

HET OPLAADEFFECT
IN DRINKWATERINSTALLATIES

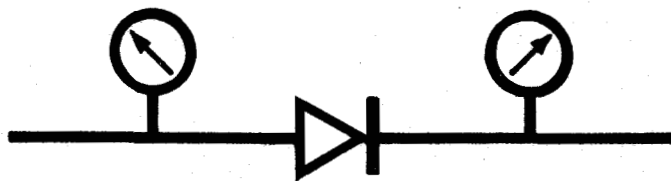
Mededeling nr.42 van het KIWA

Rapport van de
werkgroep oplaadeffect
van de
commissie distributie

Rijswijk, september 1975

<u>INHOUD</u>	<u>blz.</u>
1. Inleiding	4
2. Oplaadeffect.	5
3. Technische gegevens.	6
4. Samenvatting.	11
5. Beschouwing.	15
6. Kosten.	19
7. Conclusies.	20
<u>Bijlage:</u>	
Invloed van temperatuurverhoging op een met water gevulde en gesloten buis.	22

OPLAADEFFECT



Samenstelling

Werkgroep Oplaadeffect

A. van Duuren	Gemeentelijk Energie- en Vervoerbedrijf, Utrecht
Ing. J. F. Hoek	Gemeentelijk Waterbedrijf, Haarlem
Ing. G. J. Jongens	Gas- en Waterbedrijf der Gemeente Amstelveen
P. Meijers	Duinwaterleiding van 's-Gravenhage
Ir. F. Schmidt	Antwerpse Waterwerken N.V.
Ing. M. Sollman	KIWA N.V., Rijswijk (Z.H.), (voorzitter).

1. INLEIDING

In het midden van de zestiger jaren heeft het Staats-toezicht op de Volksgezondheid er bij de waterleiding-bedrijven bij herhaling op aangedrongen om over te gaan tot het plaatsen van keerkleppen aan het begin van de binneninstallaties. Doel hiervan is de beveiliging van het hoofdleidingnet tegen de mogelijke verontreiniging door eventuele terugstroming van water uit die binneninstallaties.

Een dergelijke terugstroming kan het gevolg zijn van een (aanzienlijke) drukdaling in het hoofdleidingnet als gevolg van bijvoorbeeld een buisbreuk of een plotselinge, grote, plaatselijke afname zoals bij brandblussing.

Door de installatie van een keerklep wordt de binneninstallatie tevens in die zin van het hoofdleidingnet afgesloten dat, indien door enige oorzaak de druk in de installatie stijgt er geen drukontlasting naar het hoofdleidingnet kan optreden.

Omdat door deze drukstijging in enkele incidentele gevallen moeilijkheden werden ondervonden is naar dit verschijnsel een onderzoek ingesteld.

Bij de uitgevoerde onderzoeken in die incidentele gevallen werd vastgesteld dat de oorzaak moest worden gezocht in het gebruik van een geiser in een drinkwaterinstallatie die met een keerklep was beveiligd. Alhoewel er dus geen reden was om andere oorzaken aan een nader onderzoek te onderwerpen, werden deze voor de volledigheid wel in de

beschouwingen opgenomen.

In dit rapport wordt kort ingegaan op de verschillende oorzaken van vorenbedoelde drukverhoging, waarbij voor enkele daarvan technische gegevens zijn opgenomen. Tenslotte omvat dit rapport een beschouwing over de eventuele noodzaak om in dit verband maatregelen te (doen) nemen.

2. OPLAADEFFECT

Voor de beschrijving van het begrip "oplaadeffect" wordt uitgegaan van de volgende definitie:

"Het trapsgewijze of geleidelijke verloop van een drukverhoging in een gesloten systeem, benedenstrooms van een afsluitorgaan zoals een keerklep".

De oorzaak van een dergelijke drukverhoging kan zowel van thermische als van hydraulische aard zijn. Voorbeelden van thermische oorzaken zijn:

- T1 - warmteoverdracht van de omgeving (bijvoorbeeld kamertemperatuur) op het in het leidingsysteem aanwezige en relatief koudere water;
- T2 - warmteoverdracht van de afvoergassen van een waakvlam in een met gas verwarmd warmwater-toestel dat koud water bevat;
- T3 - overdracht van de, in het zogenaamde binnenwerk van een (gasgestookt) doorstroomwarm-

watertoestel^{*}, geaccumuleerde warmte op het water in de tapspiraal nadat direkt daarvoor warm water is getapt;

T4 - normale verwarming van het water in voorraad-warmwatertoestellen^{**};

T5 - nabranden van geisers door storing van de geiser zelf.

