Het gedrag van PVC-waterleidingbuis onder praktijkomstandigheden

Samenvatting
Om het inzicht in het gedrag van PVC-waterleidingbuis in de praktijk te vergroten, is een proefprogramma uitgevoerd, waarbij het gedrag van PVC-buis in verschillende typen grond is bestudeerd.
Na het leggen van de buis is, na een periode van een half jaar, waarin de buizen drukloos waren, inwendige druk op de buizen aangebracht. Deze druk is gedurende een jaar op een constant niveau gehandhaafd.
Gedurende de gehele proefperiode is de deformatie van de buizen, voornamelijk met behulp van rekstroken, geregistreerd.

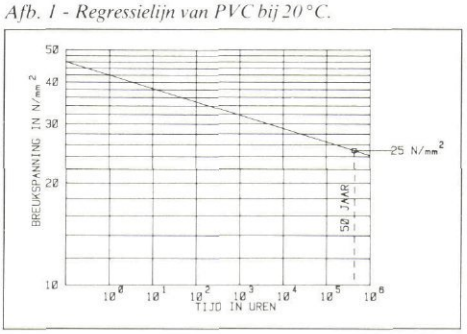
IR. J. J. BROERE
POLVA Nederland BV
Enkhuizen

Aangetoond wordt, dat het alleen meten van een afplatting van een drukloze buis tot verkeerde conclusies aanleiding kan geven. Tevens wordt aangetoond, dat de verschillen in grondtype en in legtechniek resulteren in een verschillend deformatiegedrag van de buis, zowel in drukloze toestand als onder inwendige druk.
Verder wordt aangetoond, dat een slechte verdichting van de grond in de sleuf, voornamelijk in zand en klei aanleiding kan geven tot spannings-concentraties.
De meetresultaten van de proefbuizen worden tenslotte vergeleken met de resultaten van berekeningen volgens de theorie van Bossen. Daaruit blijkt dat, onder de omstandigheden die bij de praktijkproef zijn toegepast, de theorie van Bossen een groter afplattingspercentage geeft dan in de praktijk optreedt. Leidingen die volgens deze theorie worden berekend hebben dus een extra mate van veiligheid.

1. Inleiding

Bij de constructie van PVC-waterleidingsystemen wordt, voor wat betreft de sterkteberekening, rekening gehouden met de 50 jaar breukwaarde van het toegepaste materiaal. Deze waarde is in de jaren vijftig bij de invoering van PVC buizen aangenomen, omdat de waterleidingbedrijven deze termijn hanteerden voor de afschrijving van de leidingen. Als 50 jaar breukwaarde wordt voor PVC vrij algemeen met 25 N/mm² gerekend. Deze waarde volgt uit de regressielijn van PVC bij 20 °C (afb. 1).

Afb. 1 - Regressielijn van PVC bij 20 °C.



Voor een bepaalde uitwendige diameter van de buis D en de werkdruk p, kan de wanddikte e bepaald worden met behulp van de zogenaamde ketelformule $(D-e)/e = 2\ \sigma/p$, waarin voor σ met de toelaatbare ontwerpspanning wordt gerekend.
De toelaatbare ontwerpspanning (de 50 jaar breukwaarde gedeeld door een veiligheidscoëfficiënt) is niet voor alle landen gelijk, omdat, ten gevolge van plaatselijk verschillende ervaringen in de afgelopen jaren, verschillende veiligheidscoëfficiënten zijn vastgelegd. Voorbeelden van deze verschillende ontwerpspanningen zijn weergegeven in afb. 2.
Vrij algemeen geldt dat voor wat betreft de toelaatbare ontwerpspanning, alleen rekening gehouden wordt met de inwendige druk.
Dit betekent in de praktijk dat, bij toepassing van de nominale druk, alle overige spanningen, die in de buisleiding optreden, gedragen moeten kunnen worden door de extra sterkte, die de buis heeft ten gevolge van de veiligheidscoëfficiënt. Dit zijn spanningen die ontstaan door bijvoorbeeld grond- en verkeersbelasting, zetting van de grond, drukstoten, en dergelijke.
Zijdelings zij opgemerkt, dat deze wijze van rekenen afwijkt van de werkwijze die constructeurs op andere terreinen van techniek gewend zijn. Bij bijvoorbeeld staalconstructies wordt de keus van de toelaatbare ontwerpspanning mede bepaald door de mate van nauwkeurigheid waarmee de maximaal optredende spanning berekend kan worden en het afbreuk-risico dat ontstaat bij eventueel falen van de constructie.
Voor wat betreft de invloed van de grond- en verkeersbelasting op kunststof buizen is er uit de literatuur een aantal rekenmethoden bekend, waarmee de afplatting van buizen berekend kan worden. Dit betreft dan voornamelijk drukloze buizen. Voor de berekening van de optredende wandspanning ten gevolge van deze afplatting wordt over het algemeen aangenomen, dat de buis door de afplatting een elliptische vorm krijgt.
Vastgesteld moet worden dat uit de literatuur geen gegevens bekend zijn waaruit blijkt dat voor de Nederlandse omstandigheden, waar zand, klei en veengrond voorkomen, deze rekenmethoden algemeen bruikbaar zouden zijn. Verder kan nog opgemerkt worden dat het gedrag van buizen onder inwendige druk nauwelijks in de literatuur beschreven wordt en zeker niet ondersteund wordt door resultaten van metingen.

Land	Normblad	σ N/mm2	voor buizen
Nederland	KIWA nr. 49	10	≤ 50 mm
		12,5	> 50 mm
België	NBN T42-111	10	
West-Duitsland	DIN 8062	10	
Frankrijk	NF T54-003	10	
Engeland	BS 3505	11	≤ 7"
		12,3	≥ 8"

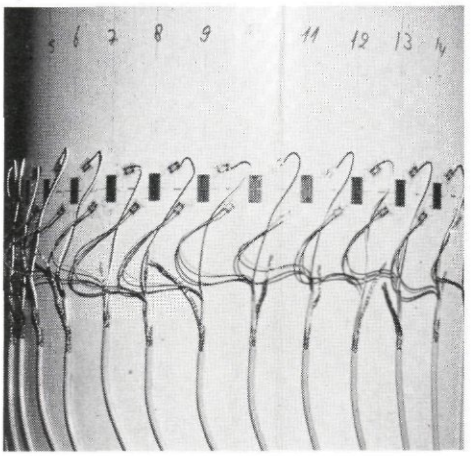
Afb. 2 - Toelaatbare ontwerpspanning σ in verschillende landen.

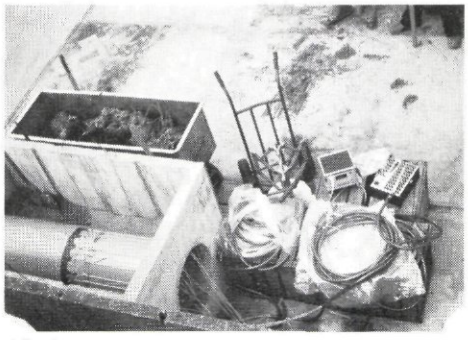
Toch is, om technisch en economisch verantwoord te kunnen construeren een goed inzicht nodig in het gedrag van de buis onder praktijkomstandigheden. Dit betreft dan het gedrag van de buis, die gedurende langere tijd drukloos in de grond ligt, de verandering van de spanningstoestand van de buiswand door het aanbrengen van de inwendige druk, de invloed van drukvariaties, etc.
Om het inzicht in deze materie te vergroten is een proefprogramma uitgevoerd, waarbij het gedrag van PVC-waterleidingbuizen onder verschillende praktijkomstandigheden is bestudeerd. De gevonden waarden zijn tevens vergeleken met de uitkomsten van berekeningen volgens de theorie van Bossen, die in veel gevallen voor de berekening van leidingen wordt toegepast.

2. Gebruikte meettechnieken

Voor een juiste beschrijving van het gedrag van een buis is het noodzakelijk de vervorming van de buis langs de gehele omtrek te bepalen en kan niet volstaan worden met alleen het meten van horizontale en/of verticale afplattingen. Daarom is bij de proeven gebruik gemaakt van rekstroken, die langs de gehele omtrek op de buitenwand van de buizen zijn geplakt (afb. 3).
Met rekstroken kan de optredende positieve of negatieve rek worden gemeten, waardoor de werkelijke vervorming van de buiswand direct afgelezen kan worden.
Voorafgaand aan de proeven onder praktijkomstandigheden zijn vóórproeven uitgevoerd

Afb. 3 - Rekstroken.





