VELDCONTROLE PIJPLEIDINGEN

Cursus & standaard-instructie
1987

Docenten:
ir. R.A.J. de Kock
ing. A. van Apeldoorn
ing. W.J. van de Geest
ing. M. Hollebek
drs. ing. J. Poot
ing. J.G. Westerhoven

Provincie Zuid-Holland

INHOUDSOPGAVE

Les I	- 1	Elementaire grondmechanica	44 blz.
	- 2	Spanningen en vervormingen bij fundering op staal	8 blz.
	- 3	Spanningen en vervormingen bij fundering op palen, damwanden	50 blz.
		bijlage 1 paaltypen	9 blz.
		bijlage 2 groutankers en diepwanden	7 blz.
Les II	- 1	Inwendige belastingen op pijpleidingen	19 blz.
	- 2	Uitwendige belastingen op pijpleidingen	24 blz.
	- 3	Funderingen van pijpleidingen	28 blz.
Les III	- 1	Spanningen in pijpleidingen	9 blz.
		bijlage (spanningen)	2 blz.
	- 2	Sterkte van pijpleidingen	24 blz.
	- 3	Oorzaken en gevolgen van het bezwijken van pijpleidingen en de kansen daarop	32 blz.
Les IV	- 1	Kruisingen met hoofd- en 2e waterkeringen	20 blz.
	- 2	Kruisingen met boezemwateren	15 blz.
		aanvulling	1 blz.
		bijlage	4 blz.
	- 3	Kruisingen van pijpleidingen met (provinciale) wegen	18 blz.
		bijlage 1 (horizontaal boren)	2 blz.
		bijlage 2 (electro-osmotische smering)	6 blz.
Les V	- 1a	Bestrijding van incidenten met hogedrukleidingen	6 blz.
		bijlage (regeling B I P)	10 blz.
	- 1b	Richtlijnen voor leidingkruisingen met waterstaatswerken volgens de bestuurbare horizontale boormethode	18 blz.
	- 1c	Toepassing van de plasticiteitsleer bij de berekening van stalen pijpleidingen	9 blz.
	- 2	Aanpassing van bestaande leidingen	6 blz.
	- 3	Kruisingen met spoorwegen	18 blz.
		bijlage 1	4 blz.
		bijlage 2	4 blz.
Les VI	- 1	Uitvoeringsinstructies	25 blz.
		bijlage	9 blz.
	- 2	Overzicht van wat er in het verleden zoal is misgegaan bij de uitvoering	10 blz.
	- 3	Metingen van zettingen en zakkingen bij leidingkruisingen	11 blz.
		Eisen aan lassen	14 blz.
		tentamen	22 blz.
		examen	22 blz.

in flap
1 tekening kruisingen vloeistofleidingen
1 tekening kruisingen gasleidingen
7 tekeningen van diverse kruisingen
1 tekening: bijlage bij les III - 3
1 tekening in 2 delen, bijlage les VI - 3

Elementaire grondmechanica.

Les I. 1.

1. HET ONTSTAAN VAN DE GRONDSOORTEN.

De meeste kunstwerken, gebouwen, dijken en kanalen worden gebouwd of aangelegd op, of betrekkelijk dicht onder het oppervlak van de aardkorst.
Mijnbouw of olie- en gasboringen vinden plaats tot aanzienlijk grotere diepte.
Voor al deze activiteiten is kennis van de aardkorst nodig.
De samenstelling van de aardkorst houdt nauw verband met het ontstaan of de wording. Daarom is het goed eerst de wordingsgeschiedenis na te gaan.
De wetenschap die zich met het reconstrueren van het ontstaan en het vormen der Aarde bezighoudt, heet Geologie.
Van deze geologie is de grondmechanica eigenlijk een onderdeel.

De wordings-geschiedenis van de aardkorst begint 5 miljard jaar geleden. In die tijd is de aardkorst voortdurend aan verandering onderhevig geweest. Daarbij zijn perioden van veel beweging of betrekkelijke rust te onderkennen.
In de perioden met veel beweging worden de gesteenten onder invloed van enorme krachten in elkaar gedrukt, verplaatst en omhoog gedrukt. Hierdoor werden gebergten en zeeën gevormd.
In de perioden met betrekkelijke rust werd door erosie veel materiaal van die gebergten afgezet langs de randen van de massieven. Op deze wijze ontstonden de continenten, die aan voortdurende veranderingen onderhevig zijn. Met name langs de randen van de continenten treden vele variaties op.

De "groeitijd" van de aardkorst wordt in 5 tijdperken onderverdeeld en wel:

a. het precambrium: van 5000 tot 600 miljoen jaar geleden
b. het primair : " 600 " 230 " " "
c. het secundair : " 230 " 60 " " "
d. het tertiair : " 60 " 1 " " "
e. het kwartair : " 1 miljoen jaar geleden tot heden.

Deze tijdperken zijn geologisch gezien alle even interessant. In verband met de grondmechanica is alleen het kwartair het tijdperk, dat aandacht verdient. In dat tijdperk werden namelijk de aardlagen gevormd, waarop de grondmechanica wordt toegepast.

Het kwartair wordt weer verdeeld in twee tijdperken, namelijk:

1. het pleistoceen: van 1.000.000 jaar tot 10.000 jaar geleden
2. het holoceen : van 10.000 jaar geleden tot heden.

De bovenkant van de in het pleistoceen gevormde aardlagen ligt in Nederland op een diepte van 30 m tot 0 m beneden de tegenwoordige maaiveldshoogte. 30 m beneden het maaiveld in het westen van Nederland en 0 m in het zuiden en oosten.

In het pleistoceen werden gedurende ca. 4 ijstijden en de daartussen gelegen perioden met hogere temperaturen (interglaciale perioden) de pleistocene aardlagen gevormd.

Deze aardlagen bestaan uit glaciale sedimenten (= afzettingen) van fijn en grof zand, met hier en daar wat leem en grind.
Die sedimenten zijn de grondmorenen van het landijs, dat in de ijstijden ons land bedekte. In de interglaciale perioden trad mariene en lacustriene sedimentatie op (transgressie), waarin fijn zand, klei en veen is afgezet.
Morenen zijn nu nog te zien aan de voet van gletschers.
Op de pleistocene aardlagen zijn meestal gebouwen en kunstwerken gefundeerd. Er wordt dan gesproken over fundering op het "diepe zand" of pleistocene zand.

In het holoceen (alluvium) werden op de pleistocene aardlagen de zand- en kleilagen afgezet en de veenlagen gevormd, waarop en waarin in het westen van het land thans de meeste bouwactiviteiten plaatsvinden.
Door de in de loop der jaren groeiende noodzaak om de eigenschappen van die lagen te leren kennen, heeft zich sinds 1925 een wetenschap ontwikkeld, welke bekend staat onder de naam Grondmechanica.

2. GRONDMECHANICA.

Grondmechanica is de wetenschap over het evenwicht en de vervorming van de grond en op natuurlijke of kunstmatige wijze tot stand gekomen grondmassa's, welke onder invloed staan van mechanische krachten.

Met deze wetenschap kan ook de invloed, die de grond of grondmassa's en de daarmede in aanraking komende constructies op elkaar uitoefenen, worden nagegaan.
Dit wordt dan funderingstechniek genoemd.

3. GROND.

Grond is een verzameling van al of niet samenhangende deeltjes van minerale en organische herkomst, waarvan de tussenruimte geheel of gedeeltelijk met water is gevuld en de overblijvende ruimte, indien aanwezig, met lucht of een ander gas.

De drie componenten van grond zijn dus: korrels, water en lucht (gas).
De korrels zijn kleiner naarmate zij minder bestand zijn tegen - en langer zijn blootgesteld aan chemische en mechanische invloeden.
Kleideeltjes zijn daarom veel kleiner dan zandkorrels.
Hoe kleiner de korrels zijn, en dus een geringer eigen gewicht hebben, des te meer gaan onderlinge aantrekkingskrachten en krachten van electro-chemische oorsprong een rol spelen.

Hierdoor is klei een veel ingewikkelder materiaal dan zand.
De hoedanigheid van de grond wordt vooral bepaald door de aard en de grootte van de korrels.

Er zijn verschillende grondsoorten, waaraan een benaming en een algemene omschrijving van de eigenschappen kan worden gegeven, zoals: grind, zand, leem,keileem, löss, klei, mergel en veen.
Met deze benamingen en een eventueel gegeven algemene omschrijving van de grondsoort kan echter niet nauwkeurig worden aangegeven welke eigenschappen die grond bezit.
Daarom wordt getracht de grondsoorten te classificeren door de eigenschappen van de grond op een vastgestelde manier in getalswaarden uit te drukken.

Er zijn verschillende wetenschappen, die zich met de studie over grondsoorten bezighouden. Zij hebben alle hun eigen omschrijving en classificatie.
In de geologie wordt een heel andere indeling en beschrijving aangehouden dan bijvoorbeeld in de bodemkunde, die een landbouwkundige achtergrond heeft.
Elke indeling is geënt op de typische eigenschappen van de grondsoorten, die voor het betreffende vakgebied van belang zijn.

Zo is ook voor de toepassing van de grondmechanica een indeling gemaakt.
In dit kader worden in Nederland 3 hoofdtypen grond onderscheiden en wel:

a. Zand: betrekkelijk grote tot matig fijne korrels, goed doorlatend, onsamenhangend, weinig samendrukbaar.
b. Klei: fijne tot zeer fijne korrels, slecht doorlatend, samenhangend, sterk samendrukbaar.
c. Veen: bevat veel organische bestanddelen (plantenresten), slecht doorlatend, samenhangend, zeer sterk samendrukbaar.

De samenstelling van deze grondsoorten wordt onderscheiden in de

mineralogische samenstelling, en de
granulaire samenstelling.

4. MINERALOGISCHE SAMENSTELLING.

In mineralogisch opzicht kan de volgende samenstelling worden omschreven.

Zand: bestaat uit: kwarts ($Si\ O_2$), komt veel voor in Nederlandse zandsoorten.
veldspaat (silicaatachtig gesteente)
glimmer (ook wel mica genoemd)

Klei: bestaat uit: kwarts ($Si\ O_2$)
kleimineralen
resten van veldspaten
humus

De kleimineralen zijn:

illiet : komt veel voor in Nederlandse kleisoorten, heeft een structuur als mica
montmorilloniet: is van vulkanische oorsprong
kaoliniet : is een onoplosbaar aluminium silicaat, gevormd bij de verwering van gesteenten.

Veen: bestaat uit: resten van organische oorsprong, zoals plantenresten en is ontstaan door conservering van plantenresten in een zuurstofloze omgeving.

5. GRANULAIRE SAMENSTELLING.

Voor het bepalen van de granulaire samenstelling van de grond moeten de korrelgrootten en de korrelverdeling bekend zijn. Om deze te leren kennen, staan twee methoden ter beschikking, die het meest worden gebruikt. Dat zijn:

a. Zeven
b. Bezinken of afslibben.

Het milieu waarin de grond gevormd is, is bepalend voor zijn uiteindelijke granulaire samenstelling.

6. EIGENSCHAPPEN VAN DE GROND.

In het voorgaande is reeds naar voren gekomen, dat grond uit drie componenten bestaat, namelijk: korrels, water en lucht (gas). De verhouding van de hoeveelheden van deze componenten, zoals zij in een bepaalde grondsoort voorkomen, bepaalt de mechanisch-physische eigenschappen van die grondsoort.

De voor deze kursus van belang zijnde mechanisch-physische eigenschappen van de grond, welke achtereenvolgens worden besproken zijn:

Dichtheid

Doorlatendheid

Samendrukbaarheid
Inwendige wrijvingsweerstand.

6. 1. DICHTHEID.

De grootheden, die de dichtheid van de grond bepalen zijn:

Soortgelijk gewicht
Poriëngehalte of holtepercentage
Poriëngetal
Volumegewicht
Vochtgehalte
Verzadigingsgraad
Luchtgehalte.

6. 1.1. Soortelijk gewicht (s.g.).

Met het soortelijk gewicht wordt altijd bedoeld het gewicht van de korrels als zodanig per volume-eenheid.
Het is dus het gewicht van de zuivere materie, die in de korrels aanwezig is en is afhankelijk van de mineralogische samenstelling van de korrels.
Het soortelijk gewicht van de korrels van in Nederland voorkomende zand- en kleisoorten, die voornamelijk bestaan uit silicaten, is gemiddeld 2,65 t/m^3 of g/cm^3.

Voor veen ligt de zaak anders.Veen is een materie, die bestaat uit plantaardige resten ronddrijvend in een waterig milieu.
Die plantenresten zijn voor een deel gevuld met gas (moerasgas of methaan).
Nu wordt voor de "korrels" van het veen, in dit geval dus plantaardige resten, een soortelijk gewicht van 1 aangehouden.
Dit is echter een simplificatie, want het soortelijk gewicht van de zuivere plantaardige resten zonder gas, bedraagt 1,4.
Niettemin wordt voor veen altijd gerekend met een s.g. = 1, dus het soortelijk gewicht van de plantaardige resten + gas.

Dat is dus geen zuiver soortelijk gewicht, maar een schijnbaar soortelijk gewicht. Maar of deze grootheid nu soortelijk gewicht of schijnbaar soortelijk gewicht wordt genoemd, maakt niet uit. Het is in ieder geval het soortelijk gewicht van de materie, zoals zij in de grond voorkomt.
Dus: schijnbaar soortelijk gewicht van veen = 1 t/m^3 (wordt altijd mee gerekend)
reëel soortelijk gewicht van veen = 1,4 t/m^3 (prettig om te onthouden)

Dit zelfde verschijnsel komt ook voor bij een ophoogmateriaal, dat bekend staat onder de verzamelnaam Flugsand (vliegzand).
Dat is een vulkanische as, welke in de Eifel wordt gevonden en ook wel Eifellith of Lavalith wordt genoemd.
Het wordt gebruikt als licht ophoogmateriaal voor wegenbouw e.d.

Het materiaal bestaat uit bolletjes, welke zijn doorregen met fijne kanaaltjes en holten. Die kanaaltjes zijn ontstaan doordat na eruptie (uitbarsting) van de vulkaan de daarbij ontstane gassen zich een weg naar buiten hebben gebaand.
Daardoor heeft die korrel een aantal poriën, die geheel open zijn, doch ook een aantal die gesloten zijn. Die laatste zijn dus lucht- of gasinsluitingen.
Het aantal van de gesloten poriën is beperkt. De open poriën zijn tot een zekere grens capillair gevuld met water.
Deze vochthoeveelheid kan als natuurlijk vochtgehalte worden beschouwd. Dat is de hoeveelheid water, die het materiaal van nature opneemt.

Wordt namelijk een bepaald volume van het volkomen droge materiaal overgoten met water of met de voet in water gezet, dan zal na verloop van tijd in het materiaal ongeveer dezelfde hoeveelheid water aanwezig zijn.
De in het eerste geval achtergebleven hoeveelheid water is ongeveer gelijk aan de in het tweede geval opgezogen hoeveelheid.
In de poriën kan een bepaalde hoeveelheid water worden vastgehouden en dat gebeurt dan ook. Niet meer en niet minder.

Het gevolg is, dat de korrels, die ongeveer eenzelfde korrelverdeling hebben als grof zand (s.g. = 2,65), niet een daarmee overeenstemmend soortelijk gewicht hebben, maar een veel lager, namelijk: 1,6 t/m^3.
Door de doorgassing en doorwatering is dus een verlaging van het korrelgewicht ontstaan van 2,65 naar 1,6.

Dat korrelgewicht is dan weer een schijnbaar soortelijk gewicht, waarmede kan worden gerekend, alsof het materiaal een soort zand is van een bijzondere samenstelling. Een soort licht zand dus.
Vandaar dat dit materiaal vliegzand (Flugsand) wordt genoemd.

Dus bij veen en Flugsand wordt gerekend met een schijnbaar soortelijk gewicht en bij andere grondsoorten met een reëel soortelijk gewicht.

6. 1.2. Poriëngehalte of holtepercentage.

Het poriëngehalte van een grondsoort is de verhouding van het poriënvolume tot het totale volume van de beschouwde hoeveelheid grond.

$$n = \frac{V_p}{V_{totaal}} \qquad \text{of} \qquad n = \frac{V_p}{V_{totaal}} \times 100\%$$

Het poriënvolume wordt bepaald door een zeker volume grond te drogen en van die gedroogde hoeveelheid grond het gewicht te bepalen. Dat gevonden gewicht gedeeld door het soortelijk gewicht van de korrels geeft dan het korrelvolume.

$$V_k = \frac{G_k}{\gamma_k}$$

Het verschil tussen het totaal volume van de grondhoeveelheid en het korrelvolume is dan het poriënvolume.

$$V_p = V_{totaal} - V_k$$

Het poriëngehalte is dan:

$$n = \frac{V_p}{V_{totaal}} = \frac{V_{totaal} - V_k}{V_{totaal}} = \frac{V_{totaal} - \frac{G_k}{\gamma_k}}{V_{totaal}}$$

Het poriëngehalte wordt in de praktijk nog al eens ten onrechte poriënvolume genoemd. Dit is niet juist, want het poriënvolume is het <u>verschil</u> tussen totaalvolume en korrelvolume, terwijl het poriëngehalte de <u>verhouding</u> is tussen poriënvolume en totaalvolume.

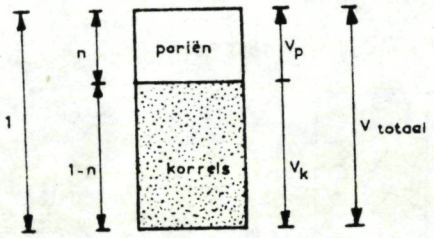


fig. .1 - Poriën - korrels. -

Het poriëngehalte is tevens een maatstaf voor de pakking van de grondlagen.
Vele grondlagen kunnen een losse pakking hebben, welke door verdichten kan worden verbeterd.
Bij zand heeft een statische belasting (hoe groot ook) weinig invloed op de pakking. Ook losgestapelde zandkorrels kunnen grote belastingen opnemen.
Dynamische belastingen, zoals trillen, heien, verkeer, veroorzaken een grote verdichting van zand, waardoor het poriëngehalte kleiner wordt.
Samenhangende gronden hebben veelal vrij grote poriëngehalten. Dat wordt veroorzaakt door onderlinge aantrekkingskrachtjes tussen de korrels en electro-chemische krachtjes.
Bij deze gronden is verdichting door trilling niet mogelijk, wel door druk en kneden (masseren).