Voorbeelden van hydraulische oorzaken zijn:

H1 - drukstoten of -schommelingen in het leiding-systeem bovenstrooms van de keerklep;

H2 - drukstoten in het leidingsysteem beneden-strooms van de keerklep en veroorzaakt door het (plotseling) stoppen van de doorstroming in dat systeem.

3. TECHNISCHE GEGEVENS

De, in het voorgaande hoofdstuk omschreven oorzaken zijn door de Werkgroep beoordeeld, waarbij met name aan geisers nog uitvoerige laboratoriumonderzoekingen hebben plaatsgevonden.

Over één en ander is het volgende te vermelden.

* In het navolgende ook met "geiser" aangeduid.

** In het navolgende ook met "boiler" aangeduid.

T1 - Invloed omgevingstemperatuur

Vrijwel altijd zal de temperatuur van het water in het hoofdleidingnet lager zijn dan de omgevingstemperatuur in woningen. Dientengevolge zal het water, nadat het zich enige tijd in de binneninstallatie bevindt, gaan uitzetten. Daardoor zal de druk in de binneninstallatie gaan stijgen.

Uit een berekening voor een specifiek geval (10 meter afgesloten koperen leiding met ϕ 12/10 mm) is gebleken dat bij een temperatuurverhoging van 10°C moet worden gerekend op een drukstijging van ruim 20 bar tengevolge van een theoretische expansie van ongeveer 1 cm³. (zie voor berekening de bijlage in dit rapport).

T2 - Aansteken geisers

Indien de waakvlam van een overigens koude geiser wordt ontstoken zal het stilstaande water worden verwarmd tot een temperatuur van circa 50 à 60°C. In een normale drinkwaterinstallatie zal de druk dan stijgen tot een waarde van circa 2 bar boven de plaatselijke netdruk, indien het uitzettende water niet kan terugstromen.

T3 - Naverhitting water in geisers

Als in een stationaire toestand bij warmwater-

bereiding door een geiser, de waterstroom wordt gestopt, zal de nog in het binnenwerk van een geiser aanwezige warmte op het dan stilstaande water worden overgedragen. Daardoor zal de druk stijgen omdat het volume immers niet kan toenemen. Laboratoriummetingen, zowel bij het KIWA als bij bedrijven die in de Werkgroep hebben medegewerkt, hebben aangetoond dat - afhankelijk van de binneninstallatie - door een dergelijke naverhitting drukken kunnen worden opgewekt van ongeveer 5 tot 35 bar. Ook speelt de toestand van de geiser een belangrijke rol.

Zo kunnen bij oudere toestellen, indien de spiraal is losgeraakt, eveneens drukken ontstaan van omstreeks 35 bar (zie ook T5).

Omdat voor sommige geisers de zogenaamde "spontane" ontstekingsdruk veelal tussen 25 en 40 bar ligt zal een dergelijke naverhitting vrijwel altijd een "spontane" ontsteking tot gevolg hebben. Dat laatste zal dan tot schade aan de geiser leiden en bij niet tijdig ontdekken tot ernstige waterschade aanleiding geven.

T4 - Voorraadwarmwatervaten

Bij de warmwaterbereiding in vaten (boilers) is er altijd sprake van een grote expansie die deels wordt opgenomen door de expansie van het vat en deels wordt afgevoerd door een ontlastklep (dergelijke ontlastkleppen zijn gewoonlijk met

een afsluitorgaan en een keerklep in één huis ondergebracht (inlaatcombinatie)). Daarbij wordt de druk dan begrensd op een waarde van veelal 8 bar. Omdat voor de gevolgen van de expansie een speciale voorziening is getroffen in de vorm van een ontlastklep, blijft dit verschijnsel in dit rapport buiten beschouwing. Nog wel is te wijzen op het feit dat een ontlastklep vast kan gaan zitten nadat de keerklep van de inlaatcombinatie gedurende lange tijd lek is geweest en het expansiewater via de binneninstallatie heeft kunnen afvloeien. Wordt in een dergelijke situatie een goed werkende keerklep in de binneninstallatie geplaatst dan bestaat de kans dat de ontlastklep eerst bij een veel hogere druk dan de ontlastdruk opent. Inmiddels kan het voorraadvat dan al beschadigd zijn (scheurvorming).

