ozf}{ft^2}$ = 32 770,582 98 $\frac{ozf}{ft^2}$

= $\frac{1}{0,004\ 394\ 184\ 874}$ $\frac{ozf}{in^2}$ = 227,573 492 8 $\frac{ozf}{in^2}$

= $\frac{1}{0,002\ 54}$ inH_2O = 393,700 787 4 inH_2O (met ρ = 1000 $\frac{kg}{m^3}$)

= $\frac{1}{0,030\ 48}$ ftH_2O = 32,808 398 95 ftH_2O (met ρ = 1000 $\frac{kg}{m^3}$)

= $\frac{1}{0,034\ 531\ 554}$ inHg = 28,959 021 07 inHg (met ρ = 13 595,1 $\frac{kg}{m^3}$)

1 bar = 1000 mbar = 100 000 Pa

= $\frac{1000}{0,014\ 881\ 639\ 44}$ $\frac{pdl}{ft^2}$ = 67 196,897 49 $\frac{pdl}{ft^2}$

= $\frac{1000}{0,478\ 802\ 589\ 8}$ $\frac{lbf}{ft^2}$ = 2088,543 423 $\frac{lbf}{ft^2}$

= $\frac{1000}{68,947\ 572\ 93}$ $\frac{lbf}{in^2}$ = 14,503 773 77 $\frac{lbf}{in^2}$ (1 $\frac{lbf}{in^2}$ = 1 psi)

= $\frac{1000}{0,029\ 925\ 161\ 87}$ $\frac{ozf}{ft^2}$ = 33 416,694 76 $\frac{ozf}{ft^2}$

= $\frac{1000}{4,309\ 223\ 909}$ $\frac{ozf}{in^2}$ = 232,060 360 3 $\frac{ozf}{in^2}$

= $\frac{1}{1,072\ 517\ 801}$ $\frac{UKtonf}{ft^2}$ = 0,932 385 457 $\frac{UKtonf}{ft^2}$

= $\frac{1}{154,442\ 563\ 4}$ $\frac{UKtonf}{in^2}$ = 0,006 474 699 004 $\frac{UKtonf}{in^2}$

= $\frac{1}{0,957\ 605\ 179\ 7}$ $\frac{UStonf}{ft^2}$ = 1,044 271 712 $\frac{UStonf}{ft^2}$

= $\frac{1}{137,895\ 145\ 9}$ $\frac{UStonf}{in^2}$ = 0,007 251 886 885 $\frac{UStonf}{in^2}$

= $\frac{1000}{2,490\ 889\ 1}$ inH_2O = 401,463 076 inH_2O (met ρ = 1000 $\frac{kg}{m^3}$)

= $\frac{1000}{29,890\ 669\ 20}$ ftH_2O = 33,455 256 33 ftH_2O (met ρ = 1000 $\frac{kg}{m^3}$)

= $\frac{1000}{33,863\ 886\ 4}$ inHg = 29,529 983 2 inHg (met ρ = 13 595,1 $\frac{kg}{m^3}$)

$$1\ Pa = \frac{1}{1,488\ 163\ 944}\ \frac{pdl}{ft^2} = 0,671\ 968\ 974\ 9\ \frac{pdl}{ft^2}$$

$$= \frac{1}{47,880\ 258\ 98}\ \frac{lbf}{ft^2} = 0,020\ 885\ 434\ 23\ \frac{lbf}{ft^2}$$

$$= \frac{1}{6894,757\ 293}\ \frac{lbf}{in^2} = 0,000\ 145\ 037\ 737\ 7\ \frac{lbf}{in^2} \qquad (1\ \frac{lbf}{in^2} = 1\ psi)$$

$$= \frac{1}{2,992\ 516\ 187}\ \frac{ozf}{ft^2} = 0,334\ 166\ 947\ 6\ \frac{ozf}{ft^2}$$

$$= \frac{1}{430,922\ 330\ 9}\ \frac{ozf}{in^2} = 0,002\ 320\ 603\ 803\ \frac{ozf}{in^2}$$

$$= \frac{1}{107\ 251,7801}\ \frac{UKtonf}{ft^2} = 0,000\ 009\ 323\ 854\ 570\ \frac{UKtonf}{ft^2}$$

$$= \frac{1}{15\ 444\ 256,34}\ \frac{UKtonf}{in^2} = 0,000\ 000\ 064\ 748\ 990\ 04\ \frac{UKtonf}{in^2}$$

$$= \frac{1}{95\ 760,517\ 97}\ \frac{UStonf}{ft^2} = 0,000\ 010\ 442\ 717\ 12\ \frac{UStonf}{ft^2}$$

$$= \frac{1}{13\ 789\ 514,59}\ \frac{UStonf}{in^2} = 0,000\ 000\ 072\ 518\ 868\ 85\ \frac{UStonf}{in^2}$$

$$= \frac{1}{249,088\ 910}\ inH_2O = 0,004\ 014\ 630\ 760\ inH_2O$$

$$= \frac{1}{2989,066\ 920}\ ftH_2O = 0,000\ 334\ 552\ 563\ 3\ ftH_2O$$

$$= \frac{1}{3386,388\ 640}\ inHg = 0,000\ 295\ 299\ 833\ inHg$$

5.13. Moment van een kracht (E : moment of force, torque)

1 poundal foot = 1 pdl . ft = 0,138 254 954 4 N . 0,3048 m
= 0,042 140 110 1 N . m

1 pound-force foot = 1 lbf . ft = 4,448 221 615 N . 0,3048 m
= 1,355 817 948 N . m

1 pound-force inch = 1 lbf . in = 4,448 221 615 N . 0,0254 m
= 0,112 984 829 N . m

1 UKton-force foot = 1 UKtonf . ft = 9964,016 420 N . 0,3048 m
= 3037,032 205 N . m

1 USton-force foot = 1 UStonf . ft = 8896,443 231 N . 0,3048 m
= 2711,635 897 N . m

1 ounce-force inch = 1 ozf . in = 0,278 013 851 N . 0,0254 m
= 0,007 061 551 815 N . m

5.14. Energie (arbeid, warmte) (E : energy; work; heat)

Wat betreft de manier waarop de eenheden van arbeid (E : work) en van moment van een kracht (E : moment of force, torque) worden weergegeven, vermeldt de publikatie "Conversion factors and tables" (British Standards Institution, BS 350 : Part 1 : 1974) op blz. 46 :
"With imperial units a distinction between torque units and energy units is made (by convention) by reversing the order of the units; e.g. the foot pound-force (ft . lbf) is an energy unit and the pound-force foot (lbf . ft) a torque unit. There is no similar convention used or advisable with metric (including SI) units".

1 ft . pdl = 0,3048 m . 0,138 254 954 4 N = 0,042 140 110 10 J

= 30,48 cm . 13 825,495 44 dyn = 421 401,101 erg

= 1 ft . 0,031 080 950 17 lbf = 0,031 080 950 17 ft . lbf

= $\frac{1}{32,174\ 048\ 56}$ ft . lbf = 0,031 080 950 17 ft . lbf

= 0,3048 m . 0,014 098 081 85 kgf = 0,004 297 095 348 kgf . m

= 0,042 140 110 10 J . $\frac{1}{4186,8}$ $\frac{\text{kcal}}{\text{J}}$ = 0,000 010 064 992 38 kcal

= 0,000 010 064 992 38 kcal . $\frac{1}{0,251\ 995\ 761\ 1}$ $\frac{\text{Btu}}{\text{kcal}}$

= 0,000 039 941 117 80 Btu

1 ft . lbf = 0,3048 m . 4,448 221 615 N = 1,355 817 948 J

= 30,48 cm . 444 822,1615 dyn = 13 558 179,48 erg

= 1 ft . 32,174 048 56 pdl = 32,174 048 56 ft . pdl

= $\frac{1}{0,031\ 080\ 950\ 17}$ ft . pdl = 32,174 048 56 ft . pdl

= 0,3048 m . 0,453 592 37 kgf = 0,138 254 954 4 kgf . m

= 1,355 817 948 J . $\frac{1}{4186,8}$ $\frac{\text{kcal}}{\text{J}}$ = 0,000 323 831 553 5 kcal

= 0,000 323 831 553 5 kcal . $\frac{1}{0,251\ 995\ 761\ 1}$ $\frac{\text{Btu}}{\text{kcal}}$

= 0,001 285 067 463 Btu

1 British thermal unit = 1 Btu = de hoeveelheid warmte die vereist is om 1 pound water (= 0,453 592 37 kg) 1 °F (= $\frac{5}{9}$ K) op te warmen (zie ook Hoofdstuk V, onder 2.2.2.)

$$1\ \text{Btu} = 0{,}453\ 592\ 37\ \text{kg} \cdot 1\ \frac{\text{kcal}}{\text{kg K}} \cdot \frac{5}{9}\ \text{K} = 0{,}251\ 995\ 761\ 1\ \text{kcal}$$

$$= 0{,}251\ 995\ 761\ 1\ \text{kcal} \cdot 4186{,}8\ \frac{\text{J}}{\text{kcal}} = 1055{,}055\ 853\ \text{J}$$

$$= \frac{1055{,}055\ 853}{0{,}042\ 140\ 110\ 10}\ \text{ft} \cdot \text{pdl} = 25\ 036{,}855\ 63\ \text{ft} \cdot \text{pdl}$$

$$= \frac{1}{0{,}000\ 039\ 941\ 117\ 80}\ \text{ft} \cdot \text{pdl} = 25\ 036{,}855\ 63\ \text{ft} \cdot \text{pdl}$$

$$= \frac{1055{,}055\ 853}{1{,}355\ 817\ 948}\ \text{ft} \cdot \text{lbf} = 778{,}169\ 262\ \text{ft} \cdot \text{lbf}$$

$$= \frac{1}{0{,}001\ 285\ 067\ 463}\ \text{ft} \cdot \text{lbf} = 778{,}169\ 262\ \text{ft} \cdot \text{lbf}$$

$$= 1055{,}055\ 853\ \text{J} \cdot \frac{1}{9{,}806\ 65}\ \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{J}} = 107{,}585\ 755\ 9\ \text{kgf} \cdot \text{m}$$

1 therm = 100 000 Btu = 105 505 585 J

1 horsepower hour = 1 hp . h (ft-lbf-s-stelsel)

$$= 550\ \frac{\text{ft} \cdot \text{lbf}}{\text{s}} \cdot 3600\ \text{s}$$

$$= 1\ 980\ 000\ \text{ft} \cdot \text{lbf}$$

$$= 550 \cdot \frac{1\ \text{ft} \cdot 32{,}174\ 048\ 56\ \text{pdl}}{\text{s}} \cdot 3600\ \text{s}$$

$$= 63\ 704\ 616{,}16\ \text{ft} \cdot \text{pdl}$$

$$= 550 \cdot \frac{0{,}3048\ \text{m} \cdot 0{,}453\ 592\ 37\ \text{kgf}}{\text{s}} \cdot 3600\ \text{s}$$

$$= 273\ 744{,}8097\ \text{kgf} \cdot \text{m}$$

$$= 550 \cdot \frac{0{,}3048\ \text{m} \cdot 4{,}448\ 221\ 615\ \text{N}}{\text{s}} \cdot 3600\ \text{s}$$

$$= 745{,}699\ 871\ 6\ \frac{\text{J}}{\text{s}} \cdot 3600\ \text{s}$$

$$= 2\ 684\ 519{,}537\ \text{J}$$

$$= 745{,}699\ 871\ 6\ \text{W} \cdot \text{h} = 0{,}745\ 699\ 871\ 6\ \text{kW} \cdot \text{h}$$

$$= 273\ 744{,}8097\ \text{kgf} \cdot \text{m} \cdot \frac{1}{270\ 000}\ \frac{\text{pk} \cdot \text{h}}{\text{kgf} \cdot \text{m}} = 1{,}013\ 869\ 666\ \text{pk} \cdot \text{h}$$

1 paardekracht uur = 1 pk . h (TS)

$= 75 \frac{kgf \cdot m}{s} \cdot 3600\ s = 270\ 000\ kgf \cdot m$

$= 75 \frac{kgf \cdot m}{s} \cdot 9{,}806\ 65 \frac{J}{kgf \cdot m} \cdot 3600\ s$

$= 735{,}498\ 75 \frac{J}{s} \cdot 3600\ s$

$= 2\ 647\ 795{,}5\ J$

$= 735{,}498\ 75\ W \cdot h$

$= 0{,}735\ 498\ 75\ kW \cdot h$

1 kilowatt hour = 1 kilowatt uur = 1 kW . h

$= 1000 \frac{J}{s} \cdot 3600\ s = 3\ 600\ 000\ J$

$= 3\ 600\ 000\ J \cdot \frac{1}{4186{,}8} \frac{kcal}{J} = 859{,}845\ 227\ 9\ kcal \approx 860\ kcal$

$= \frac{3\ 600\ 000}{1055{,}055\ 853} Btu = 3412{,}141\ 632\ Btu$

$= \frac{3\ 600\ 000}{0{,}042\ 140\ 110\ 10} ft \cdot pdl = 85\ 429\ 297{,}44\ ft \cdot pdl$

$= \frac{3\ 600\ 000}{1{,}355\ 817\ 948} ft \cdot lbf = 2\ 655\ 223{,}738\ ft \cdot lbf$

$= \frac{3\ 600\ 000}{2\ 684\ 519{,}537} hp \cdot h = 1{,}341\ 022\ 090\ hp \cdot h$

$= 3\ 600\ 000\ J \cdot \frac{1\ kgf \cdot m}{9{,}806\ 65\ J} = 367\ 097{,}8367\ kgf \cdot m$

$= 3\ 600\ 000\ J \cdot \frac{1\ kgf \cdot m}{9{,}806\ 65\ J} \cdot \frac{1\ pk \cdot h}{270\ 000\ kgf \cdot m} = 1{,}359\ 621\ 617\ pk \cdot h$

5.15. Vermogen (E : power)

$1 \frac{ft \cdot pdl}{s} = 0{,}042\ 140\ 110\ 10\ W$

$= 0{,}031\ 080\ 950\ 17 \frac{ft \cdot lbf}{s}$

$= 0{,}004\ 297\ 095\ 348 \frac{kgf \cdot m}{s}$

$1 \frac{ft \cdot lbf}{s} = 1{,}355\ 817\ 948\ W$

$= 32{,}174\ 048\ 56 \frac{ft \cdot pdl}{s}$

$= 0{,}138\ 254\ 954\ 4 \frac{kgf \cdot m}{s}$

1 horsepower = 1 hp = $550 \frac{\text{ft . lbf}}{\text{s}}$ (ft-lbf-s-stelsel)

$= 550 \cdot \frac{0{,}3048 \text{ m} \cdot 4{,}448\,221\,615 \text{ N}}{\text{s}} = 745{,}699\,871\,5 \text{ W}$

$= 550 \cdot \frac{1 \text{ ft} \cdot 32{,}174\,048\,56 \text{ pdl}}{\text{s}} = 17\,695{,}728\,71 \frac{\text{ft . pdl}}{\text{s}}$

$= 550 \cdot \frac{0{,}3048 \text{ m} \cdot 0{,}453\,592\,37 \text{ kgf}}{\text{s}} = 76{,}040\,224\,91 \frac{\text{kgf . m}}{\text{s}}$

$= 76{,}040\,224\,91 \frac{\text{kgf . m}}{\text{s}} \cdot \frac{1}{75} \frac{\text{pk}}{\frac{\text{kgf . m}}{\text{s}}} = 1{,}013\,869\,665 \text{ pk}$

1 paardekracht = 1 pk (TS)

= 1 metric horsepower

$= 75 \frac{\text{kgf . m}}{\text{s}}$

= 75 x 9,806 65 W = 735,498 75 W

$1 \frac{\text{Btu}}{\text{h}} = 0{,}251\,995\,761\,1 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$

$= 1055{,}055\,853 \frac{\text{J}}{\text{h}} \cdot \frac{1}{3600} \frac{\text{h}}{\text{s}} = 0{,}293\,071\,070\,3 \text{ W}$

$1 \frac{\text{Btu}}{\text{s}} = 0{,}251\,995\,761\,1 \frac{\text{kcal}}{\text{s}} = 907{,}184\,74 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$

$= 1055{,}055\,853 \text{ W}$

5.16. Verbrandingswarmte (E : calorific value); warmte-inhoud (E : heat content); soortelijke entalpie (E : specific enthalpy)

$1 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} = \frac{0{,}251\,995\,761\,1 \text{ kcal}}{0{,}453\,592\,37 \text{ kg}} = 0{,}555\,555\,555\,5 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$

$= \frac{1055{,}055\,853 \text{ J}}{0{,}453\,592\,37 \text{ kg}} = 2326 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$

$1 \frac{\text{Btu}}{\text{ft}^3} = \frac{0{,}251\,995\,761\,1 \text{ kcal}}{(0{,}3048)^3 \text{ m}^3} = 8{,}899\,146\,319 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3}$

$= \frac{1055{,}055\,853 \text{ J}}{(0{,}3048)^3 \text{ m}^3} = 37\,258{,}945\,82 \frac{\text{J}}{\text{m}^3}$

$$1\ \frac{\text{Btu}}{\text{UKgal}} = \frac{0{,}251\ 995\ 761\ 1\ \text{kcal}}{0{,}004\ 546\ 09\ \text{m}^3} = 55{,}431\ 318\ 14\ \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3}$$

$$= \frac{1055{,}055\ 853\ \text{J}}{0{,}004\ 546\ 09\ \text{m}^3} = 232\ 079{,}8429\ \frac{\text{J}}{\text{m}^3}$$

$$1\ \frac{\text{Btu}}{\text{USgal}} = \frac{0{,}251\ 995\ 761\ 1\ \text{kcal}}{0{,}003\ 785\ 411\ 784\ \text{m}^3} = 66{,}570\ 237\ 40\ \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3}$$

$$= \frac{1055{,}055\ 853\ \text{J}}{0{,}003\ 785\ 411\ 784\ \text{m}^3} = 278\ 716{,}2700\ \frac{\text{J}}{\text{m}^3}$$

5.17. Temperatuur, temperatuurverschil (E : temperature, temperature difference or interval)

Het begrip temperatuur, de verschillende temperatuurschalen en hun respektieve eenheden werden uitvoerig behandeld in Hoofdstuk V; de weergave van een temperatuur en een temperatuurverschil volgens de verschillende temperatuurschalen werd uitvoerig behandeld in het betrokken hoofdstuk onder 1.9.