6. 1.3. <u>Poriëngetal</u>.

Een andere grootheid, die nog al eens wordt genoemd, is het poriëngetal.
Het poriëngetal is de verhouding van het poriënvolume tot het korrelvolume.

$$\varepsilon = \frac{V_p}{V_k} = \frac{V_{totaal} - \frac{G_k}{\gamma_k}}{\frac{G_k}{\gamma_k}}$$

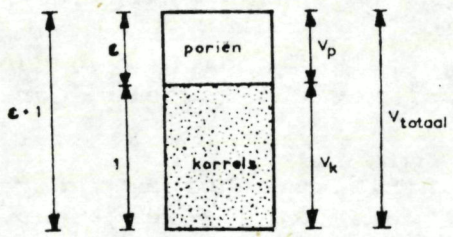
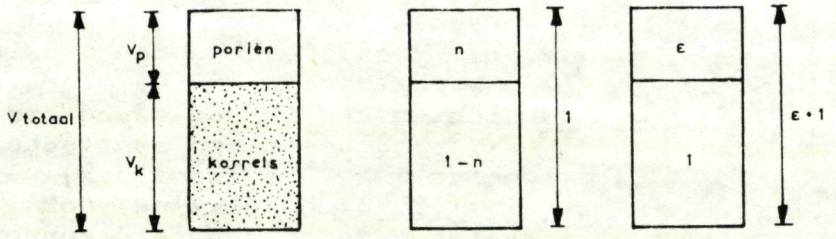


fig. .2 - Poriën - korrels. -

Het poriëngehalte en het poriëngetal hebben beide betrekking op de hoeveelheid poriën die in het monster aanwezig is.

Daar moet dus een verband tussen bestaan. Dat verband is uit fig. .3. te zien en dat is:



$$\varepsilon = \frac{V_p}{V_k} = \frac{n}{1 - n}$$

dus

$$\boxed{\varepsilon = \frac{n}{1 - n}}$$

fig. 3 - Verband tussen n en ε . -

6. 1.4. Volumegewicht.

In een bepaald volume grond zijn aanwezig: mineraalkorrels, water en lucht. Dit wordt wel een 3-fasen toestand genoemd.
Dat volume grond heeft een bepaald gewicht, dat ten dele is toe te schrijven aan het mineraalaggregaat en gedeeltelijk aan het water, dat in de poriën zit.
De in de poriën aanwezige lucht weegt verwaarloosbaar weinig.

Het volumegewicht van die grond is dan het totale gewicht van dat volume grond gedeeld door het volume.

$$\boxed{\gamma = \frac{G_{totaal}}{V_{totaal}}}$$

Het volumegewicht is dus heel wat anders dan het soortelijk gewicht. Het soortelijk gewicht wordt in het algemeen bepaald door weging van een bepaalde hoeveelheid massieve materie (uitgezonderd bij grondsoorten waarvoor een schijnbaar s.g. geldt).
Bij de bepaling van het volumegewicht wordt het gewicht van een composiet (samenstelling) bepaald, en dat gewicht gedeeld door de inhoud van dat composiet.

Zijn de waarden, welke bij die beide definities behoren, vastgesteld, dan is er daartussen natuurlijk een verband, dat als volgt kan worden geschreven.

$$\boxed{\gamma = n.\gamma_w + (1 - n)\gamma_k}$$

$$\begin{matrix} n.\gamma_w & = G_w \\ (1 - n)\gamma_k & = G_k \end{matrix}$$

waarin: γ = volumegewicht
n = poriëngehalte
γ_w = volumegewicht van water
γ_k = soortelijk gewicht van het homogene materiaal (de korrels zelf).

Hierbij wordt verondersteld, dat de poriën geheel met water zijn gevuld. Is dat niet het geval, dan moet het poriëngehalte worden opgesplitst in een gedeelte gevuld met water en een gedeelte gevuld met lucht.

De berekening van het volumegewicht van een volledig met water verzadigd monster volgens deze formule houdt dus het volgende in.
Het poriënvolume wordt vermenigvuldigd met het volumegewicht (s.g.) van water ($n.\gamma_w$) en het overblijvende deel van het volume ($1 - n$), dat dus door de korrels wordt ingenomen, wordt vermenigvuldigd met het soortelijk gewicht van de korrels ($(1 - n).\gamma_k$).
De som van beide producten is het volumegewicht van het monster.

Het verband tussen volumegewicht, soortelijk gewicht en poriëngehalte kan ook in een grafiekje (fig. .4.) worden weergegeven.

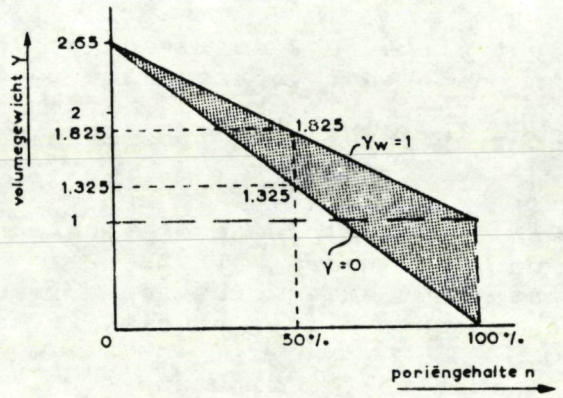


fig. 4 - Verband tussen vol.gew., s.g. en poriëngehalte. -

Droog.
Volume met n = 0%: volumegew. = s.g. korrels.
Volume met n =100%: volumegew. = 0

Nat.
Volume met n = 0%: volumegew. = s.g. korrels
Volume met n =100%: volumegew. = s.g. water

Bij wisselend poriëngehalte en vochtgehalte ligt het volumegewicht dus in het gearceerde gebied.

Droog zand : n = 50% : γ = 1,325
Verzadigd zand: n = 50% : γ = 1,825

6. 1.5. Vochtgehalte of watergehalte.

Wanneer de poriën volledig gevuld zijn met water, dan is de grond volledig verzadigd. Het kan echter ook zijn, dat de poriën slechts gedeeltelijk zijn gevuld met water en verder met lucht.
De grond is dan niet volledig verzadigd.
In beide gevallen kan het vochtgehalte worden bepaald door een grondmonster te wegen vóór en na drogen bij 105 à 110°C.
Het verschil in gewicht van het natte en het droge monster is dan het gewicht van het water, dat aanwezig was.

In tegenstelling tot het poriëngehalte, dat wordt uitgedrukt in een percentage van het totale volume, wordt het vochtgehalte uitgedrukt in gewichtsprocenten droge stof.
Dat wil zeggen: het vochtgehalte is de verhouding tussen het aanwezige gewicht aan water en het aanwezige gewicht aan korrels.

$$W = \frac{G_w}{G_k} \qquad \text{of } W = \frac{G_w}{G_k} \cdot 100\%$$

$G_w = G_{tot} - G_k$ dus ook geldt:

$$W = \frac{G_{tot} - G_k}{G_k}$$

Het feit, dat het vochtgehalte wordt uitgedrukt in % van het droog-gewicht, vloeit voort uit de wijze waarop het vochtgehalte moet worden bepaald.
Het water wordt ingedampt, het vochtverlies geregistreerd en het restant is droge stof.

Deze wijze van aanduiding heeft wel tot gevolg, dat er vochtgehalten kunnen worden gevonden, die meer dan 100% bedragen.
Dat lijkt wat vreemd, want in eerste instantie wordt een verzadigd grondmonster altijd bezien als bestaande uit een gedeelte korrels en een gedeelte water. Tezamen 100%
Het vochtgehalte zou dan altijd kleiner moeten zijn dan 100%.
Dit zou juist zijn, wanneer het vochtgehalte zou worden gedefinieerd als de verhouding tussen het gewicht aan water en het gewicht van het totale monster. Dus $\frac{G_w}{G_{totaal}}$

Daar echter om eerdergenoemde redenen het vochtgehalte wordt uitgedrukt in een percentage van het droog gewicht, dus $\frac{G_w}{G_k}$, kan het vochtgehalte meer dan 100% bedragen.

Bij zand zal dit niet zo gauw het geval zijn, doch bij klei met soms een poriëngehalte van 0,8 (= 80% poriën) kan dat wel zo zijn.
Een voorbeeld ter verduidelijking.

Een kleimonster bevat 80% poriën. Het poriëngehalte n = 0,8. Het monster is volledig verzadigd.
Uit het verband tussen s.g. en volumegewicht volgt dan:

$$\gamma = n.\gamma_w + (1 - n)\gamma_k = 0{,}8.1 + (1 - 0{,}8).\ 2{,}65 = 0{,}8 + 0{,}2.\ \ 2{,}65 = 0{,}8 + 0{,}53 \therefore \gamma = 1{,}33\ t/m^3$$

Vochtgehalte is:

$$W = \frac{G_w}{G_k} = \frac{n.\gamma_w}{(1 - n)\gamma_k} = \frac{0{,}8}{0{,}53} \cdot 100\% \fallingdotseq 150\%.$$

6. 1.6. Verzadigingsgraad.

De verzadigingsgraad van een grondmonster is het percentage poriën, dat gevuld is met water en wordt weergegeven door de verhouding van het volume van het in het monster aanwezige water en het volume van de poriën.

$$S_r = \frac{V_w}{V_p}$$

$$V_w = \frac{G_w}{\gamma_w} = \frac{G_{tot.} - G_k}{\gamma_w}, \quad V_p = V_{tot.} - V_k = V_{tot.} - \frac{G_k}{\gamma_k}$$

Dus ook geldt:

$$S_r = \frac{\frac{G_{tot.} - G_k}{\gamma_w}}{V_{tot.} - \frac{G_k}{\gamma_k}} \cdot 100\%$$

6. 1.7. Luchtgehalte.

In een niet volledig verzadigd grondmonster, zijn de niet met water gevulde poriën gevuld met lucht (gas).
Het luchtgehalte is het percentage poriën, dat gevuld is met lucht en wordt weergegeven door de verhouding van het volume van de in het monster aanwezige lucht tot het totale volume van het monster.

$$n_l = \frac{V_l}{V_{tot.}} \quad \text{of} \quad n_l = \frac{V_l}{V_{tot.}} \cdot 100\%$$

$$V_l = V_{tot.} - V_k - V_w, \quad V_k = \frac{G_k}{\gamma_k}, \quad V_w = \frac{G_{tot.} - G_k}{\gamma_w}$$

6. 2. DOORLATENDHEID.

De doorlatendheid van grond moet in vele gevallen bekend zijn in verband met onder andere:

de bepaling van dijkskwel (waterstroming onder een dijk door).
de bepaling van de mogelijkheid en de capaciteit van bronbemaling.
de bepaling van andere drainagemogelijkheden.

Het bepalen van de doorlatendheid van grond is in feite het meten van de hoeveelheid water, die per tijdseenheid bij een bepaalde temperatuur door een bekende doorsnede stroomt.

Alvorens tot de bespreking van de doorlatendheid over te gaan, eerst enige bij de bepaling daarvan van belang zijnde begrippen.

6. 2.1. Drukhoogte, potentiaal, potentiaalverschil, verhang.

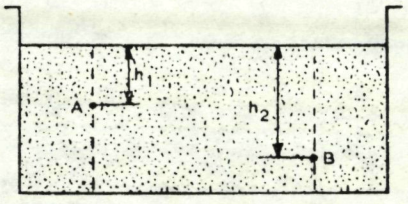


fig. 5 - Drukhoogte. -

In een bak grof zand, verzadigd met water, staat het water in de verticalen A en B even hoog. De hoogte van de punten A en B is verschillend. Punt A ligt hoger dan punt B.
De drukhoogte, of kortweg druk, in punt A wordt bepaald door de hoogte van de waterkolom h_1 boven punt A en in B door de hoogte van de waterkolom h_2 boven punt B.
Het is duidelijk, dat de drukhoogte in B groter is dan in A.
Niettemin gebeurt er verder niets, het water is in rust en blijft in rust.
Het water staat in de verticalen A en B even hoog ten opzichte van b.v. de bodem van de bak.
Het water gaat niet stromen. Voor waterstroming is namelijk potentiaalverschil nodig. De hoogte van het water in de verticalen A en B t.o.v. de bodem moet dan verschillend zijn.

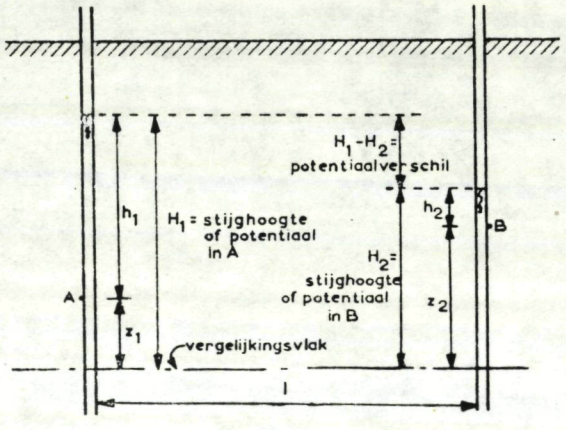


fig.6 - Potentiaal en potentiaalverschil. -

Worden nu in de punten A en B van een grondlaag peilbuizen geplaatst, dan zal het water in de buizen stijgen tot een bepaalde hoogte, afhankelijk van de ter plaatse heersende waterspanning.

$$h_1 = \frac{S_1}{\gamma_w} \quad \text{en} \quad h_2 = \frac{S_2}{\gamma_w}$$

De hoogten h_1 en h_2 zijn de drukhoogten (drukken) in A en B.

De hoogten Z_1 en Z_2 van de punten A en B ten opzichte van een aan te nemen vergelijkingsvlak worden de plaatshoogten van A en B genoemd.

De som van drukhoogte en plaatshoogte is de stijghoogte.
Dus: $H_1 = h_1 + Z_1$
$H_2 = h_2 + Z_2$

De stijghoogte in A en B is tevens de potentiaal in die punten. Onder de potentiaal in een punt wordt verstaan het hoogteverschil tussen de bovenkant van de waterkolom in dat punt en een aangenomen vergelijkingsvlak.

Het verschil tussen de potentiaal (stijghoogte) in A en B is het potentiaalverschil.

Voor de stroming van water tussen twee punten volgens bepaalde stroomlijnen is altijd potentiaalverschil nodig.

De verhouding tussen het potentiaalverschil van twee punten en de afstand tussen die punten is een gegeven, dat veel in de vloeistofmechanica wordt gebruikt, namelijk het verhang.

Het verhang tussen twee punten van een stroomlijn is de verhouding van het potentiaalverschil tussen die punten en de lengte van de stroomlijn die deze punten verbindt.

Dus het verhang is:

$$i = \frac{H_1 - H_2}{l}$$

De hoeveelheid water Q, die bij een bepaalde temperatuur per tijdseenheid door een bepaalde doorsnede stroomt ten gevolge van het potentiaalverschil, gedeeld door het oppervlak van die doorsnede F, wordt het specifiek debiet q genoemd.

$$q = \frac{Q}{F} \qquad \text{of} \qquad V_f = \frac{Q}{F}$$

Het specifiek debiet q wordt ook wel ideële - of filtersnelheid genoemd en heeft de dimensie van een snelheid. Het is een rekengrootheid.

F is het oppervlak van de volledige doorstroomde doorsnede. Het water stroomt in grond echter alleen door de poriën, waarvan de gezamenlijke doorsnede kleiner is dan F. De snelheid van het water is dus groter dan q.
De werkelijke snelheid van het water is dan:

$$V_r = \frac{q}{n} \qquad \text{of} \qquad V_r = \frac{V_f}{n}$$

waarin n = poriëngehalte V_f = filtersnelheid V_r = reële snelheid

Darcy heeft nu op experimentele wijze gevonden, dat het specifiek debiet q rechtevenredig is met het verhang i.
Dus:

$\boxed{q = k.i.}$ of $\boxed{V_f = k.i.}$

Hieruit volgt: $k.i. = \frac{Q}{F}$ en:

$\boxed{Q = k.i.F \text{ per tijdseenheid } t}$

Dit is de wet van Darcy.
De ingevoerde constante k (met de dimensie van een snelheid) is de doorlatendheidscoëfficient.

6.3 en 6.4. SAMENDRUKBAARHEID EN INWENDIGE WRIJVINGSWEERSTAND.

De samendrukbaarheid en de inwendige wrijvingsweerstand worden apart behandeld, tezamen met de daarbij betrokken grondmechanische aspecten, zoals zettingen (samendrukking) en afschuiving (inwendige wrijvingsweerstand).

Bij de bespreking van deze mechanisch-physiche eigenschappen van de grond worden nog al eens de begrippen: grondspanning, korrelspanning en waterspanning genoemd.
Daarom zullen deze begrippen eerst worden behandeld, alvorens over te gaan tot de behandeling van de eigenschappen samendrukbaarheid en inwendige wrijvingsweerstand met de daarbij behorende grondmechanische aspecten.

7. DE SPANNINGEN IN DE GROND.

Bij het berekenen van spanningen in de grond is het nodig er van uit te gaan, dat grond uit de meergenoemde componenten korrels, water en lucht bestaat en zich daarom niet als een homogeen materiaal gedraagt.
Elke component heeft zijn eigen spanning. Vandaar dat in de grondmechanica gerekend wordt met:

korrelspanningen
waterspanningen
luchtspanningen

De twee eerstgenoemde spanningen zullen worden besproken. De luchtspanning is in dit kader van minder belang.

Drukspanningen worden in de grondmechanica positief en trekspanningen negatief gerekend.

7. 1. Korrelspanningen.

Bij volkomen droge grond worden in de contactpunten tussen de korrels krachten overgebracht. Zijn de korrels in rust dan geldt voor iedere korrel, dat de daarop werkende krachten met elkaar in evenwicht zijn. Door het grote aantal korrels is het niet te doen om met de krachten te rekenen, die op elke korrel worden uitgeoefend. Daarom moeten een aantal schematisaties worden ingevoerd, die hanteerbare rekengrootheden moeten opleveren.