Afb. 4.

voor het bepalen van de betrouwbaarheid van de rekstrooktechniek op PVC-buis en de keus van het juiste type rekstrook, plakmiddel en afdekkit. Bij deze vóórproeven zijn afplatproeven onder een drukbank uitgevoerd. Daarbij treedt een deformatiebeeld op dat theoretisch goed berekend kan worden, namelijk een afplatting van de buis tussen twee vlakke platen. Daardoor is controle op de meetwaarden van de rekstroken mogelijk. Verder zijn extreme praktijkomstandigheden gesimuleerd door een buis, in een met grond gevulde betonnen bak, te belasten met betonnen platen, waarbij tevens overmatig veel water in de bak is gespoten (afb. 4).

Bij deze proef zijn de rekstrookmetingen gecontroleerd met behulp van een binnenmeetapparaat (afb. 5). Met dit binnenmeetapparaat kan, vanaf een vast punt M in de buis om de 10° de afstand tot de binnenwand van de buis gemeten worden.

Als wordt aangenomen, dat de buis over een omtrekslengte van 20° een cirkelvorm heeft, dan kan uit deze metingen voor elk meetpunt de kromtestraal berekend worden. Worden deze metingen aan de onbelaste en belaste buis uitgevoerd, dan volgt hieruit de wijziging van de kromtestraal Δ R ten gevolge van de belasting. Uit deze kromtestraalverandering kan de rek in de buiswand berekend worden.

Uit de meting met het binnenmeetapparaat volgt direct de afplatting (de afname van de verticale diameter) die de buis ten gevolge van de grondbelasting ondergaat.

3. Proefprogramma onder praktijkomstandigheden

Na afsluiting van de vóórproeven is een programma voor proeven onder praktijkomstandigheden in verschillende soorten grond opgesteld. Dit is gedaan in overleg met de Waterleiding Maatschappij Gelderland, District Epe; het Waterleidingbedrijf van de Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders, Lelystad en de Goudse Waterleiding Maatschappij. Deze bedrijven hebben tevens hun medewerking bij de uitvoering van de proeven verleend.

Bij de opstelling van het programma is er naar gestreefd voor elk type grond specifiek die variabelen te kiezen, die voor de praktijk van belang kunnen zijn. Dit resulteerde in een proevenschema, zoals is weergegeven in afb. 6. De cijfers in de tabel zijn de coderingen waarmee in het vervolg van dit verslag de buizen aangeduid zullen worden. Als verklaring van de tabel moge nog het volgende dienen. De aanduiding 'lang' en 'kort' in de regel 'buis kort of lang drukloos' geeft aan of de buis kort of lang drukloos heeft gelegen alvorens inwendige druk aan te brengen. Dit facet is bij de proeven bestudeerd, omdat waterleidingbuizen in veel gevallen lang drukloos liggen alvorens de inwendige druk wordt aangebracht. Van de invloed hiervan op de eventueel optredende rerounding van de buis is weinig bekend. Om bij de proeven aan te sluiten bij in de praktijk voorkomende tijden is voor 'lang' ca. 6 maanden en voor 'kort' 2 weken aangehouden.

Bij de vorm van de sleuf wordt met 'vlakke bodem' de uitvoering bedoeld, die bij het verleggen van buizen normaal gebruikelijk is (afb. 7). Bij de 'bodem met goot' is in de vlakke bodem een aan de buisvorm aangepast profiel getrokken. Voor zover bekend wordt deze constructie alleen door de Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders toegepast. Daarbij heeft het cirkelvormig sleufprofiel een radius die iets groter is dan de radius van de buis en een diepte die gelijk is aan ongeveer 1/3 x de buisdiameter. Deze afmetingen zijn ook bij de proeven toegepast.

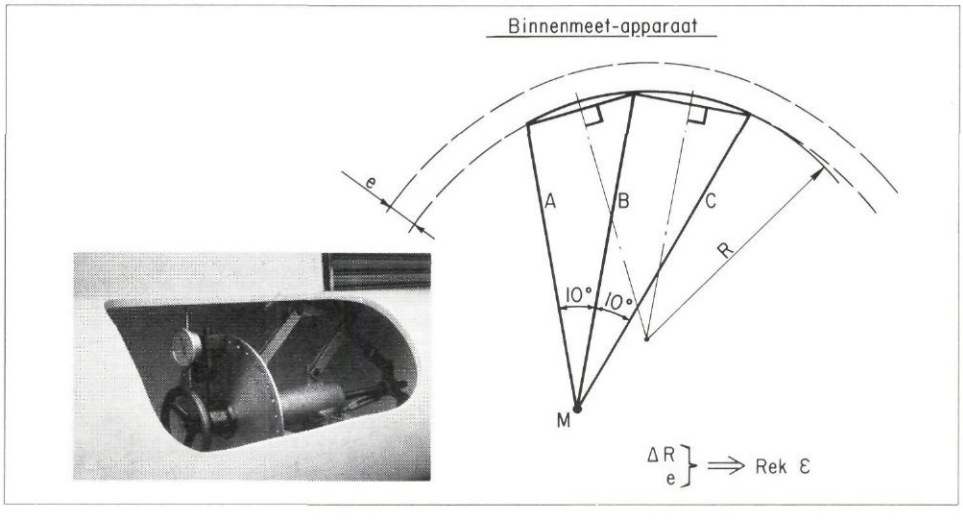
Bij de 'grond in sleuf' is bij 'verdichten' een zodanige verdichting van de grond in de sleuf toegepast als door het betreffende waterleidingbedrijf noodzakelijk werd geacht, bijvoorbeeld alleen verdichten aan de onderzijde van de buis of stapsgewijs verdichten over de gehele sleufdiepte. In de volgende paragraaf is per type grond de toegepaste verdichting nader aangegeven. Bij 'los storten' is de sleuf na het leggen van de buis zonder enige voorzorg volgestort.

Bij de proeven in zand en klei is met de graafmachine over de dichtgestorte sleuf gereden. Dit is gedaan, omdat dit een extra belasting op de buis zal geven. Hoewel hieraan door de waterleidingbedrijven niet de voorkeur wordt gegeven, zal dit in de

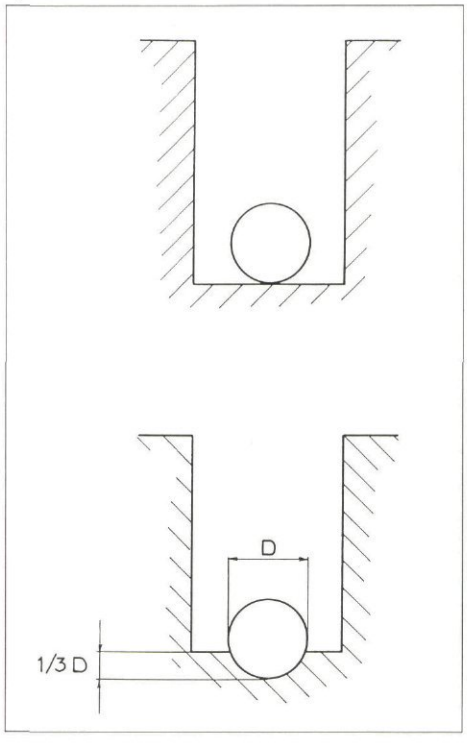
Afb. 6 - Verleggingscondities van proefbuizen.

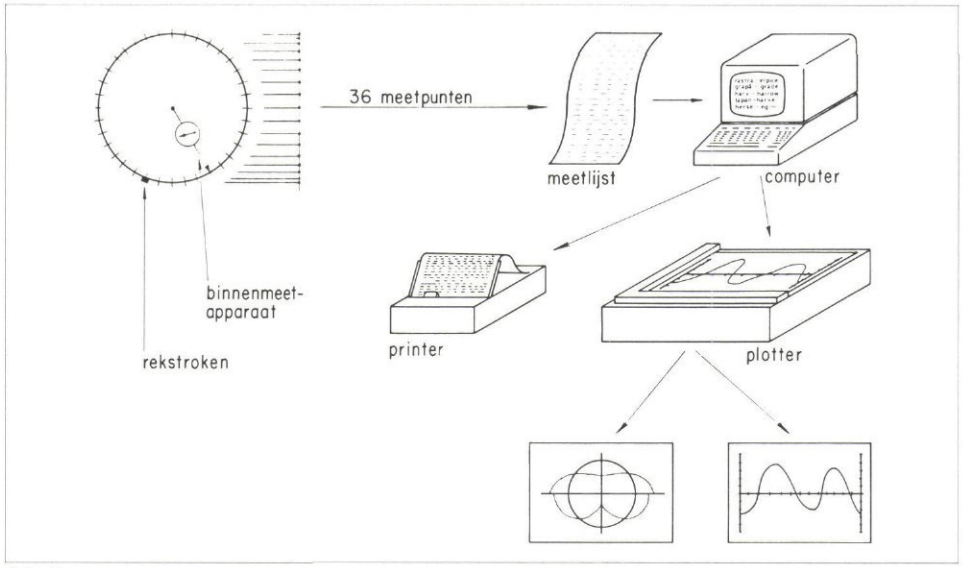
Type grond		Zand		Klei		Veen	
Lokatie		Dellenweg Epe		Pompstation Aquaterp Lelystad		Pompstation C. Rodenhuis Bergambacht	
Buis kort of lang drukloos		lang		lang		lang	kort
Vorm sleuf		vlakke bodem	bodem met goot	vlakke bodem	bodem met goot	vlakke bodem	
Grond in sleuf	verdichten	1		4			
	los storten	2	3	5	6	7	8

Afb. 5 - Binnenmeet-apparaat.



