

Waterleidingen zijn drukleidingen en in het algemeen zijn de spanningen in het buismateriaal ten gevolge van de inwendige druk maatgevend voor de bepaling van de dikte van de buiswand of voor de berekening van de wapening in deze wand. De gronddruk en de bovenbelasting zijn daarom met name van grote invloed op de berekening van drukloze leidingen en van drukleidingen, die langdurig leeg kunnen staan. De berekening van een buis geschiedt door het bepalen van de spanningen ten gevolge

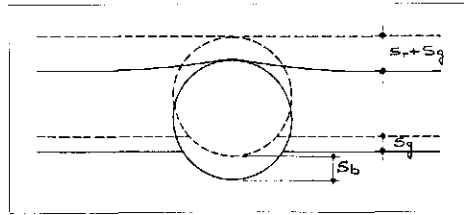


IR. F. WAGENMAKER
KIWA NV, Rijswijk

van de inwendige druk en de spanningen of de vervormingen ten gevolge van de uitwendige belastingen en vervolgens door dan een gecombineerde berekeningsmethode voor deze beide componenten te ontwerpen. Deze methode is per materiaal verschillend, aangezien de vervormingen en de materiaaleigenschappen ten aanzien van druk, trek en buiging in verschillende richtingen bij de buismaterialen onderling zo verschillen, dat hiervoor geen uniforme berekeningsmethode is te vinden. De materie van gronddruk en bovenbelasting lijkt op het eerste gezicht erg theoretisch en er komen inderdaad ingewikkelde formules in de diverse theorieën voor, maar er moet wel worden bedacht, dat de theorieën over het algemeen zijn gegrond op experimenten. Niettegenstaande deze experimentele basis treden er toch vrij grote verschillen op in de uitkomsten van de verschillende methoden [27]. Een factor 2 is niet ongewoon, maar hier moet worden opgemerkt dat — kennelijk ook uit ervaring — deze berekening weer wordt gecompenseerd door de geadviseerde veiligheidscoëfficiënt. Uiteraard is er een relatie bij de berekening van gronddruk en bovenbelasting met de grondmechanica, maar in het algemeen is deze relatie vrij summier en zijn de meeste theorieën gebaseerd op praktijkproeven.

Stijfheids criterium

De berekening van de gronddruk op de buis is afhankelijk van het feit, of de buis stijver of minder stijf is dan de omringende bodem. Marston was er in het begin van deze eeuw reeds van overtuigd, dat deze relatie bepalend is voor het verdere gedrag van de buis in de grond. Marston noemde zijn factor [17, 18] settlement deflection



Afb. 1 - Zetting van een buis volgens Marston.

ratio r_{sd} (door Roske later [21] in het Duits vertaald met *Setzungsdurchbiegungszahl*).

Marston:

$$r_{sd} = \frac{(S_r + S_g) - (S_b + \Delta d)}{S_r} \quad (1)$$

waarin:

- S_r = zetting van de later aangebrachte grond direct naast de buis
- S_g = zetting van de oorspronkelijke bodem direct naast de buis
- S_b = zetting van de buisbedding
- Δd = verandering van de buisdiameter

Voellmy ontwierp een formule, waarin de stijfheden van de grond en de buis direct met elkaar in relatie worden gebracht [25, 26], namelijk

$$n = \frac{E_g}{E_r} \left(\frac{r}{s} \right)^3 \quad (2)$$

- E_g = stijfheidsgetal van de grond
- E_r = elasticiteitsmodulus van het buismateriaal
- r = straal van de buis
- s = wanddikte van de buis

Als n kleiner is dan 1 is de buis stijver dan de omringende grond, als $n = 1$ is de buis even stijf als de omringende grond en bij n groter dan 1 is de grond stijver dan de buis.