T5 - Nabranden van geisers door storingen van de geiser

Door bepaalde storingen aan de geiser zelf kan nabranden ontstaan. Indien daardoor drukken worden opgewekt die hoger zijn dan de zogenaamde "spontane" ontstekingsdruk kan dat aanleiding geven tot schade aan de geiser en waterschade (Zie ook hetgeen bij T3 is opgemerkt).

H1 - Drukstoten in hoofdleidingnet

Drukstoten of drukschommelingen in het hoofdleidingnet zullen vrijwel ongehinderd de keerklep in de richting van de binneninstallatie passeren. Hierdoor zal die installatie tijdelijk onder een hogere druk komen te staan en dus meer water bevatten. Omdat dit water niet meer door de dan alweer gesloten keerklep kan terugvloeien zal in de binneninstallatie een druk gaan heersen die vrijwel gelijk is aan de hoogste, opgetreden druk bovenstrooms van de keerklep.

Alhoewel uitgebreide gegevens ontbreken, hebben oriënterende metingen aangetoond dat met drukken moet worden gerekend die slechts met enkele bars boven de normale netdruk uitgaan.

Juist in woningen die tijdelijk niet bewoond zijn (vakantie) kunnen door de genoemde oorzaak dergelijke hogere drukken voorkomen.

H2 - Drukstoten in binneninstallatie opgewekt

Bij het beëindigen van de stroming in een binneninstallatie zal er in principe altijd een drukstoot optreden. De grootte van de drukstoot is afhankelijk van de aanvankelijk aanwezige stroomsnelheid en de sluitkarakteristiek van het afsluitorgaan waarmee de stroming is beëindigd. Omdat het hierdoor eventueel veroorzaakte oplaadefect geen accumulerend karakter draagt en er geen aanwijzingen zijn dat hierdoor belangrijk hoge drukken kunnen

optreden, is dit verschijnsel verder buiten de beschouwingen van dit rapport gelaten.

4. SAMENVATTING

Op grond van de verschillende technische gegevens, zoals vermeld in hoofdstuk 3 van dit rapport, kan het volgende overzicht worden gemaakt.

Oorzaak drukverhoging	Orde van grootte van drukverhoging (bar)			Frequentie van optreden
	gemeten praktijk*	gemeten lab.	berekend	
T1	2 - 5	-	20	vele malen per dag
T2	-	1 - 2	-	alleen bij aansteken
T3	7 - 10	5 - 35	-	vele malen per dag**
T4	8	8	-	vele malen per dag
T5	-	35	-	incidenteel bij storingen van de geiser
H1	1 - 5	-	-	vrij incidenteel
H2	1 - 10	-	-	na elke afname

* Alhoewel een aantal praktijkproeven is uitgevoerd, betekenen de aangegeven waarden niet dat nimmer hogere drukken voorkomen. Dit houdt onder andere verband met de nevenverschijnselen zoals in het volgende omschreven.

** Omdat na het tappen van gemengd water veelal eerst

de warmwaterkraan wordt gesloten en daarna pas de koudwaterkraan, vindt nog enig aflatens van expansiewater plaats.

Uit deze globale gegevens zou moeten worden afgeleid dat er een grote kans is dat nogal frequent hoge drukken door de naverhitting van geisers optreden. Het feit evenwel dat, voor zover bekend, uiterst zelden bij de bedrijven meldingen binnenkomen over geisers die in dit opzicht defect zijn geraakt, wettigt de veronderstelling dat er bij drukverhoging in het algemeen en bij drukverhoging door naverhitting (T3) in het bijzonder nevenverschijnselen of oorzaken zijn die de grootte van de drukverhoging in belangrijke mate beperken.