Afb. 7.

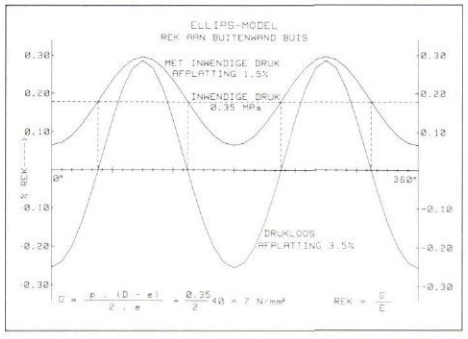




Afb. 8.

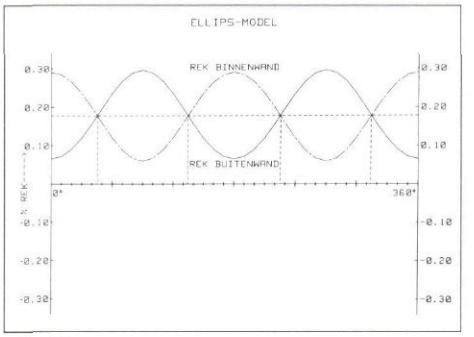
praktijk in veel gevallen niet te voorkomen zijn.
Alle proeven zijn uitgevoerd met buizen Ø 500 mm, kl. 41 (nom. druk 0,63 MPa), lengte 12 m, volgens de KIWA-keuringseis nr. 49. De buisdiameter Ø 500 mm is gekozen om, zo lang de buizen drukloos zijn, de rekstrookmetingen nog met metingen met het binnenmeetapparaat te kunnen bevestigen.
De rekstroken zijn in het midden van elke buis aangebracht en wel op 36 punten in de omtrek. Gebruik is gemaakt van twee-assige rekstroken, zodat de rek zowel in axiale als in tangentiële richting gemeten kan worden.
Bij elke proeflocatie is een voorziening aangebracht om de buizen op inwendige druk te kunnen zetten en deze druk te kunnen regelen.
De meetgegevens van de rekstroken en het binnenmeetapparaat zijn met behulp van een computer verwerkt tot een procentuele rek (afb. 8).
De resultaten kunnen vervolgens worden uitgetypt en met een plotter worden weergegeven in cirkeldiagrammen en lineaire diagrammen.
In een cirkeldiagram (zie afb. 12) wordt, uitgaande van een cirkel als nullijn, de op elke positie gemeten tangentiële rek in radiale richting met een bepaalde schaal uitgezet. Daarbij is positieve rek buiten de cirkel en negatieve rek (stuik) binnen de cirkel uitgezet.
In een lineair diagram (zie afb. 16) wordt de omtrek van de buis van 0 - 360° langs de horizontale as uitgezet, waarbij 0° de bovenzijde van de buis is. In verticale richting wordt per positie de gemeten tangentiële rek volgens de aangegeven schaal uitgezet.
Volledigheidshalve wordt opgemerkt, dat bij de verwerking van de meetgegevens niet uitgegaan is van de nominale wanddikte, die bij buizen van klasse 41 behoort. Bij elk meetpunt is in de berekeningen gewerkt met de wanddikte zoals deze daar ter plaatse gemeten is.

Afb. 9.



4. **Meetresultaten van de praktijkproef**

In deze paragraaf zullen achtereenvolgens, per type grond, de legcondities en het gedrag van de buizen in drukloze toestand en onder constante inwendige druk besproken worden.
Als inleiding op de proefresultaten zal eerst een theoretisch geval behandeld worden betreffende het gedrag van een gedeformeerde buis, die onder inwendige druk wordt geplaatst.
Als in een ondergrondse buis druk wordt aangebracht, treedt in het algemeen rerounding op.
Als voorbeeld (zie afb. 9) is de rek aan de buitenzijde van een buis kl. 41 aangegeven, die in drukloze toestand, een elliptische vorm heeft met een afplatting van 3,5%. In dit voorbeeld is verder aangenomen, dat door de inwendige druk van 0,35 MPa de afplatting afneemt tot 1,5%. Door de inwendige druk wordt de nullijn van de rekgrafiek, als het ware, in positieve richting verschoven over een afstand, die gelijk is aan de rek ten gevolge van de inwendige druk. Deze rek



Afb. 10.

volgt uit de ketelformule en de elasticiteitsmodulus. Vanaf deze nieuwe nullijn wordt vervolgens het verloop van de rek langs de omtrek ten gevolge van de afplatting van de buis uitgezet. Deze rek is, ten gevolge van de rerounding, kleiner dan bij de drukloze buis het geval is.
Voor de rek aan de binnenwand van de buis wordt aangenomen, dat deze bepaald kan worden door de reklijn van de buitenwand te spiegelen ten opzichte van de verschoven nullijn (afb. 10).
Op deze wijze kan de maximaal optredende rek, dus de maximaal aanwezige spanning, èn de plaats waar deze zich in de buiswand bevindt, worden vastgesteld.'

4.1. *Proeven in zandgrond*

Het leggen van de buizen

De buizen nr. 1, 2 en 3 (afb. 6) zijn alle drie gelegd in sleuven met een diepte van 1,75 m. Buis 1 is gelegd in een vlakke sleuf, sleufbreedte ter plaatse van de meetpunten 1,20 m. Bij het vullen van de sleuf is eerst de

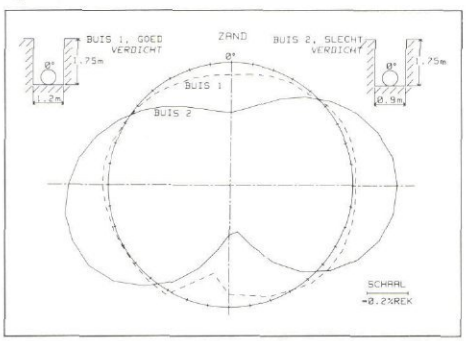
Afb. 11.

onderzijde van de buis aangevuld en met handkracht aangestampt. Vervolgens is de sleuf gevuld tot ca. 30 cm boven de buis en achtereenvolgens naast en boven de buis met een pneumatische stamper verdicht. Daarna is in 3 lagen de sleuf verder gevuld, waarbij elke laag is aangestampt.
Buis 2 is eveneens gelegd in een vlakke sleuf, breedte 0,90 m, waarna de sleuf zonder meer is volgestort.
Buis 3 is gelegd in een voorgevormde sleuf, gemaakt met behulp van een mal (afb. 11). Daarmee is in de sleuf een goot getrokken met een iets grotere radius dan die van de buis en met een diepte van ⅓ x de diameter van de buis. Nadat de buis in de goot was gelegd, is de sleuf zonder meer volgestort.
Na het leggen van de buizen is met de graafmachine over de volgestorte sleuf gereden.

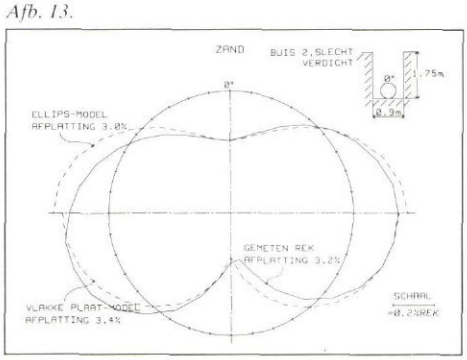
Meetresultaten aan de buizen in drukloze toestand

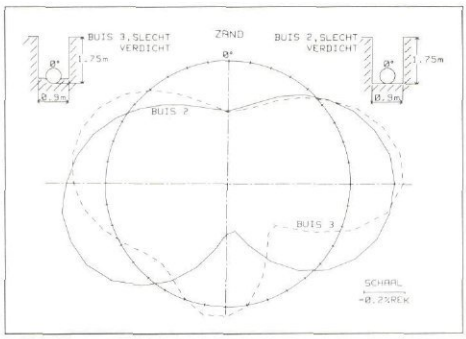
De rekstrookmetingen direct na het leggen van de buizen tonen grote onderlinge verschillen in de mate van vervorming van de drie buizen.
Buis 1 vertoont in vergelijking met buis 2 aanzienlijk minder vervorming, hetgeen toegeschreven kan worden aan de zorgvuldige verlegging. Volgens de meting met het binnenmeetapparaat is de afplatting ca. 0,5% (afb. 12).
De vervorming van buis 2 blijkt bij nadere beschouwing (zie afb. 13) aan de top redelijk overeen te komen met een buisafplatting van 3,0% met elliptische vervorming, namelijk een maximale rek van –0,24%. Aan de

Afb. 12.