5.18. Soortelijke warmtekapaciteit (soortelijke warmte) (E : specific heat capacity)

$$1\ \frac{\text{Btu}}{\text{lb}\ .\ ^\circ\text{F}} = \frac{0{,}251\ 995\ 761\ 1\ \text{kcal}}{0{,}453\ 592\ 37\ \text{kg}\ .\ \frac{5}{9}\ \text{K}} = 1\ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}\ .\ \text{K}}$$

$$= \frac{1055{,}055\ 853\ \text{J}}{0{,}453\ 592\ 37\ \text{kg}\ .\ \frac{5}{9}\ \text{K}} = 4186{,}8\ \frac{\text{J}}{\text{kg}\ .\ \text{K}} \qquad \text{(exact)}$$

$$1\ \frac{\text{ft}\ .\ \text{lbf}}{\text{lb}\ .\ ^\circ\text{F}} = \frac{0{,}3048\ \text{m}\ .\ 0{,}453\ 592\ 37\ \text{kgf}\ .\ 9{,}806\ 65\ \frac{\text{N}}{\text{kgf}}}{0{,}453\ 592\ 37\ \text{kg}\ .\ \frac{5}{9}\ \text{K}}$$

$$= 5{,}380\ 320\ 456\ \frac{\text{J}}{\text{kg}\ .\ \text{K}}$$

$$1\ \frac{\text{Btu}}{\text{ft}^3\ .\ ^\circ\text{F}} = \frac{0{,}251\ 995\ 761\ 1\ \text{kcal}}{(0{,}3048)^3\ \text{m}^3\ .\ \frac{5}{9}\ \text{K}} = 1\ 0{,}018\ 463\ 37\ \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3\ .\ \text{K}}$$

$$= \frac{1055{,}055\ 853\ \text{J}}{(0{,}3048)^3\ \text{m}^3\ .\ \frac{5}{9}\ \text{K}} = 67\ 066{,}102\ 46\ \frac{\text{J}}{\text{m}^3\ .\ \text{K}}$$

5.19. Warmtegeleidingskoëfficiënt (E : thermal conductivity)

$$1\ \frac{\text{Btu}}{\text{ft . h . °F}} = \frac{0{,}251\ 995\ 761\ 1\ \text{kcal}}{0{,}3048\ \text{m . 1 h . }\frac{5}{9}\ \text{K}} = 1{,}488\ 163\ 944\ \frac{\text{kcal}}{\text{m . h . K}}$$

$$= \frac{1055{,}055\ 853\ \text{J}}{0{,}3048\ \text{m . 3600 s . }\frac{5}{9}\ \text{K}} = 1{,}730\ 734\ 667\ \frac{\text{W}}{\text{m . K}}$$

$$1\ \frac{\text{Btu}}{\text{in . h . °F}} = \frac{0{,}251\ 995\ 761\ 1\ \text{kcal}}{0{,}0254\ \text{m . 1 h . }\frac{5}{9}\ \text{K}} = 17{,}857\ 967\ 32\ \frac{\text{kcal}}{\text{m . h . K}}$$

$$= \frac{1055{,}055\ 853\ \text{J}}{0{,}0254\ \text{m . 3600 s . }\frac{5}{9}\ \text{K}} = 20{,}768\ 816\ 00\ \frac{\text{W}}{\text{m . K}}$$

$$1\ \frac{\text{Btu . in}}{\text{ft}^2\text{ . h . °F}} = \frac{0{,}251\ 995\ 761\ 1\ \text{kcal . }0{,}0254\ \text{m}}{(0{,}3048)^2\ \text{m}^2\text{ . 1 h . }\frac{5}{9}\ \text{K}} = 0{,}124\ 013\ 662\ 0\ \frac{\text{kcal}}{\text{m . h . K}}$$

$$= \frac{1055{,}055\ 853\ \text{J . }0{,}0254\ \text{m}}{(0{,}3048)^2\ \text{m}^2\text{ . 3600 s . }\frac{5}{9}\ \text{K}} = 0{,}144\ 227\ 888\ 9\ \frac{\text{W}}{\text{m . K}}$$

5.20 Warmtedoorgangskoëfficiënt (E : thermal conductance; heat transfer coefficient)

$$1\ \frac{\text{Btu}}{\text{ft}^2\text{ . h . °F}} = \frac{0{,}251\ 995\ 761\ 1\ \text{kcal}}{(0{,}3048)^2\ \text{m}^2\text{ . 1 h . }\frac{5}{9}\ \text{K}} = 4{,}882\ 427\ 636\ \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2\text{ . h . K}}$$

$$= \frac{1055{,}055\ 853\ \text{J}}{(0{,}3048)^2\ \text{m}^2\text{ . 3600 s . }\frac{5}{9}\ \text{K}} = 5{,}678\ 263\ 343\ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{ . K}}$$

$$1\ \frac{\text{Btu}}{\text{in}^2\text{ . h . °F}} = \frac{0{,}251\ 995\ 761\ 1\ \text{kcal}}{(0{,}0254)^2\ \text{m}^2\text{ . 1 h . }\frac{5}{9}\ \text{K}} = 703{,}069\ 579\ 6\ \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2\text{ . h . K}}$$

$$= \frac{1055{,}055\ 853\ \text{J}}{(0{,}0254)^2\ \text{m}^2\text{ . 3600 s . }\frac{5}{9}\ \text{K}} = 817{,}669\ 921\ 4\ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{ . K}}$$

5.21. Warmtedoorgang per oppervlakte en tijd (E : heat flux density)

$$1\ \frac{\text{Btu}}{\text{ft}^2\ .\ \text{h}} = \frac{0{,}251\ 995\ 761\ 1\ \text{kcal}}{(0{,}3048)^2\ \text{m}^2\ .\ 1\ \text{h}} = 2{,}712\ 459\ 798\ \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2\ .\ \text{h}}$$

$$= \frac{1055{,}055\ 853\ \text{J}}{(0{,}3048)^2\ \text{m}^2\ .\ 3600\ \text{s}} = 3{,}154\ 590\ 746\ \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$1\ \frac{\text{Btu}}{\text{in}^2\ .\ \text{h}} = \frac{0{,}251\ 995\ 761\ 1\ \text{kcal}}{(0{,}0254)^2\ \text{m}^2\ .\ 1\ \text{h}} = 390{,}594\ 210\ 9\ \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2\ .\ \text{h}}$$

$$= \frac{1055{,}055\ 853\ \text{J}}{(0{,}0254)^2\ \text{m}^2\ .\ 3600\ \text{s}} = 454{,}261\ 067\ 5\ \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

5.22. Dynamische viskositeit (E : dynamic viscosity)

$$1\ \frac{\text{pdl}\ .\ \text{s}}{\text{ft}^2} = 1\ \frac{\frac{\text{lb}\ .\ \text{ft}}{\text{s}^2}\ .\ \text{s}}{\text{ft}^2} = 1\ \frac{\text{lb}}{\text{ft}\ .\ \text{s}} \qquad \text{(ft-lb-s-stelsel)}$$

$$= \frac{0{,}453\ 592\ 37\ \text{kg}}{0{,}3048\ \text{m}\ .\ 1\ \text{s}} = 1{,}488\ 163\ 944\ \text{Pa}\ .\ \text{s} \qquad \text{(SI)}$$

$$= \frac{0{,}014\ 098\ 081\ 85\ \text{kgf}\ .\ 1\ \text{s}}{(0{,}3048)^2\ \text{m}^2} = 0{,}151\ 750\ 490\ 1\ \frac{\text{kgf}\ .\ \text{s}}{\text{m}^2} \qquad \text{(TS)}$$

$$= \frac{0{,}031\ 080\ 950\ 17\ \text{lbf}\ .\ 1\ \text{s}}{\text{ft}^2} = 0{,}031\ 080\ 950\ 17\ \frac{\text{lbf}\ .\ \text{s}}{\text{ft}^2}$$

(ft-lbf-s-stelsel)

$$1\ \frac{\text{lb}}{\text{ft}\ .\ \text{h}} = \frac{1}{3600}\ \frac{\text{lb}}{\text{ft}\ .\ \text{s}} = \frac{1}{3600}\ \frac{\text{pdl}\ .\ \text{s}}{\text{ft}^2} \qquad \text{(ft-lb-s-stelsel)}$$

$$= \frac{1}{3600} \times \frac{0{,}453\ 592\ 37\ \text{kg}}{0{,}3048\ \text{m}\ .\ 1\ \text{s}} = 0{,}000\ 413\ 378\ 873\ 2\ \text{Pa}\ .\ \text{s} \qquad \text{(SI)}$$

$$= \frac{1}{3600} \times \frac{0{,}014\ 098\ 081\ 85\ \text{kgf}\ .\ 1\ \text{s}}{(0{,}3048)^2\ \text{m}^2} = 0{,}000\ 042\ 152\ 913\ 91\ \frac{\text{kgf}\ .\ \text{s}}{\text{m}^2}$$

(TS)

$$= \frac{1}{3600} \times \frac{0{,}031\ 080\ 950\ 17\ \text{lbf}\ .\ 1\ \text{s}}{\text{ft}^2} = 0{,}000\ 008\ 633\ 597\ 269\ \frac{\text{lbf}\ .\ \text{s}}{\text{ft}^2}$$

(ft-lbf-s-stelsel)

$$1\ \frac{\text{lbf . s}}{\text{ft}^2} = 1\ \frac{\frac{\text{lbf . s}^2}{\text{ft}}}{\text{ft . s}} = 1\ \frac{\text{slug}}{\text{ft . s}} \qquad \text{(ft-lbf-s-stelsel)}$$

$$= \frac{0{,}453\ 592\ 37\ \text{kgf . 1 s}}{(0{,}3048)^2\ \text{m}^2} = 4{,}882\ 427\ 636\ \frac{\text{kgf . s}}{\text{m}^2} \qquad \text{(TS)}$$

$$= \frac{14{,}593\ 902\ 94\ \text{kg}}{0{,}3048\ \text{m . 1 s}} = 47{,}880\ 258\ 99\ \text{Pa . s} \qquad \text{(SI)}$$

$$= \frac{32{,}174\ 048\ 56\ \text{lb}}{\text{ft . s}} = 32{,}174\ 048\ 56\ \frac{\text{pdl . s}}{\text{ft}^2} \qquad \text{(ft-lb-s-stelsel)}$$

$$1\ \frac{\text{lbf . h}}{\text{ft}^2} = 3600\ \frac{\text{lbf . s}}{\text{ft}^2} = 3600\ \frac{\text{slug}}{\text{ft . s}} \qquad \text{(ft-lbf-s-stelsel)}$$

$$= \frac{0{,}453\ 592\ 37\ \text{kgf . 3600 s}}{(0{,}3048)^2\ \text{m}^2} = 17\ 576{,}739\ 49\ \frac{\text{kgf . s}}{\text{m}^2} \qquad \text{(TS)}$$

$$= 3600 \times \frac{14{,}593\ 902\ 94\ \text{kg}}{0{,}3048\ \text{m . 1 s}} = 172\ 368{,}9323\ \text{Pa . s} \qquad \text{(SI)}$$

$$= 3600 \times \frac{32{,}174\ 048\ 56\ \text{lb}}{\text{ft . s}} = 115\ 826{,}5748\ \frac{\text{pdl . s}}{\text{ft}^2} \qquad \text{(ft-lb-s-stelsel)}$$

$$1\ \frac{\text{lbf . s}}{\text{in}^2} = \frac{0{,}453\ 592\ 37\ \text{kgf . 1 s}}{(0{,}0254)^2\ \text{m}^2} = 703{,}069\ 579\ 6\ \frac{\text{kgf . s}}{\text{m}^2} \qquad \text{(TS)}$$

$$= \frac{4{,}448\ 221\ 615\ \text{N . 1 s}}{(0{,}0254)^2\ \text{m}^2} = 6894{,}757\ 293\ \text{Pa . s} \qquad \text{(SI)}$$

$$= \frac{1\ \text{lbf . s}}{(\frac{1}{12})^2\ \text{ft}^2} = 144\ \frac{\text{lbf . s}}{\text{ft}^2} = 144\ \frac{\text{slug}}{\text{ft . s}} \qquad \text{(ft-lbf-s-stelsel)}$$

5.23. Kinematische viskositeit (E : kinematic viscosity)

$$1\ \frac{\text{ft}^2}{\text{s}} = \frac{(0{,}3048)^2\ \text{m}^2}{\text{s}} = 0{,}092\ 903\ 04\ \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \qquad \text{(exact)}$$

$$1\ \frac{\text{ft}^2}{\text{h}} = \frac{(0{,}3048)^2\ \text{m}^2}{3600\ \text{s}} = 0{,}000\ 025\ 806\ 4\ \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \qquad \text{(exact)}$$

$$1\ \frac{\text{in}^2}{\text{s}} = \frac{(0{,}0254)^2\ \text{m}^2}{\text{s}} = 0{,}000\ 645\ 16\ \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \qquad \text{(exact)}$$

$$1\ \frac{\text{in}^2}{\text{h}} = \frac{(0{,}0254)^2\ \text{m}^2}{3600\ \text{s}} = 0{,}000\ 000\ 179\ 211\ 111\ 1\ \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

5.24. Massastroom (E : mass rate of flow), (norm)gewichtsstroom

a. Massastroom in het stelsel met massa als basisgrootheid (ft-lb-s-stelsel)

$$1 \frac{\text{pound}}{\text{second}} = 1 \frac{\text{lb}}{\text{s}} = 0{,}453\ 592\ 37 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$= 27{,}215\ 542\ 20 \frac{\text{kg}}{\text{min}}$$

$$= 1632{,}932\ 532 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$1 \frac{\text{pound}}{\text{minute}} = 1 \frac{\text{lb}}{\text{min}} = 0{,}453\ 592\ 37 \frac{\text{kg}}{\text{min}}$$

$$= 0{,}007\ 559\ 872\ 833 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$= 27{,}215\ 542\ 20 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$1 \frac{\text{pound}}{\text{hour}} = 1 \frac{\text{lb}}{\text{h}} = 0{,}453\ 592\ 37 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$= 0{,}007\ 559\ 872\ 833 \frac{\text{kg}}{\text{min}}$$

$$= 0{,}000\ 125\ 997\ 880\ 6 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$1 \frac{\text{UK ton}}{\text{hour}} = 1 \frac{\text{UKton}}{\text{h}} = \frac{2240\ \text{lb}}{\text{h}} = \frac{1016{,}046\ 909\ \text{kg}}{3600\ \text{s}} = 0{,}282\ 235\ 252\ 5 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$1 \frac{\text{US ton}}{\text{hour}} = 1 \frac{\text{USton}}{\text{h}} = \frac{2000\ \text{lb}}{\text{h}} = \frac{907{,}184\ 74\ \text{kg}}{3600\ \text{s}} = 0{,}251\ 995\ 761\ 1 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

b. (Norm)gewichtsstroom in het stelsel met kracht als basisgrootheid (ft-lbf-s-stelsel)

$$1 \frac{\text{pound-force}}{\text{second}} = 1 \frac{\text{lbf}}{\text{s}} = 0{,}453\ 592\ 37 \frac{\text{kgf}}{\text{s}}$$

$$= 27{,}215\ 542\ 20 \frac{\text{kgf}}{\text{min}}$$

$$= 1632{,}932\ 532 \frac{\text{kgf}}{\text{h}}$$

$$1\ \frac{\text{pound-force}}{\text{minute}} = 1\ \frac{\text{lbf}}{\text{min}} = 0{,}453\ 592\ 37\ \frac{\text{kgf}}{\text{min}}$$

$$= 0{,}007\ 559\ 872\ 833\ \frac{\text{kgf}}{\text{s}}$$

$$= 27{,}215\ 542\ 20\ \frac{\text{kgf}}{\text{h}}$$

$$1\ \frac{\text{pound-force}}{\text{hour}} = 1\ \frac{\text{lbf}}{\text{h}} = 0{,}453\ 592\ 37\ \frac{\text{kgf}}{\text{h}}$$

$$= 0{,}007\ 559\ 872\ 833\ \frac{\text{kgf}}{\text{min}}$$

$$= 0{,}000\ 125\ 997\ 880\ 6\ \frac{\text{kgf}}{\text{s}}$$

5.25. Volumestroom (E : volume rate of flow)

$$1\ \frac{\text{cubic foot}}{\text{second}} = 1\ \text{CFS} = 1\ \text{cfs} = 1\ \frac{\text{ft}^3}{\text{s}}$$

$$= \frac{(0{,}3048)^3\ \text{m}^3}{\text{s}} = 0{,}028\ 316\ 846\ 59\ \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$= 1{,}699\ 010\ 795\ \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

$$= 101{,}940\ 647\ 7\ \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$1\ \frac{\text{cubic foot}}{\text{minute}} = 1\ \text{CFM} = 1\ \text{cfm} = 1\ \frac{\text{ft}^3}{\text{min}}$$

$$= \frac{(0{,}3048)^3\ \text{m}^3}{60\ \text{s}} = 0{,}000\ 471\ 947\ 443\ 2\ \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$= 0{,}028\ 316\ 846\ 59\ \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

$$= 1{,}699\ 010\ 795\ \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$1\ \frac{\text{cubic foot}}{\text{hour}} = 1\ \frac{\text{ft}^3}{\text{h}} = \frac{(0{,}3048)^3\ \text{m}^3}{3600\ \text{s}} = 0{,}000\ 007\ 865\ 790\ 719\ \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$= 0{,}000\ 471\ 947\ 443\ 1\ \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

$$= 0{,}028\ 316\ 846\ 59\ \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$1\ \frac{\text{UK gallon}}{\text{second}} = 1\ \frac{\text{UKgal}}{\text{s}} = \frac{0{,}004\ 546\ 09\ \text{m}^3}{\text{s}} = 0{,}004\ 546\ 09\ \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$= 0{,}272\ 765\ 4\ \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

$$= 16{,}365\ 924\ \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$1\ \frac{\text{UK gallon}}{\text{minute}} = 1\ \text{GPM (UK)} = 1\ \text{gpm (UK)}$$

$$= \frac{0{,}004\ 546\ 09\ \text{m}^3}{60\ \text{s}} = 0{,}000\ 075\ 768\ 166\ 67\ \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$= 0{,}004\ 546\ 09\ \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

$$= 0{,}272\ 765\ 4\ \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$1\ \frac{\text{UK gallon}}{\text{hour}} = 1\ \frac{\text{UKgal}}{\text{h}} = \frac{0{,}004\ 546\ 09\ \text{m}^3}{3600\ \text{s}} = 0{,}000\ 001\ 262\ 802\ 778\ \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$= 0{,}000\ 075\ 768\ 166\ 68\ \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

$$= 0{,}004\ 546\ 09\ \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$1\ \frac{\text{US gallon}}{\text{second}} = 1\ \frac{\text{USgal}}{\text{s}} = \frac{0{,}003\ 785\ 411\ 784\ \text{m}^3}{\text{s}} = 0{,}003\ 785\ 411\ 784\ \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$= 0{,}227\ 124\ 707\ \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

$$= 13{,}627\ 482\ 42\ \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$1\ \frac{\text{US gallon}}{\text{minute}} = 1\ \text{GPM (US)} = 1\ \text{gpm (US)}$$

$$= \frac{0{,}003\ 785\ 411\ 784\ \text{m}^3}{60\ \text{s}} \quad 0{,}000\ 063\ 090\ 196\ 40\ \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$= 0{,}003\ 78[illegible]\ 411\ 784\ \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

$$= 0{,}227\ 124\ 707\ 0\ \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$1\ \frac{\text{US gallon}}{\text{hour}} = 1\ \frac{\text{USgal}}{\text{h}} = \frac{0{,}003\ 785\ 411\ 784\ \text{m}^3}{3600\ \text{s}} = 0{,}000\ 001\ 051\ 503\ 273\ \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$= 0{,}000\ 063\ 090\ 196\ 38\ \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

$$= 0{,}003\ 785\ 411\ 784\ \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

5.26. Weerstandswaarde van regelkleppen (E : capacity index of valves, flow coefficient of valves)

Wat betreft de weerstandswaarde van regelkleppen bij aanwending van Angelsaksische eenheden, en de berekening van de overeenstemmende waarde bij het gebruik van andere eenhedenstelsels, wordt verwezen naar Hoofdstuk XIV, onder 2.3.16.