Zonder deze verschijnselen of oorzaken alle uitvoerig te beschouwen is het van belang enkele van deze te noemen:

- a. relatief kleine diameter van de opdrukstift in de geiser zodat de "spontane ontsteking" slechts bij zeer hoge drukken kan optreden;
- b. ontlasten van water via de vlotterkraan in de stortbak;
bij de vlotterkranen van het "evenwichtstype" zal er direct ontlasting van de druk plaatsvinden; bij vlotterkranen van het "overdruktype" zal eerst ontlasting kunnen plaatsvinden indien een bepaalde - voor elke kraan karakteristieke - druk wordt overschreden. Voor de in Nederland

- aan de markt zijnde vlotterkranen met KIWA-garantiemerk liggen deze karakteristieke drukken tussen 12 en 19 bar;
- c. elasticiteit van de installatie (leidingen, toestellen, afdichtingen, slangen van bijvoorbeeld wasmachines);
 - d. lekkage (niet goed gesloten kranen);
 - e. compressibiliteit (samendrukbaarheid) van het in de binneninstallatie aanwezige water.

Met betrekking tot dit laatste, de compressibiliteit, is het van belang te wijzen op de relatief grote opnamecapaciteit van het water dat zich in de binneninstallatie bevindt.

In de bijlage van dit rapport is een berekeningsmethode opgenomen voor de bepaling van de invloed van een temperatuursverhoging op de druk in een met water gevulde buis. Aan deze berekeningsmethode kan worden ontleend bij welke combinatie van leidinglengte en -diameter een (tijdelijke) drukverhoging (Δp) van 5 respectievelijk 10 bar optreedt indien wordt uitgegaan van een (eveneens tijdelijke) volumevermeerdering (ΔV) van 1 cm^3 . In de navolgende tabel zijn deze gegevens samengevat.

Uitw.diam. koperen pijp in mm	Leidingslengte (in m) en leidinginhoud (in l) waarin een volumevermeerdering van 1 cm ³ de aangegeven drukverhoging (Δp) bewerkstelligt			
	$\Delta p = 5$ bar		$\Delta p = 10$ bar	
	lengte	inhoud	lengte	inhoud
12	42,5	3,35	21,3	1,68
15	24,0	3,18	12,0	1,59
22	9,6	2,95	4,8*	1,48
28	5,4	2,78	2,7	1,39
35	3,2	2,64	1,6	1,32
42	2,1	2,54	1,1	1,27
54	1,0	2,05	0,5	1,03

* Door proefnemingen bevestigd

Voor de berekening van deze gegevens is uitgegaan van een volumevermeerdering van 1 cm³ omdat bij de gebruikelijke keukengeisers dit volume in het algemeen in de orde van grootte van 0,5 tot 1,5 cm³ is. Alleen bij keukengeisers met een slecht binnenwerk en bij badgeisers moeten op volumina van 2 tot 3 cm³ worden gerekend. Voor deze laatste toestellen speelt daarbij een gunstige rol het feit dat dan ook grotere leidingdiameters worden toegepast. In aanmerking nemende dat de totale waterinhoud van de drinkwaterinstallatie in bijvoorbeeld een woningwet-eengezinswoning veelal al 5 liter bedraagt, wordt dan ook geconcludeerd dat bij het gebruik van keukengeisers in normale woningen door na-

verhitting slechts tijdelijke drukverhogingen in de orde van grootte van 2 of 3 bar kunnen voorkomen.

Slechts in het bijzondere geval van binneninstallaties met een zeer geringe waterinhoud en/of warmwatertoestellen met een volumevermeerdering die belangrijk groter is dan de genoemde 1 cm^3 is het van belang om de risico's dienaangaande te onderkennen en zondig te elimineren.

5. BESCHOUWING

Uitgaande van de aanwezigheid van een keerklep in de binneninstallatie moet gerekend worden op situaties waarin, hetzij thermische hetzij hydraulische oorzaken een oplaadefect (drukverhoging) in die binneninstallatie veroorzaken.

Op grond van een klein aantal, incidentele praktijkervaringen en van enkele metingen in proefinstallaties lijkt het technisch verantwoord om voornamelijk het naverhittende effect van doorstroomwarmwatertoestellen als belangrijkste oorzaak van de bedoelde drukverhoging te zien.

In het licht van de eliminatie van oplaadefecten en hun secundaire gevolgen kan de volgende beschouwing worden ontwikkeld. Hierbij is alleen de technische kant beschouwd en zijn eventuele andere aspecten buiten beschouwing gelaten.