Afb. 13.

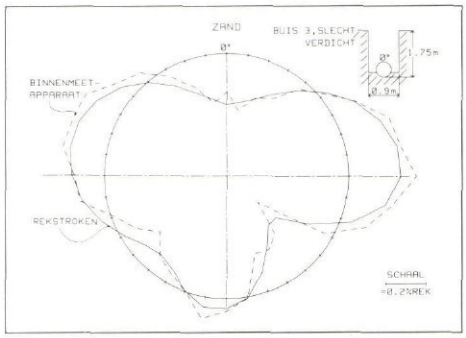




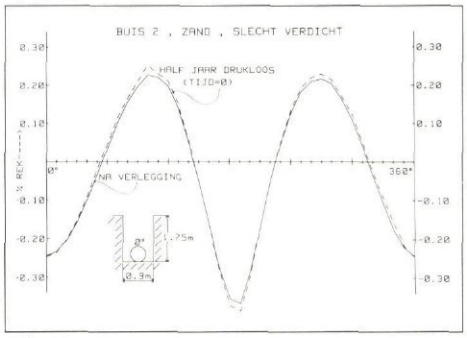
Afb. 14.

onderzijde is de vervorming overeenkomstig een afplatting van 3,4% tussen twee vlakke platen, wat een maximale rek van –0,38% veroorzaakt.
Deze waarden zijn in overeenstemming met de meetgegevens van het binnenmeetapparaat, waarmee een buisafplatting van 3,2% is vastgesteld. Door de harde bodem van de sleuf is er aan de onderzijde van de buis sprake van een lijnoplegging, zoals die ook het geval is bij het afplatten van een buis tussen twee vlakke platen.
Daardoor ontstaat, meer dan dat bij een elliptische vervorming het geval is, een piekspanning. Een neven-effect is, dat de buis aan de onderzijde, door het ontbreken van verdichte grond, minder gesteund wordt en dus verhoudingsgewijs meer afplat dan aan de bovenzijde het geval is. Dit beïnvloedt de hoogte van de piekspanning op ongunstige wijze.
Hieruit volgt duidelijk het bezwaar van een meetmethode waarbij alleen de afplatting gemeten wordt. In dit geval is daarbij een afplatting van 3,2% gemeten, hetgeen bij een elliptische vervorming een rek van 0,26% betekent. In werkelijkheid is de gemeten rek 0,38%, dus de helft meer.

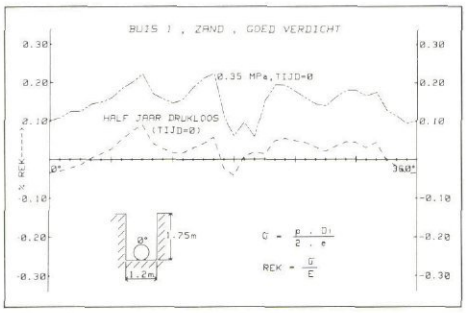
Buis 3 heeft aan de onderzijde een afwijkend gedrag ten opzichte van buis 2 (afb. 14). De piekspanning aan de onderzijde van de buis, zoals die bij buis 2 geconstateerd is, treedt hier niet op. Op de rand van de goot wordt echter een andere piekspanning geïntroduceerd, die nagenoeg eenzelfde waarde heeft. Dit gedrag kan verklaard worden door aan te nemen, dat de buiswand als het ware op de rand van de goot knikt. Daardoor ontstaat daar ter plaatse een drukspanning, die aan de onderzijde van de buis overgaat in een trekspanning.
De bovenzijde van buis 3 gedraagt zich ongeveer gelijk aan die van buis 2, eveneens een elliptische vervorming met een afplatting van 3%, hetgeen aannemelijk is omdat in beide gevallen de sleuf zonder enige voorzorg is volgestort.
De metingen met het binnenmeetapparaat bevestigen dit beeld (afb. 15). In de afb. zijn de berekende vervormingen van de metingen



Afb. 15.



Afb. 16.



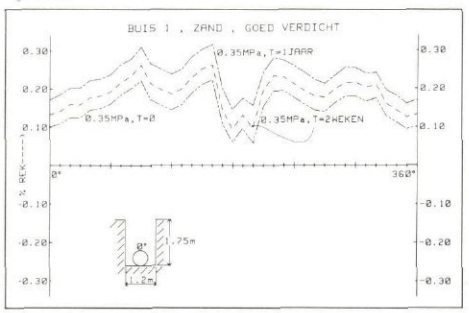
Afb. 17.

met het binnenmeetapparaat en de rekstrookmetingen weergegeven.
Hieruit blijkt overigens het bezwaar van een meting met een binnenmeetapparaat.
Ter plaatse van niet-geleidelijk verlopende deformaties ontstaan, volgens de toegepaste methode, ongenuanceerde pieken in het spanningsverloop. Dit is een gevolg van het relatief geringe aantal meetpunten en van de berekeningsmethode, waarbij wordt aangenomen, dat tussen 3 meetpunten, over een omtreklengte van ca. 8 cm, de buis een cirkelvorm heeft.
De buizen 1, 2 en 3 hebben resp. 6, 6 en 4 maanden in lege toestand drukloos gelegen. In deze periode zijn een viertal rekstrookmetingen uitgevoerd. Uit deze metingen volgt, dat de vervorming van alle drie de buizen vrijwel gelijk blijft aan de situatie direct na het leggen. Een voorbeeld hiervan is afb. 16, die de meting aan buis 2 weergeeft. Geconcludeerd mag worden, dat tijdens de drukloze periode het buismateriaal weinig of geen kruipverschijnsel vertoont.

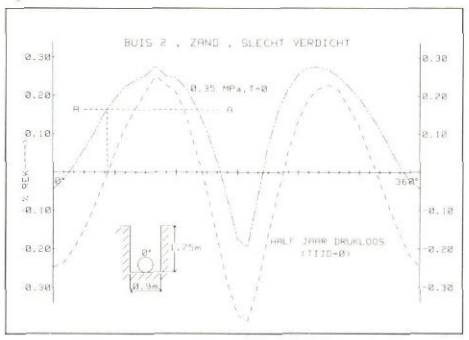
Meetresultaten aan de buizen onder inwendige druk

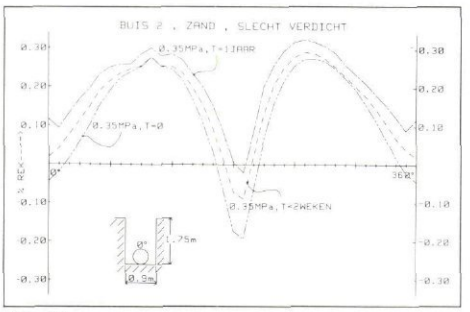
Na de drukloze periode is op de buizen in zandgrond een inwendige druk van 0,35 MPa aangebracht. Bij buis 1 (afb. 17) heeft het aanbrengen van deze inwendige druk tot gevolg, dat langs de gehele omtrek van de buis de reeds aanwezige rek met een positieve waarde van ca. 0,14% wordt vergroot.
Deze waarde volgt ook uit de ketelformule, als we daarbij rekenen met de inwendige diameter van de buis en de elasticiteitsmodulus inclusief de dwarscontractiefactor.
Rerounding van de buis is niet merkbaar. Dit was ook niet te verwachten, omdat de buis bij het leggen nagenoeg niet is afgeplat.
Na het op druk brengen is de inwendige druk constant op 0,35 MPa gehouden en zijn regelmatig metingen verricht. Voorbeelden hiervan zijn de metingen na 2 weken en na 1 jaar (afb. 18), waaruit blijkt, dat ten gevolge van de inwendige druk kruip van het buismateriaal is opgetreden.
Bij buis 2 (afb. 19) heeft het aanbrengen van de inwendige druk tot gevolg, dat de oorspronkelijke nullijn in positieve richting wordt verschoven over een afstand van 0,16% rek (lijn A-A). Deze waarde is, evenals bij buis 1, in overeenstemming met de ketelformule als rekening wordt gehouden met de inwendige diameter en de elasticiteitsmodulus, inclusief de dwarscontractiefactor.
Bij deze buis is een sterke rerounding merkbaar. De bovenzijde blijft een ellipsmodel vertonen, waarbij de afplatting van 3% naar 1,5% is teruggegaan. De onderzijde van de buis blijft het vlakke plaatmodel volgen.