5.27. Hoeveelheid stof (E : amount of substance)

De SI-eenheid van hoeveelheid stof is de mol (in het Engels : mole, symbool mol); dit is de hoeveelheid stof van een systeem dat evenveel elementaire deeltjes (atomen, molekulen, ionen, ...) bevat als er atomen zijn in 0,012 kilogram ^{12}C . Als veelvoud van de mol heeft men : 1 kmol = 1000 mol. Vroeger werd de mol (met een andere definitie) beschouwd als een individuele eenheid van massa, en mocht men schrijven : 1 mol = M_r g (met M_r = relatieve molekuulmassa); thans dient men te schrijven : 1 mol $\hat{=}$ M_r g (zie Hoofdstuk VI, onder 8.).

In de Angelsaksische landen kende men de eenheden pound-mole (lb-mole), gramme-mole (g-mole) en kilogramme-mole (kg-mole), die we hier beschouwen als individuele eenheden van massa :

1 lb-mole = M_r lb
1 g-mole = M_r g $\hat{=}$ 1 mol
1 kg-mole = M_r kg $\hat{=}$ 1 kmol

Hieruit volgt :

1 lb-mole = 0,453 592 37 kg-mole
$\hat{=}$ 0,453 592 37 kmol
= 453,592 37 g-mole
$\hat{=}$ 453,592 37 mol (SI)

Opmerking : De pound-mole (lb-mole) werd ook kortweg mole genoemd. Dit kan er aanleiding toe geven, de aldus genoemde pound-mole te verwarren met de SI-eenheid mol (in het Engels : mole, symbool : mol).

$$1 \text{ g-mole} = \frac{1}{453,592\ 37} \text{ lb-mole} = 0,002\ 204\ 622\ 622 \text{ lb-mole}$$

$$\hat{=} 1 \text{ mol}$$

$$1 \text{ kg-mole} = \frac{1}{0,453\ 592\ 37} \text{ lb-mole} = 2,204\ 622\ 622 \text{ lb-mole}$$

$$\hat{=} 1 \text{ kmol}$$

Voorbeeld :

Zuurstof O_2, met $M_r = 2 \times 15,9994 = 31,9988 \approx 32$

$$1 \text{ lb-mole } O_2 = 32 \text{ lb } O_2$$

$$= 32 \times 0,453\ 592\ 37 \text{ kg } O_2 = 14,514\ 955\ 84 \text{ kg } O_2$$

$$= 0,435\ 592\ 37 \text{ kg-mole } O_2$$

$$\hat{=} 0,453\ 592\ 37 \text{ kmol } O_2$$

$$= 453,592\ 37 \text{ g-mole } O_2$$

$$\hat{=} 453,592\ 37 \text{ mol } O_2$$

$$1 \text{ g-mole } O_2 = 32 \text{ g } O_2$$

$$= \frac{32}{453,592\ 37} \text{ lb } O_2 = 0,070\ 547\ 923\ 9 \text{ lb } O_2$$

$$= \frac{1}{453,592\ 37} \text{ lb-mole } O_2 = 0,002\ 204\ 622\ 622 \text{ lb-mole } O_2$$

$$\hat{=} 1 \text{ mol } O_2$$

$$\hat{=} 0,001 \text{ kmol } O_2$$

$$1 \text{ kg-mole } O_2 = 32 \text{ kg } O_2$$

$$= \frac{32}{0,453\ 592\ 37} \text{ lb } O_2 = 70,547\ 923\ 90 \text{ lb } O_2$$

$$= \frac{1}{0,453\ 592\ 37} \text{ lb-mole } O_2 = 2,204\ 622\ 622 \text{ lb-mole } O_2$$

$$\hat{=} 1 \text{ kmol } O_2$$

$$\hat{=} 1000 \text{ mol } O_2$$

Hierbij valt op te merken dat in het TS en in het ft-lbf-s-stelsel respektievelijk de eenheden kg en lb niet voorkomen (de betrokken eenheden behoren tot andere eenhedenstelsels). Wanneer men nu het TS stelsel en het ft-lbf-s-stelsel konsekwent wil toepassen, dient men te schrijven (met kgf en lbf als eenheden van normgewicht) :

- in het TS :

$$1 \text{ kmol} \triangleq M_r \text{ kgf}$$

- in het ft-lbf-s-stelsel :

$$1 \text{ lb-mole} \triangleq M_r \text{ lbf}$$

5.28. Molair volume (E : molar volume)

Het molair volume is het volume per hoeveelheid stof :

$$V_m = \frac{V}{n}$$

De SI-eenheid van molair volume is : $\frac{m^3}{mol}$

Angelsaksische eenheden van molair volume zijn : $\frac{ft^3}{lb\text{-mole}}$; $\frac{ft^3}{g\text{-mole}}$; $\frac{ft^3}{kg\text{-mole}}$ (met dien verstande dat de eenheden lb-mole, g-mole en kg-mole eigenlijk individuele eenheden van massa zijn, en niet van hoeveelheid stof, zie onderhavig hoofdstuk onder 5.27.).

Tussen bovenstaande Angelsaksische eenheden en de overeenkomstige SI-eenheid geldt volgend verband :

$$1 \frac{ft^3}{lb\text{-mole}} \triangleq \frac{(0,3048)^3 \ m^3}{453,592\ 37 \ mol} = 0,000\ 062\ 427\ 960\ 57 \frac{m^3}{mol}$$

$$1 \frac{ft^3}{g\text{-mole}} \triangleq \frac{(0,3048)^3 \ m^3}{mol} = 0,028\ 316\ 846\ 59 \frac{m^3}{mol}$$

$$1 \frac{ft^3}{kg\text{-mole}} \triangleq \frac{(0,3048)^3 \ m^3}{1000 \ mol} = 0,000\ 028\ 316\ 846\ 59 \frac{m^3}{mol}$$

Het molair normvolume V_{mn} is het volume per hoeveelheid stof bij een druk gelijk aan de normale atmosferische druk (101 325 Pa) en bij een temperatuur gelijk aan 0 °C (≙ 273,15 K).

Het molair normvolume van een ideaal gas bedraagt :

$$V_{mn} = 22{,}413\ 83 \cdot 10^{-3}\ \frac{m^3}{mol}$$

$$= 22{,}413\ 83\ \frac{m^3}{kmol}$$

$$= 22{,}413\ 83\ \frac{dm^3}{mol}$$

$$= 22{,}413\ 83 \cdot 10^{-3} \times \frac{(\frac{1}{0{,}3048})^3\ ft^3}{\frac{1}{453{,}592\ 37}\ lb\text{-}mole} = 359{,}035\ 115\ \frac{ft^3}{lb\text{-}mole}$$

$$= 22{,}413\ 83 \cdot 10^{-3} \times \frac{(\frac{1}{0{,}3048})^3\ ft^3}{g\text{-}mole} = 0{,}791\ 536\ 937\ \frac{ft^3}{g\text{-}mole}$$

$$= 791{,}536\ 9\ 7\ \frac{ft^3}{kg\text{-}mole}$$

5.29. Molaire (of algemene of universele) gaskonstante; specifieke gaskonstante (E : *molar gas constant; specific gas constant*)

5.29.1. Toestandsvergelijking van een ideaal gas en berekening van de molaire gaskonstante en de specifieke gaskonstante

5.29.1.1. *Eenhedenstelsels met massa als basisgrootheid*

a. SI (zie ook Hoofdstuk XIV, onder 2.3.1.)

- Toestandsvergelijking van een ideaal gas toegepast op 1 kg gas :

$$p \cdot v = R \cdot T$$

met R = specifieke gaskonstante

$$[p] = Pa \qquad [v] = \frac{m^3}{kg} \qquad [R] = \frac{J}{kg \cdot K} \qquad [T] = K$$

- Toestandsvergelijking van een ideaal gas toegepast op 1 mol gas ($\hat{=} M_r$ g):

$$p \cdot M \cdot v = p \cdot V_m = n \cdot R \cdot T = \mathfrak{R} \cdot T$$

met $\mathfrak{R}$ = molaire gaskonstante

$$M = \frac{m}{n} = \text{molaire massa} = M_r\ \frac{g}{mol} = M_r\ \frac{kg}{kmol} = \frac{M_r}{1000}\ \frac{kg}{mol}$$

Wanneer p = normale atmosferische druk = 101 325 Pa en T = 273,15 K, is $V_m = V_{mn} = 0{,}022\ 413\ 83\ \frac{m^3}{mol}$. Dit laat toe de molaire gaskonstante $\mathcal{R}$ te berekenen :

$$\mathcal{R} = \frac{101\ 325\ Pa\ .\ 0{,}022\ 413\ 83\ \frac{m^3}{mol}}{273{,}15\ K} = 8{,}314\ 41\ \frac{J}{mol\ .\ K}$$

$$= 8314{,}41\ \frac{J}{kmol\ .\ K}$$

De specifieke gaskonstante R wordt berekend als volgt :

$$R = \frac{\mathcal{R}}{M} = \frac{8314{,}41\ \frac{J}{kmol\ .\ K}}{M_r\ \frac{kg}{kmol}} = \frac{8314{,}41}{M_r}\ \frac{J}{kg\ .\ K}$$

b. ft-lb-s-stelsel

- Toestandsvergelijking van een ideaal gas toegepast op 1 lb gas :

$$p\ .\ v = R\ .\ T$$

met R = specifieke gaskonstante

$$[p] = \frac{pdl}{ft^2} \qquad [v] = \frac{ft^3}{lb} \qquad [R] = \frac{ft\ .\ pdl}{lb\ .\ °R} \qquad [T] = °R$$

- Toestandsvergelijking van een ideaal gas toegepast op 1 lb-mole gas (= M_r lb) :

$$p\ .\ M\ .\ v = p\ .\ V_m = M\ .\ R\ .\ T = \mathcal{R}\ .\ T$$

met $\mathcal{R}$ = molaire gaskonstante

$M = \frac{m}{n}$ = molaire massa = $M_r\ \frac{lb}{lb\text{-}mole}$

Wanneer p = normale atmosferische druk = 68 087,256 39 $\frac{pdl}{ft^2}$ en T = 491,67 °R (≙ 32 °F ≙ 0 °C ≙ 273,15 K), is $V_m = V_{mn} = 359{,}035\ 115\ \frac{ft^3}{lb\text{-}mole}$.
Dit laat toe de molaire gaskonstante $\mathcal{R}$ te berekenen :

$$\mathcal{R} = \frac{68\ 087{,}256\ 39\ \frac{pdl}{ft^2}\ .\ 359{,}035\ 115\ \frac{ft^3}{lb\text{-}mole}}{491{,}67\ °R} = 49\ 719{,}76\ \frac{ft\ .\ pdl}{lb\text{-}mole\ .\ °R}$$

Indien men als eenheid van energie Btu neemt in plaats van ft . pdl, bekomt men (met 1 Btu = 25 036,855 63 ft . pdl) :

$$\mathcal{R} = \frac{49\ 719{,}76}{25\ 036{,}855\ 63}\ \frac{Btu}{lb\text{-}mole\ .\ °R} = 1{,}985\ 863\ \frac{Btu}{lb\text{-}mole\ .\ °R}$$

De specifieke gaskonstante R wordt berekend als volgt :

$$R = \frac{\mathcal{R}}{M} = \frac{49\ 719{,}76\ \frac{\text{ft . pdl}}{\text{lb-mole . °R}}}{M_r\ \frac{\text{lb}}{\text{lb-mole}}} = \frac{49\ 719{,}76}{M_r}\ \frac{\text{ft . pdl}}{\text{lb . °R}}$$

$$= \frac{1{,}985\ 863\ \frac{\text{Btu}}{\text{lb-mole . °R}}}{M_r\ \frac{\text{lb}}{\text{lb-mole}}} = \frac{1{,}985\ 863}{M_r}\ \frac{\text{Btu}}{\text{lb . °R}}$$

c. Gemengd stelsel met eenheden uit het ft-lb-s-stelsel en het MKS-stelsel

- Toestandsvergelijking van een ideaal gas toegepast op 1 kg gas :

$$p \cdot v = R \cdot T$$

met R = specifieke gaskonstante

$$[p] = \frac{\text{pdl}}{\text{ft}^2} \qquad [v] = \frac{\text{ft}^3}{\text{kg}} \qquad [R] = \frac{\text{ft . pdl}}{\text{kg . °R}} \qquad [T] = \text{°R}$$

- Toestandsvergelijking van een ideaal gas toegepast op 1 g-mole gas (= M_r g)

$$p \cdot M \cdot v = p \cdot V_m = M \cdot R \cdot T = \mathcal{R} \cdot T$$

met $\mathcal{R}$ = molaire gaskonstante

$$M = \frac{m}{n} = \text{molaire massa} = M_r\ \frac{\text{g}}{\text{g-mole}} = M_r\ \frac{\text{kg}}{\text{kg-mole}} = \frac{M_r}{1000}\ \frac{\text{kg}}{\text{g-mole}}$$

Wanneer p = normale atmosferische druk = 68 087,256 39 $\frac{\text{pdl}}{\text{ft}^2}$ en T = 491,67 °R (≙ 32 °F ≙ 0 °C ≙ 273,15 K) is $V_m = V_{mn}$ = 0,791 536 937 $\frac{\text{ft}^3}{\text{g-mole}}$.
Dit laat toe de molaire gaskonstante $\mathcal{R}$ te berekenen :

$$\mathcal{R} = \frac{68\ 087{,}256\ 39\ \frac{\text{pdl}}{\text{ft}^2} \cdot 0{,}791\ 536\ 937\ \frac{\text{ft}^3}{\text{g-mole}}}{491{,}67\ \text{°R}} = 109{,}613\ 31\ \frac{\text{ft . pdl}}{\text{g-mole . °R}}$$

$$= 109\ 613{,}31\ \frac{\text{ft . pdl}}{\text{kg-mole . °R}}$$

Indien men als eenheid van energie Btu neemt in plaats van ft . pdl, bekomt men (met 1 Btu = 25 036,855 63 ft . pdl) :

$$\mathcal{R} = \frac{109\ 613{,}31}{25\ 036{,}855\ 63}\ \frac{\text{Btu}}{\text{kg-mole . °R}} = 4{,}378\ 078\ \frac{\text{Btu}}{\text{kg-mole . °R}}$$

De specifieke gaskonstante R wordt berekend als volgt :

$$R = \frac{\mathcal{R}}{M} = \frac{109\ 613{,}31\ \frac{\text{ft . pdl}}{\text{kg-mole . °R}}}{M_r\ \frac{\text{kg}}{\text{kg-mole}}} = \frac{109\ 613{,}31}{M_r}\ \frac{\text{ft . pdl}}{\text{kg . °R}}$$

$$= \frac{4{,}378\ 078\ \frac{\text{Btu}}{\text{kg-mole . °R}}}{M_r\ \frac{\text{kg}}{\text{kg-mole}}} = \frac{4{,}378\ 078}{M_r}\ \frac{\text{Btu}}{\text{kg . °R}}$$

5.29.1.2. *Eenhedenstelsels met kracht als basisgrootheid*

a. TS (zie ook Hoofdstuk XIV, onder 2.3.1.)