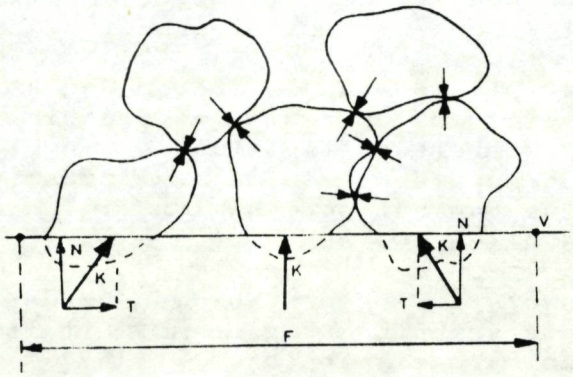


fig. 7 - Korrelspanningen in droge grond. -

In een willekeurig doorsnijdingsvlak van de korrels kunnen de krachten worden aangegeven, die de korrels op elkaar uitoefenen.
Wordt nu in de grond een vlak V beschouwd, dan werken in dat vlak de resulterende krachten K op de korrels, die evenwicht maken met de krachten in de contactpunten.
Qua richting en grootte zijn deze krachten voor iedere korrel verschillend.
Het is daarom dan ook beter te rekenen met de gemiddelde spanning over een zeker vlak F, dat ten opzichte van de korreldiameter grote afmetingen heeft.

De ter plaatse van de verschillende korrels op dat vlak in allerlei richtingen werkende krachten worden ontbonden in componenten loodrecht op het vlak F en componenten T evenwijdig aan F.

De gemiddelde normale korrelspanning op vlak F is dan: $\sigma_k = \frac{\Sigma N}{F}$, en
de gemiddelde schuifspanning in vlak F is dan: $\tau_k = \frac{\Sigma T}{F}$

De gemiddelde korrelspanningen zijn aanmerkelijk lager dan de spanningen in de aanrakingspunten van de korrels zelf.

7. 2. Waterspanningen.

Bij geheel met water verzadigde grond zijn de poriën geheel gevuld met water. In die poriën heerst dan een alzijdige waterspanning u. Worden nu zeer kleine aanrakingsvlakjes tussen de korrels tot punten geschematiseerd, dan kan worden aangenomen, dat die waterspanning u op het gehele korreloppervlak werkt.

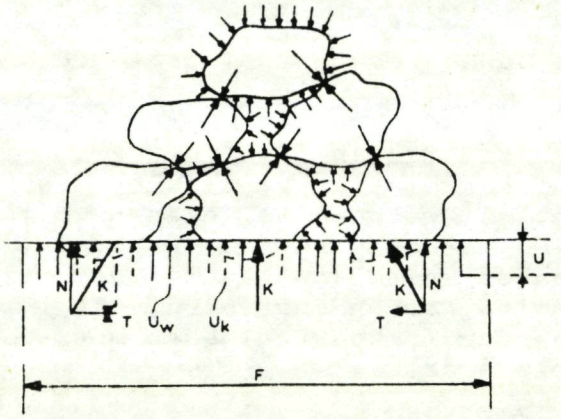


fig. 8 - Korrel- en waterspanningen. -

Als aan de buitenzijde van een korrel een alzijdige spanning heerst, is er ook in de korrel een alzijdige spanning aanwezig.

Hieruit volgt, dat wanneer - evenals in het vorige geval - een vlak F in de grond wordt beschouwd, in dat vlak ook die spanning heerst.

Ter plaatse van de doorsneden korrels heerst dus de alzijdige spanning in de korrels en ter plaatse van de doorsneden poriën de alzijdige spanning van het poriënwater. In beide gevallen een spanning u.

Deze spanningen u tezamen worden de waterspanning σ_w genoemd. Dit is een normaalspanning.
Schuifspanningen zijn niet aanwezig, want water is frictieloos, het kan geen wrijvingskrachten opnemen.

Behalve de door het water op de korrels uitgeoefende krachten, oefenen de korrels onderling ook weer krachten op elkaar uit, evenals bij droge grond.
De daaruit voortvloeiende gemiddelde spanningen op vlak F zijn dan weer $\sigma_k = \frac{\Sigma N}{F}$ en $\tau_k = \frac{\Sigma T}{F}$.

7. 3. Grondspanning.

De som van de normale korrelspanningen en de waterspanning is de grondspanning of totale spanning. Dus:

$$\sigma_g = \sigma_k + \sigma_w$$

De grondschuifspanning is gelijk aan de korrelschuifspanning. Dus:

$$\tau_g = \tau_k$$

De indices g en k worden verder dan ook nooit gebruikt.

De hier ingevoerde korrelspanning σ_k is slechts een rekengrootheid en niet de werkelijke spanning in de korrels zelf.
Die werkelijke spanning is, vooral bij de aanrakingspunten, aanmerkelijk groter dan de gemiddelde korrelspanning, waarmede wordt gerekend.

De als rekengrootheid ingevoerde gemiddelde korrelspanningen σ_k en τ zijn bepalend voor de deformaties en het evenwicht van de grond.
De alzijdige waterspanning u veroorzaakt nauwelijks deformatie van de korrels zelf, omdat deze vrijwel niet samendrukbaar zijn.
De deformaties in het korrelskelet van de grond worden hoofdzakelijk veroorzaakt door wijziging in de structuur van het skelet of de korrelstapeling.

De krachten tussen de korrels onderling zijn daartoe in staat, want: $\sigma_k = \frac{\Sigma N}{F}$ en $\tau_k = \frac{\Sigma T}{F}$, waaruit volgt, dat de korrelspanningen de invloed van de krachten tussen de korrels onderling weergeven.

7. 4. Bepaling van grond-, korrel- en waterspanningen.

Bij een uitgestrekt terrein met horizontaal bovenvlak is het vrij eenvoudig de spanningen op lager dan het maaiveld gelegen horizontale vlakken te bepalen.
De wijze, waarop de bepaling van de spanningen, die kunnen optreden als gevolg van de componenten korrels en water, plaats vindt, zal successievelijk worden opgebouwd.

7. 4.1. Volledig droge grond.

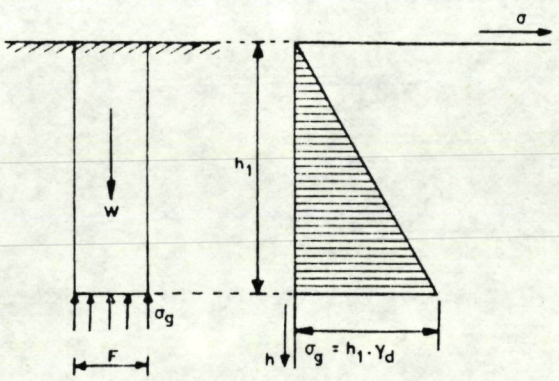


fig. 9

De grondspanning op een horizontaal vlak op een diepte h_1 onder het maaiveld wordt gevonden uit het verticaal evenwicht van een kolom grond met een hoogte h_1 en een doorsnede F.
Het gewicht van de grondkolom is:

$W = h_1 . F . \gamma_d$, waarin γ_d = volumegewicht van de droge grond.

De spanning in het vlak F is dan:

$$\sigma_g = \frac{W}{F} = \frac{h_1 . F . \gamma_d}{F}$$

$$\boxed{\sigma_g = h_1 . \gamma_d}$$

Rekenende vanaf het maaiveld neemt de grondspanning σ_g dus lineair met de diepte h toe.
In de poriën zit geen water, dus $\sigma_g = \sigma_k$.
Uit symetrie-overwegingen volgt, dat op de zijvlakken van de kolom en in het horizontale vlak geen schuifspanningen werken.

7. 4.2. Volledig droge grond met bovenbelasting.

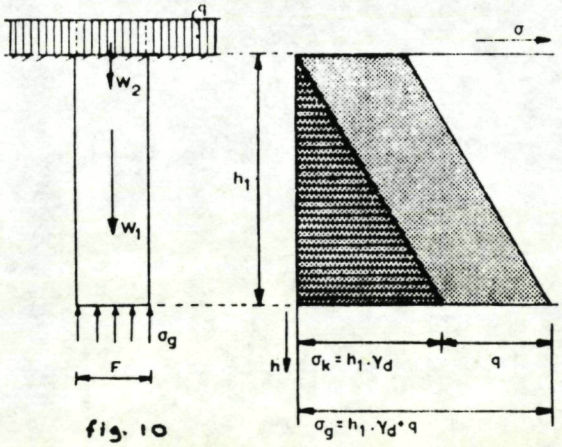


fig. 10

Wordt nu op het maaiveld een bovenbelasting q aangebracht, dan zal deze grondspanning σ_g verhogen.
Het gewicht van de grondkolom is weer:

$W_1 = h_1 . F . \gamma_d$

De bovenbelasting per eenheid van oppervlakte is q en vertegenwoordigt dus een gewicht:

$W_2 = q . F$

Het totale gewicht is dan: $W = W_2 + W_1 = q.F + h_1.F.\gamma_d$

$$\sigma_g = \frac{W}{F} = \frac{W_2 + W_1}{F} \qquad \sigma_g = \frac{q.F + h_1.F.\gamma_d}{F}$$

$$\boxed{\sigma_g = h_1.\gamma_d + q}$$

Ook hier is geen water in de poriën aanwezig, dus: $\sigma_g = \sigma_k$.

7. 4.3. <u>Met water verzadigde grond.</u>

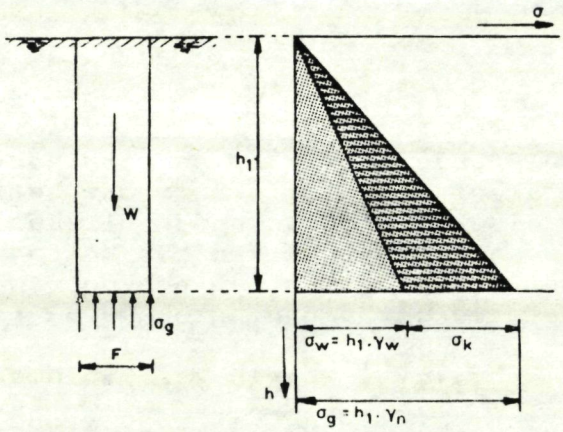


fig. II

In het geval dat de grond tot aan het maaiveld verzadigd is met water is het gewicht van de grondkolom:

$W = h_1.F.\gamma_n$, waarin γ_n = volumegewicht van de natte grond.

De spanning in vlak F is dan:

$$\sigma_g = \frac{W}{F} = \frac{h_1.F.\gamma_n}{F}$$

$$\boxed{\sigma_g = h_1.\gamma_n}$$

Nu zit er water in de poriën en dan is:

$$\sigma_g \neq \sigma_k$$

Nu moet rekening worden gehouden met de waterspanning.
Deze is aan het maaiveld = 0 en zolang het water in rust is, verloopt de waterdruk hydrostatisch. Dat wil zeggen: de waterdruk neemt lineair met de diepte h toe.
Het gewicht van de kolom water op F is dan: $W_w = h_1.F.\gamma_w$.

De waterspanning in vlak F is dan: $\sigma_w = \frac{h_1.F.\gamma_w}{F}$

$$\boxed{\sigma_w = h_1.\gamma_w}$$

Het is reeds bekend dat: $\sigma_g = \sigma_k + \sigma_w$

σ_g is bekend, σ_w is bekend, dus σ_k is te berekenen, namelijk:

$$\sigma_k = \sigma_g - \sigma_w = h_1.\gamma_n - h_1.\gamma_w$$

$$\boxed{\sigma_k = (\gamma_n - \gamma_w).h_1}$$

7. 4.4. Waterspiegel boven het maaiveld.

Ook nu kunnen weer uit het verticaal evenwicht van de kolom grond + water de spanningen in vlak F worden berekend.

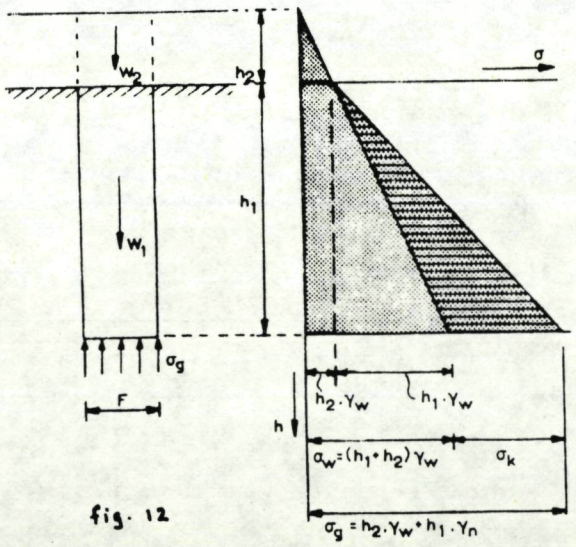


fig. 12

Het gewicht van de kolom met water verzadigde grond is:
$W_1 = h_1 \cdot F \cdot \gamma_n \cdot$

Het gewicht van de kolom water boven het maaiveld is:
$W_2 = h_2 \cdot F \cdot \gamma_w \cdot$

Het totale gewicht is dan:
$W = W_1 + W_2 = h_1 \cdot F \cdot \gamma_n + h_2 \cdot F \cdot \gamma_w \cdot$

De grondspanning in F is dan:

$$\sigma_g = \frac{W}{F} = \frac{h_1 \cdot F \cdot \gamma_n + h_2 \cdot F \cdot \gamma_w}{F}$$

$$\boxed{\sigma_g = h_1 \cdot \gamma_n + h_2 \cdot \gamma_w}$$

Ook nu verloopt de waterdruk hydrostatisch vanaf de waterspiegel.

Het gewicht van de waterkolom boven F is: $(h_1 + h_2) \cdot F \cdot \gamma_w$

De waterspanning in F is dan: $\sigma_w = \frac{(h_1 + h_2) \cdot F \cdot \gamma_w}{F}$

$$\boxed{\sigma_w = (h_1 + h_2) \cdot \gamma_w}$$

De korrelspanning is dan weer te berekenen uit:

$$\sigma_k = \sigma_g - \sigma_w = h_1 \cdot \gamma_n + h_2 \cdot \gamma_w - (h_1 + h_2)\gamma_w = h_1 \cdot \gamma_n + h_2 \cdot \gamma_w - h_1 \cdot \gamma_w -$$

$$h_2 \cdot \gamma_w = h_1 \cdot \gamma_n - h_1 \cdot \gamma_w$$

$$\boxed{\sigma_k = (\gamma_n - \gamma_w) \cdot h_1}$$

Hieruit volgt, dat de korrelspanning in dit geval dezelfde grootte heeft als in het geval waarbij de grondtot aan het maaiveld verzadigd is met water.
Met andere woorden: verhoging van de waterspiegel tot boven het maaiveld geeft in volledig verzadigde grond geen verhoging van de korrelspanningen.

7. 4.5. <u>Waterspiegel beneden het maaiveld</u>.

Dit geval kan worden behandeld als een combinatie van 7.4.1. en 7.4.3.

$W_1 = (h_1 - h_2).\gamma_n.F, \quad W_2 = h_2.F.\gamma_d$

$W = W_1 + W_2 = (h_1 - h_2).F.\gamma_n + h_2.F.\gamma_d.$

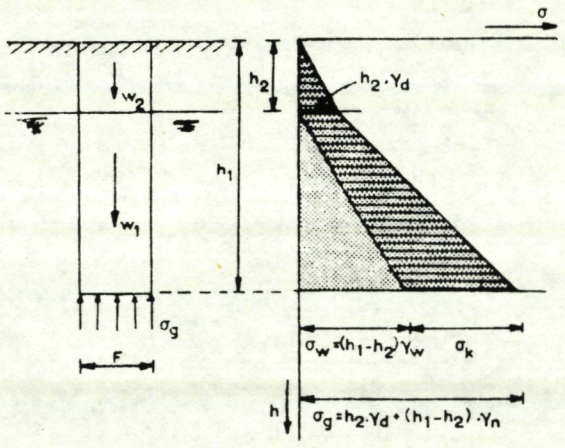


fig. 13

De grondspanning in F is dan:

$$\sigma_g = \frac{W}{F} = \frac{(h_1 - h_2).F.\gamma_n + h_2.F.\gamma_d}{F}$$

$$\boxed{\sigma_g = (h_1 - h_2).\gamma_n + h_2.\gamma_d}$$

Het gewicht van de waterkolom op F is:
$(h_1 - h_2).F.\gamma_w$

De waterspanning in F is dan:

$$\sigma_w = \frac{(h_1 - h_2).F.\gamma_w}{F}$$

$$\boxed{\sigma_w = (h_1 - h_2).\gamma_w}$$

De korrelspanning is dan weer te berekenen uit:

$$\sigma_k = \sigma_g - \sigma_w = (h_1 - h_2).\gamma_n + h_2.\gamma_d - (h_1 - h_2).\gamma_w$$
$$= h_1.\gamma_n - h_2.\gamma_n + h_2.\gamma_d - h_1.\gamma_w + h_2.\gamma_w$$

$$\boxed{\sigma_k = (\gamma_n - \gamma_w).h_1 + (\gamma_d + \gamma_w - \gamma_n).h_2}$$

Bij de waterspiegel onder maaiveld is $\sigma_k = (\gamma_n - \gamma_w).h_1 + (\gamma_d + \gamma_w - \gamma_n).h_2$

Bij met water verzadigde grond is $\sigma_k = (\gamma_n - \gamma_w).h_1$.

Uit vergelijking van de korrelspanningen in beide gevallen blijkt, dat door het verlagen van de waterspiegel de korrelspanningen toenemen.

Het geval met de grondwaterspiegel onder het maaiveld komt in de praktijk het meeste voor.
In het voorgaande is steeds uitgegaan van één homogene grondlaag en zijn de grond-, water- en korrelspanningen steeds apart bepaald.
Aan de hand van een eenvoudig voorbeeld wordt nu aangegeven, wat de in de praktijk gebruikelijke manier is om dergelijke berekeningen uit te voeren en het verschil is met de besproken methode.