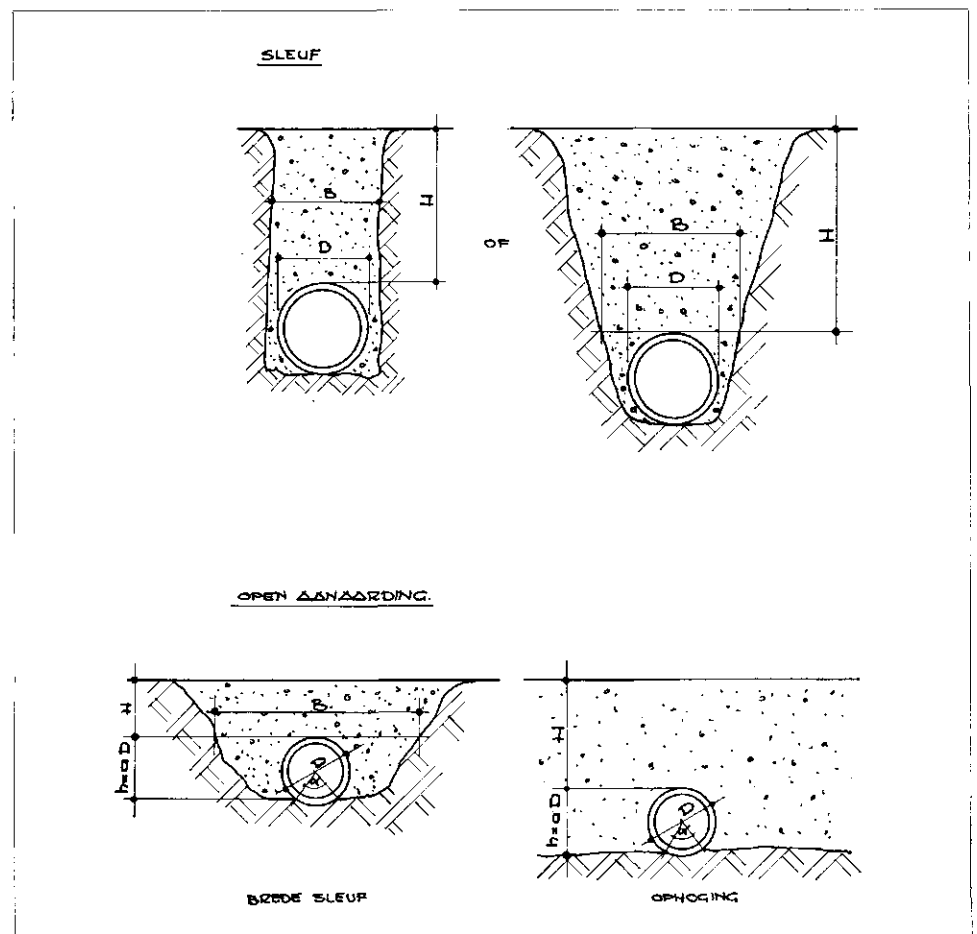
Holger Lutz [15, 16] vergelijkt de beide criteria van Marston en Voellmy en komt tot de conclusie dat, als S_b gelijk is aan S_g in formule (1),

$$r_{sd} = 1 - n \quad (3)$$

Het stijfheidsgetal E_g neemt af van 80 N/mm² in dichtgepakt zand via 10 N/mm² in vrij slappe klei of leem tot 0,1 N/mm² in veen.

Dit betekent [27] volgens formule (2), dat bij betonbuizen altijd een $n < 1$ optreedt, dus dat betonbuizen altijd stijver zijn dan de omringende grond. Asbestcementbuizen en gietijzeren buizen zijn, afhankelijk van hun wanddikte, vaak stijver dan de grond

Afb. 2 - Sleufcondities en open-aaraardingscondities.



in slappe klei en flexibeler dan de grond in zand. Kunststofbuizen zijn daarentegen altijd flexibeler dan de omringende grond. In dit verband moet nog gewezen worden op het zogenaamde 'rerounding effect'. Door de inwendige druk in persleidingen wordt de doorbuiging ten gevolge van de gronddruk tegengegaan, waardoor we in het algemeen met een stijvere buis te maken hebben dan uit stijfheids criterium (2) volgt. Uiteraard is dit afhankelijk van de hoogte van de druk in de leiding. De stijfheid kan het beste worden gevisualiseerd door een buis tussen twee lijnbelastingen samen te drukken. Bij beton ontstaat breuk bij een doorbuiging van nog geen 0,01 %. Bij buizen van asbestcement en gietijzer ontstaat breuk bij een doorbuiging, afhankelijk van de wanddikte, van maximaal 2 respectievelijk 5 % en bij nodulair gietijzer van meer dan 30 %. Buizen van staal en kunststoffen kunnen helemaal worden platgedrukt, zonder dat er breuk optreedt.

Stijve buizen

Voor de berekening van stijve en semi-stijve buizen is verder bepalend of de buizen gelegd zijn in een zogenaamde sleuf (E: Trench conditions, D: Grabenbedingung) of in een 'open aanaarding' (E: Embankment conditions, D: Dammbedingung). Op het gebied van internationale normalisatie loopt het Technische Comité ISO/TC 77 (Asbestcementprodukten) in de voorste gelederen. Dit onderdeel van de International Standard Organization heeft onlangs een ontwerp voor een internationale norm uitgegeven (ISO/DIS 2785) [7], dat volledige berekeningsmethoden van asbestcementbuizen, zowel voor persleidingen als voor drukloze rioolleidingen, inhoudt. Deze norm geeft naast een berekeningsmethode voor de grond- en verkeersbelastingen ook formules, grafieken en tabellen voor de gecombineerde berekening van persleidingbuizen bij inwendige druk en uitwendige belastingen. ISO/DIS 2785 geeft als grenswaarden voor de sleufconditie:

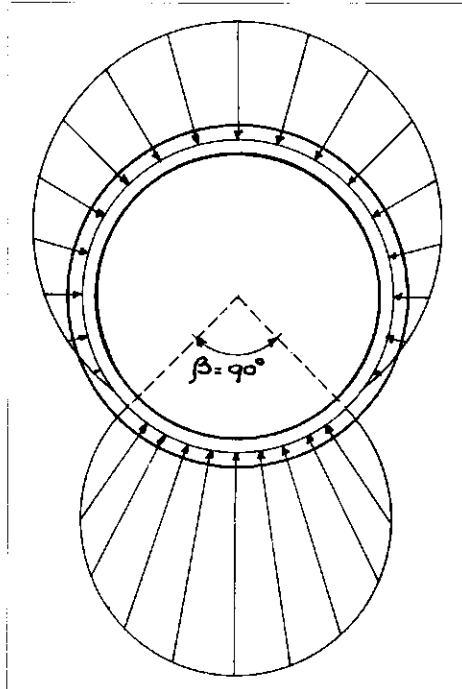
$$\begin{aligned} 1. \quad & B \leq 2 D \quad H \geq 1,5 B \\ 2. \quad & 2 D < B < 3 D \quad H \geq 3,5 B \end{aligned} \quad (4)$$

In de literatuur worden ook andere grenswaarden gegeven [8, 13, 21]. Wanneer de breedte van de sleuf en de dekking van de buis niet binnen de hierboven genoemde twee voorwaarden vallen, is sprake van een toestand van 'open aanaarding'.

ISO/DIS 2785 geeft als formule voor de berekening van de verticale grondbelasting op de buis bij open aanaarding:

$$W_{\text{ewt}} = C_e w D^2 \quad (5)$$

waarin:



Afb. 3 - Drukverdeling volgens Olander.

W_{ewt} = belasting op de buis in kN/m
 w = volumieke massa van de grondsoort in kN/m³
 D = buitenmiddellijn van de buis in m
 C_e = coëfficiënt volgens in ISO/DIS 2785 gegeven grafiek

De grafiek geeft verschillende lijnen voor verschillende waarden van de zettingsdoorbuigingsfactor r_{sd} , namelijk

$$\begin{aligned} r_{\text{sd}} &= +1,0 && \text{voor een brede sleuf} \\ &= +1,0 && \text{voor zeer harde grond bij ophoging} \\ &= +0,8 - 0,5 && \text{voor zand-klei bij ophoging} \\ &= +0,5 - 0 && \text{voor slappe grond bij ophoging} \end{aligned}$$

In ons land zal in het algemeen de 'open-aanaardingsformule' moeten worden gehanteerd, omdat diepe sleuven hier worden gemeden wegens de hoge grondwaterstand. Een buis met een inwendige diameter van 1000 mm moet al ten minste 3 m gronddekking hebben om voor een berekening in sleufcondities in aanmerking te komen. Voor sleuven past ISO/DIS 2785 de silotheorie toe en komt dan uit op de formule:

$$W_{\text{et}} = C_t w B^2 \quad (6)$$

waarin:

W_{et} = belasting op de buis in kN/m
 w = volumieke massa van de grondsoort in kN/m³
 B = sleufbreedte ter plaatse van de buis-schedel
 C_t = coëfficiënt volgens in ISO/DIS 2785 gegeven grafiek

Tevens wordt in deze concept-norm het hiervoor besproken stijfheids criterium van Voellmy ingevoerd, echter wel met de voorwaarde dat de aanvulling goed moet zijn verdicht (ten minste 90 % proctor). Dit betekent dus dat een verminderingsfactor wordt toegestaan, als de stijfheid van de buis kleiner is dan van grond. Aangezien de uitwendige diameter van de buis over het algemeen 50 tot 70 % van de sleufbreedte is, zal de uitgerekenende belasting dus ook tot een dergelijk percentage worden verlaagd, namelijk

als $n \geq 1$

wordt formule (6) gewijzigd in

$$W_{\text{ete}} = K_e C_t w B^2 \quad (7)$$

waarin:

$$K_e = \frac{D}{B}, \text{ zodat}$$

$$W_{\text{ete}} = C_t w B D \quad (8)$$

Ook voor deze berekeningen met sleufcondities geldt, dat uit de literatuur verschillende andere berekeningsmethoden bekend zijn, die echter voor een belangrijk deel soortgelijke resultaten geven als in de formules (6) en (8) is weergegeven [8, 13, 32].