- Toestandsvergelijking van een ideaal gas toegepast op 1 kgf gas :

$$p \,.\, v^{\star} = R^{\star} \,.\, T$$

met $R^{\star}$ = specifieke gaskonstante

$$[p] = \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} \qquad [v^{\star}] = \frac{\text{m}^3}{\text{kgf}} \qquad [R^{\star}] = \frac{\text{kgf . m}}{\text{kgf . °K}} \qquad [T] = \text{°K}$$

- Toestandsvergelijking van een ideaal gas toegepast op 1 mol gas ($\hat{=} M_r$ gf):

$$p \,.\, M^{\star} \,.\, v^{\star} = p \,.\, V_m = M^{\star} \,.\, R^{\star} \,.\, T = \mathcal{R} \,.\, T$$

met $\mathcal{R}$ = molaire gaskonstante

$$M^{\star} = \frac{G}{n} = \text{molair (norm)gewicht} = M_r\ \frac{\text{gf}}{\text{mol}} = M_r\ \frac{\text{kgf}}{\text{kmol}} = \frac{M_r}{1000}\ \frac{\text{kgf}}{\text{mol}}$$

Wanneer p = normale atmosferische druk = 10 332,274 53 $\frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$ en T = 273,15 °K, is $V_m = V_{mn} = 0{,}022\ 413\ 83\ \frac{\text{m}^3}{\text{mol}}$. Dit laat toe de molaire gaskonstante $\mathcal{R}$ te berekenen :

$$\mathcal{R} = \frac{10\ 332{,}274\ 53\ \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} \,.\, 0{,}022\ 413\ 83\ \frac{\text{m}^3}{\text{mol}}}{273{,}15\ \text{°K}} = 0{,}847\ 834\ \frac{\text{kgf . m}}{\text{mol . °K}}$$

$$= 847{,}834\ \frac{\text{kgf . m}}{\text{kmol . °K}}$$

Indien men als eenheid van energie kcal neemt in plaats van kgf . m, bekomt men (met 1 kcal = 4186,8 J = $\frac{4186{,}8}{9{,}806\ 65}$ kgf . m = 426,934 784 kgf . m):

$$\mathcal{R} = \frac{847{,}834}{426{,}934\ 784}\ \frac{\text{kcal}}{\text{kmol . °K}} = \frac{8314{,}41}{4186{,}8}\ \frac{\text{kcal}}{\text{kmol . °K}} = 1{,}985\ 863\ \frac{\text{kcal}}{\text{kmol . °K}}$$

De specifieke gaskonstante $R^{\star}$ wordt berekend als volgt :

$$R^{\star} = \frac{\mathcal{R}}{M^{\star}} = \frac{847{,}834 \ \frac{\text{kgf . m}}{\text{kmol . °K}}}{M_r \ \frac{\text{kgf}}{\text{kmol}}} = \frac{847{,}834}{M_r} \ \frac{\text{kgf . m}}{\text{kgf . °K}}$$

$$= \frac{1{,}985\ 863 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kmol . °K}}}{M_r \ \frac{\text{kgf}}{\text{kmol}}} = \frac{1{,}985\ 863}{M_r} \ \frac{\text{kcal}}{\text{kgf . °K}}$$

b. ft-lbf-s-stelsel

- Toestandsvergelijking van een ideaal gas toegepast op 1 lbf gas :

$$p \ . \ v^{\star} = R^{\star} \ . \ T$$

met $R^{\star}$ = specifieke gaskonstante

$$\left[p \right] = \frac{\text{lbf}}{\text{ft}^2} \qquad \left[v^{\star} \right] = \frac{\text{ft}^3}{\text{lbf}} \qquad \left[R^{\star} \right] = \frac{\text{ft . lbf}}{\text{lbf . °R}} \qquad \left[T \right] = \text{°R}$$

- Toestandsvergelijking van een ideaal gas toegepast op 1 lb-mole gas ($\hat{=} M_r$ lbf) :

$$p \ . \ M^{\star} \ . \ v^{\star} = p \ . \ V_m = M^{\star} \ . \ R^{\star} \ . \ T = \mathcal{R} \ . \ T$$

met $\mathcal{R}$ = molaire gaskonstante

$$M^{\star} = \frac{G_n}{n} = \text{molair (norm)gewicht} = M_r \ \frac{\text{lbf}}{\text{lb-mole}}$$

Wanneer p = normale atmosferische druk = 2116,216 624 $\frac{\text{lbf}}{\text{ft}^2}$ en T = 491,67 °R ($\hat{=}$ 32 °F $\hat{=}$ 0 °C $\hat{=}$ 273,15 K), is $V_m = V_{mn} = 359{,}035\ 115 \ \frac{\text{ft}^3}{\text{lb-mole}}$.
Dit laat toe de molaire gaskonstante $\mathcal{R}$ te berekenen :

$$\mathcal{R} = \frac{2116{,}216\ 624 \ \frac{\text{lbf}}{\text{ft}^2} \ . \ 359{,}035\ 115 \ \frac{\text{ft}^3}{\text{lb-mole}}}{491{,}67 \ \text{°R}} = 1545{,}3375 \ \frac{\text{ft . lbf}}{\text{lb-mole . °R}}$$

Indien men als eenheid van energie Btu neemt in plaats van ft . lbf, bekomt men (met 1 Btu = 778,169 262 ft . lbf) :

$$\mathcal{R} = \frac{1545{,}3375}{778{,}169\ 262} \ \frac{\text{Btu}}{\text{lb-mole . °R}} = 1{,}985\ 863 \ \frac{\text{Btu}}{\text{lb-mole . °R}}$$

De specifieke gaskonstante R^* wordt berekend als volgt :

$$R^* = \frac{\mathcal{R}}{M^*} = \frac{1545{,}3375 \ \frac{\text{ft . lbf}}{\text{lb-mole . °R}}}{M_r \ \frac{\text{lbf}}{\text{lb-mole}}} = \frac{1545{,}3375}{M_r} \ \frac{\text{ft . lbf}}{\text{lbf . °R}}$$

$$= \frac{1{,}985\ 863 \ \frac{\text{Btu}}{\text{lb-mole . °R}}}{M_r \ \frac{\text{lbf}}{\text{lb-mole}}} = \frac{1{,}985\ 863}{M_r} \ \frac{\text{Btu}}{\text{lbf . °R}}$$

c. Gemengd stelsel met eenheden uit het ft-lbf-s-stelsel en eenheden uit het TS

- Toestandsvergelijking van een ideaal gas toegepast op 1 kgf gas :

$$p \ . \ v^* = R^* \ . \ T$$

met R^* = specifieke gaskonstante

$$\left[p\right] = \frac{\text{lbf}}{\text{ft}^2} \qquad \left[v^*\right] = \frac{\text{ft}^3}{\text{kgf}} \qquad \left[R^*\right] = \frac{\text{ft . lbf}}{\text{kgf . °R}} \qquad \left[T\right] = \text{°R}$$

- Toestandsvergelijking van een ideaal gas toegepast op 1 g-mole gas ($\hat{=} M_r$ gf) :

$$p \ . \ M^* \ . \ v^* = p \ . \ V_m = M^* \ . \ R^* \ . \ T = \mathcal{R} \ . \ T$$

met $\mathcal{R}$ = molaire gaskonstante

$$M^* = \frac{G_n}{n} = \text{molair (norm)gewicht} = M_r \ \frac{\text{gf}}{\text{g-mole}} = M_r \ \frac{\text{kgf}}{\text{kg-mole}} = \frac{M_r}{1000} \ \frac{\text{kgf}}{\text{g-mole}}$$

Wanneer p = normale atmosferische druk = 2116,216 624 $\frac{\text{lbf}}{\text{ft}^2}$ en T = 491,67 °R ($\hat{=}$ 32 °F $\hat{=}$ 0 °C $\hat{=}$ 273,15 K), is $V_m = V_{mn}$ = 0,791 536 937 $\frac{\text{ft}^3}{\text{g-mole}}$.
Dit laat toe de molaire gaskonstante $\mathcal{R}$ te berekenen :

$$\mathcal{R} = \frac{2116{,}216\ 624 \ \frac{\text{lbf}}{\text{ft}^2} \ . \ 0{,}791\ 536\ 937 \ \frac{\text{ft}^3}{\text{g-mole}}}{491{,}67 \ \text{°R}} = 3{,}406\ 886 \ \frac{\text{ft . lbf}}{\text{g-mole . °R}}$$

$$= 3406{,}886 \ \frac{\text{ft . lbf}}{\text{kg-mole . °R}}$$

Indien men als eenheid van energie Btu neemt in plaats van ft . lbf, bekomt men (met 1 Btu = 778,169 262 ft . lbf) :

$$\mathcal{R} = \frac{3406{,}886}{778{,}169\ 262} \ \frac{\text{Btu}}{\text{kg-mole . °R}} = 4{,}378\ 078 \ \frac{\text{Btu}}{\text{kg-mole . °R}}$$

De specifieke gaskonstante $R^{\star}$ wordt berekend als volgt :

$$R^{\star} = \frac{\mathcal{R}}{M^{\star}} = \frac{3406{,}886 \ \frac{\text{ft . lbf}}{\text{kg-mole . °R}}}{M_r \ \frac{\text{kgf}}{\text{kg-mole}}} = \frac{3406{,}886}{M_r} \ \frac{\text{ft . lbf}}{\text{kgf . °R}}$$

$$= \frac{4{,}378\ 078 \ \frac{\text{Btu}}{\text{kg-mole . °R}}}{M_r \ \frac{\text{kgf}}{\text{kg-mole}}} = \frac{4{,}378\ 078}{M_r} \ \frac{\text{Btu}}{\text{kgf . °R}}$$

5.29.1.3. *Samenvatting*

$$\mathcal{R} = 8{,}314\ 41 \ \frac{\text{J}}{\text{mol . K}}$$

$$= 8314{,}41 \ \frac{\text{J}}{\text{kmol . K}}$$

$$= 49\ 719{,}76 \ \frac{\text{ft . pdl}}{\text{lb-mole . °R}} = 1{,}985\ 863 \ \frac{\text{Btu}}{\text{lb-mole . °R}}$$

$$= 109\ 613{,}31 \ \frac{\text{ft . pdl}}{\text{kg-mole . °R}} = 4{,}378\ 078 \ \frac{\text{Btu}}{\text{kg-mole . °R}}$$

$$= 847{,}834 \ \frac{\text{kgf . m}}{\text{kmol . °K}} = 1{,}985\ 863 \ \frac{\text{kcal}}{\text{kmol . °K}}$$

$$= 1545{,}3375 \ \frac{\text{ft . lbf}}{\text{lb-mole . °R}} = 1{,}985\ 863 \ \frac{\text{Btu}}{\text{lb-mole . °R}}$$

$$= 3406{,}886 \ \frac{\text{ft . lbf}}{\text{kg-mole . °R}} = 4{,}378\ 078 \ \frac{\text{Btu}}{\text{kg-mole . °R}}$$

$$R = \frac{\mathcal{R}}{M} = \frac{8314{,}41}{M_r} \ \frac{\text{J}}{\text{kg . K}}$$

$$= \frac{49\ 719{,}76}{M_r} \ \frac{\text{ft . pdl}}{\text{lb . °R}} = \frac{1{,}985\ 86}{M_r} \ \frac{\text{Btu}}{\text{lb . °R}}$$

$$= \frac{109\ 613{,}31}{M_r} \ \frac{\text{ft . pdl}}{\text{kg . °R}} = \frac{4{,}378\ 078}{M_r} \ \frac{\text{Btu}}{\text{kg . °R}}$$

$$R^{\star} = \frac{\mathcal{R}}{M^{\star}} = \frac{847{,}834}{M_r} \ \frac{\text{kgf . m}}{\text{kgf . °K}} = \frac{1{,}985\ 863}{M_r} \ \frac{\text{kcal}}{\text{kgf . °K}}$$

$$= \frac{1545{,}3375}{M_r} \ \frac{\text{ft . lbf}}{\text{lbf . °R}} = \frac{1{,}985\ 863}{M_r} \ \frac{\text{Btu}}{\text{lbf . °R}}$$

$$= \frac{3406{,}886}{M_r} \ \frac{\text{ft . lbf}}{\text{kgf . °R}} = \frac{4{,}378\ 0}{M_r} \ \frac{\text{Btu}}{\text{kgf . °R}}$$

5.29.1.4. *Voorbeeld van berekening van een specifieke gaskonstante*

Bereken de specifieke gaskonstante van lucht (beschouwd als een ideaal gas) met :

M = molaire massa = $\frac{28,95}{1000}\ \frac{kg}{mol} = 28,95\ \frac{kg}{kmol} = 28,95\ \frac{g}{mol} \hat{=} 28,95\ \frac{lb}{lb\text{-}mole}$

$M^{\star}$ = molair (norm)gewicht = $\frac{28,95}{1000}\ \frac{kgf}{mol} = 28,95\ \frac{kgf}{kmol} = 28,95\ \frac{gf}{mol} \hat{=} 28,95\ \frac{lbf}{lb\text{-}mole}$

M_r = relatieve molekuulmassa = 28,95

Men bekomt :

$R = \frac{8314,41}{28,95}\ \frac{J}{kg\ .\ K} = 287,199\ \frac{J}{kg\ .\ K}$ (SI)

$= \frac{49\ 719,76}{28,95}\ \frac{ft\ .\ pdl}{lb\ .\ °R} = 1717,436\ \frac{ft\ .\ pdl}{lb\ .\ °R}$

$= \frac{1,985\ 863}{28,95}\ \frac{Btu}{lb\ .\ °R} = 0,068\ 596\ \frac{Btu}{lb\ .\ °R}$

$= \frac{109\ 613,31}{28,95}\ \frac{ft\ .\ pdl}{kg\ .\ °R} = 3786,297\ \frac{ft\ .\ pdl}{kg\ .\ °R}$

$= \frac{4,378\ 078}{28,95}\ \frac{Btu}{kg\ .\ °R} = 0,151\ 229\ \frac{Btu}{kg\ .\ °R}$

$R^{\star} = \frac{847,834}{28,95}\ \frac{kgf\ .\ m}{kgf\ .\ °K} = 29,286\ \frac{kgf\ .\ m}{kgf\ .\ °K}$ (TS)

$= \frac{1,985\ 863}{28,95}\ \frac{kcal}{kgf\ .\ °K} = 0,068\ 596\ \frac{kcal}{kgf\ .\ °K}$

$= \frac{1545,3375}{28,95}\ \frac{ft\ .\ lbf}{lbf\ .\ °R} = 53,380\ \frac{ft\ .\ lbf}{lbf\ .\ °R}$

$= \frac{1,985\ 863}{28,95}\ \frac{Btu}{lbf\ .\ °R} = 0,068\ 596\ \frac{Btu}{lbf\ .\ °R}$

$= \frac{3406,886}{28,95}\ \frac{ft\ .\ lbf}{kgf\ .\ °R} = 117,682\ \frac{ft\ .\ lbf}{kgf\ .\ °R}$

$= \frac{4,378\ 078}{28,95}\ \frac{Btu}{kgf\ .\ °R} = 0,151\ 229\ \frac{Btu}{kgf\ .\ °R}$

5.29.2. Angelsaksische eenheden waarin de molaire gaskonstante wordt uitgedrukt

a. Stelsel met massa als basisgrootheid (ft-lb-s-stelsel)

$$1\ \frac{\text{ft . pdl}}{\text{lb-mole . °R}} \triangleq \frac{0{,}3048\ \text{m . } 0{,}453\ 592\ 37\ \text{kg . } 0{,}3048\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{453{,}592\ 37\ \text{mol . } \frac{5}{9}\ \text{K}}$$

$$\triangleq 0{,}000\ 167\ 225\ 472\ \frac{\text{J}}{\text{mol . K}}$$

$$\triangleq 0{,}167\ 225\ 472\ \frac{\text{J}}{\text{kmol . K}}$$

$$1\ \frac{\text{ft . pdl}}{\text{kg-mole . °R}} \triangleq \frac{0{,}3048\ \text{m . } 0{,}453\ 592\ 37\ \text{kg . } 0{,}3048\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{1000\ \text{mol . } \frac{5}{9}\ \text{K}}$$

$$\triangleq 0{,}000\ 075\ 852\ 198\ 18\ \frac{\text{J}}{\text{mol . K}}$$

$$\triangleq 0{,}075\ 852\ 198\ 18\ \frac{\text{J}}{\text{kmol . K}}$$

b. Stelsel met kracht als basisgrootheid (ft-lbf-s-stelsel)

$$1\ \frac{\text{ft . lbf}}{\text{lb-mole . °R}} \triangleq \frac{0{,}3048\ \text{m . } 0{,}453\ 592\ 37\ \text{kgf}}{0{,}453\ 592\ 37\ \text{kmol . } \frac{5}{9}\ \text{°K}} = 0{,}548\ 64\ \frac{\text{kgf . m}}{\text{kmol . °K}}$$

$$\triangleq \frac{0{,}3048\ \text{m . } 0{,}453\ 592\ 37\ \text{kg . } 9{,}806\ 65\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{453{,}592\ 37\ \text{mol . } \frac{5}{9}\ \text{K}}$$

$$\triangleq 0{,}005\ 380\ 320\ 456\ \frac{\text{J}}{\text{mol . K}}$$

$$\triangleq 5{,}380\ 320\ 456\ \frac{\text{J}}{\text{kmol . K}}$$

$$1\ \frac{\text{ft . lbf}}{\text{kg-mole . °R}} \triangleq \frac{0{,}3048\ \text{m . } 0{,}453\ 592\ 37\ \text{kgf}}{\text{kmol . } \frac{5}{9}\ \text{°K}} \quad 0{,}248\ 858\ 918\ 0\ \frac{\text{kgf . m}}{\text{kmol . °K}}$$

$$\triangleq \frac{0{,}3048\ \text{m . } 0{,}453\ 592\ 37\ \text{kg . } 9{,}806\ 65\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{1000\ \text{mol . } \frac{5}{9}\ \text{K}}$$

$$\triangleq 0{,}002\ 440\ 472\ 308\ \frac{\text{J}}{\text{mol . K}}$$

$$\triangleq 2{,}440\ 472\ 308\ \frac{\text{J}}{\text{kmol . K}}$$

5.29.3. Angelsaksische eenheden waarin de specifieke gaskonstante wordt uitgedrukt

a. Specifieke gaskonstante R in het stelsel met massa als basisgrootheid (ft-lb-s-stelsel) $\left(\text{met } R = \frac{p \cdot V}{m \cdot T} = \frac{p \cdot v}{T} = \frac{n \cdot \mathcal{R}}{m} = \frac{\mathcal{R}}{M}\right)$

$$1\ \frac{\text{ft} \cdot \text{pdl}}{\text{lb} \cdot {}^\circ\text{R}} = \frac{0{,}3048\ \text{m} \cdot 0{,}453\ 592\ 37\ \text{kg} \cdot 0{,}3048\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{0{,}453\ 592\ 37\ \text{kg} \cdot \frac{5}{9}\ \text{K}} = 0{,}167\ 225\ 472\ 0\ \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$1\ \frac{\text{ft} \cdot \text{pdl}}{\text{kg} \cdot {}^\circ\text{R}} = \frac{0{,}3048\ \text{m} \cdot 0{,}453\ 592\ 37\ \text{kg} \cdot 0{,}3048\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{\text{kg} \cdot \frac{5}{9}\ \text{K}} = 0{,}075\ 852\ 198\ 18\ \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

b. Specifieke gaskonstante R^* in het stelsel met kracht als basisgrootheid (ft-lbf-s-stelsel) $\left(\text{met } R^* = \frac{p \cdot V}{G_n \cdot T} = \frac{p \cdot v^*}{T} = \frac{n \cdot \mathcal{R}}{G_n} = \frac{\mathcal{R}}{M^*}\right)$

$$1\ \frac{\text{ft} \cdot \text{lbf}}{\text{lbf} \cdot {}^\circ\text{R}} = \frac{0{,}3048\ \text{m} \cdot 0{,}453\ 592\ 37\ \text{kgf}}{0{,}453\ 592\ 37\ \text{kgf} \cdot \frac{5}{9}\ {}^\circ\text{K}} = 0{,}548\ 640\ \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{kgf} \cdot {}^\circ\text{K}}$$

$$\triangleq 0{,}548\ 640 \times 9{,}806\ 65\ \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} = 5{,}380\ 320\ 456\ \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$1\ \frac{\text{ft} \cdot \text{lbf}}{\text{kgf} \cdot {}^\circ\text{R}} = \frac{0{,}3048\ \text{m} \cdot 0{,}453\ 592\ 37\ \text{kgf}}{\text{kgf} \cdot \frac{5}{9}\ {}^\circ\text{K}} = 0{,}248\ 858\ 918\ 0\ \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{kgf} \cdot {}^\circ\text{K}}$$

$$\triangleq 0{,}248\ 858\ 918 \times 9{,}806\ 65\ \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} = 2{,}440\ 472\ 308\ \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

6. De getalwaarden "million", "billion", "trillion" en "quadrillion" enerzijds in Groot-Brittannië (UK) en de overige Europese landen en anderzijds in de Verenigde Staten van Noord-Amerika (USA)

In Groot-Brittannië (UK), zoals trouwens in al de Europese landen, geldt, in overeenstemming overigens met een beslissing van de 9de CGPM (1948) :

1 million = 10^6 (= 1 miljoen)

1 billion = 10^{12} (= 1 biljoen = miljoen tot de tweede macht)

1 trillion = 10^{18} (= 1 triljoen = miljoen tot de derde macht)

1 quadrillion = 10^{24} (= 1 quadriljoen = miljoen tot de vierde macht)

In de Verenigde Staten van Noord-Amerika (USA) echter gelden volgende waarden :

1 million = 10^6 (= 1000 x 1000 = 1 miljoen)
1 billion = 10^9 (= 1000 x $(1000)^2$ = 1 miljard)
1 trillion = 10^{12} (= 1000 x $(1000)^3$)
1 quadrillion = 10^{15} (= 1000 x $(1000)^4$)

De Britse norm BS 350 : Part 1 : 1974 (Conversion factors and tables, Part 1. Basis of tables . Conversion factors) vermeldt hieromtrent op blz. 4 :
"In view of the differences between European and USA practice, ambiguities can easily arise with the words "billion", "trillion" and "quadrillion", therefore their use should be avoided".