Volgens de methode zoals in de voorgaande gevallen is aangehouden, wordt eerst de grondspanning bepaald onder invoering van de droge of natte volumegewichten van de grond.
Daarna wordt de waterspanning bepaald.
De korrelspanning wordt dan verkregen door de waterspanning van grondspanning af te trekken ($\sigma_k = \sigma_g - \sigma_w$).
Dit is een vrij omslachtige manier, die vrijwel nooit wordt toegepast.
Hij geeft wel een goed inzicht wat er wordt berekend.

7. 4.6. Overspannen en onderspannen water.

Het verloop van de waterspanningen is niet altijd hydrostatisch, zoals in het voorgaande is aangenomen.
Wanneer in het grondprofiel slecht doorlatende lagen aanwezig zijn, is er vaak een afwijking van het hydrostatisch verloop te constateren.
Bij overspannen water is de waterspanning in een bepaalde laag groter dan overeenkomt met het hydrostatisch drukverloop.
Bij onderspannen water is de waterspanning kleiner dan de hydrostatische druk.

In beide gevallen zullen grondwaterstromingen ontstaan die ook weer hun repercussies hebben op spanningen en stabiliteit.

In het navolgende is een geval van overspannen grondwater aangegeven en een geval met onderspannen grondwater.

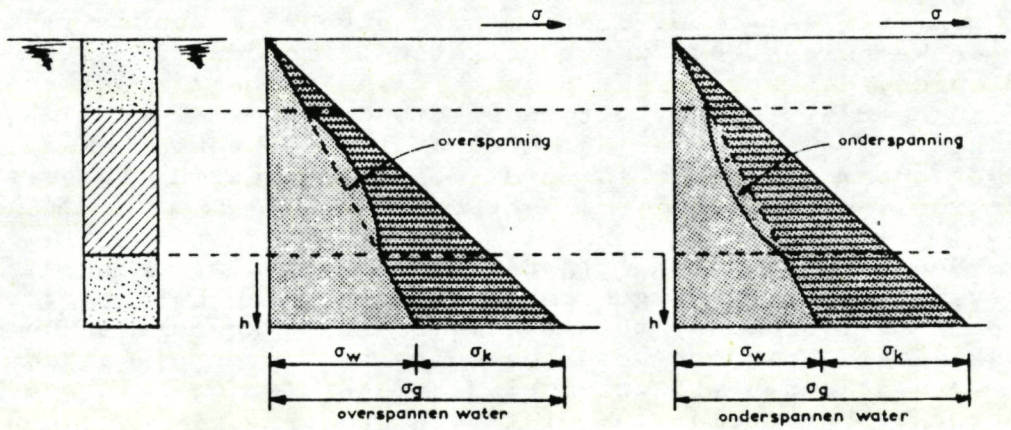


fig. 14 - Over- en onderspannen water. -

7. 4.7. Spanningen in niet horizontale vlakken.

In het voorgaande is steeds uitgegaan van een uitgestrekt grondmassief, waarin de spanningen op horizontale vlakken werden bezien. In een dergelijk massief werken echter ook spanningen op niet-horizontale vlakken.
Daar deze materie nog ter sprake komt bij de behandeling van de inwendige wrijvingsweerstand, wordt er hier niet verder op ingegaan.

8. SAMENDRUKBAARHEID, CONSOLIDATIE, INWENDIGE WRIJVINGWEERSTAND.

Wordt op een grondmassief een belasting aangebracht, dan zal de grond onder invloed van die belasting worden samengedrukt.
Die samendrukking van de grond wordt zetting genoemd.
Het is bij allerlei constructies van groot belang die samendrukking of zetting te kennen.
Voorbeelden hiervan zijn:

de zettingen of zettingsverschillen van op staal gefundeerde gebouwen
de zakking van een dijk
de daling van het maaiveld als gevolg van grote verlaging van de grondwaterspiegel.
(Geeft korrelspanningsverhoging, dus zetting).
de zettingen of zettingsverschillen van transportleidingen.

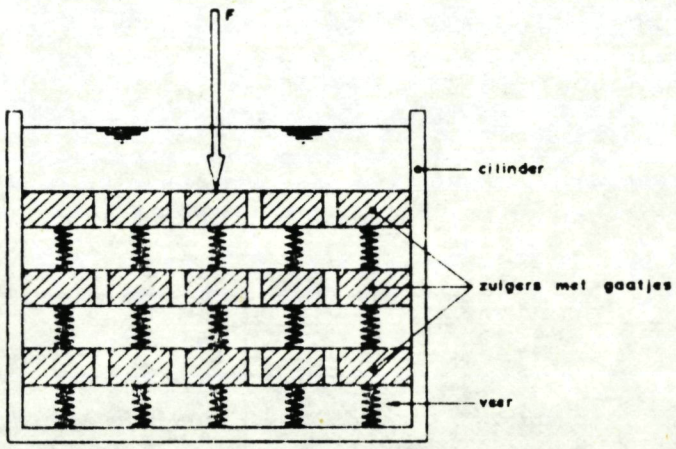
Alvorens het begrip van de samendrukking zal worden besproken moet eerst het begrip Consolidatie worden ingevoerd.

8. 1. Consolidatie.

Wanneer een met water verzadigd grondmassief wordt belast door b.v. een grondophoging dan zal dit grondmassief onder die belasting worden samengedrukt. Het totale volume van de grond wordt hierbij kleiner. Daar echter het volume van de gronddeeltjes niet kleiner wordt omdat die deeltjes zelf vrijwel onsamendrukbaar zijn, betekent dit dat er water moet worden weggeperst of zoals men dit zegt, moet afstromen. Hiervoor is echter tijd nodig en kan bij slecht waterdoorlatende gronden tientallen jaren duren. Het korrelskelet van klei en veen is zowel sterk samendrukbaar als slecht waterdoorlatend.
Omdat het aanwezige water dat moet afstromen, zoals bekend, nagenoeg onsamendrukbaar is wordt de bovenbelasting in eerste instantie door het aanwezige poriënwater gedragen. Het water

krijgt door die belasting tijdelijk een hogere spanning die wateroverspanning wordt genoemd. Als gevolg van het wegstromen van het water wordt het totale volume van de korrels en het water kleiner. Hierdoor komen de korrels dichter bij elkaar te liggen en kunnen zij geleidelijk een groter deel van de aangebrachte bovenbelasting dragen. Hierdoor wordt de overspanning van het water geleidelijk kleiner en gaat de afstroming steeds langzamer.

De samendrukking van de grond verloopt dan ook steeds langzamer. Zodra de korrels de gehele belasting van het water hebben overgenomen is de eindzakking bereikt. Men zegt dan dat de grond geconsolideerd is.
De tijd waarin deze plaats vindt noemt men de hydrodynamische periode.
De consolidatie kan door figuur 15 worden verduidelijkt.



figuur .15.

In een met water gevulde cylinder kunnen een aantal waterdicht afsluitende zuigers bewegen. Die beweging wordt wrijvingsloos verondersteld.
Tussen de zuigers bevindt zich een aantal veren.
Bij belasting van de zuigers zullen deze niet zakken, want water is vrijwel onsamendrukbaar en het kan niet ontsnappen.

Het water neemt dus de totale belasting op en komt onder spanning te staan.

Zitten er nu kleine gaatjes in de zuigers, dan wordt weer direct na belasting van de zuigers de volledige belasting door het water gedragen.
De waterspanning wordt hoger dan voorheen, doch het water kan nu als gevolg van die overspanning door de gaatjes in de zuigers wegstromen.

De bovenste zuiger zal eerst dalen, de bovenste veren worden wat samengedrukt en nemen een gedeelte van de belasting over.
Hierdoor vermindert in het bovenste compartiment de wateroverspanning, zodat het water uit de lager gelegen compartimenten naar boven stroomt.
De afstroming wordt steeds minder door de afnemende spanningsverschillen.
Zodra de veren de totale belasting dragen, is de uitstroming geëindigd en is de oorspronkelijke spanning in het water weer bereikt.

Hier komen de veren overeen met het korrelskelet van grond en de uitstroming van het water door de gaatjes in de zuigers is te vergelijken met de stroming van het grondwater door de poriën.

8. 2. SAMENDRUKKINGSPROEF.

Om de consolidatie qua grootte en tijd te kunnen bepalen, moet de samendrukbaarheid van grond bekend zijn.
Die samendrukbaarheid kan in het laboratorium worden bepaald, door op een grondmonster uit een te beschouwen grondlaag de samendrukkingsproef uit te voeren.

De samendrukkingsproef gaat als volgt.

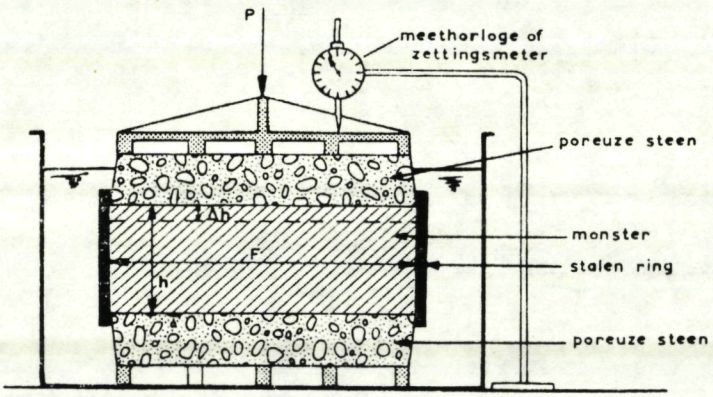


fig. 16 - Schema samendrukkingsproef. -

Het grondmonster wordt in een stijve stalen ring geplaatst.
Het monster wordt aan de onder- en bovenzijde door poreuze stenen afgesloten. Hierdoor kan het poriënwater vrij af- en toestromen.
Het geheel zet men in een bakje water om het uitdrogen door verdamping uit te schakelen. Het bakje wordt nu onder een belastingsmechanisme gezet, waarmee een willekeurige belasting op het monster kan worden aangebracht. Door middel van een meethorloge wordt dan op vastgestelde tijdstippen de door de aangebrachte belasting veroorzaakte zetting gemeten.

8. 2.1. Logaritmische samendrukkingswetten.

De wetten zijn ontwikkeld door von Terzaghi, Keverling Buisman en ir. A.W. Koppejan.
Terzaghi ging uit van een zettingsproces dat na het opbrengen van de belasting begint totdat na verloop van tijd, die de hydrodynamische periode wordt genoemd, de eindzetting is bereikt. Hij vond onder meer dat de eindzetting evenredig is met de logaritme van de belasting.

In formule uitgedrukt:

$$Z = \frac{h}{c} \cdot \ln \frac{p + \Delta p}{p}$$

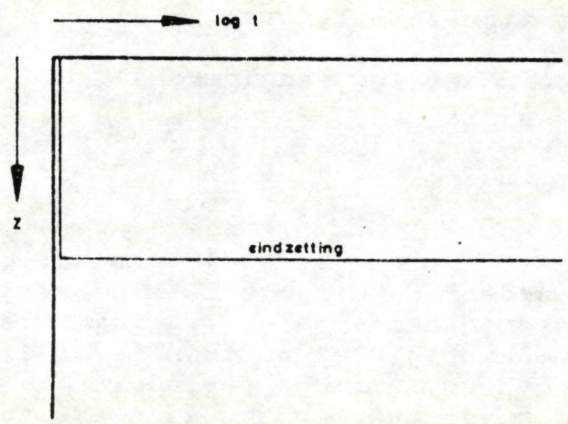
Hierin is Z = zetting in m
h = dikte samendrukbare laag in m
p = oorspronkelijke korrelspanning in die laag in kN/m^2
Δp = aangebrachte belasting in kN/m^2
$\frac{1}{c}$ = een constante die samendrukkingsconstante wordt genoemd.

Hieronder volgen enige C-waarden:

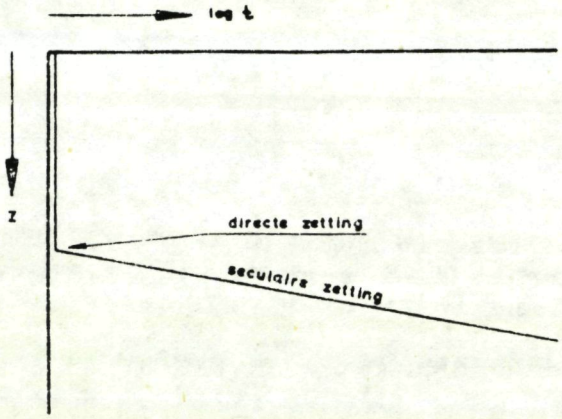
zand	100 à 500
klei	10 à 20
veen	5 à 10

8. 2.3. Seculair effect.

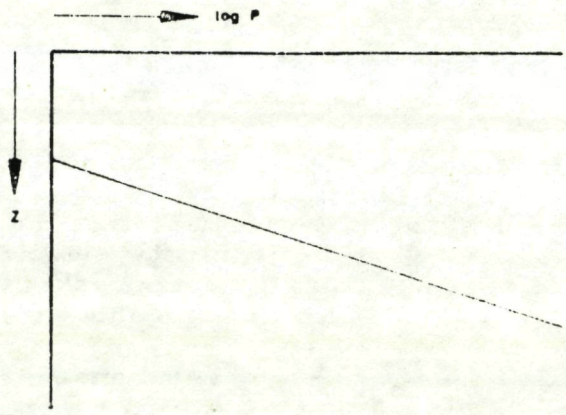
Buisman heeft gevonden dat bij de Nederlandse grondsoorten géén echte eindzetting wordt bereikt. Er treedt nog een soort nazakking op die evenredig met de logaritme van de tijd blijkt te zijn en seculair effect wordt genoemd.
Ook Buisman vond echter dat zijn "eindzettingen", die dus nu bepaald moeten worden voor een bepaald tijdsverloop, evenredig zijn met de logaritme van de belastingen.
Gaan we er nu gemakshalve even van uit dat we te maken hebben met een zeer doorlatende grondsoort, die dan dus een zeer korte hydrodynamische periode heeft, dan kan de theorie van Terzaghi worden voorgesteld door figuur .17. en die van Buisman door .18.
De logaritmische wet voor de belasting-zettingsrelatie blijkt uit figuur 19.



figuur .17.



figuur .18.



figuur .19.

Koppejan heeft voor deze beide theorieën één formule opgesteld, die thans algemeen wordt gebruikt en luidt:

$$Z = h \left(\frac{1}{C_p} + \frac{1}{C_s} \log t\right) \ln \frac{p + \Delta p}{p}$$

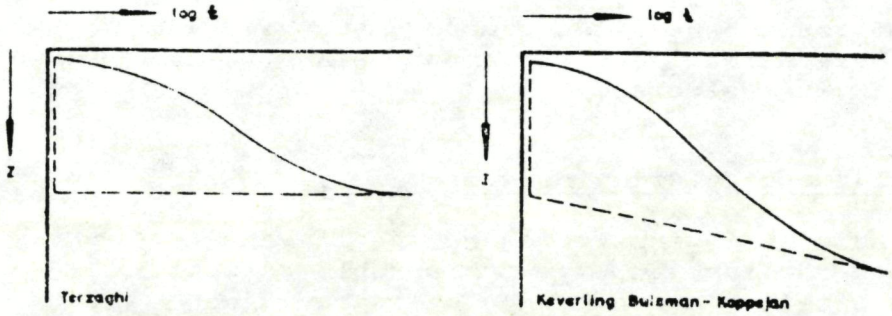
Hierin is :

Z	=	zetting in m
h	=	laagdikte in m
t	=	tijd in dagen
p	=	oorspronkelijke korrelspanning in kN/m^2
Δp	=	aangebrachte belasting in kN/m^2
log	=	gewone logaritme
ln	=	natuurlijke logaritme (= 2,3 x log)
$\frac{1}{C_p}$ en $\frac{1}{C_s}$	=	samendrukkingsconstanten voor direct- en secundair effect.

Verwaarloost men in de formule van Koppejan het secundair effect dan is $\frac{1}{C_s} = 0$ en gaat zijn formule over in die van Terzaghi.
Verder zien we dat de eindzetting van Terzaghi gelijk is aan de directe zetting van Buisman.

8. 2.4. Tijdseffect.

Het uitgangspunt voor de figuren 17 en 18 was dat de grond erg goed doorlatend was waardoor de directe zetting vrijwel direct optreedt en dus geen hydrodynamische vertraging ontstaat. Dit is bij zand het geval maar bij klei en veen is er altijd sprake van een aanmerkelijke hydrodynamische periode.
De zettingen met de tijd verlopen in dat geval volgens figuur 20.



figuur .20.

8. 2.5. Laagdikte effect.

De tijdsduur van de hydrodynamische periode hangt in hoofdzaak af van:

- de doorlatendheid van de grond en
- de lengte van de weg die het afstromende poriënwater moet afleggen.

De formule waarmee de duur van de hydrodynamische periode kan worden berekend luidt:

$$T_e = \tfrac{1}{2} h^2 \alpha / k \quad m_w.$$

Hierin is:
- h = laagdikte in m
- k = verticale doorlatendheid in m/sec
- m_w = soortelijke massa water in t/m^3
- α = factor die verband houdt met de zetting van de laag in m^2/N
- T_e = einde periode in sec

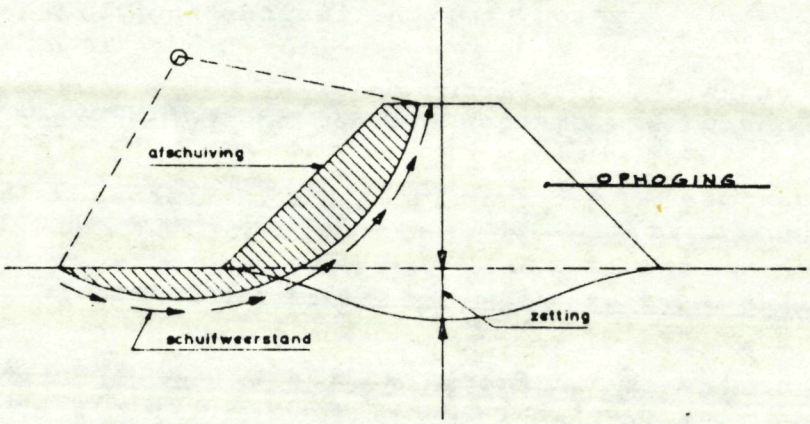
De formule geldt voor 2-zijdige afstroming d.w.z. zowel naar boven als beneden.
Een kleilaag zal b.v. naar 2 zijden afstromen als hij reikt tot maaiveld en aan de onderzijde door zand wordt begrensd.
Kan de laag slechts eenzijdig afstromen dan moet men voor h de dubbele laagdikte nemen.
Komen we nog even op de formule terug dan zien we dat de laagdikte kwadratisch voorkomt, dit betekent:
Bij een 2 x zo dikke laag duurt de hydrodynamische periode 4 x zo lang. Men spreekt dan ook van het kwadratisch laagdikte effect.