Alhoewel om technische of economische redenen tot andere maatregelen zou kunnen worden besloten moet

als fundamenteel uitgangspunt worden gezien dat een toestel, dat een drukverhoging veroorzaakt, wordt voorzien van een inrichting om die drukverhoging te elimineren.

Dit zou voor nieuwe installaties dan inhouden dat doorstroomwarmwatertoestellen - evenals dat met boilers altijd al het geval was - moeten zijn voorzien van een ontlastinrichting. Voor bestaande installaties zou - alhoewel de consequenties misschien niet onbelangrijk zijn - een zelfde uitgangspunt moeten gelden.

De gevolgen van één en ander overziende zouden door de verantwoordelijke groeperingen de volgende eisen kunnen worden gesteld:

1. Nieuwe doorstroomwarmwatertoestellen moeten van een ontlastklep zijn voorzien.
(Het verkleinen van de diameter van de opdrukstift bij geisers is bijzonder gunstig te achten omdat daardoor de "spontane" ontstekingsdruk wordt verhoogd. Gezien de resultaten van de laboratoriummetingen zou een waarde van 35 bar voor die druk als een minimum moeten worden aangehouden.)
2. Bestaande installaties, voorzien van een keerklep en een doorstroomwarmwatertoestel moeten worden uitgebreid met een ontlastklep.
3. Bestaande installaties, voorzien van een doorstroomwarmwatertoestel moeten met een ontlastklep worden uitgebreid zodra een keerklep wordt geplaatst.

Toepassing van deze eisen is echter niet nodig voor die gevallen waarin de inhoud van de drinkwaterinstallatie voldoende groot is om de tijdelijke volumevermeerdering zonder belangrijke drukstijging op te nemen. In het algemeen zijn dit de vele gevallen van een normale geiser in een ééngeswoning.

Is incidenteel toch een ontlastinrichting c.q. beveiliging tegen het ontstaan van te hoge drukken nodig, dan komen in aanmerking:

- a - ontlastklep in of direct bij toestel;
- b - ontlastklep bij keerklep;
- c - keerklep, die bij drukken in de binneninstallatie boven bijvoorbeeld 10 bar water doorlaat naar het hoofdleidingnet, totdat de druk in de binneninstallatie beneden 10 bar is gekomen;
- d - opnemen van een overdrukschakelaar in het thermo-elektrische beveiligingscircuit van de geiser;
- e - opnemen buffer in installatie;
- f - toepassen evenwichtsvlotterkraan.

Over deze oplossingen kan nog het volgende worden opgemerkt:

ad a. Dit is de meest fundamentele oplossing. Het beveiligingselement wordt daar geplaatst waar de onveilige situatie zijn oorsprong vindt; bovendien zal daar de afvoer van expansiewater veelal geen probleem opleveren.

ad b. Tegenover de eerstgenoemde oplossing zal de afvoer van het expansiewater bij de keerklep wel-

licht vaak problemen opleveren.

- ad c. Het terugvoeren van het expansiewater in de richting van het hoofdleidingnet is principieel onjuist. Omdat het echter enkele cm^3 water (bij een keukengeiser ongeveer 1 cm^3) betreft en wel die welke zich direkt benedenstrooms van de keerklep bevinden zal dit in feite geen probleem geven. Deze oplossing geeft de zekerheid dat de plaatsing van de keerklep gepaard gaat met het aanbrengen van de ontlastinrichting. Toestellen van deze aard zijn praktisch niet bekend omdat er geen vraag naar is. Wellicht is een eenvoudige constructie mogelijk.
- ad d. Het gebruik van een drukgevoelige schakelaar op de energietoevoer stelt zeker dat de geiser niet "spontaan" kan ontsteken en daardoor schade zou lijden.
- ad e. In het verleden gaf de aanwezigheid van een buffer in een drinkwaterinstallatie aanleiding tot de registratie van schijnverbruiken op de watermeter. Door de plaatsing van keerkleppen kan van dergelijke schijnverbruiken geen sprake meer zijn zodat ook een buffer als oplossing kan worden beschouwd. Een directe relatie met de geiser is echter niet aanwezig. Bovendien geeft een dergelijke buffer geen oplossing bij hydraulische oplaadeffecten tengevolge van drukstoten bovenstrooms van de keerklep. Voorts kleeft aan het gebruik van een buffer nog het grote bezwaar dat het grootste

deel van het water in de buffer niet wordt ververst.