7. Overgang naar het SI in Groot-Brittannië (UK) en de Verenigde Staten van Noord-Amerika (USA)

In de uitgave van 1972 en van 1978 van de publikatie "The use of SI Units" (uitgegeven door het British Standards Institution) wordt hieromtrent in de inleiding het volgende medegedeeld.

☆ The use of SI Units (PD 5686 : 1972)

Introduction

The International System of units has received worldwide acceptance and in almost every country legislation based on the SI either exists or is being introduced. Legislation is already established in some 25 countries, including for example France, Germany, USSR, Czechoslovakia and India.

In October 1971 the Council of Ministers of the European Economic Community (EEC) ratified a Directive on units which commits all member countries to amend legislation in terms of SI units within 18 months of that date and to implement all the provisions of the Directive within a further 5 years. Further details of the EEC Directive are given later.

In the United Kingdom it was decided in 1969 that the SI would become the primary system of measurement in this country. The subsequent decision by Parliament that Britain should become a member of EEC will hasten this process.

The position is also developing in the United States of America, where a 3-year study has now been completed on behalf of the Department of Commerce to determine the advantages and disadvantages of increased use of the metric system in the USA. As a result of this detailed study the Secretary of Commerce recommended to Congress in July 1971 that the United States should change to the International System of metric units over a period of 10 years by which time the country will have become predominantly metric. The SI is already being used and actively promoted by many important organizations within USA; it has now been established as a truly international system of units not only in name but in fact.

The SI is a coherent system of units. Thus the SI unit of area results when the SI unit of length is squared, the SI unit of velocity results when the SI unit of length is divided by the SI unit of time, and the SI unit of force results when the SI unit of mass is multiplied by the SI unit of acceleration. No numerical factors other than unity are involved.

☆ The use of SI Units (PD 5686 : 1978)

Introduction

With the exception of a very few developing countries, every country in the world has either adopted the SI in legislation or is in the process of doing so. In the United Kingdom it was decided in 1969 that the SI would become the primary system of units. The subsequent decision by Parliament that the United Kingdom should become a member of the European Economic Community (EEC) has hastened this process.

In October 1971 the Council of Ministers of the EEC ratified a Directive (71/354/EEC) on units which committed all member states to amend legislation to authorize SI units within eighteen months of that

data and to implement all provisions of the Directive within a further five years. On the accession of the United Kingdom to the Community the Directive was amended to include imperial units in an additional annex and to require the future use of imperial units to be decided by 31 August 1976 at the latest. An amending Directive (76/770/EEC), ratified by the Council of Ministers in July 1976, mitigates the obligations assumed under the Treaty of Accession and more accurately reflects the progress of metrication in the United Kingdom. The more important requirements of these Directives are described on page 4.

In the United States of America in 1975 President Ford signed the Metric Conversion Act which declared a national policy for coordinating the increasing use of the metric system in the USA and which established a Metric Board. On 10 December 1976 the Federal Register contained a notice defining the units of the SI. The Metric Commission of Canada will work closely with the US Metric Board to coordinate planning of the progressive changeover. The SI is already being actively promoted and used by many important organizations within the USA, so that it has now been established as a truly international system of units not only in name but in fact.

In the earlier metric systems the decimal connection between units of different size for the same quantity aided both memory and calculation. In the SI there is the very important added advantage of coherence between the units for every quantity, thus removing all awkward factors in calculations involving quantity relations.

GERAADPLEEGDE LITERATUUR

☆☆☆☆☆☆

☆ Le Système International d'Unités (SI)
Bureau International des Poids et Mesures
Pavillon de Breteuil, F-92310 Sèvres, France
- 3e Edition, 1977
  44 pages, 29,5 cm x 21 cm
- 4e Edition, 1981
  50 pages, 29,5 cm x 21 cm
- 5e Edition, 1985
  Textes français et anglais
  110 pages, 29,5 cm x 21 cm

☆☆☆

☆ De EEG-richtlijnen inzake de onderlinge aanpassing van de wetgevingen der lidstaten op het gebied van de meeteenheden (zie Hoofdstuk I, onder 1.4.)

☆ De Belgische wetgeving inzake eenheden (zie Hoofdstuk I, onder 2.1.1.)

☆ De Nederlandse wetgeving inzake eenheden (zie Hoofdstuk I, onder 2.2.1.)

☆☆☆

☆ De Belgische normen inzake grootheden en eenheden (zie Hoofdstuk I, onder 2.1.2.)

☆ De Nederlandse normen inzake grootheden en eenheden (zie Hoofdstuk I, onder 2.2.2.)

☆☆☆

☆ Norme internationale ISO 31/0 : Principes généraux concernant les grandeurs, les unités et les symboles
- première édition : 1974-04-01
- deuxième édition : 1981-07-01

☆ Norme internationale ISO 1000 : Unités SI et recommandations pour l'emploi de leurs multiples et de certaines unités
- première édition : 1973-02-01
- deuxième édition : 1981-02-15

☆ Catalogue des publications de la CEI, 1986
Normes mondiales pour l'électricité et l'électronique
Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale
Rue de Varembé 3, 1211 Genève 20, Suisse

☆☆☆

☆ Briefwisseling met :

- Ministerie van Ekonomische Zaken, Administratie van de Handel, Metrologische Dienst, J.-A. De Motstraat 24-26, 1040 Brussel
- Dienst van het IJkwezen, Van Swinden Laboratorium, Schoemakerstraat 97, 2628 VK Delft
- Belgisch Instituut voor Normalisatie, Brabançonnelaan 29, 1040 Brussel
- Koninklijke Sterrenwacht van België, Ringlaan 3, 1180 Brussel

☆☆☆

☆ DIN 1301 Teil 1 : Einheiten : Einheitennamen, Einheitenzeichen (Oktober 1978)

Beiblatt 1 zu DIN 1301 Teil 1 : Einheiten : Einheitenähnliche Namen und Zeichen (April 1982)

Teil 2 : Einheiten : Allgemein angewendete Teile und Vielfache (Februar 1978)

Teil 3 : Einheiten : Umrechnungen für nicht mehr anzuwendende Einheiten (Oktober 1979)

☆ DIN 1313 : Physikalische Gröszen und Gleichungen : Begriffe, Schreibweisen (April 1978)

☆ DIN 1304 : Allgemeine Formelzeichen
Februar 1978

☆ DIN 1304 : Beiblatt 1 : Allgemeine Formelzeichen : Zusammenhang mit Internationalen Normen
April 1979

☆ DIN 1305 : Gewicht, Masse, Menge
2. Ausg. Juli 1938

☆ DIN 1305 : Masse, Gewicht, Gewichtskraft, Fallbeschleunigung
Juni 1968

☆ DIN 1305 : Masse, Kraft, Gewichtskraft, Gewicht, Last
Mai 1977

☆ DIN 1306 : Dichte
August 1958

☆ DIN 1306 : Dichte
März 1967

☆ DIN 1306 : Dichte
Dezember 1971

☆ DIN 1306 : Dichte
Juni 1984

☆ DIN 1314 : Druck
Mai 1956

☆ DIN 1314 : Druck
März 1966

☆ DIN 1314 : Druck
Dezember 1971

☆ DIN 1314 : Druck
Februar 1977

☆ DIN 1343 : Normzustand, Normvolumen
November 1975

☆ DIN 5490 : Gebrauch der Wörter bezogen, spezifisch, relativ, normiert und reduziert
April 1974

☆ DIN Taschenbuch 22 : Einheiten und Begriffe für physikalische Grösen; Normen; AEF-Taschenbuch 1
6. Auflage, 1984
398 Seiten, 21 cm x 15 cm
Beuth Verlag GMBH, Berlin, Köln

☆☆☆

☆ The International System of units (SI)
12 pages, 30 cm x 21 cm
BS 3763 : 1970
British Standards Institution, 1970

☆ The International System of units (SI)
10 pages, 30 cm x 21 cm
BS 3763 : 1976
British Standards Institution, 1976

☆ The use of SI Units
28 pages, 30 cm x 21 cm
PD 5686 : 1972
British Standards Institution, 1972

☆ The use of SI Units
26 pages, 30 cm x 21 cm
PD 5686 : 1978
British Standards Institution, 1978

☆ Conversion factors and tables
100 pages, 30 cm x 21 cm
BS 350 : Part 1 : 1974
British Standards Institution, 1974

☆☆☆

☆ NBN L 01-001 : Fotometrische woordenlijst - Begrippen - Grootheden - Eenheden
3^{de} uitgave (1980)

☆ DIN 5031 : Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik
- Beiblatt 1 : Inhaltsverzeichnis über Grösszen, Formelzeichen und Einheiten sowie Stichwortverzeichnis zu DIN 5031 Teil 1 bis Teil 10
November 1982
- Teil 1 : Grösszen, Formelzeichen und Einheiten der Strahlungsphysik
März 1982
- Teil 2 : Strahlungsbewertung durch Empfänger
März 1982
- Teil 3 : Grösszen, Formelzeichen und Einheiten der Lichttechnik
März 1982
- Teil 4 : Wirkungsgrade
März 1982
- Teil 5 : Temperaturbegriffe
März 1982
- Teil 6 : Pupillen-Lichtstärke als Masz für die Netzhautbeleuchtung
März 1982
- Teil 7 : Benennung der Wellenlängenbereiche
Januari 1984
- Teil 8 : Strahlungsphysikalische Begriffe und Konstanten
März 1982
- Teil 9 : Lumineszenz-Begriffe
März 1982
- Teil 10 : Grösszen, Formel- und Kurzzeichen für photobiologisch wirksame Strahlung
(Vornorm)
November 1979

☆☆☆

☆ Use of the International System of Units in the Plant Sciences
M.J. Savage
HortScience, Vol. 14(4), August 1979, p.492-495

☆ Guidelines for Measuring and Reporting the Environment for Plant Studies
Growth Chamber Working Group of the American Society for Horticultural Science
HortScience, Vol. 15(6), December 1980, p. 719-720

☆ Photometric, Radiometric, and Quantum Light Units of Measure : A review of Procedures for Interconversion
Richard W. Thimijan and Royal D. Heins
HortScience, Vol. 18(6), December 1983, p. 818-822

☆☆☆

☆ NBN S 01-002 : Fysische niveaus en subjektief niveau van een toon of van een geluid en luidheidschaal
2de uitgave, oktober 1974

☆ NBN S 01-003 : Normale lijnen van gelijke luidheid voor zuivere tonen beluisterd in vrij veld en binaurale gehoordrempel in vrij veld
2de uitgave, november 1974

☆ NBN S 01-004 : Normale frekwenties voor akoestische metingen
2de uitgave, oktober 1974

☆ NBN C 97-121 : Precisiegeluidspeilmeters - Sonomètres de précision
2de uitgave, april 1979

☆ DIN 1318 : Lautstärkepegel : Begriffe, Meszverfahren
September 1970

☆ DIN 45630 : Grundlagen der Schallmessung :
- Teil 1 : Physikalische und subjektive Gröszen von Schall
Dezember 1971
- Teil 2 : Normalkurven gleicher Lautstärkepegel
September 1967

☆☆☆

☆ NBN 361 (thans niet meer geldig) : Het praktische eenhedenstelsel
41 blz., 29,5 cm x 21 cm
Belgisch Instituut voor Normalisatie, 1956

☆ Messen und Rechnen in der Physik
2., verbesserte und ergänzte Auflage
471 Seiten, 27 cm x 19,5 cm
von Dr. Phil. Habil. Ulrich Stille
Verlag Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1961

☆ Die Umstellung auf das Internationale Einheitensystem in Mechanik und Wärmetechnik
Zweite, verbesserte und erweiterte Auflage
138 Seiten, 18,5 cm x 12,5 cm
von Horst Wolfhard Hahnemann
VDI-Verlag, Düsseldorf, 1964

☆ Toward the International System of Units
92 pages, 21 cm x 15 cm
by Dr. Walter Haeder
Beuth-Vertrieb, Berlin, Köln, Frankfurt (M), 1964

☆ Der Sprung vom pound und pound-force zum kilogramme und newton
70 Seiten, 21 cm x 14,5 cm
von Dr. Walter Haeder
Beuth-Vertrieb, Berlin, Köln, Frankfurt (M), 1966

☆ Die Sorgenkinder der Technik : Kraft, Masse, Gewicht
Zweite neubearbeitete und erweiterte Auflage
48 Seiten, 21 cm x 15 cm
von Dr. Walter Haeder, Dipl.-Ing. Nikolaus Ludwig und Dipl.-Ing. Rudolf Muschalla
Beuth-Vertrieb, Berlin, Köln, Frankfurt, 1967

☆ Die Krafteinheit "Newton" in Berechnungen der Technik
Zweite neubearbeitete und erweiterte Auflage
44 Seiten, 21 cm x 14,5 cm
von Dr. Walter Haeder
Beuth-Vertrieb, Berlin, Köln, Frankfurt, 1967

☆ Newton-Kilopond
32 Seiten, 21 cm x 14,5 cm
von Dr. Walter Haeder und Ernst Gärtner
Beuth-Vertrieb, Berlin, Köln, Frankfurt (M), 1967

☆ Internationale overeenkomsten inzake metrologie
door Ir. J.L.J. Claesen
Artikel verschenen in "Het ingenieursblad", orgaan van de Koninklijke Vlaamse Ingenieursvereniging
Jaargang 38, nr. 20, 16 oktober 1969, blz. 559-569

☆ Handel und Wirtschaft und das "Einheitengesetz"
96 Seiten, 21 cm x 14,5 cm
von Dr. Walter Haeder und Ernst Gärtner
Beuth-Vertrieb, Berlin, Köln, Frankfurt (Main), 1971

☆ Von der Königlichen Elle zum Meter : Chronologie einer technisch-wissenschaftlichen Entwicklung
72 Seiten, 21 cm x 15 cm
von Dr. Walter Haeder
Beuth-Vertrieb, Berlin, Köln, Frankfurt (Main), 1973

☆ Die neuen gesetzlichen Einheiten
221 Seiten, 20 cm x 12 cm
von Theodor Sexauer
Verlag C.F. Müller, Karlsruhe, 1973

☆ Einheitenlexikon
Vierte, völlig neubearbeitete Auflage
300 Seiten, 16,5 cm x 10,5 cm
von Alfred Sacklowski unter Mitarbeit von Professor Emanuel Röhrl
Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1973

☆ Die gesetzlichen Einheiten in der Technik
Vierte, neubearbeitete und erweiterte Auflage
224 Seiten, 21 cm x 14,5 cm
von Dr. Walter Haeder und Ernst Gärtner
Beuth-Vertrieb, Berlin, Köln, Frankfurt (Main), 1974

☆ Eenheid in eenheden
128 blz., 29 cm x 20,5 cm
met bijdragen van Ing. J. Bosschaart, Ir. J.P.M. van Elk, Ir. J. van Male, S.J.C.S. Schrooten en Ir. H. Wieringa, in samenwerking met het Nederlands Normalisatie-instituut (eindredaktie Ir. J. van Male)
Stichting Teleac - Utrecht, 1975

☆ Einheiten, Gröszen, Gleichungen und ihre praktische Anwendung
3., *verbesserte* Auflage
238 Seiten, 23 cm x 16,5 cm
von Dipl.-Ing. Hans Förster
VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1976

☆ Einheiten und Gröszenarten der Naturwissenschaften
3., neubearbeitete Auflage
380 Seiten, 19 cm x 12 cm
von Dr. phil. Erna Padelt und Dr. rer. nat. Hansgeorg Laporte
VEB Fachbuchverlag, Leipzig, 1976

☆ Das System Internationaler Einheiten SI
64 Seiten, 23 cm x 16,5 cm
von G. Oberdorfer
Springer-Verlag, Wien, New-York, 1977

☆ SI : Het internationale stelsel van eenheden
72 blz., 21,5 cm x 14,5 cm
door Ir. L. Suetens
Standaard Uitgeverij, 1977

☆ SI *vademecum*
210 blz., 15 cm x 10,5 cm
door Ir. J. van Male
Elsevier, Amsterdam, Brussel, 1978

☆ Grootheid = getal x eenheid
Moderne ontwikkelingen op het gebied van symbolen en eenheden
achtste druk (1979)
79 blz., 29 cm x 20,5 cm
door Ing. J. Bosschaart
Uitgegeven door het Polytechnisch Tijdschrift, orgaan van de Nederlandse Ingenieursvereniging niria