8. 3. Wrijvingseigenschappen.

Naast de reeds behandelde samendrukbaarheid van de grond is er nog een eigenschap, die van groot belang is namelijk de inwendige wrijvingsweerstand.

8. 3.1. Inwendige wrijvingsweerstand.

De inwendige wrijvingsweerstand speelt een grote rol als het gaat om de beoordeling van evenwichtsproblemen zoals:
de stabiliteit van ophogingen en ingravingen
de gronddruk op grondkerende constructies
het evenwichtsdraagvermogen van de grond.
Wanneer op een bepaald terrein een plaatselijke ophoging wordt gemaakt dan zal die een zakking van de onderliggende lagen veroorzaken.
Is de ondergrond erg slap dan bestaat het gevaar dat een deel van de ophoging met een deel van de eronder gelegen ondergrond afschuift. Het geheel is in figuur 21 schematisch aangegeven.

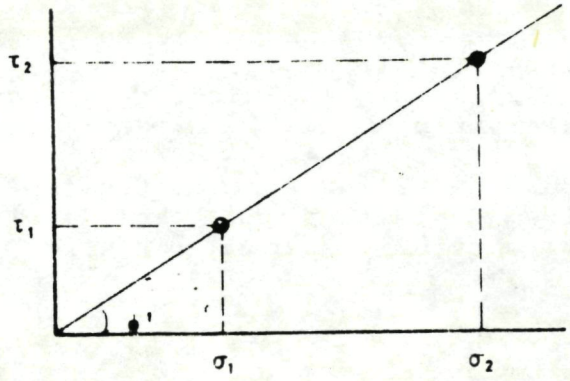


figuur 21

Ook in de grondmechanica kan de inwendige wrijvingsweerstand van grond via een direkte schuifproef, op eenvoudige wijze, worden bepaald. Met hierbij gevonden verband tussen σ, τ en ϕ' kan met behulp van de formule van Coulomb worden weergegeven en luidt:

$$\tau = \sigma . \operatorname{tg} \phi'$$

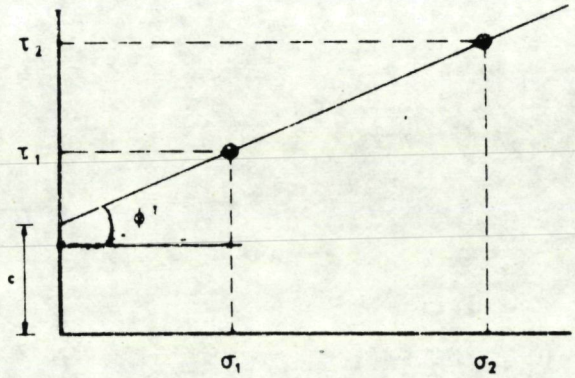
Het verband is in figuur 22 in beeld gebracht, waarbij zij opgemerkt dat de grafiek door de oorsprong gaat.



figuur 22

8. 3.2. Cohesie.

In een aantal gevallen loopt de grafiek niet door de oorsprong zoals figuur 23 aangeeft.



figuur 23

Dit verschijnsel, dat de cohesie wordt genoemd, doet zich voor bij samenhangende gronden als klei en veen. De cohesie wordt veroorzaakt door de moleculaire krachtjes tussen de korrels. Bij zand wordt géén cohesie gevonden en is de c dus 0.

9. SPREIDING VAN TERREINBELASTINGEN IN DE ONDERGROND NA CONSOLIDATIE.

In de voorgaande beschouwingen over samendrukking is steeds uitgegaan van de hypothese van een onbegrensd horizontaal terrein met stilstaand grondwater, dat over de gehele oppervlakte wordt belast met een nieuwe eveneens in twee richtingen oneindig uitgestrekte gelijkmatig verdeelde belasting, onder invloed waarvan spanningen optreden in de ondergrond.
Daarbij is op grond van symmetrie de horizontale rek = 0 en kon worden volstaan met beschouwing van de verticale samendrukking (ééndimensionaal probleem). De korrelspanningsverhoging na aanpassing op een horizontaal vlak in de ondergrond als gevolg van de nieuw opgebrachte belasting is dan op iedere diepte gelijk aan deze belasting, omdat belastingsspreiding niet optreedt.

Spreiding kan alleen plaatsvinden via het korrelskelet, daar water geen interne frictie bezit.
Wanneer in het hier navolgende wordt gesproken van spanningen, worden de korrelspanningen na consolidatie bedoeld.

Wanneer een nieuwe belasting slechts plaatselijk wordt aangebracht, wordt het probleem driedimensionaal en zeer lastig te berekenen, zodat met een vereenvoudige benadering wordt volstaan.

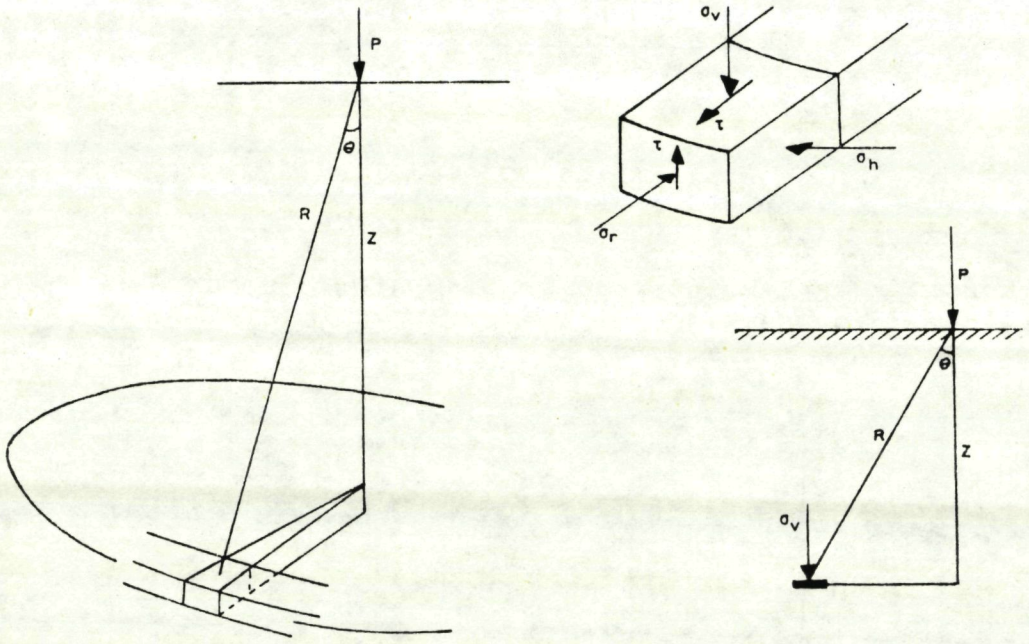


fig. 24 - Spanningen in de ondergrond t.g.v. een puntlast. -

Daarbij wordt de grond voorgesteld als een oneindig groot, homogeen en isotroop halfmedium, waarvoor de wet van Hooke geldt. Dat wil zeggen, dat de elasticiteitsmodulus E en de contractiecoëfficient ν constant zijn op alle plaatsen (homogeen) en in alle richtingen (isotroop). Dat lichaam wordt belast door een bekende verticale last P.
Op basis van deze aannamen werden door Boussinesq formules opgesteld voor de spanningen op een stukje uit een ring met rechthoekige doorsnede op een diepte z als gevolg van de loodrecht op het terrein-oppervlak werkende puntlast P.

Die formules zijn:

$$\tau = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{\pi R^2} \cdot \cos^2\theta \sin\theta$$

$$\sigma_h = -\frac{1}{2} \cdot \frac{P}{\pi R^2} \cdot (1 - 2\nu)\left(\cos\theta - \frac{1}{1 + \cos\theta}\right)$$

$$\sigma_r = \frac{1}{2} \cdot \frac{P}{\pi R^2} \cdot \left(3 \cos\theta \sin^2\theta - \frac{1 - 2\nu}{1 + \cos\theta}\right)$$

$$\sigma_v = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{\pi R^2} \cdot \cos^3\theta = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{\pi z^2} \cdot \cos^5\theta$$

σ_v is voor de bepaling van de belastingsspreiding wel de belangrijkste en kan worden omschreven als de normaalspanning op een horizontaal vlak in een punt met de coördinaten θ en R.
σ_v in een bepaald horizontaal vlak is dus afhankelijk van z en θ.

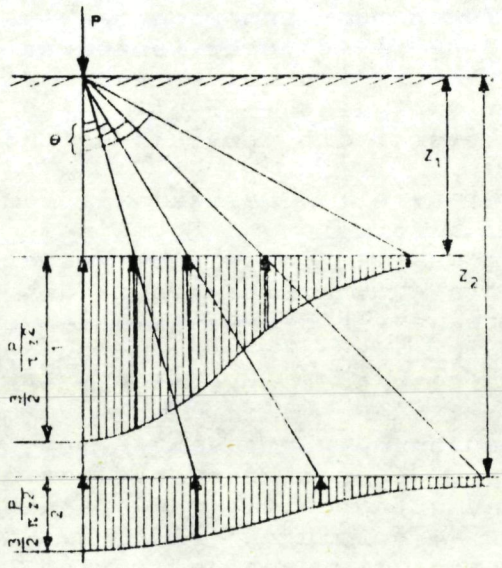


fig. 25 - Verticale spanning op horizontale vlakken op verschillende diepten. -

In de verticaal onder P is σ_v het grootst.
$\theta = 0$ en $\cos^5\theta = 1$ dus $\sigma_v = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{\pi z_1^2}$

Hoe groter θ wordt voor de punten in een bepaald horizontaal vlak op diepte z, des te kleiner wordt σ_v.
De verdeling van de verticale spanning op een horizontaal vlak onder een puntlast P heeft een klokvorm.
Bij toenemende diepte vindt afvlakking van die klokvorm plaats. Immers, in de verticaal onder P is σ_v maximaal en alleen afhankelijk van de diepte z. Op diepte z_2 is is $\sigma_v = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{\pi z_2^2}$. Dus hoe groter z wordt, des te kleiner wordt σ_v, doch deze blijft voor het vlak op grotere diepte onder P ook maximaal. Ook voor het dieper gelegen horizontale vlak geldt, dat bij toenemende θ, σ_v afneemt.

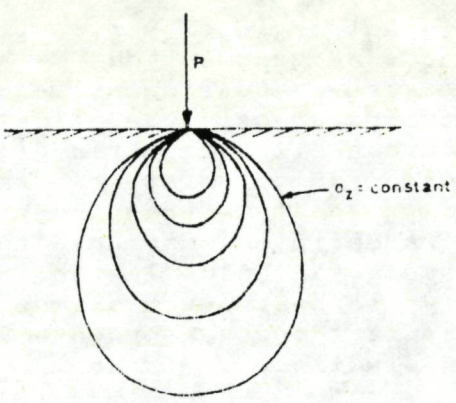


fig. 26 - Lijnen van gelijke σ_z (= σ_v) (isobaren). -

Nu zijn in de ondergrond lijnen aan te wijzen, waarin als gevolg van de belasting P dezelfde verticale spanning heerst. Die lijnen worden isobaren genoemd.

Uit proeven is gebleken, dat de door Boussinesq aangenomen eigenschappen niet alle voor grond gelden. Die eigenschappen waren:

half-oneindige uitgestrektheid,
elasticiteit (geldigheid van de wet van Hooke),
homogeniteit,
isotropie.

Door Buisman is daarom de spanningsverdeling berekend met als uitgangspunt, dat de elasticiteitsmodulus E met de terreinspanning toeneemt.
Progressief-elastisch ($E = \sigma_v . C$).

Hij vindt dan voor het verloop van verticale spanningen op een diepte z:

$$\sigma_v = 2 . \frac{P}{\pi z^2} . \cos^6 \theta$$

Volgens deze formule worden de spanningen meer onder de puntlast geconcentreerd en de belastingsspreiding is geringer (sneeuwbaleffect; de spanningen onder de last zijn als gevolg van zuiver geometrische spreiding volgens Boussinesq al hoger dan naast de last. Het hierdoor opgewekte stijfheidsverschil versterkt dit verschijnsel nog).

Wordt de ondergrond belast door een plaatselijk gelijkmatig verdeelde belasting, dan kan met behulp van de formule van Boussinesq worden berekend, welke spanningen als gevolg daarvan in de ondergrond ontstaan. Hierbij wordt dan ieder stukje van de gelijkmatig verdeelde belasting q werkend op een oppervlakje dF opgevat als een puntlast q.dF.
Indien nu wordt aangenomen, dat voor de ondergrond het beginsel van superpositie van spanningen en vervormingen geldt, kan door integratie over het gebied, waarop gelijkmatig verdeelde belasting q werkt, de als gevolg daarvan optredende totale spanningverhoging worden gevonden.

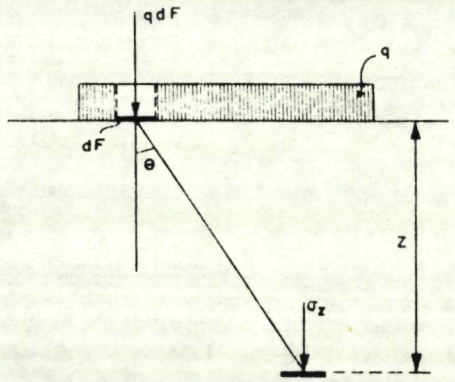


fig. 27 - Spanning t.g.v. eindige gelijkmatig verdeelde belasting. -

Bij het beginsel van superpositie wordt aangenomen, dat de spanningen en vormveranderingen, welke als gevolg van een tweede last ontstaan, onafhankelijk zijn van die tengevolge van de eerste reeds aanwezige last, zodat de spanningen en vormveranderingen, die ontstaan als gevolg van beide lasten, samen dan zijn te beschouwen als de resultante van de door iedere afzonderlijke last teweeggebrachte spanningen en vormveranderingen (homogeen-elastisch).

Het bepalen van de spanningsverhoging in de ondergrond als gevolg van een opgebrachte plaatselijke gelijkmatig verdeelde belasting is op analytische wijze wel mogelijk doch vergt veel rekenwerk.
Newmark heeft op basis van de formule van Boussinesq een diagram opgesteld (het zogenaamde "zon-diagram"), waarmede op vrij eenvoudige wijze de spanningsverhogingen kunnen worden bepaald.
Dat diagram is als volgt afgeleid.

Een cirkelvormig gebied met straal r_u wordt belast met een gelijkmatig verdeelde belasting q en de spanningsverhoging σ_z in de verticaal door het middelpunt van dat gebied op diepte z wordt berekend.
Uit dit gebied wordt ter hoogte van het maaiveld een elementaire ring genomen met breedte dr en gelegen op een afstand r van het middelpunt.

Op de elementaire ring werkt dan een kracht $P = q.dr.2\pi r$. Elk stukje van de ring ligt even ver van het middelpunt en levert dus een zelfde bijdrage aan σ_z.

De bijdrage aan σ_z is volgens Boussinesq

$$d\sigma_z = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2\pi R^2} \cdot \cos^3\theta$$

$$= q.dr.2\pi r. \frac{3}{2\pi R^2}.\cos^3\theta$$

$$R^2 = z^2 + r^2 \rightarrow R = \sqrt{z^2 + r^2} \text{ en } \cos\theta = \frac{z}{R} = \frac{z}{\sqrt{z^2 + r^2}}$$

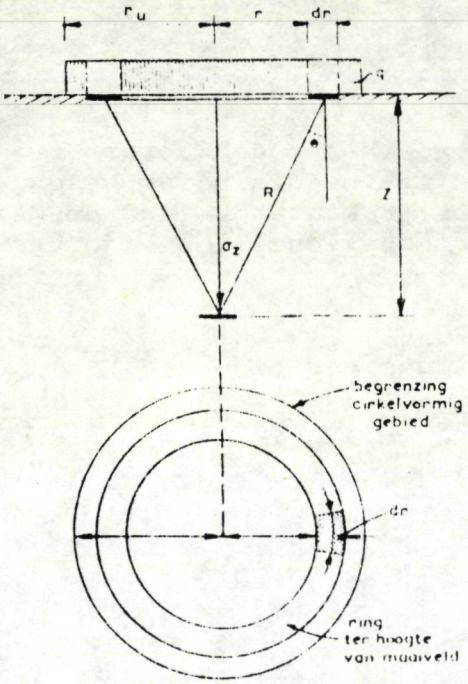


fig. 28 - Afleiding "zondiagram". -

$$d\sigma_z = q.dr.2\pi r.\frac{3}{2\pi R^2}.\left(\frac{z}{\sqrt{z^2 + r^2}}\right)^3$$

$$= q.dr.2\pi r.\frac{3}{2\pi\left(\sqrt{z^2 + r^2}\right)^2}.\frac{z^3}{\left(\sqrt{z^2 + r^2}\right)^3}$$

$$= q.dr.r.\frac{3}{\left(\sqrt{z^2 + r^2}\right)^2}.\frac{z^3}{\left(\sqrt{z^2 + r^2}\right)^3}$$

$$d\sigma_z = 3q.z^3.\frac{r}{\left(z^2 + r^2\right)^{5/2}}.dr$$

Integratie geeft dan:

$$\sigma_z = \int_0^{r_u} 3qz^3 \frac{r}{\left(z^2 + r^2\right)^{5/2}}\, dr$$

$$= qz^3\left(\frac{1}{z^3} - \frac{1}{\left(z^2 + r_u^2\right)^{3/2}}\right)$$

Wanneer dit anders wordt geschreven, ontstaat:

$$\sigma_z = q\left\{\frac{z^3}{z^3} - \frac{z^3}{\left(z^2 + r_u^2\right)^{3/2}}\right\} = q\left\{1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{r_u^2}{z^2}\right)^{3/2}}\right\}$$

Wordt nu de term $\left\{1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{r_u^2}{z^2}\right)^{3/2}}\right\}$ achtereenvolgens gelijk gesteld aan:

0,1, 0,2, 0,3, enz., dan kan worden berekend dat bij:

0,1 →	r_u = 0,27z,	zodat	σ_z = 0,1q	bij	r_u = 0,27z
0,2 →	= 0,4 z,	"	= 0,2q	"	= 0,4 z
0,3 →	= 0,52z,	"	= 0,3q	"	= 0,52z
0,4 →	= 0,64z,	"	= 0,4q	"	= 0,64z
0,5 →	= 0,77z,	"	= 0,5q	"	= 0,77z
0,6 →	= 0,92z,	"	= 0,6q	"	= 0,92z
0,7 →	= 1,11z,	"	= 0,7q	"	= 1,11z
0,8 →	= 1,39z,	"	= 0,8q	"	= 1,39z

Worden nu de cirkels met r_u = ...z getekend, dan levert dus elke ring tussen twee opeenvolgende cirkels een bijdrage van 0,1q aan σ_z. Elke ring wordt verdeeld in 100 stukjes. Elk stukje ligt op dezelfde afstand van het middelpunt en levert dus eenzelfde bijdrage aan σ_z.