Afb. 18.



Afb. 19.





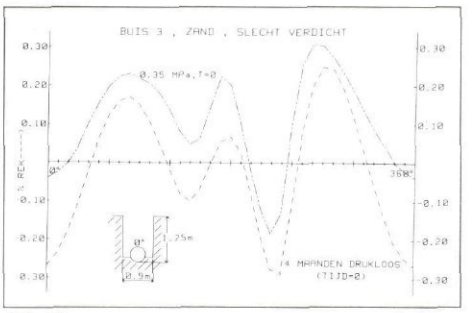
Afb. 20.

De maximaal optredende rek aan de buitenzijde treedt op aan de zijkanten van de buis en bedraagt 0,28%. De rek aan de binnenzijde van de buis kan bepaald worden door de reklijn te spiegelen om lijn A-A. Daaruit volgt, dat de maximale rek aan de onderzijde optreedt en ca. 0,5% bedraagt.

In de periode dat buis 2 op inwendige druk heeft gelegen (afb. 20) is een doorgaande kruip en rerounding vast te stellen.
Het verschil tussen boven- en onderkant van de buis, namelijk het ellipsmodel en het vlakke plaatmodel blijft zichtbaar.
Buis 3 vertoont bij het op druk brengen aan de bovenzijde een sterke rerounding (afb. 21). Dit gedrag is gelijk aan dat van buis 2, hetgeen verklaarbaar is, omdat de sleuf van beide buizen is gevuld zonder de grond te verdichten. Aan de onderzijde van de buis blijft de invloed van de randen van de goot duidelijk merkbaar. Dit blijft ook het geval in de periode dat de buis op druk is blijven liggen.

Samenvatting en conclusies

Bij zandgrond, althans bij het type harde grond waarin de proefbuizen zijn gelegd, is de verdichting van de grond in de sleuf bepalend voor het gedrag van de buis.
Bij een goede verdichting heeft de buis in de grond nagenoeg zijn oorspronkelijke ronde vorm en treedt geen extra rek op ten gevolge van afplatting.
Bij een slechte verdichting is de bovenzijde van de buis elliptisch vervormd en heeft de onderzijde een vervormingsbeeld, dat overeenkomt met de afplatting tussen twee vlakke platen.
De constructie met het gootje is in de onderzochte vorm niet aan te bevelen wegens het gevaar van spanningspieken. Door verandering van de vorm van het gootje is wellicht verbetering mogelijk.
In drukloze toestand vertonen de buizen vrijwel geen kruip.
Voor de rek, die als gevolg van de inwendige druk optreedt, kan gerekend worden met de inwendige diameter van de buis en de elasticiteitsmodulus, inclusief de dwarscontractiefactor.
De rerounding, die door de inwendige druk



Afb. 21.

ontstaat, is een proces, dat zich langzaam voltrekt.
Als totaalbeeld geldt voor een PVC buis in zandgrond:

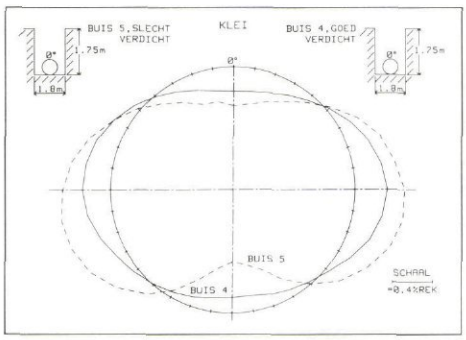
goed gelegd	blijft goed
slecht gelegd	blijft slecht

4.2. *Proeven in klei*

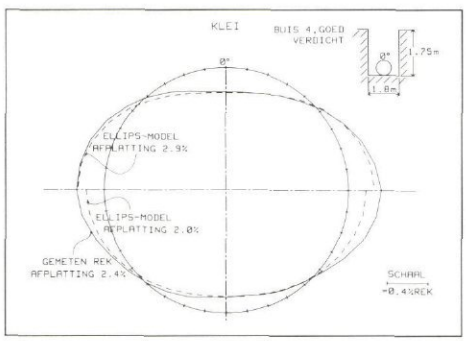
Het leggen van buizen

De buizen nr. 4, 5 en 6 (afb. 6) zijn alle drie gelegd in sleuven met een diepte van 1,75 m.
Buis 4 is gelegd in een vlakke sleuf, sleufbreedte 1,80 m. Na het leggen van de buis is de grond aan de onderzijde van de buis zorgvuldig met handkracht aangestampt. Daarbij is gebruik gemaakt van grond uit de sleuf, waarbij grove kluiten vermeden zijn. Daarna is de sleuf volgestort.
Buis 5 is gelegd in een sleuf overeenkomstig aan die van buis 4. Bij deze buis is de sleuf zonder enige voorzorg volgestort.
Buis 6 is gelegd in een sleuf die gemaakt is met een speciale graafbak (afb. 22).
Daardoor ontstaat in de bodem van de sleuf een goot met een iets grotere radius dan die

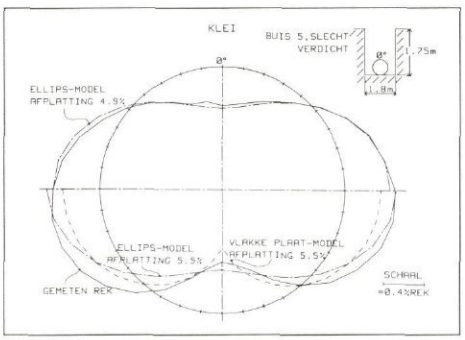
Afb. 22.



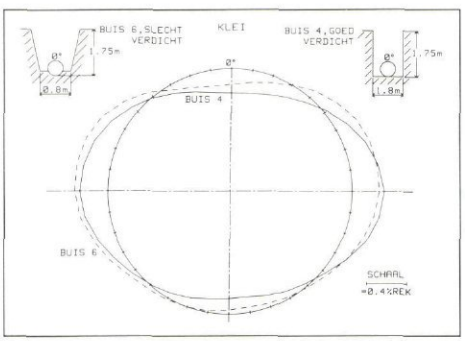
Afb. 23.



Afb. 24.



Afb. 25.



Afb. 26.

van de buis en met een diepte van 1/3 x de diameter van de buis. Deze constructie wordt door de Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders veelvuldig in kleigrond toegepast. Nadat de buis in deze goot is gelegd, is de sleuf zonder meer volgestort.
Na het leggen van de buizen is met de graafmachine over de dichtgestorte sleuf gereden.

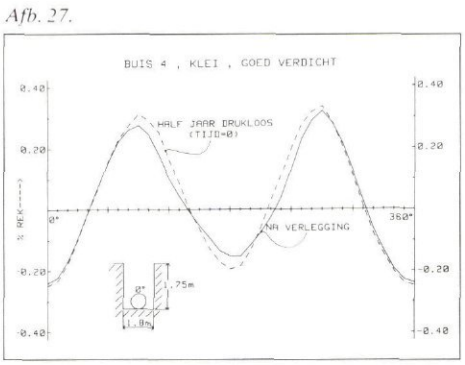
Meetresultaten aan de buizen in drukloze toestand

De rekstrookmetingen direct na het leggen van de buizen vertonen grote onderlinge verschillen. Buis 4 vertoont in vergelijking met buis 5 aanzienlijk minder vervorming, als gevolg van de verdichting van de grond aan de onderzijde van de buis (afb. 23).
De vervorming van buis 4 blijkt bij nadere beschouwing (afb. 24) aan de boven- en onderzijde overeen te komen met een ellipsvorm met een afplatting van resp. 2,9 en 2,0%. Het lagere afplattingspercentage aan de onderzijde is een gevolg van de verdichting van de grond, die daar is uitgevoerd. Het gemiddelde van deze beide percentages is in overeenstemming met de afplatting, die met het binnenmeetapparaat is gemeten, namelijk 2,4%.
Bij buis 5 blijkt de bovenzijde een elliptische vervorming te hebben, terwijl het gedrag aan de onderzijde tussen een ellipsmodel en een vlakke plaatmodel in ligt (afb. 25). Hoewel de buis op de vlakke bodem van de sleuf ligt, volgt het rekverloop niet volledig het vlakke plaatmodel, omdat de buis enigszins in de (zachte) sleufbodem wordt gedrukt.
Het afplattingspercentage aan de onderzijde is groter, omdat daar, door het ontbreken van verdichte grond, de buis minder gesteund wordt dan aan de bovenzijde het geval is.
De vervorming van buis 6 kan het beste vergeleken worden met die van buis 4 (afb. 26). Hieruit blijkt dat het leggen van de buis in een goot, zonder verder aanstampen van de grond in de sleuf, tenminste een even goed resultaat geeft als het verdichten van de grond langs de onderzijde van de buis, ingeval de buis op een vlakke sleufbodem wordt gelegd.
Verwacht mag worden, dat als de grond aan de zijkanten van de buis was verdicht het totaalbeeld nog gunstiger was geweest.
De buizen 4, 5 en 6 hebben 6 maanden in lege toestand drukloos gelegen. In deze periode zijn 4 metingen verricht.
Daaruit blijkt, dat de vervorming van buis 4 zich in geringe mate heeft doorgezet (afb. 27).
In deze zelfde periode is de vervorming van buis 5 afgenomen (afb. 28), waarbij verder blijkt, dat het rekverloop aan de onderzijde meer een ellipsmodel is gaan volgen.
Ook de vervorming van buis 6 is gedurende de drukloze periode iets afgenomen.
Deze afname in de vervorming kan alleen verklaard worden door aan te nemen, dat de zetting van de grond in gunstige zin is gewijzigd.
Opgemerkt wordt, dat een groot deel van het halfjaar, dat de buizen drukloos hebben gelegen, de grond zeer nat is geweest.