☆ Grootheden en eenheden in de landbouw en de biologie
122 blz., 24 cm x 17 cm
door K. Schurer & J.C. Rigg
Centrum voor Landbouwpublikaties en Landbouwdokumentatie, Wageningen, 1980

EENHEDENREGISTER

a : zie jaar

A_{int} 4, 153, 158

aanvullende eenheden in het SI 48, 342 - 345

absolute elektrische eenheden (1948) 154 - 162

absolute praktische elektrische eenheden (1881) 148 - 153

acre 415, 534, 644

AE 418 - 419

afgeleide SI-eenheden met een eigen benaming 346 - 348

ampère 4 - 5, 48, 148 - 150, 152 - 157, 170, 342 - 343

ampère uur 368 - 370

ampère-winding 157

amu 220, 225

Angelsaksische eenheden 620 - 687

Angelsaksische eenheden van :

- arbeid 661 - 663
- druk 652 - 660
- dynamische viskositeit 667 - 668
- energie 661 - 663
- hoeveelheid stof 672 - 674
- inhoud 645
- kinematische viskositeit 668
- koncentratie 648 - 649
- kracht 650 - 652
- lengte 644
- massa 645
- massastroom 669 - 670
- molair volume 674 - 675
- moment van een kracht 660 - 661
- oppervlakte 644
- snelheid 649 - 650
- soortelijke entalpie 664 - 665
- soortelijke massa 645 - 647
- soortelijke warmtekapaciteit 665
- soortelijk gewicht 645 - 647
- soortelijk volume 647
- spanning (mechanische spanning) 652 - 660
- temperatuur, temperatuurverschil 665
- tijd 649
- verbrandingswarmte 664 - 665
- vermogen 663 - 664
- versnelling 650
- volume 645
- volumestroom 670 - 671
- warmte 661 - 663
- warmtedoorgang per oppervlakte en tijd 667
- warmtedoorgangskoëfficiënt 666
- warmtegeleidingskoëfficiënt 666
- warmte-inhoud 664 - 665
- weerstandswaarde van regelkleppen 672, 568 - 576

ångström 247, 410

apostilb 272

apothecaries' drachm (UK) 630

apothecaries' dram (US) 630

apothecaries' ounce 630 - 631

apothecaries' pound 630

apothecaries' scruple 630

are 104, 358 - 359, 361, 366 - 367

assay ton (UK) 629

assay ton (US) 629

astronomical unit 418

astronomische eenheid 416 - 419

at 68, 360, 388, 402, 409, 659

ata 68

atm 388, 402 - 403, 410, 658

atmosfeer :

- normale atmosfeer 6, 388, 402 - 403, 410, 658

- technische atmosfeer 68, 360, 388, 402, 409, 659

ato 68

atomic mass unit 220, 225

atomic weight unit 219, 225

atoommassa-eenheid (u) 224 - 225, 358 - 359, 364 - 365, 367 - 368

atto (voorvoegsel) 354

atü 68

AU 418

avoirdupois dram 628

avoirdupois ounce 416, 628

avoirdupois pound 628

awu 219, 225

bar 358 - 361, 366 - 367, 403, 659

barn 358 - 359, 361 - 362, 366 - 367

barrel :

- beer barrel (UK) 637

- cranberry barrel (US) 638

- dry barrel (US) 637 - 638

- petroleum barrel (US) 636

- wine barrel (UK) 637

baryе 121

bbl = barrel (US, for petroleum) 636

bbl (dry) = dry barrel (US) 637 - 638

becquerel 8, 347, 411 - 412

beer barrel (UK) 637

bel 306

biot 141 - 142

board foot 634

bougie :

- bougie décimale 274

- bougie internationale 274

- bougie nouvelle 5, 275

British thermal unit 195, 199 - 206, 211, 662

bushel :

- dry bushel (US bushel) 627, 637 - 638

- international corn bushel 628

- UK bushel 627, 635, 638

1^{C} (decimale hoekminuut) 283 - 285

1^{CC} (decimale hoeksekonde) 284 - 285

°C (graad Celsius) 7, 175, 180, 183 - 188, 349

calorie 195 - 198, 201 - 206, 210 - 212, 388, 409

candela 5, 7 - 8, 48, 258 - 259, 262, 265, 267 - 268, 273, 275 - 276, 342 - 343

carcel 273

cc 409

cental (UK) 451, 629

centi (voorvoegsel) 119, 354

centiare 366 - 367

centigraad (hoek) 283

centigrade (F) = 1^{C} 284

centigrade (UK, US) = 1 °C 175, 180, 183 - 188, 348

Centigrade heat unit 199 - 201, 211

Centigrade thermal unit 199 - 201, 211

centimeter 119 - 120

centipoise 122, 401

centistokes 123, 402

centweight 629

CGS-eenheden :

- mechanische eenheden 121 - 123

- elektromagnetische eenheden 123 - 138

- elektrostatische eenheden 123 - 138

chain :
- chain 631, 644
- engineer's chain, Ramsden's chain 632
- Gunter's chain 631
chaldron (UK) 636
circular mil 633
cord 635
corn bushel 628
coulomb 4, 52, 148 - 150, 153, 157, 347
cran (UK) 635
cranberry barrel (US) 638
ctl (UK) 629
cubic inch 624, 634, 645
cubic foot 624, 634, 645
cubic yard 624, 634, 645
curie 411
cwt (UK) 629

dag 89, 109, 358, 363, 365 - 366
dalton 219 - 220, 225
dB (A), dB (B), dB (C) 337 - 339
deci (voorvoegsel) 354
decibel 51, 306 - 310, 337 - 339, 370 - 371
decimale (hoek)graad 283 - 285, 358, 363, 365 - 368, 410
decimale (hoek)minuut 283 - 285
decimale (hoek)sekonde 283 - 285
decimale kaars 274
degré (F) = 1° 284, 363
degree (UK, US) = 1° 284, 363
deka (voorvoegsel) 119, 354
dioptrie 358 - 359, 362, 366
drachm :
- apothecaries' drachm (UK) 630
- drachm (UK) 630
- fluid drachm (UK) 635, 638
dram :
- apothecaries' dram (US) 630
- avoirdupois dram (US) 628
- dram (UK) 628
- fluid dram (US) 636, 638
- liquid dram (US) 636, 638
dry barrel (US) 637 - 638
dry bushel (US) 637 - 638
dry pint (US) 637 - 638
dry quart (US) 637 - 638
duim : zie inch
dwt (US) 630
dyne 119, 121 - 122, 410, 414

eenheden :
- van energie in de warmteleer 195 - 212
- van het CGS-stelsel 120 - 143
- van het ft-lb-s-stelsel (English absolute system) 639 - 640
- van het ft-lbf-s-stelsel (English gravitational system) 640 - 642
- van het KS (kwadrantstelsel) 148 - 153
- van het metriek stelsel 104 - 106
- van het MKS-stelsel 143 - 147
- van het MKSA-stelsel 154 - 158
- van het MTS-stelsel 147
- van de neo-CGS-stelsels 139 - 141
- van het SI 46 - 49, 52, 341 - 357
- van het TS (technisch stelsel) 374 - 408
efemeridensekonde 6, 114
einstein 278
elektronvolt 358 - 359, 364, 366 - 368
em-CGS-eenheden 128 - 130, 132 - 133, 138

engineer's chain 632
erg 119, 121 - 122, 410, 414
erkende eenheden die niet tot het SI behoren 358 - 370
es-CGS-eenheden 127 - 128, 132 - 133, 138
exa (voorvoegsel) 354

°F (graad Fahrenheit) 175, 184 - 188
farad 4, 52, 148 - 150, 153, 157, 347
fathom 415, 632
fbm 634
feet board measure 634
femto (voorvoegsel) 354
fluid drachm (UK) 635, 638
fluid dram (US) 636, 638
fluid ounce :
- UK fluid ounce 415, 635, 638
- US fluid ounce 636, 638
fluid scruple (UK) 635
fonometrische eenheden 327 - 333
foon 328 - 332, 334 - 335
foot :
- foot 415, 631, 644
- board foot 634
- US survey foot 623 - 624
footcandle 272
footlambert 272
foot of water 657
foot poundal 640, 661
foot pound-force 208, 642, 661
fotometrische eenheden 254 - 268, 271 - 276
franklin 139, 142
frigorie 409
furlong 631, 644

fysische atmosfeer (atm) 6, 388, 402 - 403, 410, 658

g 283 - 284, 410
gal 121, 410, 414
gallon :
- UK gallon, imperial gallon 415, 625 - 626, 635, 638, 645
- US gallon 626 - 627, 636, 638, 645
gauss 130, 133, 138, 414
geografische mijl 632
geq 227 - 233, 241
geünificeerde atoommassa-eenheid (u) 224 - 225, 358 - 359, 364 - 365, 367 - 368
giga (voorvoegsel) 354
gilbert 130, 133, 138, 414
gill :
- UK gill 415, 635, 638
- US gill 636, 638
gon 283 - 285, 358, 363, 365 - 368, 410
graad (hoek) 281 - 283, 358, 363, 365 - 366
graad Celsius 7, 175, 180, 183 - 188, 348
graad Fahrenheit 175, 184 - 188
graad Kelvin 6 - 7, 172, 178, 342
graad Rankine 179, 184 - 188
grade (F) = decimale graad 284, 363
grade décimal (F) 363
grain 622 - 623, 628, 631
grain-force 451, 651
grain-weight (US) 451, 651
gram 96, 119 - 120, 355
gram-atoom 216
gramekwivalent 227 - 233
gramkracht (gf, g') 172, 435

gramme-mole 672 - 673
gram-mol 216 - 219
gram-molekuul 216
gray 8, 347, 411 - 413
grondeenheden in het SI 48, 342 - 343
gross ton (US) 629
Gunter's chain 631

hand (US) 632
hectopièze 147
Hefner-Kerze 273
hektare 366 - 367
hekto (voorvoegsel) 119, 354
henry 4, 150, 153, 157, 347
hertz 347
hoekgraad 281 - 283, 358, 363, 365 - 366
hoekminuut 281 - 283, 358, 363, 365 - 366
hoeksekonde 281 - 283, 358, 363, 365 - 366
horsepower 388, 399, 642, 664
horsepower hour 642, 662
hundredweight :
- hundredweight (UK) 451, 629
- hundredweight (US) 629
- long hundredweight (US) 451, 629
- short hundredweight (US) 451, 629
Hyl (D) 381, 641

imperial bushel 627, 635, 638
imperial gallon 415, 625 - 626, 635, 638, 645
imperial nautical mile 94, 631
inch 415, 621, 623, 631, 644
inch of mercury 658
inch of water 657
international candle 274
international candle power 274
international corn bushel 628
internationale ampère 4, 153, 158
internationale elektrische eenheden (1908) 4, 5, 153 - 154, 158 - 159
internationale joule 153 - 154, 158 - 159, 201 - 202, 211
internationale kaars 274
internationale knoop 649
internationale ohm 4, 153, 158
internationale tafel(kilo)calorie 202 - 206
internationale volt 153, 158
internationale watt 153, 158 - 159
internationale zeemijl 94, 631
international knot 649
international nautical mile 94, 631
international table British thermal unit 202 - 206

J_{int} 153 - 154, 158 - 159, 201 - 202, 211
jaar 109
joule 4, 5, 51 - 52, 60, 144, 149 - 153, 156, 195, 204, 210 - 212, 347, 408

°K (graad Kelvin) 6 - 7, 172, 178, 342
karaat 362
kelvin 6 - 7, 48, 172, 178 - 180, 183 - 188, 342 - 343
keq 232, 241
kilo (voorvoegsel) 119, 354
kilocalorie 195 - 198, 202 - 207, 210 - 212, 388, 401, 408 - 409
kilo-ekwivalent 232, 241
kilogram 4, 48 - 49, 60, 95 - 104, 342, 354 - 355

kilogramkracht 60, 62 - 63, 374 - 378, 398, 409, 414, 435

kilogram(kracht) meter 60, 63, 207, 386, 400, 408, 642

kilogramme des archives 97, 99, 104

kilogramme-mole 672 - 673

kilogram-mol 216 - 219

Kilohyl (D) 381, 641

kilo-imperial-pound (US) 651

kilopascal 406

Kilopond (D) 435

kilopound-force 651

kilowatt 150

kilowatt hour 663

kilowatt uur 151, 206, 212, 400, 408, 663

kip (US) 651

knoop 416 - 417, 419, 649

knot :

- international knot 649

- UK knot 650

- US knot 650

KS-eenheden 148 - 153

ksi 653

kval 232, 241

kubieke meter 348

kW_{int} . h 211 - 212

kwadraatgon 287

kwadraatgraad 286

kwadranteenheden 148 - 153

lambert 271

langley 253

lb : zie pound

lbf : zie pound-force

l cwt (US) 629

ligne 632

line 632

link (US) 632

liquid dram (US) 636, 638

liquid ounce (US) 636, 638

liquid pint (US) 636, 638

liquid quart (US) 636, 638

liter 4, 7 - 8, 104 - 106, 358 - 359, 366 - 367

liter atmosfeer 209 - 209, 212, 217, 219, 221

long hundredweight (US) 451, 629

long ton (US) 629

long ton-weight (US) 451, 652

lumen 261, 265, 267, 347

lumen uur 271, 368 - 370

lux 264, 273, 347

massaal 381

massa-eenheid ME 219 - 220, 225

maxwell 130, 133, 138, 414

ME 219 - 220, 225

mega (voorvoegsel) 354

megapascal 406

meq 232, 241

meter 4, 5, 7 - 8, 48, 60, 95 - 104, 342, 374

meter waterkolom 388, 390 - 394, 404, 409

mètre des archives 97, 99, 103

metric horsepower 642, 664

metrieke maat 358 - 359, 362, 365, 366

mikro (voorvoegsel) 354

mikron 7, 247, 354, 409

mijl :

- geografische mijl 632

- zeemijl 93 - 94, 416 - 417, 419, 632

mil 632
mile :
- imperial nautical mile 631
- international nautical mile 631
- mile (UK) 415, 631, 644
- statute mile (US) 631
- telegraph nautical mile 631
- UK nautical mile 631
- US nautical mile 631
milli (voorvoegsel) 119, 354
millibar 403
milli-ekwivalent 232, 241
milli-inch 632
millilambert 271
millimeter kwik(kolom) 358 - 359, 364 - 366, 388, 394 - 398, 405, 409
millimeter waterkolom 388, 390 - 394, 404, 409
millival 232, 241
minim :
- UK minim 635, 638
- US minim 636, 638
minuut (hoek) 281 - 283, 358, 363, 365 - 366
minuut (tijd) 89, 109, 358, 363, 365 - 366
MKS-eenheden 143 - 147
MKSA-eenheden 154 - 158
mol 8, 48, 216 - 224, 244, 342 - 343, 672 - 674
MTS-eenheden 147
mval 232, 241

nano (voorvoegsel) 354
nautical mile 94, 631
neper 51, 306 - 310, 370 - 371
Neugrad (D) 284
Neuminute (D) 284
Neusekonde (D) 284
newton 5, 52, 60, 143, 156, 347
newton meter 51, 144, 151 - 152
nit 271
normaal kubieke meter 68 - 69
normale atmosfeer (atm) 6, 388, 402 - 403, 410, 658

Ω_{int} 4, 153, 158
oersted 130, 133, 138, 414
ohm 4, 52, 148-150, 152 - 153, 156, 347
omwenteling 288 - 291, 363
ounce :
- apothecaries' ounce 630 - 631
- avoirdupois ounce (US) 628
- fluid ounce (UK) 415, 635, 638
- fluid ounce (US) 636, 638
- liquid ounce (US) 636, 638
- ounce (UK) 416, 628
- troy ounce 416, 630 - 631
ounce-force 651
ounce-weight (US) 651
oz : zie ounce

paardekracht 388, 399, 408 - 409, 642, 664
paardekracht uur 208, 212, 388, 400, 409, 642, 663
parsec 416 - 419
pascal 8, 52, 144, 347, 405 - 406, 660
pc 418 - 419
peck :
- UK peck 635, 638
- US peck 637 - 638
pennyweight 451, 630

pentane candle 273
perch, pole 632
peta (voorvoegsel) 354
petroleum barrel (US) 636
phot 272 - 273
piko (voorvoegsel) 354
pièze 147
pint :
- dry pint (US) 637 - 638
- liquid pint (US) 636, 638
- UK pint 415, 635, 638
pond 98, 435
Pond (D) 435
point (US) 632
poise 122, 401, 410, 414
poiseuille 401
pound :
- pound 416, 620 - 623, 628, 642 - 643, 645
- apothecaries' pound 630
- avoirdupois pound 416, 628, 642 - 643, 645
- troy pound 630
poundal 639 - 640, 650
pound-force 451, 640 - 643, 651
pound-force foot 660
pound-mole 672 - 673
pound per square inch 388, 405, 653
pound-weight (US) 451, 640, 643, 651
ppb 235, 648 - 649
ppm 235, 648 - 649
psi 388, 405, 653
psia 653
psig 653

quart :
- dry quart (US) 637 - 638
- liquid quart (US) 636, 638
- UK quart 415, 635, 638
quarter (massa, UK) 628
quarter (inhoudsmaat, UK) 636