Deze oplossing is overigens vergelijkbaar met de werking van het gesloten expansievat bij c.v.-installaties.

ad f. Een vlotterkraan kan beschouwd worden als een (gewichtsbelaste) ontlastklep; gezien het feit dat er geen relatie is met het te beveiligen object en bijvoorbeeld een afsluiter in de leiding naar de vlotterkraan - zonder acht te slaan op de veiligheid ter zake van het oplaad-effect - zou kunnen worden gesloten kan dit niet als een principieel juiste oplossing worden gezien.

6. KOSTEN

Omdat voor de oplossingen, zoals in het voorgaande genoemd veelal geen direct geëigende produkten op de markt beschikbaar zijn, is het voorshands niet mogelijk een bedrag te noemen voor de kosten die aan die oplossingen zijn verbonden.

Wel kan worden gesteld dat, zo een afzonderlijk toestel als ontlastinrichting moet worden geïnstalleerd, de kosten bij nieuwe drinkwaterinstallaties aanzienlijk lager zullen zijn dan bij bestaande installaties. In zekere zin geldt dit niet indien de ontlastinrichting onderdeel van de keerklep is, want dan kan het aanbrengen van de beveiliging (niet de aanschaffing) als kosteloos worden beschouwd omdat

deze bij de keerklepwisseling plaatsvindt.

Indien de beveiliging als onderdeel van de geiser wordt uitgevoerd zal dat voor nieuwe installaties wellicht de goedkoopste oplossing zijn.

7. CONCLUSIES

Resumerend kan het volgende worden geconcludeerd:

- a. In drinkwaterinstallaties kunnen door verschillende oorzaken drukverhogingen optreden indien die installaties met keerkleppen zijn beveiligd.
- b. De drukverhogingen als onder a bedoeld kunnen bij drinkwaterinstallaties met een geringe inhoud en indien zij door de functionering van doorstroomwarmwatertoestellen zijn ontstaan, funeste gevolgen hebben; het aantal bekende gevallen waarbij in de praktijk schade is ontstaan is echter zo klein dat geen onmiddellijke maatregelen nodig worden geacht.

Als wenselijkheid wordt hier naar voren gebracht dat de "spontane" ontstekingsdruk (door toepassing van een dunnere opdrukstift) van geisers zou moeten worden verhoogd tot tenminste 35 bar. Met deze druk komt men dan (ver) uit boven de druk die in een exceptioneel kleine installatie zou kunnen ontstaan. Voor de "overdrukvlotterkranen" zou de druk, waarbij de vlotterkraan in gesloten stand weer opent, ten hoogste 16 bar mogen bedragen.

- c. De afvoer van enig expansiewater (in de orde van grootte van 1 cm^3 bij een keukengeiser) in de richting van het hoofdleidingnet is formeel niet juist doch wordt wel toelaatbaar geacht.
- d. Het aanbrengen van een ontlastinrichting moet in beginsel direct bij het toestel, dat het oplaad-effect veroorzaakt, geschieden; dit is voor nieuwe installaties in het algemeen wel mogelijk; voor bestaande installaties kan worden gesteld dat bedoelde inrichting ook elders kan worden aangebracht.

INVLOED VAN TEMPERATUURVERHOOGING OP DE DRUK IN
EEN MET WATER GEVULDE EN GESLOTEN BUIS.

(Bijlage van het rapport Oplaadefect)

1. INLEIDING

Indien de temperatuur van een met water gevulde buis - waarvan de uiteinden zijn afgesloten - wordt verhoogd, manifesteren zich verschillende verschijnselen.

Ten eerste neemt de waterhoeveelheid toe terwijl ook de inhoud van de buis toeneemt. Omdat echter de inhoudsvergroting geen gelijke tred houdt met de volumevergroting van het water, zal de druk in de buis toenemen. Deze volumevergroting behoeft echter niet ten volle door een verdere vergroting van de buisinhoud te worden gecompenseerd omdat het water in zekere mate compressibel is.