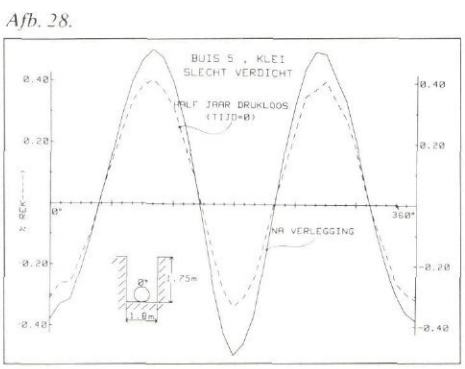
Meetresultaten aan de buizen onder inwendige druk

Na de drukloze periode is op de buizen in kleigrond een inwendige druk van 0,35 MPa aangebracht. Bij buis 4 (afb. 29) heeft het aanbrengen van de inwendige druk tot gevolg, dat de oorspronkelijke nullijn in positieve richting wordt verschoven over een afstand van 0,17% rek (lijn A-A).
Deze waarde is in overeenstemming met de ketelformule, als rekening wordt gehouden

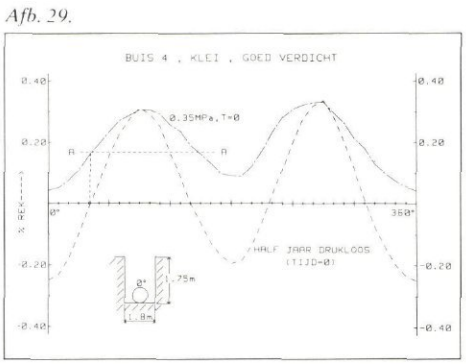
Afb. 27.



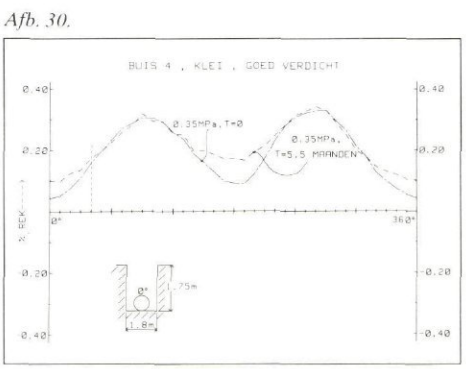
Afb. 28.

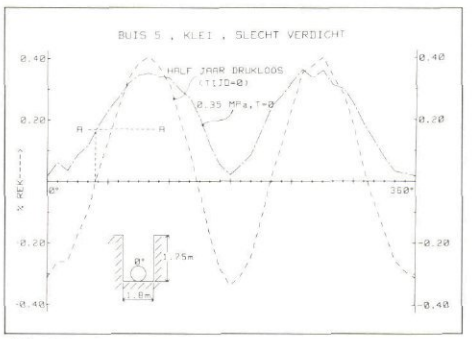


Afb. 29.

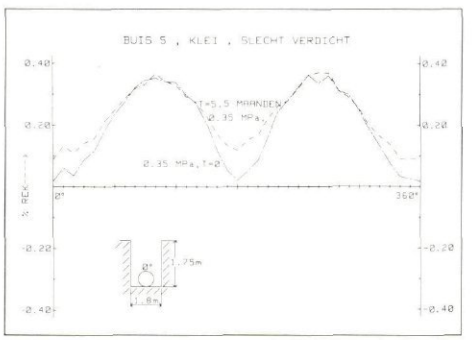


Afb. 30.





Afb. 31.



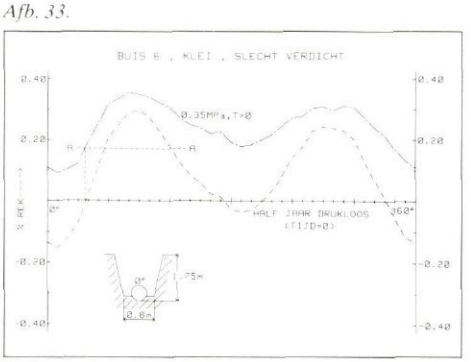
Afb. 32.

met de inwendige diameter en als de elasticiteitsmodulus inclusief de dwarscontractiefactor in rekening wordt gebracht. Bij deze buis is verder een sterke rerounding opgetreden. De afplatting is, ten opzichte van de drukloze situatie, gehalveerd tot 1,5% terwijl het elliptische vervormingsmodel gehandhaafd blijft.
In de periode, dat de buis onder inwendige druk heeft gelegen (afb. 30) heeft de rerounding zich langzaam doorgezet.
De kruip van het buismateriaal is slechts minimaal.
Buis 5 heeft bij het op druk brengen een gelijk gedrag als buis 4 (afb. 31).
De oorspronkelijke nullijn wordt bij deze buis ook over een afstand van +0,17% rek verschoven (lijn A-A). De rerounding is, als gevolg van de slechte verdichting nog groter dan bij buis 4. De reklijn volgt nu volledig een ellipsmodel met een afplatting van 2%.
Ook bij deze buis is in de loop van de tijd (afb. 32) een doorgaande rerounding en slechts een geringe kruip van het buismateriaal vast te stellen.
Het gedrag van buis 6 is bij het op druk brengen anders dan van de buizen 4 en 5 (afb. 33). De oorspronkelijke nullijn wordt wel op gelijke wijze over ca. 0,17% rek verschoven (lijn A-A), maar aan de zijkanten van de buis treedt een hogere rek op dan gezien het gedrag van buis 4 en 5 verwacht zou worden. De rek aan de zijkant van de buis heeft nu eenzelfde waarde als bij buis 5.
Ook bij deze buis is in de loop van de tijd (afb. 34) een doorgaande rerounding vast te stellen.

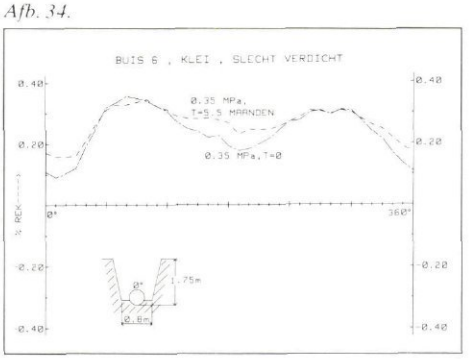
Samenvatting en conclusies
Bij de verschillende legtechnieken, die bij de proefbuizen in kleigrond zijn toegepast, zijn direct na het leggen grote onderlinge verschillen in het vervormingsbeeld vastgesteld.
De constructie met de goot zonder verdichting van de sleuf is tenminste gelijkwaardig aan een goede verdichting onder de buis gebleken. Een piekspanning ter plaatse van de rand van de goot, zoals die bij de buis in zandgrond optrad, is in dit geval, als gevolg van de zachte grond, niet aanwezig.
Verwacht mag worden dat, als aan de zijkant van de buis de grond was verdicht, het resultaat nog aanzienlijk beter was geweest.
De onderlinge verschillen tussen de drie buizen zijn na een drukloze periode van een half jaar minder geworden. Als verklaring voor dit gedrag kan slechts gewezen worden op het feit, dat de grond in deze periode zeer nat is geweest.
Bij het aanbrengen van inwendige druk vertonen de buizen een geringe kruip en worden de onderlinge verschillen nog kleiner.
Bij alle drie de buizen treedt door de inwendige druk rerounding op. Deze rerounding zet zich langzaam door.
Totaalbeeld: Verschillen in deformatie, ontstaan door verschillen in legtechniek, zijn door de tijd heen èn door de inwendige druk grotendeels teniet gedaan.