Die bijdrage is dan $\frac{0,1q}{100}$ = 0,001q.

Ieder vakje van het gehele veld levert dus een bijdrage van 0,001q aan σ_z.

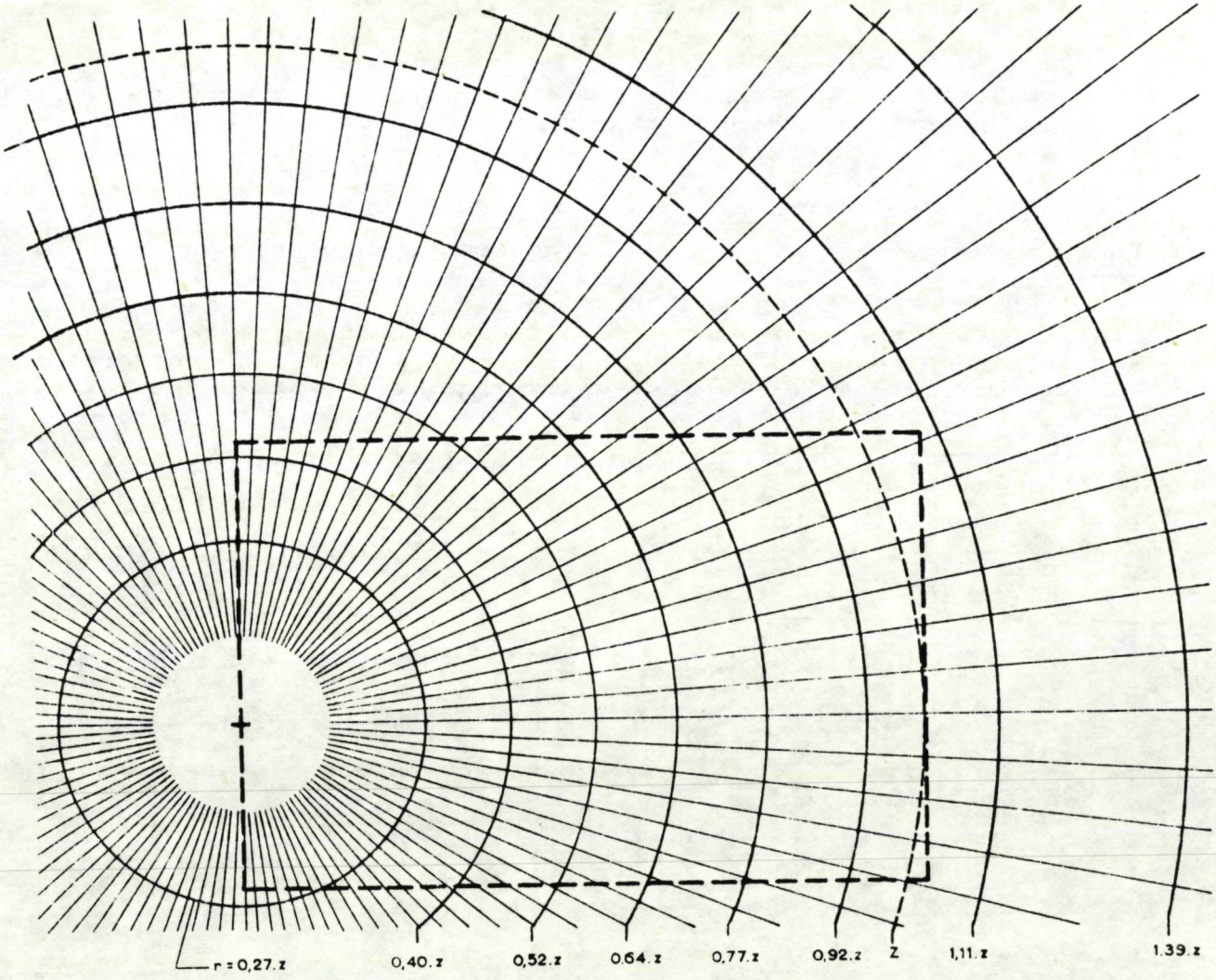


fig. 29 - Zondiagram van Newmark. -

Berekeningsvoorbeeld.

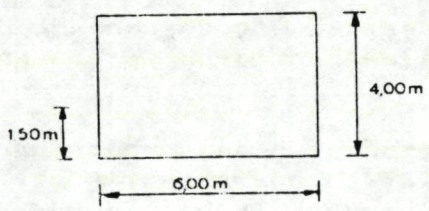


fig. 30

Gegeven: Een rechthoekig gebied 4x6 m is gelijkmatig verdeeld belast met

$q = 20\ t/m^2 = 2\ kg/cm^2$

Gevraagd: De spanning t.g.v. q op 6 m diepte onder A.

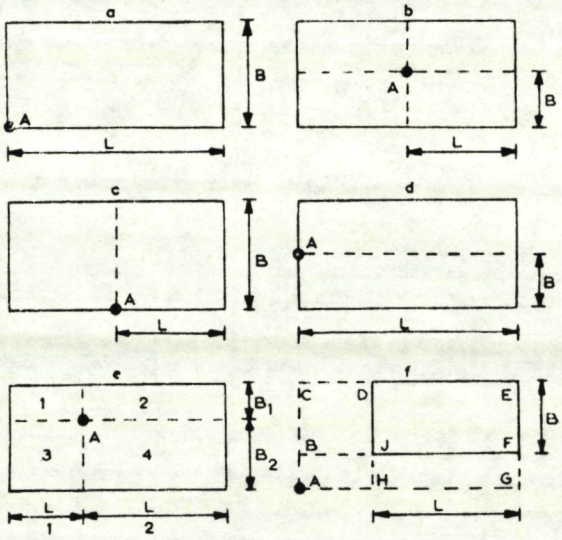
Met z = 6m kan de schaal van de in het diagram te tekenen rechthoek worden bepaald.
In het diagram is r = z = 10 cm.
Bij z = 6 m is dus voor dit geval de schaal 1:60 (Is b.v. z = 4 m dan zou de schaal 1:40 zijn en de te tekenen rechthoek veel groter, meer hokjes, groter σ_z). De rechthoek wordt nu op die schaal in het diagram getekend op zodanige wijze, dat punt A in het middelpunt van het diagram valt, waarna het binnen de rechthoek vallende aantal vakjes wordt geteld. In dit geval is dat ongeveer 168.
De spanning op 6 m diepte onder punt A is dan: $\sigma_z = 168.0,001.2 =$ $0,366\ kg/cm^2$.

Newmark heeft ook nog een diagram samengesteld, waarmede voor rechthoekige oppervlakken direct een invloedscoëfficient I_σ kan worden afgelezen, die afhankelijk is

van de twee factoren $m = \frac{B}{z}$ en $n = \frac{L}{z}$.

De spanning op diepte z onder een hoekpunt van de rechthoek is dan: $\sigma_z = I_\sigma . q$.

Ligt het te beschouwen punt midden in de rechthoek of halverwege één van de zijden, dan moet de gevonden waarde voor σ_z worden vermenigvuldigd met het aantal van de aangrenzende evengrote rechthoeken.



In geval a is in A: $\sigma_z = I_\sigma . q$

" " b " " A: $\sigma_z = (I_\sigma . q)\,4$

" " c " " A: $\sigma_z = (I_\sigma . q).2$

De factoren $m = \frac{B}{z}$ en $n = \frac{L}{z}$ geven anders geschreven:

$B = m.z$ en $L = n.z$.

Deze vormen komen overeen met

$r_u = x.z$ uit het "zondiagram"

m en n zijn onderling verwisselbaar.

fig. 31

Ook asymetrische gevallen kunnen met deze methode worden berekend.

e) $\sigma_z = (I_{\sigma_1} + I_{\sigma_2} + I_{\sigma_3} + I_{\sigma_4}).q$,

f) $\sigma_z = I_\sigma (ACEG - ACDH - ABFG + ABJH).q$.

10. GRONDONDERZOEK.

In dit gedeelte zal het primaire grondonderzoek worden behandeld dat door Nederlandse laboratoria, bureaus en bedrijven in binnen- en buitenland wordt gehanteerd.

Aan de hand van een uitgevoerd grondonderzoek kan een fundering van een gebouw, kunstwerk, leiding e.d. worden ontworpen.
De belangrijkste techniek bij het grondonderzoek is het sonderen. Teneinde het onderzoek te completeren kan het sondeerwerk worden uitgebreid met boringen en laboratoriumproeven. Verder is het mogelijk (voor de bepalingen van de korrelspanningen) waterspanningsmetingen te verrichten.
Tenslotte wordt hierbij nog opgemerkt, dat bij de aanleg van leidingen, wegen e.d. luchtfoto's en/of geo-elektrisch onderzoek een belangrijke bijdrage kunnen leveren voor het ontwerp van een fundering.

10. 1. Sonderen.

De Nederlandse methode van sonderen wordt algemeen omschreven als "druk-sonderen", dit in tegenstelling tot het "slag-sonderen". Bij het "druk-sonderen" wordt een conus met een tophoek van 60^{o} en een doorsnede (basiscirkel) van 1000 mm^2 toegepast. De conus wordt met een constante snelheid van 20 mm/sec de grond ingedrukt. Tijdens het drukken wordt de door de conus ondervonden weerstand gemeten. Het is hierbij tevens mogelijk de totale wrijvingsweerstand op de sondeerbuizen of de plaatselijke wrijvingsweerstand, m.b.v. de zogenaamde kleefmantel van Begemann, te meten.

10. 1.1. Sondeersystemen.

De thans gebruikte sondeersystemen zijn te onderscheiden is:

a) mechanisch
b) elektrisch

10. 1.2. Typen sonderingen.

Veelal wordt bij het onderscheiden van de verschillende typen sonderingen de totaaldruk als indikatie gebruikt.
Men komt dan tot de volgende in het algemeen gebruikte benamingen:

- middelzware sonderingen met een totaaldruk variërend van 20 tot 35 kN (2 tot 3,5 ton) afhankelijk van de gebruikte apparatuur
- zware sonderingen met een totaaldruk van 100 kN (10 ton)
- extra zware sonderingen met een totaaldruk van 200 kN (20 ton).

De indringingsdiepte voor elk van de bovengenoemde typen sonderingen kan vooraf niet worden opgegeven. Deze diepte wordt grotendeels bepaald door de bodemgesteldheid.

10. 2. Boren.

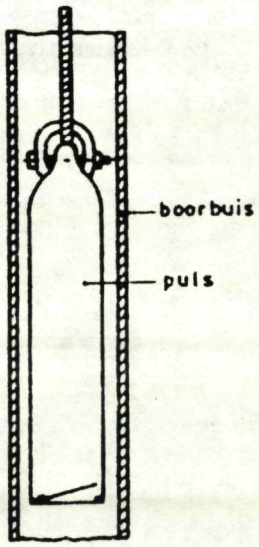
Bij het sonderen wordt een indikatie verkregen over de weerstanden (vastheden) in de diverse grondlagen. Naast deze informatie uit de sondeerresultaten staan, teneinde meer inzicht te krijgen in de bodemopbouw en de eigenschappen van de verschillende grondlagen, verschillende boormethoden ter beschikking. Enkele daarvan worden hieronder besproken.

10. 2.1. Boorsystemen.

a) Pulsboring
b) Ackermannboring
c) Begemann boring (continuboring).

a. Pulsboring.

Bij een pulsboring wordt het boorgat, dat van een buis is voorzien, verkregen door de grond met behulp van een puls uit het gat te verwijderen. Hiertoe wordt grond gemengd met water door middel van het op en neer halen van de puls, waarna het mengsel uit het gat wordt gehaald door de puls op te halen.



figuur 32

De pulsboring is dus een natte boring, die uitsluitend wordt toegepast in grondlagen gelegen beneden de grondwaterspiegel. Tot aan de grondwaterspiegel kan de grond over het algemeen eenvoudiger worden verwijderd met behulp van een schroefboor.
Zoals uit het boorsysteem blijkt verkrijgt men met water vermengde en sterk geroerde grond uit het boorgat. Indien geen ongeroerde monsters worden gestoken, geeft de pulsboring dus een globaal beeld van de bodemopbouw, waarbij men in sterke mate afhankelijk is van de vakkundigheid van de boormeester en deels van zijn beoordeling van het uitgepulste materiaal.
Het steken van ongeroerde monsters geschiedt in het algemeen met een slagapparaat of met een druksteekapparaat. Bij het slagapparaat wordt een monsterbus, meestal met een inwendige diameter van 66 mm en een lengte van 450 mm, onderin het boorgat in de grond geslagen juist onder de boorbuis uit.
Veelal worden monsterbussen gebruikt met een wanddikte van 1 mm, maar in harde gronden is het gebruik van een grotere wanddikte noodzakelijk.
Geroerde grondmonsters worden bij de pulsboring ontleend aan het mengsel, dat uit de puls komt, dan wel voor lagen boven de grondwaterspiegel aan de grond afkomstig van de schroefboor. Bij sterk samenhangende gronden, zoals vaste klei en vast veen, kan men ook beneden de grondwaterspiegel nog wel met de schroefboor grond uit het boorgat verwijderen. Men dient hierbij voorzichtig te zijn, want bij zanderige lagen en op grote diepte beneden de grondwaterspiegel ontstaat het gevaar, dat door de waterdrukverschillen de grond van onderaf in de boorbuis wordt geperst, zodat een volkomen vertekend beeld van de bodemopbouw wordt verkregen.

In verband hiermede wordt volledigheidshalve opgemerkt, dat de waterstand in de boorbuis bij de pulsboring ten minste gelijk, liefst hoger, dient te zijn dan de stijghoogte van het water in de te passeren grondlagen.

b. Ackermannboring.

Indien het gewenst is dat er een zo continu mogelijk beeld van de ondergrond wordt verkregen dan kan men opdracht geven een Ackermannboring uit te voeren. Hierbij worden de grondmonsters in opeenvolgende steekbussen naar boven gebracht. De monsters worden ter plaatse uit de bussen verwijderd en in de lengte doorgesneden; daarna worden gootjes (300 x 25 x 25 mm^3) in de opgesneden monsters gedrukt en op volgorde in een kist verzameld. De beschrijving van de grondlagen gebeurt in de regel in het laboratorium.

c. Begemann boring. (continuboring)

De meest ideale wijze van verkennen van de ondergrond wordt gevormd door het uitvoeren van een continuboring volgens het systeem Begemann. Deze boormethode geeft een ongestoord en ononderbroken beeld van de grondslag over een grote diepte (een en ander is afhankelijk van de indrukcapaciteit en de aanwezige grondslag). Het steekapparaat om dit monster aan de ondergrond te kunnen ontlenen is door het Laboratorium voor Grondmechanica te Delft gedurende een lange reeks jaren van intensief researchwerk ontwikkeld en vervolmaakt. Het Laboratorium heeft de beschikking over steekapparaten met een monsterdiameter van 29 mm en van 66 mm, die ieder hun eigen toepassingsgebieden hebben.
De Begemann boring ϕ 29 mm geeft aanvullende informatie op de sonderingen, uitsluitsel in twijfelgevallen. Tevens verschaft zij een eerste indruk van de mechanische eigenschappen van de ondergrond. Het verkregen monster is geschikt voor het maken van korrelverdelingen terwijl ook het volumegewicht per hele of halve meter kan worden bepaald.
De Begemann boring ϕ 66 mm heeft zowel andere toepassingsgebieden als andere funkties dan de continuboring ϕ 29mm.
Het ongeroerde ononderbroken monster dat door middel van het grote steekapparaat ϕ 66 mm wordt verkregen, is bij uitstek geschikt om aan alle mogelijke soorten beproevingen of bepalingen in het laboratorium te worden onderworpen. Een groot voordeel bij deze methode is het feit, dat pas in het laboratorium behoeft te worden vastgesteld welke representatieve monsters uit de boringen ter beproeving zullen worden genomen.

11. WAARNEMING VAN ZAKBAKEN EN WATERSPANNINGSMETERS.

Uit het voorgaande is gebleken, dat het gewenst is tijdens de ophoging zakbaken en waterspanningsmeters nauwkeurig waar te nemen. Deze contrôlemiddelen worden in het navolgende besproken.

11. 1. Zakbaken.

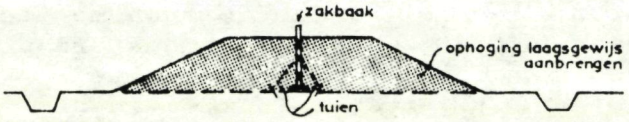


fig. 33 - Plaats zakbaak. -

Alvorens met een ophoging wordt begonnen, behoren op het oorspronkelijke maaiveld zakbaken te worden geplaatst, vooral daar waar de grootste ophoging zal komen.