In de navolgende berekening zijn eerst de invloeden van de temperatuur berekend waarbij ervan is uitgegaan dat het watersurplus nog geen drukverhoging tot gevolg heeft gehad.

Vervolgens wordt op basis van het berekende watersurplus de drukverhoging nagegaan.

Tenslotte is nog een rekenvoorbeeld opgenomen.

2. UITZETTING DOOR TEMPERATUURVERHOOGING

Aanduidingen

V_{t_1} = volume vóór temperatuurverhoging (bij temperatuur t_1).

V_{t_2} = volume na temperatuurverhoging (bij temperatuur t_2).

R = inwendige straal buis.

- s = wanddikte buis.
 Δt = $t_2 - t_1$.
 α = lineaire uitzettingscoëfficiënt buismateriaal*.
 γ = uitzettingscoëfficiënt water.

Voor water geldt bij uitzetting:

$$V_{t_2} = V_{t_1} (1 + \gamma \Delta t) \quad (1)$$

Voor de buis geldt bij uitzetting:

$$V_{t_2} = V_{t_1} (1 + 3\alpha \Delta t) \quad (2)$$

Omdat γ groter is dan 3α kan het watersurplus berekend worden door (1) te verminderen met (2):

$$\text{WATERSURPLUS} = V_{t_1} (\gamma \Delta t - 3\alpha \Delta t) \quad (3)$$

3. UITZETTING DOOR DRUKVERHOGING

Aanduidingen

- p = druk in de buis
 V_{p_1} = volume in buis voor drukverhoging (bij druk p_1)
 V_{p_2} = volume in buis na drukverhoging (bij druk p_2)

*Voor de kubieke uitzettingscoëfficiënt wordt in het algemeen een waarde van 3α aangehouden.

$$\Delta p = p_2 - p_1$$

R = inwendige straal buis

s = wanddikte buis

E = elasticiteitsmodulus buismateriaal

σ_1 = materiaalspanning dwars op buisas

σ_2 = materiaalspanning evenwijdig aan buisas.

Voor de dwarsdoorsnede is de evenwichtsvergelijking

$$\sigma_1 \times 2 s = p \times 2 R \quad (4)$$

daaruit volgt voor de materiaalspanning:

$$\sigma_1 = \frac{p \cdot R}{s} \quad (5)$$

Voor de situatie in de langsdoorsnede geldt de evenwichtsvergelijking:

$$\sigma_2 \times (\pi (R + s)^2 - \pi R^2) = p \times \pi R^2 \quad (6)$$

daarvoor kan benaderend geschreven worden:

$$\sigma_2 \times 2 \pi R s = p \pi R^2 \quad (7)$$

Daaruit volgt dan voor deze materiaalspanning:

$$\sigma_2 = \frac{p R}{2 s} \quad (8)$$

Met gebruikmaking van (5) wordt de vergroting van de buisstraal:

$$\Delta R = \frac{\sigma_1 R}{E} \quad (9)$$

en door substitutie van σ_1 :

$$\Delta R = \frac{p \cdot R^2}{s \cdot E} \quad (10)$$

Voor de buislengte wordt via

$$\Delta l = \frac{\sigma_2 \cdot l}{E} \quad (11)$$

op overeenkomstige wijze afgeleid:

$$\Delta l = \frac{p R l}{2 s E} \quad (12)$$

Voor de buisinhoud bij p_1 geldt:

$$V_{p_1} = \pi R^2 l \quad (13)$$

Met gebruikmaking van (10) en (12) wordt de buisinhoud bij p_2 :

$$V_{p_2} = \pi (R + \Delta R)^2 s (l + \Delta l) \quad (14a)$$

$$= \pi \left(R + \frac{pR^2}{sE} \right)^2 \times \left(l + \frac{pRl}{2sE} \right) \quad (14b)$$

Hieruit wordt op een benaderende* wijze de volgende formule afgeleid:

$$V_{P_2} = V_{P_1} \left(1 + \frac{5Rp}{2sE} \right) \quad (15)$$

4. VOLUMEVERMINDERING DOOR COMPRESSIE

Als de compressiefactor met f wordt aangeduid geldt voor de volumevermindering door compressie:

$$V_{P_2} = V_{P_1} (1 - fp) \quad (16)$$

5. BEPALING DRUKVERHOGING

Uit formule (15) kan de volumevergroting (opnamecapaciteit) van de buis worden afgeleid die is veroorzaakt door de, door het watersurplus veroorzaakte drukverhoging.