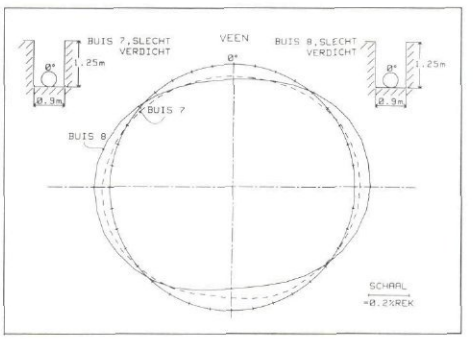
4.3. *Proeven in veengrond*
Het leggen van de buizen (afb. 6)
Gezien de conditie van de bodem (slappe grond en een waterstand van ca. 0,5 m onder het maaiveld), was bij deze proef nauwelijks zijdelingse steun van de grond te verwachten.

Afb. 33.

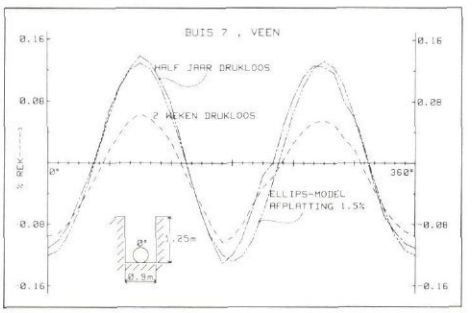


Afb. 34.





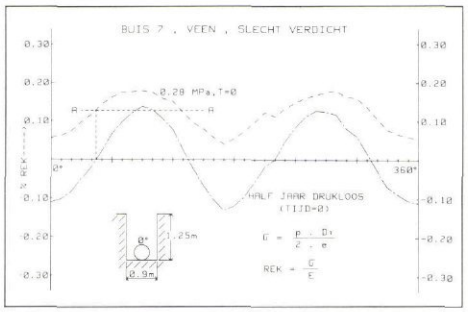
Afb. 35.



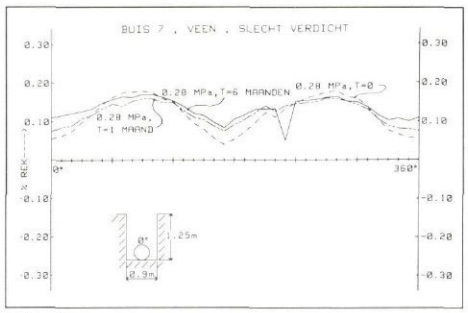
Afb. 36.

Daarom is in dit geval dan ook geen poging gedaan om de legtechniek te variëren.
Voor de praktijk kan het interessant zijn om te weten in hoeverre in deze grondsoort het snel op druk brengen van de buis voordelen biedt in vergelijking met het lang drukloos laten liggen. Om aan te sluiten bij praktisch uitvoerbare mogelijkheden is daarbij gekozen voor op druk brengen na resp. 2 weken en 6 maanden na het leggen van de buizen. Beide buizen zijn gelegd in een sleuf met een breedte van ca. 0,90 m en een diepte van 1,25 m. Bij het leggen is de sleuf droog gehouden met behulp van een dompelpomp, terwijl daarna de buizen zijn gevuld met water om opdrijven te voorkomen.

Meetresultaten aan de buizen in drukloze toestand
De rekstrookmetingen direct na het leggen van de buizen zijn weergegeven in afb. 35.
Voor de onderlinge verschillen tussen buis 7 en 8 kan geen verklaring worden gegeven.
De vervormingen zijn echter betrekkelijk klein en komen overeen met een elliptische vervorming bij een afplatting van 0,6% voor buis 7 en 0,9% voor buis 8.
Na 2 weken drukloos gelegen te hebben is deze afplatting toegenomen tot 1,0% voor buis 7 en 1,2% voor buis 8.
Om een gunstiger beginpositie van de buis niet te relateren aan een eventueel gunstiger gedrag ten gevolge van snel op druk brengen, is de buis met de grootste vervorming, dus buis 8, na 2 weken op inwendige druk gebracht.
Buis 7 is een half jaar, gevuld met water, drukloos blijven liggen. Daarbij is de



Afb. 37.



Afb. 38.

afplatting toegenomen tot 1,5% met een rekverloop, dat overeenkomt met een elliptische vervorming (afb. 36).

Meetresultaten aan de buizen onder inwendige druk

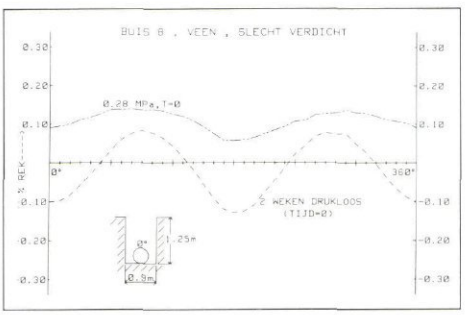
Na de drukloze periode is op de buizen in veengrond een inwendige druk van 0,28 MPa aangebracht.

Bij buis 7 (afb. 37) heeft het aanbrengen van de inwendige druk tot gevolg, dat de oorspronkelijke nullijn in positieve richting wordt verschoven over een afstand van 0,13% rek (lijn A-A). Deze waarde is in overeenstemming met de ketelformule als rekening wordt gehouden met de inwendige diameter en als de elasticiteitsmodulus inclusief de dwarscontractiefactor in rekening wordt gebracht. Bij deze buis is een sterke rerounding opgetreden. De vervorming blijft een ellipsmodel vertonen, waarbij de afplatting van 1,5% naar 0,7% is teruggegaan.

In de periode, dat de buis onder inwendige druk heeft gelegen (afb. 38) heeft de rerounding zich doorgezet en is kruip van het buismateriaal opgetreden.

Buis 8, die slechts 2 weken drukloos heeft gelegen, vertoont bij het op inwendige druk zetten, een nog sterker rerounding dan buis 7 (afb. 39). Evenals bij buis 7 is de oorspronkelijke nullijn over een afstand van ca. 0,13% rek verschoven. Door de rerounding is de afplatting teruggegaan van 1,2% tot 0,3% waarbij het ellipsmodel gehandhaafd blijft.

In de periode, dat de buis onder inwendige druk heeft gelegen (afb. 40) heeft de rerounding zich verder doorgezet. Na 7 weken blijkt de buis vrijwel rond te zijn. De reklijn



Afb. 39.

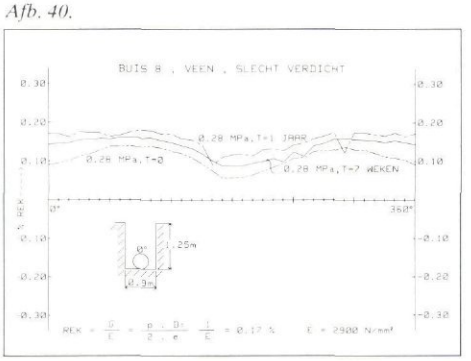
ligt na 1 jaar op een niveau van ca. 0,17% rek. Uit deze waarde volgt, als in de ketelformule de inwendige diameter wordt ingevoerd, een waarde voor de elasticiteitsmodulus van ca. 2.900 N/mm².

Aan de onderkant van buis 8 treedt een lagere rek op dan aan de bovenkant. Dit is voor het grootste deel te verklaren uit de axiale rek die aan de onderkant gemeten is, namelijk 0,07%. Deze axiale rek is waarschijnlijk ontstaan omdat de buis hol in de sleuf ligt. Deze positieve axiale rek veroorzaakt in tangentiële richting een negatieve rek. Het niveau van deze negatieve tangentiële rek fungeert als 'nullijn' voor de tangentiële rek ten gevolge van de inwendige druk.

Samenvatting en conclusies

Zowel in drukloze toestand als onder

Afb. 40.



inwendige druk vertonen de buizen een elliptische vervorming.

De veengrond blijkt vrijwel geen steun aan de buis te geven. Als gevolg daarvan zet in drukloze toestand de deformatie zich snel door. Wordt de inwendige druk op de buis aangebracht dan treedt echter een snelle rerounding op en wel des te vlugger naarmate de buis korter drukloos heeft gelegen.

Als totaalbeeld geldt voor een PVC buis in veengrond, dat de grond, althans in vergelijking met andere grondsoorten, weinig invloed heeft op het gedrag van de buis.

De buis heeft weinig last van de grond, maar ondervindt ook niet het gemak van een steunende werking door de grond.

5. Vergelijking meetresultaten met de theorie van Bossen

De buizen, die in een sleuf met vlakke bodem zijn gelegd, zijn voor wat betreft het korte duur vervormingsgedrag berekend met de theorie van Bossen.