De zakbaken worden vooral op die plaatsen gezet, waar door middel van boringen en sonderingen alle grondmechanische gegevens bekend zijn.
De zakbaken worden vóór de ophoging getuid. Later, wanneer de ophoging zelf voldoende steun geeft, worden de tuien weer losgemaakt.

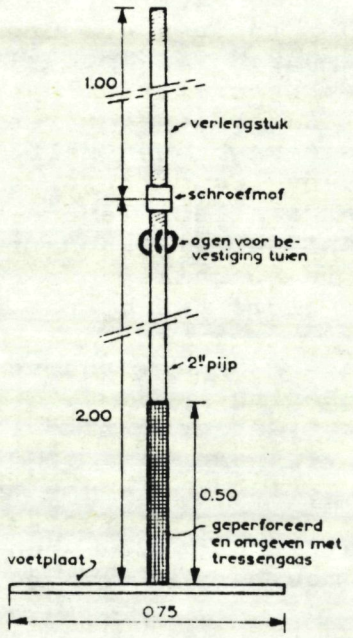


fig. 34 - Zakbaak. -

Een zakbaak bestaat uit een stalen voetplaat, bijvoorbeeld 0,75x0,75x 0,01 m, met loodrecht daarop gelast een 2" pijp van circa 2,00 m lengte. Naarmate de ophoging vordert, kan die pijp worden verlengd, door er verlengstukken op te schroeven van telkens 1,00 m.
Het is dan gebruikelijk, dat de onderste 0,50 m van de zakbaak wordt geperforeerd en omgeven door tressengaas.
Tressengaas is van koper en laat wel water doch geen grond door.
Op deze wijze doet de zakbaak tevens dienst als open peilbuis en kan de waterstand in de zand(op-hoging) worden gemeten.
Dit heeft vooral zin, wanneer de ophoging tot stand wordt gebracht door middel van het opspuiten van zand.
Bij kleiophogingen heeft dit geen zin.

De zakbaken moeten van een stevige constructie zijn, want zij worden belast door negatieve kleef als gevolg van de klink van het ophoogmateriaal.
Trouwens, de kans op mechanische beschadiging vraagt ook een stevige constructie en een zo goed mogelijke beveiliging.

Het voornaamste doel van een zakbaak is het waarnemen van de samendrukking van de ondergrond mogelijk te maken.
Doordat de voetplaat op het oude maaiveld is geplaatst, wordt de eigen klink van het ophoogmateriaal niet waargenomen, en geven de zakbaken dus de zuivere samendrukking van het oorspronkelijke pakket aan.

Het waarnemen van de zettingen is om twee redenen noodzakelijk.

a) voor de bepaling van het aanpassingspercentage tijdens het werk.
b) voor de contrôle van de prognose van de grondmechanisch adviseur.

De grondmechanisch adviseur geeft voor een bepaalde ophoging onder andere de te verwachten zetting op, de belasting, die in éénmaal mag worden opgebracht (laagdikte) en het tempo, waarin het ophogen mag geschieden.
Daarbij is het zeer belangrijk, dat behalve de eindzetting tevens wordt opgegeven, welke zetting naar verwachting tijdens het werk zal optreden.
Het verschil tussen eindzetting en zetting tijdens het werk moet in de laatste fase van het werk als overhoogte worden aangebracht.
Die overhoogte is dus gelijk aan de restzetting.
De bepaling daarvan zou kunnen gebeuren aan de hand van het tijd-zakkingsdiagram van Terzaghi.

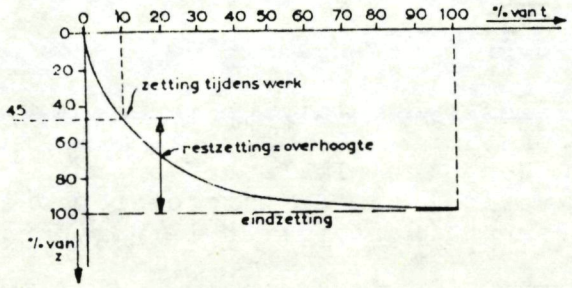


fig. 35 - Restzetting - overhoogte. -

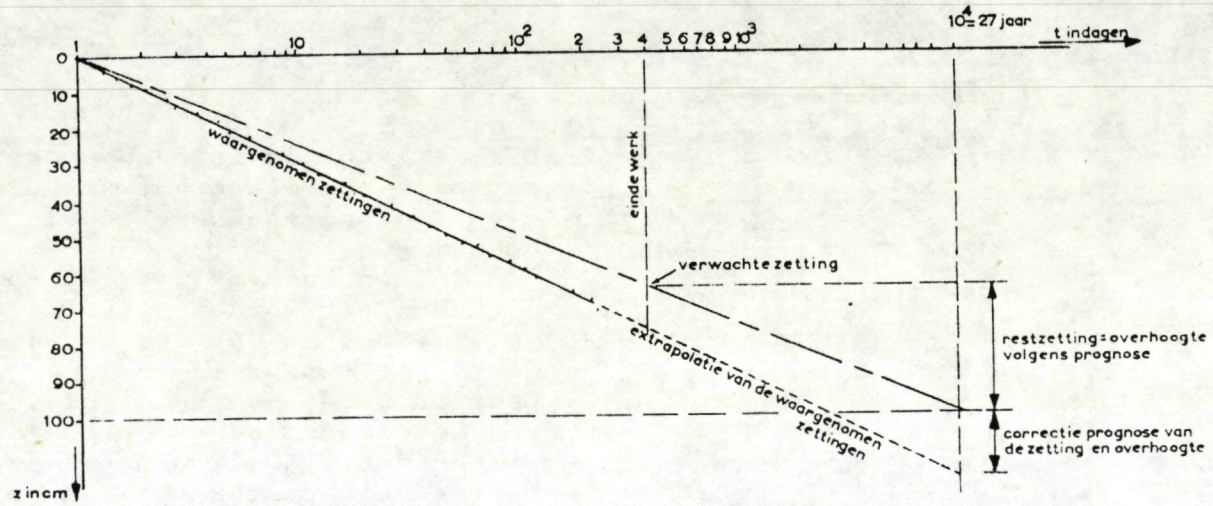


fig. 36 - Extrapolatie van de waargenomen zettingen. -

Door middel van zakbaakwaarnemingen is dus na te gaan in hoeverre de prognose van de grondmechanisch adviseur juist was of nog correctie behoeft.
Het aanbrengen van een eventuele correctie in de overhoogte kan het best geschieden in de laatste fase van het werk.
Een dergelijke correctie wordt aangebracht in overleg met de grondmechanisch adviseur.

Om na te gaan of correctie al of niet nodig is, worden de tijdens het werk waargenomen zettingen op half-logarithmisch papier uitgezet tegen de tijd.
Zoals bekend, behoort dit een rechte lijn te geven. Deze rechte is dan met een redelijke zekerheid te extrapoleren naar het tijdstip, waarop de eindzetting is bereikt (einde van de hydrodynamische periode).

11. 2. Peilbuizen en waterspanningsmeter.

Kennis van het verloop van de water(over)spanningen in de grond is dikwijls van groot belang.
De waterspanningen verlopen meestal niet hydrostatisch tengevolge van wateroverspanning.
Daarom moeten waterspanningen op één bepaalde plaats op verschillende diepten worden gemeten om het verloop van de wateroverspanning in een bepaalde verticaal te leren kennen (hart filter in het hart van de diverse slappe lagen).
De waterspanningen kunnen op verschillende manieren worden gemeten.
Die methoden zijn:

open peilbuizen,
hydraulische waterspanningsmeters,
electrische waterspanningsmeters.

11. 2.1. Open peilbuizen.

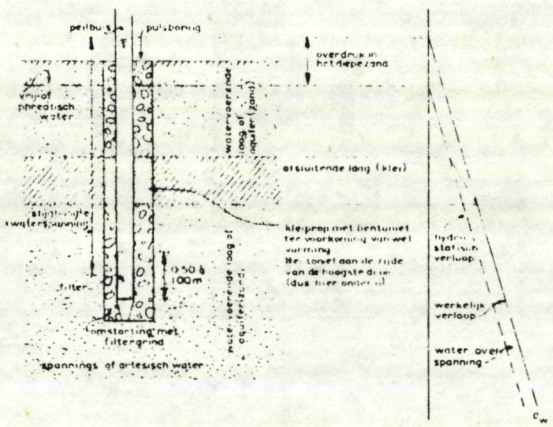


fig. 37 - Peilbuis. -

Bij de zakbaken is reeds besproken, dat deze ook als open peilbuis kunnen dienst doen, voornamelijk in zandophogingen.
Peilbuizen kunnen in enkele omstandigheden ook worden gebruikt om de waterspanningen op een bepaalde diepte te meten.
Daartoe wordt een buis (b.v. 2"), aan de onderzijde voorzien van een filter van 0,50-1,00 m lengte, dat bestaat uit perforatie van de buis (sleuven) omgeven door tressengaas, d.m.v. een pulsboring in de grond gebracht tot de gewenste diepte, waarop de waterspanning moet worden bepaald.
Het grondwater stijgt in de buis op, totdat de waterkolom evenwicht maakt met de waterspanning ter hoogte van het filter. De lengte van die waterkolom is de stijghoogte en de op te meten waterspanning in dat punt.
Deze methode van waterspanningsmeting is echter alleen practisch toepasbaar in goed doorlatende grond, waar een vlotte in- en uitstroming van water in de peilbuis plaats vindt.

Dit is in grind en niet te fijn zand het geval. Daarom wordt deze methode voornamelijk toegepast om de waterdruk (onder- of overdruk) in de pleistocene zandlagen te meten.
Hiervan kan dan gebruik worden gemaakt bij de overwegingen om aan te brengen zandpalen tot in het diepe zand door te zetten, zodat tweezijdige afstroming (naar boven en naar beneden) ontstaat, hetgeen de afvloeiing van het water enigszins bevordert.
Ook kan het voorkomen, dat zandpalen alleen maar toegepast kunnen worden wanneer afwatering naar het diepe zand mogelijk is. Dat is bijvoorbeeld het geval bij buitendijkse kleiophogingen tegen een bestaande waterkering of bij ophoging tegen tweezijdig kerende dijken.
In alle gevallen moet echter zekerheid bestaan, dat in die zandlagen permanent een lagere dan wel gelijke druk heerst ten opzichte van het phreatisch vlak, zodat de beoogde afstroming inderdaad zal plaats vinden. Hierbij dient met seizoensfluctuaties in grondwater - onttrekkingen in de omgeving rekening te worden gehouden.
Dit impliceert, dat niet mag worden afgegaan op een momentopname, doch dat de meest recente zomer - en wintergegevens moeten worden geraadpleegd. Ook de getij-invloed moet worden bezien.
Tevens bestaat dan de garantie, dat de tot in het diepe zand aangebrachte zandpalen geen wel kunnen vormen, die het water in de ophoging brengt.

In minder doorlatende lagen, zoals klei of veen, is de toepassing van open peilbuizen niet aan te raden.
De toestroming van water naar de peilbuis gaat dan heel langzaam en het duurt dan zeer lang voordat de waterstand in de peilbuis zich heeft aangepast aan de waterdruk ter plaatse van het filter. Dit geeft altijd foutieve waarnemingen.
Bovendien moet tijdens het ophogen de wateroverspanning direct bekend zijn om aan de hand daarvan het aanpassingspercentage en dus het tempo van ophogen te kunnen bepalen.
Een open peilbuis werkt in weinig doorlatende lagen dan te traag. Daarom worden in dat geval waterspanningsmeters gebruikt.

11. 2.2. Hydraulische waterspanningsmeters.

Een hydraulische waterspanningsmeter bestaat uit een buis ϕ 3/4" aan de onderzijde voorzien van een filter en een kegelvormige punt. Aan de bovenzijde is de buis afgesloten door een Bourdonmanometer en een afsluitbaar peilglas. Dit laatste om na te gaan of de waterspanningsmeter goed met water gevuld is tot boven de aansluiting van de manometer en om de buis zonodig bij te vullen (b.v. na verlenging of ontgassing in veengrond). De buis wordt met behulp van een sondeerstelling tot de gewenste diepte in de grond gedrukt, waarna de buis wordt gevuld met water en de Bourdonmanometer en het peilglas worden aangebracht. Dit levert een gesloten systeem, waarin de manometer vrijwel direct reageert op enige wijziging van de waterspanning in het grondmassief rond de waterspanningsmeter. De wijziging van druk wordt reeds bij een geringe waterverplaatsing door de manometer geregistreerd.

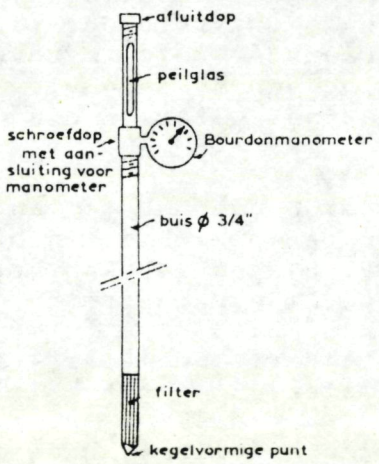


fig. 38 - Hydraulische waterspanningsmeter. -

Alvorens goede waarnemimgen met de waterspanningsmeter tijdens het werk kunnen worden gedaan, moet deze eerst aangepast zijn aan de aanwezige waterspanning.
De waterspanningsmeters moeten dus ruim vóór de aanvang van het werk worden geplaatst.

Omdat de grondslag meestal uit meerdere lagen is opgebouwd en het verloop van de waterspanning in een gehele verticaal bekend moeten zijn, worden op één plaats meerdere waterspanningsmeters geplaatst. Dit wordt - vrij verwarrend - een raai genoemd.

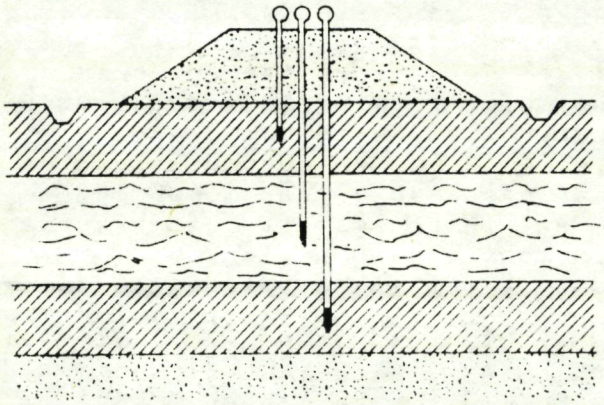


fig. 39 - Raai waterspanningsmeters. -

Wanneer zo'n raai in het midden van de bijvoorbeeld 6 m hoge ophoging wordt aangebracht, kunnen de manometers vóór de aanvang van het werk niet op 6 m boven het maaiveld worden geplaatst.
Tijdens de ophoging moet de buis dus regelmatig worden verlengd.
's Winters kan het water in de waterspanningsmeters bevriezen. Om dat te voorkomen wordt dan paraffine aan het water toegevoegd.

De schaal van de Bourdonmanometer (manometer tevens vacuümmeter) is zo ingericht, dat zowel positieve - (overdruk) als negatieve (onderdruk) waarden kunnen worden geregistreerd. Wat is namelijk het geval.
De aflezing op de manometer geeft de over- of onderdruk in meters waterkolom weer ten opzichte van hart manometer.
Een aflezing van +4 wil dus zeggen, dat het grondwater bij een wijde open peilbuis met veronderstelde goede wateraanvoer tot 4 m boven de hoogteligging van de manometer zou stijgen.

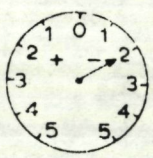


fig. 40 - Schaal Bourdonmanometer. -

Een aflezing van -1 wil dan zeggen, dat het water in die peilbuis 1 m beneden die hoogteligging blijft.

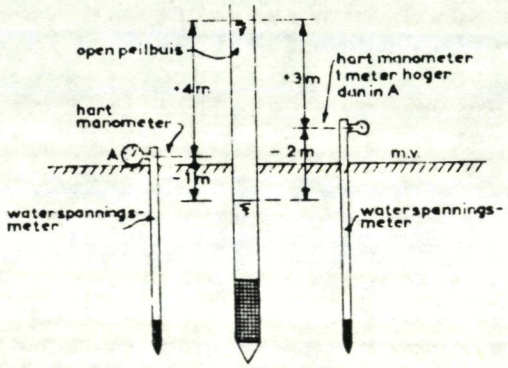


fig. 41 - Aflezing manometer. -

Wanneer nu de hoogte van hart manometer ten opzichte van bijvoorbeeld N.A.P. bekend is, kan het piëzometrisch niveau (de potentiaal) worden berekend uit:
hoogte hart manometer ± aflezing manometer.

Stel de aflezing van de manometer is vóór de aanvang van het werk -1 m.
Na ophoging is de aflezing +4 m. De wateroverspanning is dan 5 m waterkolom.

Ligt nu hart manometer op N.A.P., dan was de aanvankelijke potentiaal N.A.P.- 1 m en de potentiaal na ophoging N.A.P.+ 4 m. Het verloop van de waterspanningen (potentialen) kan in een grafiek worden bijgehouden. Het voordeel van deze wijze van registratie (potentiaal = plaatshoogte + drukhoogte) is, dat wijziging in de hoogteligging van de manometer door verlengen van de buis en door zakking tengevolge van negatieve kleef, niet tot uitdrukking komt in de grafiek.
De laatste verplaatsing kan wel tijdelijk een verstoring (verhoging) geven tengevolge van puntweerstand (bijvoorbeeld direct na het aanbrengen van een nieuwe laag). Wordt dus in fig. 41 de manometer 1 m hoger geplaatst, dan zal bij overigens dezelfde omstandigheden de aflezing zijn +3 m respectievelijk -2 m.

Het voorbijtrekken van een depressie kan invloed hebben op de aflezingen van de manometer.
Een luchtdrukdaling van enige centimeters kwikkolom à 13,6 gr/cm^3 betekent een stijging van de waterspanning met enige decimeters waterkolom.
(1 atmosfeer ≈ 76 cm kwik ≈ 1000 millibar).