Zoals al eerder aangeduid wordt een gedeelte van het watersurplus geaccumuleerd door de compressibiliteit. Uitgaande van de gedachte dat beide verschijnselen (uitzetting en drukverhoging) na elkaar plaatsvinden ware voor de vaststelling van het uiteindelijke fenomeen in de formules (15) en (16) voor de beide grootheden V_{P_1} de waarden van de grootheid V_{t_2} uit

* Benadering gebaseerd op $\left(1 + \frac{1}{x}\right)^2 = \left(1 + \frac{2}{x}\right)$ waarbij $\frac{1}{x^2}$ wordt verwaarloosd omdat x erg groot is.

de formule (2) te kiezen.

Uit de formules (3), (15), (16) en (2) kan de eindvergelijking worden geschreven als

$$V_{t_1} (\gamma \Delta t - 3\alpha \Delta t) = V_{p_1} \left(1 + \frac{5Rp}{2sE} \right) - V_{p_1} (1 - fp) \quad (17)$$

of beter

$$V_{t_1} (\gamma - 3\alpha) \Delta t = V_{t_2} \left(\left(1 + \frac{5Rp}{2sE} \right) - (1 - fp) \right) \quad (18)$$

WATERSURPLUS = OPNAMECAPACITEIT

6. REKENVOORBEELD

Uitgangsgegevens

$$R = 0,5 \text{ cm}$$

$$s = 0,1 \text{ cm}$$

$$\Delta t = 10^{\circ}\text{C}$$

$$p_1 = 0$$

$$p_2 = \Delta p = p \text{ bar}$$

$$E = 1,2 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\alpha = 16 \times 10^{-6}$$

$$\gamma = 180 \times 10^{-6}$$

$$f = 49 \times 10^{-6} / \text{bar} \quad (20^{\circ}, 13 \text{ bar})$$

$$l = 1000 \text{ cm} \quad (10 \text{ m})$$

$$V_{t_1} = \pi R^2 l = \pi \cdot 0,5^2 \cdot 1000 = 785,71 \text{ cm}^3$$

$$(\gamma - 3\alpha) \Delta t = (180 \times 10^{-6} - 48 \times 10^{-6}) \cdot 10 = 1320 \cdot 10^{-6}$$

$$\text{WATERSURPLUS} = 785,71 \times 1320 \cdot 10^{-6} = \boxed{1,04 \text{ cm}^3} \quad (3)$$

$$V_{t_2} = V_{t_1} (1 + 48 \cdot 10^{-6} \cdot 10) = 786,0913 \text{ cm}^3 \quad (2)$$

$$1 + \frac{5Rp}{2sE} - (1 - fp) = \quad (18)$$

$$1 + \frac{5 \cdot 0,5 \text{ p}}{2 \cdot 0,1 \cdot 1,2 \times 10^6} - \left(1 - \frac{49p}{10^6}\right) = \frac{59,4 \text{ p}}{10^6}$$

$$\text{OPNAMECAPACITEIT } V_{t_2} \times \frac{59,4 \text{ p}}{10^6} = \boxed{0,047 \text{ p}}$$

$$\text{Drukberekening } p = \frac{1,04}{0,047} \approx 22 \text{ bar}$$

7. OPMERKING

De compressibiliteit van water is, evenmin als de uitzetting een vast gegeven.

Zo vermeldt het Chemical Engineers Handboek (1963) in tabel 3 - 167, op gezag van de Smithsonian Tables No.106 onder andere de volgende gegevens voor de waarde f:

Waarden van compressibiliteitsfaktor (f) bij

temperatuur	druk	f
20°C	13 bar	49×10^{-6}
20°C	200 bar	43×10^{-6}
20°C	500 bar	39×10^{-6}
40°C	500 bar	38×10^{-6}

Omdat de verwachte druk van de orde van grootte van 13 bar is en de temperatuur van 20°C als normale omgevingstemperatuur is te beschouwen werd voor f de waarde van 49×10^{-6} aangehouden.