Hierbij is gerekend met de werkelijke wanddikte van de buizen en is voor de elasticiteitsmodulus van het buismateriaal de waarde E = 3.000 N/mm² gebruikt.

Voor de grondconstante zijn waarden gebruikt, die veelal in de praktijk voor deze typen grond worden toegepast, waarbij de waarden van de klei- en veengrond zijn geverifieerd door metingen met een conussondeerapparaat.

De gegevens die verder zijn gebruikt, alsmede de berekende waarden van de afplatting en de meetwaarden, die bij de praktijkproef zijn vastgesteld, zijn vermeld in de tabel, afb. 41.

Uit deze gegevens blijkt, dat bij de buizen in zand en klei, waarbij verdichting van de grond in de sleuf is toegepast (buis 1 en 4) in drukloze toestand, de berekende afplattingen duidelijk groter zijn dan de gemeten waarden. Nadat de buizen onder inwendige druk zijn geplaatst, zijn de verschillen kleiner geworden, maar bedacht moet worden, dat

Afb. 41 - Vergelijking meetresultaten - berekening volgens de theorie van Bossen.

Type grond	ZAND		KLEI		VEEN
Buis nr.	1	2	4	5	8
Legdiepte m (tot hart buis)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0
Grondwater m (boven hart buis)	-	-	-	-	0,5
Verleggingsfaktor	1	4	3	4	4
Grondconstante	60	60	25	25	10
Dichtheid grond kg/m³	1900	1900	1800	1800	1500
Drukloze toestand					
Afplatting berekend %	1,41	3,08	4,3	5,28	3,32
gemeten %	0,5	3,0	2,0	4,9	0,9
Onder inwendige druk					
Inwendige druk MPa	0,35	0,35	0,35	0,35	0,28
Afplatting berekend %	0,81	1,71	1,78	2,16	1,16
gemeten %	0,5	1,5	1,5	2,0	0,3

bij de praktijkproef de buizen toen reeds een half jaar drukloos in de grond hebben gelegen.
Bij de buizen in zand en klei, waarbij geen verdichting is toegepast (buis 2 en 5), zijn de afplattingen volgens de theorie van Bossen redelijk in overeenstemming met de gemeten waarden.
Bij veengrond (buis 8) is, zowel in drukloze toestand als onder inwendige druk, de berekende afplatting aanzienlijk groter dan de gemeten waarde.
Uit deze gegevens blijkt, dat in de hier beschreven gevallen de theorie van Bossen een ongunstiger uitkomst geeft dan dat bij de praktijkproef is gemeten.

6. **Slotopmerkingen**
Naast de commentaren en conclusies, die bij de bespreking van de afzonderlijke buizen zijn gegeven, kunnen nog een aantal algemene opmerkingen worden gemaakt, namelijk:
a. Een methode waarbij alleen de horizontale en/of verticale afplatting van een buis wordt gemeten kan, voor wat betreft de optredende rek in de buiswand, tot verkeerde conclusies leiden. Aangetoond is, dat niet bij voorbaat aangenomen mag worden dat de buis een elliptische vervorming heeft.
b. Door het meten met een binnenmeetapparaat kan een goede indruk over de vervorming van een drukloze buis worden verkregen. Daarbij moet dan wel een zodanig groot aantal metingen in de omtrek van de buis worden uitgevoerd, dat een redelijk beeld van de vorm van de buis wordt verkregen. In het algemeen moet aan metingen met rekstroken de voorkeur worden gegeven, temeer omdat deze ook kunnen worden toegepast bij buizen, die onder inwendige druk staan.
c. Bij de bespreking van de meetresultaten is reeds gewezen op het verloop van de elasticiteitsmodulus als functie van de tijd. Algemeen wordt aangenomen, dat bij vrije kruip de elasticiteitsmodulus van hard PVC waterleidingbuis over een periode van 50 jaar afneemt tot 1.500 N/mm². Gezien de meetresultaten lijkt de conclusie gerechtvaardigd, dat deze lage waarde bij een ondergrondse buis niet bereikt zal worden.
d. In alle gevallen heeft het aanbrengen van de inwendige druk een rerounding van de buis tot gevolg gehad. Afhankelijk van de verleggingscondities blijft echter een zekere mate van vervorming over. Als de buis op de nominale inwendige druk wordt gebracht, dan zal plaatselijk de wandspanning een hogere waarde hebben dan de maximaal toelaatbare ontwerpspanning volgens de kwaliteitsnormen. De extra spanning ten gevolge van de grondbelasting komt in dat geval ten laste van de veiligheids-coëfficiënt.
e. In de praktijk wordt zand veelal als een gunstige grondsoort voor het leggen van PVC-buizen beschouwd, terwijl een veengebied als moeilijk wordt ervaren.
Uit de proeven is gebleken, dat, voor wat betreft de optredende wandspanning in de buis, deze regel te ongenuanceerd is.
De legmethode die wordt toegepast is bij zandgrond veel meer bepalend voor het vervormingsgedrag van de buis dan bij veen het geval is. Bij een zorgvuldige legmethode kan in zandgrond, als gevolg van de goede steunende werking van deze grond, een goed resultaat bereikt worden.
Als echter aan het leggen van de buis in zandgrond geen zorg wordt besteed, dan is het resultaat beduidend slechter dan dat de buis, op dezelfde onzorgvuldige wijze, in veengrond wordt gelegd.
f. Uit de vergelijking tussen de resultaten van de praktijkproef en de berekeningen volgens de theorie van Bossen blijkt, dat met deze theorie grotere percentages afplatting worden berekend dan in de praktijk optreden. Een ontwerp van een leiding, gebaseerd op de theorie van Bossen, zal derhalve in overeenkomstige gevallen een extra mate van veiligheid hebben.
g. In het bovenstaande is alleen het gedrag van PVC-waterleidingbuizen besproken, die drukloos en onder een constante inwendige druk hebben gelegen.
Omdat dit voor de praktijk eveneens van belang is, wordt het onderzoek voortgezet met proeven, waarbij in de buizen een variërende inwendige druk wordt aangebracht. Tevens zijn proeven met verkeersbelasting in uitvoering.

• • •

Waterontharding Amsterdam lijkt goede kans te hebben

Het lijkt erop dat de centrale ontharding van het Amsterdamse drinkwater een feit zal worden. Een meerderheid van de gemeenteraadsfracties en van de omliggende gemeenten, die drinkwater van de hoofdstedelijke gemeentewaterleidingen betrekken, is 'gematigd positief' over deze plannen, ondanks een kostenstijging van ongeveer negen gulden per jaar voor het gemiddelde gezin.
Dit bleek tijdens de vergadering van de raadscommissie voor de gemeentebedrijven. Het waterleidingbedrijf heeft een procédé ontwikkeld om de hardheid van het drinkwater te verlagen van 14 à 16° D tot ongeveer 8,5° D. Ontharding heeft een positief effect op de gezondheid en het milieu omdat het metaaloplossend vermogen van het water erdoor verminderd, zo heeft onderzoek van onder andere het Amsterdamse waterleidingbedrijf uitgewezen. In het drinkwater in Nederland komen zware metalen voor. Voornamelijk lood.
De installatie voor de ontharding gaat bijna *f* 25 miljoen kosten. De ministeries van EZ en VROM hebben een subsidie van ruim drie miljoen toegezegd aan de gemeente Amsterdam in het kader van regeling voor milieuvriendelijke technologieën.
Om de kosten te dekken zou het drinkwater 8,6 cent/m³ duurder moeten worden. Daar staat echter tegenover dat er met zachter water minder wasmiddelen en zeep gebruikt behoeven te worden en minder energie verbruikt wordt. Ook onderhoud aan apparaten als geisers en boilers zou goedkoper worden omdat er minder kalkafzetting is. Volgens een globale schatting van gemeentewaterleidingen zou dit de consument een bedrag van 75 à 100 gulden per jaar besparen.
Over deze besparingen bestaan echter binnen en buiten Amsterdam twijfels. Echt gedegen onderzoek is hiernaar nooit gedaan. Bovendien zijn B en W huiverig voor een verhoging van de woonlasten, die de laatste jaren toch al sterk gestegen zijn.
Ook instanties als de consumentenbond en consumentencontact die door het Amsterdamse gemeentebestuur om hun mening waren gevraagd, hebben hun twijfels over de financiële voordelen van de waterontharding.
Het merendeel van de raadsleden bleek echter genoeg voordelen te zien om met de ontharding te beginnen. Ook de omliggende gemeenten stonden overwegend positief tegenover de plannen. B en W van Amsterdam moeten volgens wethouder Jonker hun definitieve standpunt nog bepalen en zullen dan met een voordracht aan de raad komen. (ANP)