11. 2.3. Electrische waterspanningsmeters.

Waterspanningen kunnen ook worden geregistreerd met een electrische waterspanningsmeter.

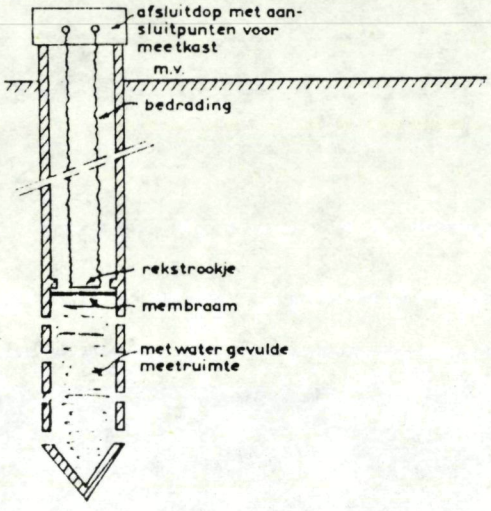
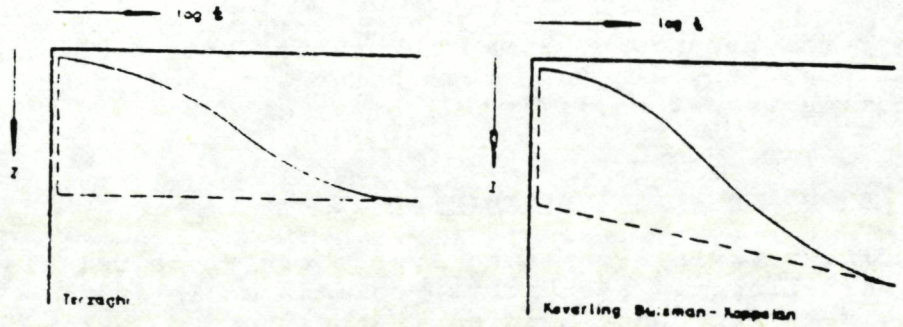


fig. 42 - Electrische waterspanningsmeter. -

Ook dan wordt een buis de grond ingedrukt, maar nu is onder aan die buis een met water gevulde meetruimte aanwezig.
De bovenzijde van de meetruimte is afgesloten door een membraan.
De druk van het grondwater veroorzaakt doorbuiging van dat membraan, die kan worden gemeten door middel van een rekstrookje en een maat is voor de waterspanning. De verandering in lengte (rek) beïnvloedt (vergroot) de electrische weerstand van dat rekstrookje.

De verdere buis is nu niet gevuld met water.
Door de buis loopt een kabeltje vanaf het rekstrookje naar een aan de bovenzijde van de buis aangebracht aansluitpunt.
Hierop kan meetapparatuur (ampèremeter) worden aangesloten, waarmede dan de waterspanning wordt afgelezen.



figuur .20.

8. 2.5. Laagdikte effect.

De tijdsduur van de hydrodynamische periode hangt in hoofdzaak af van:

- de doorlatendheid van de grond en
- de lengte van de weg die het afstromende poriënwater moet afleggen.

De formule waarmee de duur van de hydrodynamische periode kan worden berekend luidt:

$$T_e = \tfrac{1}{2} h^2 \alpha / k \gamma_w.$$

Hierin is:
- h = laagdikte in m
- k = verticale doorlatendheid in m/sec
- γ_w = soortelijk gewicht water in kN/m^3
- α = factor die verband houdt met de zetting van de laag in m^2/kN
- T_e = einde periode in sec

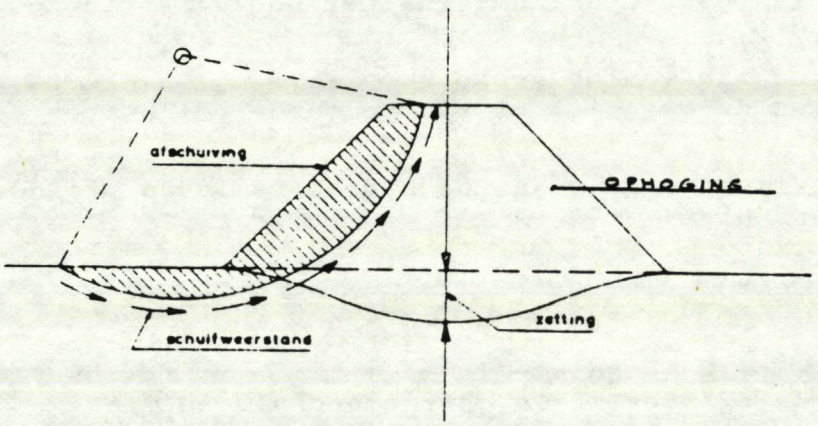
De formule geldt voor 2-zijdige afstroming d.w.z. zowel naar boven als beneden.
Een kleilaag zal b.v. naar 2 zijden afstromen als hij reikt tot maaiveld en aan de onderzijde door zand wordt begrensd.
Kan de laag slechts eenzijdig afstromen dan moet men voor h de dubbele laagdikte nemen.
Komen we nog even op de formule terug dan zien we dat de laagdikte kwadratisch voorkomt, dit betekent:
Bij een 2 x zo dikke laag duurt de hydrodynamische periode 4 x zo lang. Men spreekt dan ook van het kwadratisch laagdikte effect.

8. 3. Wrijvingseigenschappen.

Naast de reeds behandelde samendrukbaarheid van de grond is er nog een eigenschap, die van groot belang is namelijk de inwendige wrijvingsweerstand.

8. 3.1. Inwendige wrijvingsweerstand.

De inwendige wrijvingsweerstand speelt een grote rol als het gaat om de beoordeling van evenwichtsproblemen zoals:
de stabiliteit van ophogingen en ingravingen
de gronddruk op grondkerende constructies
het evenwichtsdraagvermogen van de grond.
Wanneer op een bepaald terrein een plaatselijke ophoging wordt gemaakt dan zal die een zakking van de onderliggende lagen veroorzaken.
Is de ondergrond erg slap dan bestaat het gevaar dat een deel van de ophoging met een deel van de eronder gelegen ondergrond afschuift. Het geheel is in figuur 21 schematisch aangegeven.



figuur 21

Ook in de grondmechanica kan de inwendige wrijvingsweerstand van grond via een direkte schuifproef, op eenvoudige wijze, worden bepaald. Het hierbij gevonden verband tussen σ, τ en ϕ' kan met behulp van de formule van Coulomb worden weergegeven en luidt:

$$\tau = \sigma . \operatorname{tg} \phi'$$

Het verband is in figuur 22 in beeld gebracht, waarbij zij opgemerkt dat de grafiek door de oorsprong gaat.

Het waarnemen van de zettingen is om twee redenen noodzakelijk.

a) voor de bepaling van het aanpassingspercentage tijdens het werk.
b) voor de contrôle van de prognose van de grondmechanisch adviseur.

De grondmechanisch adviseur geeft voor een bepaalde ophoging onder andere de te verwachten zetting op, de belasting, die in éénmaal mag worden opgebracht (laagdikte) en het tempo, waarin het ophogen mag geschieden.
Daarbij is het zeer belangrijk, dat behalve de eindzetting tevens wordt opgegeven, welke zetting naar verwachting tijdens het werk zal optreden.
Het verschil tussen eindzetting en zetting tijdens het werk moet in de laatste fase van het werk als overhoogte worden aangebracht.
Die overhoogte is dus gelijk aan de restzetting.
De bepaling daarvan zou kunnen gebeuren aan de hand van het tijd-zakkingsdiagram van Terzaghi.

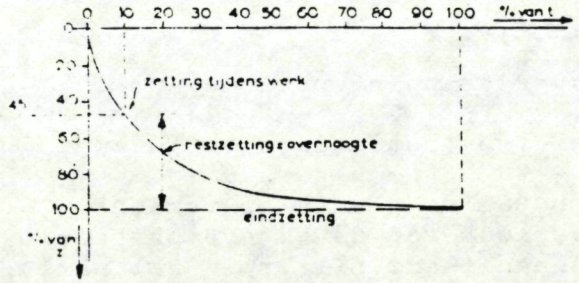


fig. 35 - Restzetting - overhoogte. -

De verzamelde gegevens behoren regelmatig met de grondmechanisch adviseur te worden besproken en zeker vóór de aanvang van de laatste fase van het werk in verband met het eventueel corrigeren van de prognose en het bepalen van de nog benodigde overhoogte om tot een opleveringshoogte te komen.

Er zijn altijd twee prognoses, namelijk de te verwachten zetting en de tijd die daarvoor nodig is. Beide kunnen onjuist zijn.
Dat zijn twee variabelen en die zijn pas op te lossen, wanneer er twee vergelijkingen zijn.
Dan zijn er twee onafhankelijke waarnemingen nodig, namelijk van zakbaken en waterspanningsmeters.
Wordt nu tijdens het werk minder zetting gemeten dan werd verwacht, terwijl er nog een behoorlijke wateroverspanning heerst, dan zou de prognose voor de hydrodynamische periode onjuist kunnen zijn.
Is er daarentegen bij die geringere zetting vrijwel geen wateroverspanning meer, dan zou kunnen worden geconcludeerd, dat de zetting te pessimistisch is bezien.

Alleen waarneming van de zakbaken is dus niet genoeg om de prognose te kunnen controleren.
Wanneer de zetting tijdens het werk sterk afwijkt van de te verwachten zetting, zijn tevens waarnemingen van waterspanningsmeters nodig om te kunnen beoordelen wat er aan de hand is, een foutieve zettingsprognose of een tijdsduur die zal afwijken van de berekende hydrodynamische periode.

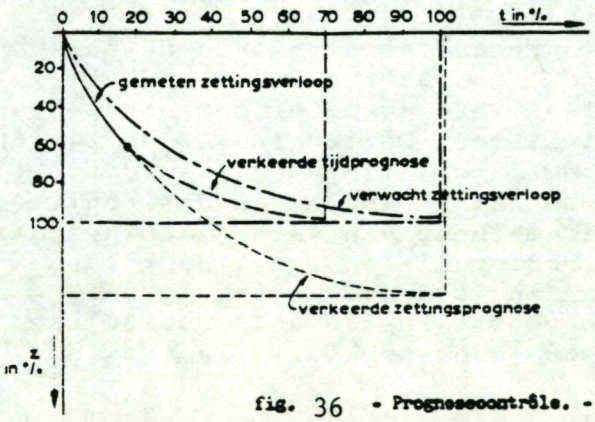


fig. 36 - Prognosecontrôle. -

Wanneer de te verwachten zettingen en de gemeten zettingen in een tijd-zakkingsdiagram worden uitgezet en daartussen is een grote afwijking, dan kunnen twee vragen rijzen.
Is de prognose van de zetting verkeerd geweest en de tijdsduur goed berekend, zodat uiteindelijk toch op het juiste tijdstip een andère eindzetting wordt bereikt.
Of is de zetting goed voorspeld en de tijdsduur niet.
In beide gevallen kan dan de registratie van nog aanwezige wateroverspanning het middel zijn om na te gaan welke prognose onjuist is geweest.

Wanneer buiten de ophogingswerkzaamheden van de ene meting op de andere ineens een grotere zetting dan normaal is opgetreden, kan dit duiden op een lichte afschuiving, waarbij het grondmassief na een kleine verplaatsing (nivellering) juist weer evenwicht heeft gevonden (grenstoestand, geen reserve).
In die gevallen moet het verder ophogen met voorzichtigheid geschieden.
Er kan tijdens die lichte afschuiving bovendien verkneding van de grond zijn opgetreden, die in het vervolg als een soort smeerlaag werkt, zodat de grond weer gemakkelijk in een afschuivende beweging komt.

11. 2. Peilbuizen en waterspanningsmeter.

Kennis van het verloop van de water(over)spanningen in de grond is dikwijls van groot belang.
De waterspanningen verlopen meestal niet hydrostatisch tengevolge van wateroverspanning.
Daarom moeten waterspanningen op één bepaalde plaats op verschillende diepten worden gemeten om het verloop van de wateroverspanning in een bepaalde verticaal te leren kennen (hart filter in het hart van de diverse slappe lagen).
De waterspanningen kunnen op verschillende manieren worden gemeten.
Die methoden zijn:

open peilbuizen,
hydraulische waterspanningsmeters,
electrische waterspanningsmeters.

11. 2.1. Open peilbuizen.

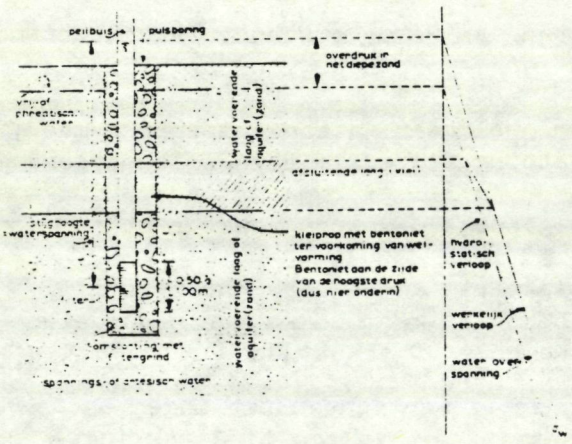


fig. 37 - Peilbuis. -

Bij de zakbaken is reeds besproken, dat deze ook als open peilbuis kunnen dienst doen, voornamelijk in zandophogingen.
Peilbuizen kunnen in enkele omstandigheden ook worden gebruikt om de waterspanningen op een bepaalde diepte te meten.
Daartoe wordt een buis (b.v. 2"), aan de onderzijde voorzien van een filter van 0,50-1,00 m lengte, dat bestaat uit perforatie van de buis (sleuven) omgeven door tressengaas, d.m.v. een pulsboring in de grond gebracht tot de gewenste diepte, waarop de waterspanning moet worden bepaald.
Het grondwater stijgt in de buis op, totdat de waterkolom evenwicht maakt met de waterspanning ter hoogte van het filter. De lengte van die waterkolom is de stijghoogte en de op te meten waterspanning in dat punt.
Deze methode van waterspanningsmeting is echter alleen practisch toepasbaar in goed doorlatende grond, waar een vlotte in- en uitstroming van water in de peilbuis plaats vindt.

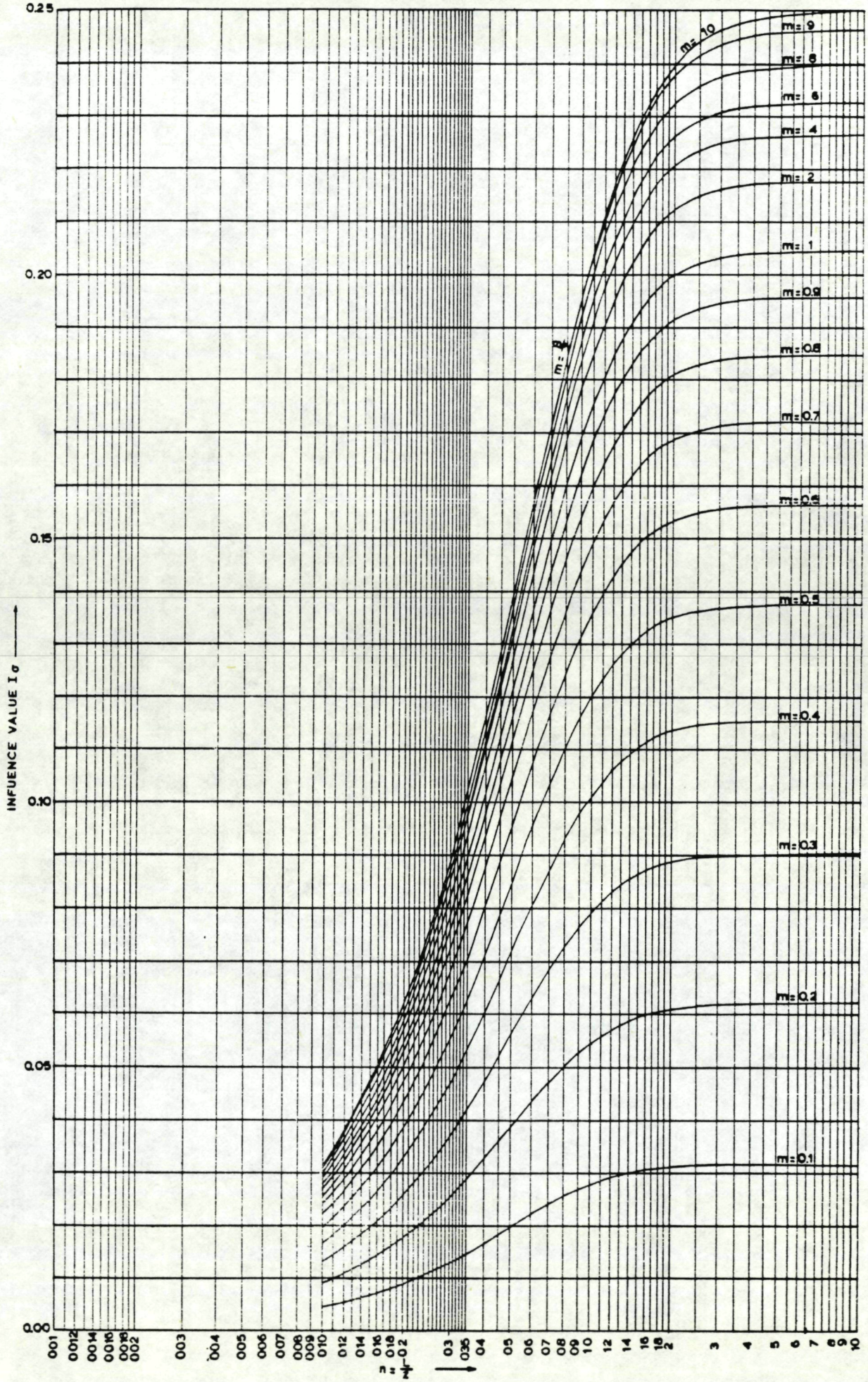


Fig. 30A Diagram van Newark