°R (graad Rankine) 179, 184 - 188
rad (eenheid van geabsorbeerde dosis) 411, 413
radiaal 48, 279 - 280, 299 - 302, 343 - 345
Ramsden's chain 632
rayl 317
registerton 416 - 417, 419, 629, 634
rem 411, 413
revolution 288 - 289
rev/min 288 - 289
rod 632
röntgen 411
rood (UK) 634, 644
Rossini-calorie : zie termochemische calorie
rpm : zie rev/min

scruple :
- apothecaries' scruple (US) 630
- fluid scruple (UK) 635
- scruple (UK) 630
sekonde (hoek) 261 - 283, 358, 363, 365 - 366
sekonde (tijd) 6 - 7, 48, 60, 89, 108 - 109, 114 - 115, 119 - 120, 342, 364
sh cwt (US) 629
shipping ton (US) 629
short hundredweight (US) 451, 629
short ton (US) 629
short ton-weight (US) 652
SI-eenheden 46 - 49, 52, 341 - 357

siemens 5, 8, 157, 347
sievert 8, 347, 411 - 413
slug 641 - 642, 645
slug metric 641, 645
soon 332 - 335
span (US) 632
sperm candle 273
square chain 633
square inch 624, 633, 644
square foot 415, 624, 633, 644
square link 633
square mile 634, 644
square perch 633
square pole 633
square rod 633
square yard 415, 624, 633, 644
standard 635
standard atmosphere (E) 658
statute mile (US) 631
Steam Table British thermal unit 202 - 206
steradiaal 48, 267, 285 - 286, 302 - 303, 343 - 345
stere 410
sthène 147
stilb 271, 409
stone (UK) 628
stokes 122 - 123, 402, 410, 414
stralingseenheden 248 - 253, 268
survey foot 623 - 624

technische atmosfeer (at) 68, 360, 388, 402, 409, 659
technische massa-eenheid 60 - 63, 381, 385 - 386, 641
telegraph nautical mile 631
tera (voorvoegsel) 354
termochemische calorie 201 - 202, 210, 409
tesla 5, 157, 347
tex 358 - 359, 361, 365 - 367
therm 416, 662
thermie 196, 409
toer 66, 288 - 291, 363
toise 94
ton 147, 358 - 359, 365 - 367
ton (*angelsaksische eenheid*) :
- assay ton (UK) 629
- assay ton (US) 629
- gross ton (US) 629
- long ton (US) 629
- short ton (US) 629
- ton (UK) 629
- ton (US) 629

ton-force 451
ton of refrigeration 629
ton-weight (US) 451
torr 358, 388, 395 - 398, 404 - 405, 409
troy ounce 416, 630 - 631
troy pound 630
TS-eenheden 374 - 388

u 224 - 225, 358 - 359, 364 - 365, 367 - 368, 373
UA 418
UK bushel 627, 635, 638
UK gallon 415, 625 - 626, 635, 638, 645
UK knot 650
UK nautical mile 94, 631
UK ton 629
UK ton-force 652
US bushel 627, 637 - 638

US gallon 626 - 627, 636, 638, 645
US knot 650
US nautical mile 94, 631
US survey foot 623 - 624
US ton 629
US ton-force 652
uur 89, 109, 358, 363, 365 - 366, 368 - 370

V_{eff} 69
V_{int} 153, 158
val 232, 241
var 69 - 70, 348
Vereins-Paraffinkerze 273
vervallen eenheden 409 - 415
vierkante meter 348
Violle-eenheid 274
voet : zie foot
volle hoek 280 - 281, 358, 363, 365 - 366
volt 4, 52, 148 - 150, 152 - 153, 156, 347
volt ampère 70, 348
volt ampère reaktief 70

W_{int} 153, 158 - 159
warmte-eenheden 195 - 212
watt 4, 52, 60, 144, 150 - 153, 156, 347, 408
watt uur 151, 368 - 370, 400
weber 5, 157, 347
wettelijke eenheden 340 - 370
wine barrel (UK) 637

X-meter 100, 104

yard 415, 620 - 623, 631, 644

zeemijl 93 - 94, 416 - 417, 419, 631 - 632

ALGEMEEN REGISTER
(uitgezonderd eenheden)

aantal elementaire deeltjes 221, 343

aantal molekulen of deeltjes 350

aantal poolparen 353

aantal windingen 353

aantrekkingskracht : zie gravitatiekracht

aanvullende grootheden in het SI 48, 342 - 345

aards zwaarteveld 423 - 429

absolute druk 68

absolute elektrische eenheden (1948) 154 - 162

absolute praktische elektrische eenheden (1881) 148 - 153

absolute temperatuur : zie termodynamische temperatuur

adiabatische expansie in een turbine 593

adiabatische kompressie in turbokompressoren 593

adiabatische stroming 594 - 596

afgeleide eenheid 23, 47 - 49, 346 - 348

afgeleide groothedensoort 22 - 24, 27

afgeleide grootheid 22 - 24, 27, 63 - 68

afgeleide vergelijking 29 - 36

akoestische impedantie 315 - 317

aktiviteit (van radionucliden) 347, 351, 411 - 412

algemene gaskonstante 24, 53, 194 - 195, 217 - 223, 373, 675 - 681, 683

algemene groothedenvergelijking 24 - 36, 43 - 46

Algemene Konferentie voor Maten en Gewichten (CGPM) 1, 4 - 8

Angelsaksische eenhedenstelsels :

- ft-lb-s-stelsel (English absolute system) 639 - 640

- ft-lbf-s-stelsel (English gravitational system) 640 - 642

annus fictus 110

anomalistisch jaar 109 - 111

arbeid 51 - 52, 151 - 152, 347, 350, 661 - 663

arbeidsvermogen van beweging (kinetische energie) 25 - 26, 31 - 33, 350, 493 - 494, 510

arbeidsvermogen van plaats (potentiële energie van plaats) 25 - 26, 350, 491 - 493, 510

areïek 66 - 67

atoomgewicht 213 - 215

atoomgewichtsschalen 213 - 215

atoommassakonstante 224 - 225, 373

atoomnummer 87, 213

atoomtijd 114 - 118

avogadrokonstante 70

BAAS 4, 119

balans (weegschaal) 435 - 440

basisgrootheden in het SI 48, 342

basisgroothedensoort 22 - 24, 46

basisgrootheid 22 - 24, 46 - 49

bel 306

belasting 451 - 452

Belgische normen 16

belichting, belichtingsdosis 264, 351

Bernoulli (wet van Bernoulli) 504 - 519, 596 - 600

Bessel 110

Bessels jaar 110
bestraling, bestralingsdosis 253, 351
bestralingssterkte 251, 277, 351
betrekkingen tussen eenheden 57 - 63
BIH 115 - 116
billion 684 - 685
BIPM 2
bloeddruk 364 - 365
BNM 3
Bouguer 92 - 94
breedte 348
Briggse logaritme 26, 304 - 305
burgerlijk jaar 111 - 112

Cassini 93
CEI 11 - 13
CEI-normen 11 - 13
Celsius 175
celsiustemperatuur :
- empirische celsiustemperatuur 175, 180
- termodynamische celsiustemperatuur 179 - 181, 185, 350
CEN 13
CENELEC 13
CGPM 1, 4 - 8
CGS-stelsel 119 - 143
CIM 3
CIPM 1 - 2
circulatiepomp :
- debiet 577 - 580
- opvoerhoogte 534 - 535
cirkelbeweging 287 - 291, 299 - 301
cirkelfrekwentie (hoekfrekwentie) 294 - 295, 297, 299, 349
Ciscar 96
Comité Européen de Normalisation 13
Commission Electrotechnique Internationale 11 - 13
computertekst 87 - 88
Concordet 95
Coulomb (wetten van Coulomb) :
- elektrostatische wet van Coulomb 124, 162, 165 - 170
- elektromagnetische wet van Coulomb 162, 165 - 170

dag 89
dB (A), dB (B), dB (C) 337 - 339
debiet 68
debiet van een circulatiepomp 577 - 580
de Boer 139
de Borda 95
decibel 51, 306 - 310, 337 - 339, 370 - 371
decimaal teken 84 - 86
decimale getallen 84 - 86
deelstreep (schuine deelstreep) 77 - 78
definitievergelijking 27, 29 - 36, 52
de la Condamine 92, 94
Delambre 96, 103
diameter 348
dikte 348
dimensie 49 - 60
dimensiekontrole 53 - 55
dimensieloze grootheden 51
dimensieloze kengrootheden 55 - 56, 603 - 619
dimensieloze parameters 55 - 56, 603 - 619
dimensiesymbolen 82
dipoolmoment
- elektrisch dipoolmoment 352
- magnetisch dipoolmoment 161, 353

dosisekwivalent 347, 351, 411 - 413

draagvermogen 451 - 452

draaimoment 39 - 43

druk 52, 68, 347, 349, 652 - 660

drukhoogte 496, 511

druk van lichaamsvloeistoffen 364 - 365

drukverval 524 - 533

dynamische druk 512

dynamische viskositeit 561 - 564, 667 - 668

dynamische viskositeit :

- CGS-stelsel 122
- MKS-stelsel (en SI) 144, 349
- TS 387

EEG 14 - 15

EEG-richtlijnen 14 - 15, 340 - 341, 361 - 362, 365

eenhedenkontrole 53 - 55

eenhedenstelsels :

- absolute elektrische eenheden (1948) 154 - 162
- absolute praktische elektrische eenheden (1881) 148 - 153
- CGS-stelsel 119 - 143
- ft-lb-s-stelsel (English absolute system) 639 - 640
- ft-lbf-s-stelsel (English gravitational system) 640 - 642
- internationale elektrische eenheden (1908) 4, 5, 153 - 154, 158 - 159
- KS (kwadrantstelsel) 148 - 153
- metriek stelsel 97 - 99, 104 - 108
- MKS-stelsel 120, 143 - 147, 151 - 152
- MKSA-stelsel (Giorgi-stelsel) 4, 5, 154 - 162
- MTS-stelsel 120, 147
- neo-CGS-stelsels 139, 141 - 142
- SI 6 - 7, 46 - 49, 340 - 357
- TS (technisch stelsel) 374 - 389

eerste hoofdwet van de termodynamika 588 - 600

efemeridentijd 114, 118

effektief elektrisch vermogen 69

effektieve spanning 69

ekwivalentgeleiding 241 - 243

ekwivalentkoncentratie 241 - 243

elektrisch dipoolmoment 352

elektrische flux 161, 352

elektrische fluxdichtheid 160 - 161, 352

elektrische geleiding 347, 352

elektrische induktantie 347, 352

elektrische induktie 160 - 161, 352

elektrische kapaciteit 52, 347, 352

elektrische lading 52, 347, 351

elektrische polarisatie 352

elektrische potentiaal 347, 352

elektrische spanning 52, 347, 352

elektrische stroom 343, 351

elektrische susceptibiliteit 139, 161

elektrische veldsterkte 352

elektrische verplaatsing 160 - 161, 352

elektrische weerstand 52, 347, 352

elektrisch warmte-ekwivalent 198

elektrodynamische hoofdwet 125, 154, 165 - 170

elektromagnetische wet van Coulomb 162, 165 - 170

elektrostatische wet van Coulomb 124, 162, 165 - 170

empirische celsiustemperatuur 175, 180

empirische fahrenheittemperatuur 175

empirische temperatuur 173 - 177

energetische exitantie 249, 351

energetische luminantie 249, 351

energie 51 - 52, 347, 349, 661 - 663

energieflux 347

energiegrootheden en veldgrootheden 304, 306 - 307

energiehoogte 511

English absolute system 639 - 640

English gravitational system 640 - 642

entalpie 350

entropie 52, 350

Eratosthenes 92

ET 114, 118

European Committee for Standardization 13

Europese Ekonomische Gemeenschap 14 - 15

exitantie :

- energetische exitantie 249, 351

- lichtgevende exitantie 261, 272, 351

exponent 26

expositie 351, 411 - 412

Fahrenheit 175

fahrenheittemperatuur :

- empirische fahrenheittemperatuur 175

- termodynamische fahrenheittemperatuur 179 - 181, 185

Fernel 92

flux :

- elektrische flux 161, 352

- magnetische flux 347, 352

fluxdichtheid :

- elektrische fluxdichtheid 160 - 161, 352

- magnetische fluxdichtheid 347, 352

fonometrische grootheden 328 - 334

fotometrische grootheden 247, 260 - 265, 268

fotometrisch stralingsekwivalent 260, 265, 270, 351

foton 277 - 278

fotosyntese 276 - 278

frekwentie 245, 294 - 297, 299, 311, 347, 349

ft-lb-s-stelsel 639 - 640

ft-lbf-s-stelsel 640 - 642

fysische grootheden vergelijking : zie algemene grootheden vergelijking

Galilei 89 - 90

gaskonstante :

- molaire gaskonstante 24, 53, 194 - 195, 217 - 223, 373, 675 - 681, 683

- specifieke gaskonstante 54, 487 - 489, 675 - 682, 684

gastermometer 176 - 177

Gauss 119, 123

$G \cdot D^2$ 587 - 588

geabsorbeerde dosis 347, 351, 411 - 413

gebruik van de wettelijke eenheden 16 - 19

gehoordrempel : zie hoorgrens

geleidbaarheid : zie geleiding

geleiding (elektrische geleiding) 347, 352

geleidingsvermogen : zie geleiding

geluid :

- als fysisch verschijnsel 311 - 327

- als een door het menselijk gehoor waargenomen verschijnsel 327 - 333

geluidsdruk 313, 319 - 325

geluidsdrukniveau (geluidsniveau, geluidspeil) 318 - 325, 333, 336 - 339

geluidsenergiedichtheid 312 - 313

geluidsindruk 327

geluidsintensiteit 312, 319 - 325

geluidsintensiteitsniveau 319 - 325

geluidsleer (wetten) 314 - 315

geluidsmeting 333, 336 - 339

geluidsniveau, geluidspeil (geluidsdrukniveau) 318 - 325, 333, 336 - 339

geluidspeilmeter 333, 336 - 339

geluidssnelheid 54, 313 - 314, 489 - 491

geluidsvermogen 312

gerationaliseerde definitievergelijking 124, 137

gerationaliseerd Giorgi-stelsel 159 - 162

geschiedenis van :

- de ampère 170 - 171

- de candela 273 - 276

- de meter 103 - 104

- de mol 244

- het kilogram 104

getalfaktor 29 - 32

getallen in cijferschrift 83 - 84

getalwaarde x eenheid 20 - 22

getalwaarden en eenheden 86

getalwaardenvergelijking 36 - 43, 527 - 530, 548 - 552, 556 - 557

geünificeerde atoommassakonstante 224, 373

gewicht 4, 378 - 381, 424 - 425, 429, 439, 443 - 451

gewicht en massa 420 - 453

Giorgi 4, 154 - 155

Giorgi-stelsel 4, 154 - 162

GMT 113

golflengte 245 - 247, 311, 349

graad van een stelsel 22 - 24

gravitatie 422 - 429

gravitatiekonstante 24, 373, 422 - 423, 433 - 434

gravitatiekracht 422 - 425, 427

gravitatieveld 424

gravitatieveldsterkte 424, 426 - 427

gravitatiewet 162, 422 - 423

Greenwich Mean Time 113

gregoriaans jaar 111 - 112

Gregorius XIII 111

grondeenheden in het SI 47 - 48, 341 - 343

grondeenheid 23 - 24, 46

gronddimensie 50

grootheden (met opgave van SI-eenheid) :

- niet-elektrische grootheden 348 - 351

- elektrische en (elektro)magnetische grootheden 351 - 353

groothedensoort 20 - 22

groothedenvergelijking 24 - 36, 43 - 46

grootheid 20 - 22

grootte van een grootheid 20

grootte van koherente afgeleide eenheden 29 - 31

handschrift 87

harmonische beweging 292 - 295

hoek :

- vlakke hoek 48, 51, 279 - 285, 343 - 345, 349, 363, 365

- ruimtehoek 48, 51, 285 - 287, 343 - 345, 349

hoekfrekwentie (cirkelfrekwentie) 294 - 295, 297, 299, 349

hoeksnelheid 287 - 291, 299 - 301, 349

hoekversnelling 349

hoeveelheid beweging 349

hoeveelheid elektriciteit : zie elektrische lading

hoeveelheid licht 261, 271, 351

hoeveelheid stof 220 - 221, 343, 350, 672 - 674

hoeveelheid stralingsenergie 248, 351

hoeveelheid warmte 350

hoogte 348

hoogtedruk 512

hoorgrens 329, 331

Huygens 90 - 91

hydrostatische druk 389 - 398, 495 - 497

IAU 3

ICR 3

ICRP 3

ICRU 3

IEC 3, 11 - 13

IEC-normen 11 - 13

IMM 3

impedantie (geluidsleer) 315 - 317

index 73 - 74

index van geabsorbeerde dosis 347, 411 - 413

induktantie (elektrische induktantie) 347, 352

induktie :

- elektrische induktie 160 - 161, 352

- magnetische induktie 347, 352

inhoud 349, 645

Internationaal Bureau voor Maten en Gewichten (BIPM) 2

Internationaal eenhedenstelsel (SI) 6 - 7, 46 - 49, 340 - 357

Internationaal Elektrotechnisch Komitee 11 - 13

Internationaal Komitee voor Maten en Gewichten (CIPM) 1 - 2

Internationale atoomtijd 114 - 118

internationale elektrische eenheden (1908) 4, 5, 153 - 154, 158 - 159

International Electrotechnical Commission 11 - 13

Internationale Organisatie voor Normalisatie 9 - 11

Internationale Organisatie voor Wettelijke Metrologie 8 - 9

internationale temperatuurschaal 181 - 183

International Organization for Standardization 9 - 11

International Practical Temperature Scale 181

inwendige energie 350

ionenprodukt van water 227

irradiantie 251

ISO 9 - 11

ISO-normen 10 - 11

isofoon 330 - 331

isotoop 213

IUGG 3

IUPAC 3

IUPAP 3

jaar :

- anomalistisch jaar 109 - 111

- Bessels jaar 110

- burgerlijk jaar 111 - 112

- gregoriaans jaar 111 - 112

- juliaans jaar 111 - 112

- kalenderjaar 111 - 112

- siderisch jaar (sterrejaar) 109 - 111
- tropisch jaar 109 - 111
juliaanse dagen 113
juliaans jaar 111 - 112

kalenderjaar 111 - 112
kalorisch ekwivalent van de mechanische energie-eenheid 198
kapaciteit (elektrische kapaciteit) 52, 347, 352
kengrootheden 55 - 56, 603 - 619
kengrootheid van :
- Euler 605, 615
- Fourier 607, 615
- Froude 608, 615
- Grashof 608 - 609, 616
- Nusselt 609, 616
- Péclet 609 - 610, 616
- Prandtl 611 - 612, 616
- Rayleigh 612 - 613, 616
- Reynolds 56, 613 - 614, 616
- Stanton 614 - 616
Kepler 112
kerma 347, 411
kilogramme des archives 97, 99
kinematische viskositeit 561 - 564, 668
kinematische viskositeit :
- CGS-stelsel 123
- MKS-stelsel (en SI) 144, 349
- TS 387 - 388
kinetische energie 25 - 26, 31 - 33, 350, 493 - 494, 510
kinetische gasteorie 189 - 191
kinetische translatie-energie 189 - 194
koherente eenheden 27 - 28, 43 - 46
koherent eenhedenstelsel 43 - 46
koherentie 27 - 28
koncentratie 225 - 239, 648 - 649
koncentratieparameters 225 - 239
konduktantie 352
konduktiviteit 67, 352
konstante van :
- Avogadro 217 - 218, 220, 222, 373
- Boltzmann 24, 194 - 195, 373
- Dirac 373
- Faraday 373
- Planck 373
- Stefan-Boltzmann 373
kotiënt van eenheden 81 - 82
kracht 52, 347, 349, 650 - 652
krachtwerking :
- tussen 2 elektrische ladingen 124, 162, 165 - 166, 168
- tussen 2 stroomvoerende evenwijdige geleiders 125, 154, 165 - 166, 168 - 169
- tussen 2 puntpolen 162, 165 - 166, 169 - 170
KS (kwadrantstelsel) 148 - 153
kwantum 277 - 278

laadvermogen 451 - 452
lading (elektrische lading) 52, 347, 351
lading (mechanische lading) 451 - 452
Lagrange 95
Landolt 139
laminaire stroming over een hellend vlak 564 - 567
Laplace 95 - 96
Legendre 96
lengte 342, 348, 644
lichtefficiëntie 351

lichtflux 261, 347, 351

lichtgevende exitantie 261, 272, 351

lichtgevende luminantie 52, 258, 262, 271, 351

lichtkwantum 277 - 278

lichtrendement 269

lichtsnelheid 373

lichtsterkte 262, 343, 351

lichtstroom : zie lichtflux

lineïek 66

lineïeke massa 66, 361, 365

logaritme 26, 304 - 305

Lord Kelvin 177

luchtsnelheid in een trekschouw 557 - 561

luidheid 332 - 335

luidheidsniveau (luidheidspeil) 328 - 332, 334 - 335

luminantie :

- energetische luminantie 249, 351
- lichtgevende luminantie 52, 258, 262, 271, 351

magnetisatie 352

magnetisch dipoolmoment 161, 353

magnetische flux 347, 352

magnetische fluxdichtheid 347, 352

magnetische inductie 347, 352

magnetische polarisatie 161, 352

magnetische poolsterkte 161, 353

magnetische spanning 161, 352

magnetische susceptibiliteit 139, 161

magnetische veldsterkte 160 - 161, 352

magnetisch moment 353

massa 342, 349, 645

massa afgeleid van lengte en tijd 431 - 433

massa en gewicht 420 - 453

massafraktie 234

massagetal 87, 213

massa in het TS 381 - 386

massakoncentratie 234

massastroom 68, 349, 669 - 670

massatraagheidsmoment 349

massa van parels en edelstenen 362

massiek 66 - 67

Maxwell 148 - 149

Méchain 96, 103

mechanisch warmte-ekwivalent 197 - 198

meten van doorstromende hoeveelheden 500 - 503

Meterkonventie 1 - 8, 99, 103

mètre des archives 97, 99

metriek stelsel 97 - 99, 104 - 108

middelbare zonnedag 108 - 109

middelpuntvliedende kracht 301

million 684 - 685

MKS-stelsel 120, 143 - 147, 151 - 152

MKSA-stelsel 4, 5, 154 - 162

molair 65 - 66

molair deeltjesaantal 220

molaire fraktie 233 - 234

molaire gaskonstante 24, 53, 194 - 195, 217 - 223, 373, 675 - 681, 683

molaire geleidbaarheid : zie molaire geleiding

molaire geleiding 239 - 243

molaire grootheden 65 - 66, 243 - 244

molaire koncentratie 225 - 227, 350

molaire massa 52, 223 - 224, 350

molaire warmtekapaciteit 350

molair geleidingsvermogen : zie molaire geleiding

molair normvolume van een ideaal gas 217 - 218, 220 - 222, 373, 674 - 675

molair volume 350, 674 - 675

molaliteit 233

molariteit 226

moment van een koppel 349

moment van een kracht 51, 349, 660 - 661

Monge 95

monochromatisch licht 254

Mouton 93

MTS-stelsel 120, 147

namen van eenheden, voluit geschreven 70 - 72

namen van grootheden, voluit geschreven 70

natuurkonstante 24, 194 - 195

natuurkonstanten in het SI 371 - 373

natuurlijk logaritme : zie neperiaans logaritme

NBS 3

Nederlandse normen 18

neerslagreaktie 230 - 231

neo-CGS-stelsels 139, 141 - 142

neper 51, 306 - 310, 370 - 371

neperiaans logaritme 26, 304 - 305

Newton (wetten van Newton) 420 - 423

niet-adiabatische kompressie in (gekoelde) zuigerkompressoren 594

niet-gerationaliseerde grootheden-vergelijking 124 - 125, 137

niet-gerationaliseerd Giorgi-stelsel 159 - 162

niveau(peil) van :

- een energiegrootheid 309 - 310
- een geluidsdruk (geluidsniveau, geluidspeil) 318 - 325, 333, 336 - 339
- een geluidsintensiteit 319 - 325
- een snelheid van een trillend deeltje 318 - 325
- een veldgrootheid 309 - 310
- een vermogen van een geluidsbron 319 - 325

normale atmosferische druk 6

normalisatie 9 - 13

normaliteit 227 - 233

normen inzake eenheden :

- Belgische normen 16
- IEC-CEI-normen 11 - 13
- ISO-normen 10 - 11
- Nederlandse normen 18

normgewicht 376 - 381, 434 - 443, 445 - 451, 454 - 481

normversnelling 4, 5, 376, 379 - 381, 454 - 455, 481

normvolume 68

normzwaarteveldsterkte 454 - 455, 481

NPL 3

NRC 3

NRLM 3

nucleonental 87, 213

OIML 8 - 9

onjuiste benamingen van afgeleide grootheden 63 - 68

onjuiste definities van afgeleide grootheden 63 - 68

onjuiste voorstellingen van symbolen van eenheden 68 - 70

ooggevoeligheidscurve 256

ooggevoeligheidsfaktor 255 - 260

opbouw van het SI 46 - 49

oppervlakte 349, 644

optisch rendement 269

opvoerhoogte van een circulatiepomp 534 - 535

Organisation Internationale de Métrologie Légale 8 - 9

oude landmaten 106 - 108

overdruk 68

overeenkomsten 1 - 8, 14 - 15

oxidatie 228 - 229

p_H 226

peil : zie niveau

periode 287 - 288, 293 - 297, 311, 349

permeabiliteit 24, 125 - 126, 161

permeabiliteit van vacuüm(waarden) :

- es-CGS-stelsel 140
- em-CGS-stelsel 140
- niet-gerationaliseerd MKSA-stelsel 140
- gerationaliseerd MKSA-stelsel en SI 140, 162 - 163, 353, 373

permeantie 352

permittiviteit 24, 125 - 126, 161

permittiviteit van vacuüm(waarden) :

- es-CGS-stelsel 140
- em-CGS-stelsel 140
- niet-gerationaliseerd MKSA-stelsel 140
- gerationaliseerd MKSA-stelsel en SI 140, 163 - 165, 353, 373

Picard 93

pijngrens 329

polarisatie :

- elektrische polarisatie 352
- magnetische polarisatie 161, 352

pompvermogen 37 - 39, 44 - 45, 535 - 552

poolsterkte 161, 353

potentiaal (elektrisch potentiaal) 347, 352

potentiële drukenergie 510

potentiële energie van plaats (arbeidsvermogen van plaats) 25 - 26, 350, 491 - 493, 510

produkt van eenheden 79 - 80

protonental 87, 213

PTB 3

PTR 3

pulsatie 294 - 295, 297, 299, 349

quadrillion 684 - 685

radiantie 249, 351

radioaktiviteit : zie aktiviteit

rationalisatie 124, 159 - 162

reaktief elektrisch vermogen 69 - 70

redoxreaktie 228 - 230

reduktie 228 - 229

regelkleppen (weerstandswaarde) 568 - 576

relatieve atoommassa 215 - 216, 224, 350

relatieve molekuulmassa 215, 224, 350

resistiviteit 67, 352

Richer 91

richtlijnen (EEG) 14 - 15, 340 - 341, 361 - 362, 365

rotatiefrekwentie (toerental) 66, 287 - 291, 299, 349

ruimtehoek 48, 51, 285 - 287, 343 - 345, 349

rustmassa :

- van een elektron 373
- van een neutron 373
- van een proton 373

samengestelde eenheid :

- voorstelling 79 - 80

- SI-eenheid + erkende eenheid die niet tot het SI behoort 368 - 370

Scaliger 113

schaal van de relatieve atoommassa's 215

scheikundesymbolen 87, 213

schijnbaar elektrisch vermogen 69 - 70

schrijf- en zetwijzen van symbolen van grootheden en eenheden 72 - 78

schrijfmachineschrift 87 - 88

schrikkeljaar 111

schuine deelstreep 77 - 78, 81 - 82

SI 6 - 7, 46 - 49, 340 - 357

siderisch jaar 109 - 111

SI-notatie 481 - 486

SI-voorvoegsels 7, 49, 96, 119, 353 - 357

slingertijd 55, 89

snelheid 52, 349, 649 - 650

snelheidshoogte 494, 497 - 498, 511

snelheid van een trillend deeltje (geluid) 313, 319 - 325

snelheid van :

- het geluid 54, 313 - 314, 489 - 491

- het licht 373

Snellius 92

solidus : zie schuine deelstreep

soortelijk 67

soortelijke energieoverdracht 347, 411

soortelijke entalpie 350, 664 - 665

soortelijke entropie 350

soortelijke geleidbaarheid : zie soortelijke geleiding

soortelijke geleiding 67, 240, 352

soortelijke grootheden 67, 460 - 479

soortelijke inwendige energie 350

soortelijke massa 349, 452 - 453, 460 - 471, 645 - 647

soortelijke warmte 67

soortelijke warmtekapaciteit 52, 68, 350, 665

soortelijke weerstand 67, 352

soortelijk (norm)gewicht 453, 460 - 471, 645 - 647

soortelijk volume 349, 460 - 471, 647

Sosigenes 111

spanning :

- elektrische spanning 52, 347, 352

- magnetische spanning 161, 352

- mechanische spanning 347, 349, 652 - 660

specifiek 67

specifieke akoestische impedantie 315 - 317

specifieke gaskonstante 54, 487 - 489, 675 - 682, 684

spektraal fotometrisch stralingsekwivalent 260, 265, 270, 351

spektrale ooggevoeligheidsfaktor 255 - 260

spektrum van de elektromagnetische golven 245

steradiek 66 - 67

sterkte van optische systemen 362, 366

sterredag 108

sterrejaar 109 - 111

Stevin 92

stoffraktie 233 - 234

stofgehalte 233

stofkoncentratie 225 - 227, 350

straal 348

straling :

- als fysisch verschijnsel 248 - 253

- als een door het menselijk oog waargenomen verschijnsel 254 - 260

stralingsenergie 248, 351

stralingsenergiestroom : zie stralingsflux

stralingsflux 248 - 249, 351

stralingsgrootheden 247 - 253, 268

stralingsintensiteit 249, 351

stralingskonstante :

- eerste stralingskonstante 373

- tweede stralingskonstante 373

stralingsrendement 267

stralingssterkte 249, 351

stromingsenergie 510

stromingsverliezen 519 - 535

stroom (elektrische stroom) 343, 351

stroomdichtheid 351

stuwdruk 512

SUN 3

susceptibiliteit :

- elektrische susceptibiliteit 139, 161

- magnetische susceptibiliteit 139, 161

symbool van een eenheid 74 - 76

symbool van een grootheid 72 - 76

TA 115

TAI 115 - 118

TE 114, 118

technisch (eenheden)stelsel 374 - 389

telextekst 87 - 88

temperatuur 172 - 195, 343, 350

temperatuur als afgeleide grootheid 192 - 194

temperatuurgeleidingskoëfficiënt 68, 350, 600 - 602

temperatuurinterval 7, 183 - 184

temperatuurschaal (internationale temperatuurschaal) 181 - 183

temperatuurtolerantie 183 - 184

temperatuurvereffeningskoëfficiënt 68, 350, 600 - 602

temperatuurverschil 7, 183 - 184

temperatuur volgens verschillende schalen 184 - 188

termisch evenwicht 172 - 173

termodynamika (eerste hoofdwet) 588 - 600

termodynamische celsiustemperatuur 179 - 181, 185, 350

termodynamische fahrenheittemperatuur 179 - 181, 185

termodynamische kelvinschaal 178 - 179

termodynamische temperatuur 177 - 179, 343, 350

termodynamische temperatuurschaal 6, 178

termometers 173 - 177

Thomson 177

tijd 108 - 118, 342, 349, 649

tijdmeting 108

titer 227 - 233

toerental (rotatiefrekwentie) 66, 287 - 291, 299, 349

toestandsvergelijking van een ideaal gas 53 - 54, 486 - 489, 675 - 681

traagheidswet 420

trage massa 421, 429 - 431

Tralles 96

trekschouw (luchtsnelheid) 557 - 561

trillion 684 - 685

tripelpunt van water 6, 176, 178 - 179, 180, 204

tropisch jaar 109 - 111

TS (technisch stelsel) 374 - 389

TS-notatie 481 - 486

uitstroomsnelheid van een vloeistof uit een open vat 497 - 500

universele gaskonstante 24, 53, 194 - 195, 217 - 223, 373, 675 - 681, 683

unster 440 - 443

UT 117 - 118

UTC 117 - 118

valhoogte 494 - 495

valsnelheid 54, 494 - 495

Van Swinden 96

veldgrootheden en energiegrootheden 304, 306 - 307

veldsterkte :

- elektrische veldsterkte 352

- magnetische veldsterkte 160 - 161, 352

ventilatieverliezen 581 - 583

ventilatorvermogen 553 - 557

verbrandingswarmte 664 - 665

Verdrag van Rome tot oprichting van de Europese Ekonomische Gemeenschap 14 - 15

vergelijking :

- algemene (of fysische) grootheden-vergelijking 24 - 36, 43 - 46

- getalwaardenvergelijking 36 - 43, 527 - 528, 548 - 552, 556 - 557

vergelijking :

- definitievergelijking 27, 29 - 36, 52

- afgeleide vergelijking 29 - 36

verlichtingssterkte 263 - 264, 272, 276, 347, 351

verlieshoogte per lengte 524 - 526, 530 - 533

vermenigvuldigingspunt 77, 79

vermogen 52, 151 - 152, 347, 352, 663 - 664

vermogen van :

- een geluidsbron 311 - 312, 319 - 325

- een pomp 37 - 39, 44 - 45, 535 - 552

- een ventilator 553 - 557

verplaatsing (elektrische verplaatsing) 160 - 161, 352

versnelling 52, 349, 650

versnelling van de zwaartekracht 91, 349, 375, 420 - 429

vervallen eenheden 409 - 415

vervallen eenhedenstelsels 414 - 415

viskositeit :

- dynamische viskositeit 122, 144, 349, 387, 561 - 564, 667 - 668

- kinematische viskositeit 123, 144, 349, 387 - 388, 561 - 564, 668

visueel rendement 269 - 270

vlakke hoek 48, 51, 279 - 285, 343 - 345, 349, 363, 365

vliegwiel en massatraagheidsmoment 301, 583 - 588

volume 349, 645

volumefraktie 235

volumestroom 68, 349, 670 - 671

volumiek 66 - 67

volumieke massa 349, 452 - 453, 460 - 471

voorstelling van produkten en kotiënten van grootheden 77 - 78

voorstelling van samengestelde eenheden 79 - 82

voortplantingssnelheid :
- van het geluid 54, 313 - 314, 489 - 491
- van het licht 373
voorvoegsels 7, 49, 96, 119, 353 - 357
vrije val 54, 428 - 429, 494 - 495

warmte 51, 195 - 212, 347, 661 - 663
warmtedoorgang per oppervlakte en tijd 667
warmtedoorgangskoëfficiënt 64 - 65, 350, 482, 666
warmtegeleidingskoëfficiënt 68, 350, 666
warmte-indringingskoëfficiënt 55, 602 - 603
warmtekapaciteit 350
warmteoverdracht door straling 33 - 36
warmteoverdrachtskoëfficiënt 350
warmtestroom 350
warmteverliezen door luchtverversing 581 - 583
waterstofionenexponent 226
Weber 119
wederzijdse induktie 352
weegschaal (balans) 438 - 440
weerstand (elektrische weerstand) 52, 347, 352
weerstandswaarde van regelkleppen 568 - 576
wegen 435 - 443
weglengte 348
wereldtijd 112 - 113
werkelijk gewicht : zie gewicht
wetgeving :
- in België 15 - 16
- in Nederland 17 - 18
wettelijke eenheden 340 - 370
wetten uit de geluidsleer 314 - 315
wetten van Coulomb :
- elektrostatische wet van Coulomb 124, 162, 165 - 170
- elektromagnetische wet van Coulomb 162, 165 - 170
wetten van Newton 420 - 423
wet van Bernoulli 504 - 519, 596 - 600
wet van de inertie (traagheid) 420
wiskundesymbolen 82 - 83
wisselstroom 295 - 298

X-meter 100, 104

zelfinduktie 352
zichtbare straling 246 - 247, 254
zonnedag 108 - 109
zonnestraling 245 - 246
zuur-basereaktie 227 - 228
zwaartekracht 424 - 425, 427 - 429
zwaarteveld (aards zwaarteveld) 423 - 429
zwaarteveldsterkte 91, 349, 375, 420 - 429
zware massa 422, 429 - 431

Sinds enkele jaren is in alle landen van de Europese Ekonomische Gemeenschap het Internationaal Eenhedenstelsel, in alle talen aangeduid met het lettersymbool SI, het enig wettelijk eenhedenstelsel. Bij de overgang van de vroegere eenhedenstelsels naar het nieuwe eenhedenstelsel (SI) stellen zich heel wat problemen, niet alleen wat betreft allerhande omrekeningsfaktoren, maar ook wat betreft de schrijfwijze van de groothedenvergelijkingen. Volgende eenhedenstelsels worden uitvoerig beschreven: het metriek stelsel, het CGS-stelsel, het MKS-stelsel, het MTS-stelsel, het kwadrantstelsel, het MKSA- of Giorgi-stelsel, het technisch stelsel (TS), de Angelsaksische eenhedenstelsels en het nieuwe Internationale Eenhedenstelsel (SI). Verder wordt aan de hand van talrijke voorbeelden aangetoond, hoe men overgaat van TS-groothedenvergelijkingen (vergelijkingen waarin de grootheid normgewicht voorkomt) naar SI-groothedenvergelijkingen (waarin dan de grootheid massa voorkomt als tegenhanger van de grootheid normgewicht in het TS).

Dit boek wil een leidraad zijn voor allen, jongeren en ouderen, die in het onderwijs, de wetenschap en de techniek te maken hebben met eenheden en groothedenvergelijkingen. Het vormt een belangrijke bijdrage in het Nederlandse taalgebied van een op wereldschaal sinds lang nagestreefd doel, namelijk te komen tot meer 'eenheid in eenheden'!

ISBN 90-220-1031-7
NUGI 812

Pudoc Wageningen