Hoewel deze formules nu — voor een bepaald materiaal — internationaal zijn vastgelegd, blijven er enkele belangrijke vragen over, namelijk:

1. Moeten er nu werkelijk twee verschillende berekeningsmethoden zijn voor de condities van sleuven en open aanaarding en zou dit niet in één geïntegreerde berekeningswijze kunnen worden samengevat?
2. Kan er niet één berekeningswijze voor de verschillende materialen worden ontworpen?

Verskillende deskundigen in een aantal landen houden zich met deze vragen bezig, onder andere onze confraters in de DVGW. Vraag 1 zal naar verluit spoedig worden beantwoord doch op vraag 2 zal de oplossing nog wel jaren op zich laten wachten, omdat er nog te grote verschillen blijken te zijn in de materiaaleigenschappen (en tussen de materiaaldeskundigen) om tot een geïntegreerde rekenmethodiek te komen.

Enkele pogingen worden inmiddels al gedaan [15, 16] om het stijfheids criterium bij de verschillende theorieën aan vergelijkende beschouwingen te onderwerpen en hieruit blijkt reeds, dat er overeenkomsten kunnen bestaan tussen de diverse berekeningsmethoden.

In deze paragraaf over de berekening van stijve en semi-stijve buizen tenslotte nog

enkele opmerkingen over andere berekeningsmethoden dan de hiervoor genoemde. Olander [34] heeft aan de hand van proefnemingen geconcludeerd, dat de belastingen meestal op de in afb. 3 getekende wijze op de buis aangrijpen en dat de situatie met een beddingshoek $\beta = 90^\circ$ de praktijk van in de grond gelegde stijve buizen het beste benadert.

Gelok [9] heeft voor een dergelijk belastingsschema een computerprogramma ontworpen, waarbij verschillende inputgegevens kunnen worden gevarieerd.

In de pijpleidingcode van de Provinciale Waterstaat van Zuid-Holland [35] worden eveneens enkele berekeningssystemen genoemd, waaruit enige computerprogramma's zijn ontwikkeld [36].

Tenslotte moeten nog vermeld worden de methodes van Marston [17, 18] en Roske [21], die veel op de methode van DIS 2785 [7] lijken, van Guerrin en Daniel [10], van Voellmy [25, 26] en van Wetzorke [31, 32]. In enkele andere in de literatuurlijst aangehaalde werken worden eveneens een aantal van deze theorieën behandeld [6, 8, 12, 13].

Flexibele buizen

Bij de berekening van flexibele buizen [1, 2, 11, 14, 20, 33] ten gevolge van de uitwendige belastingen spelen de vervormingen de hoofdrol. De optredende buigspanningen en knik zijn in het algemeen volledig ondergeschikt aan de vervormingen. De methode van Spangler [24] voor de doorbuiging van de buis (de zogenaamde Iowa-formule voor 'Ring-Deflection') luidt als volgt:

$$\Delta_x = D_1 \frac{k W_c r^3}{E I + 0,061 e r^4} \quad (9)$$

waarin:

Δ_x = toename van de horizontale diameter van een flexibele buis ten gevolge van de uitwendige belastingen inclusief de passieve horizontale gronddruk in cm

D_1 = factor die de in de loop van de tijd toenemende verdichting van de grond in rekening brengt (tussen 1,25 en 1,5)

k = bedding-constante, afhankelijk van beddingshoek (tussen 0,08 bij 180° en 0,11 bij 0°)

W_c = totale uitwendige verticale belasting op kruinhoogte (grondbelasting volgens Marston + verkeersbelasting) in kg/cm

r = straal van de buis in cm

$E I$ = stijfheid van de buis in kg cm²/cm

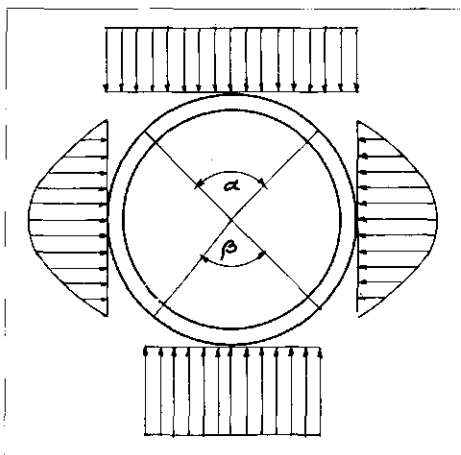
e = modulus voor de passieve grondweerstand in kg/cm³

Hoek α wordt naar aanleiding van experimenten op $150 - 180^\circ$ aangenomen en hoek β op ten minste 90° . De waarde van e kan gesteld worden voor leemachtig zand van 0,4 (onverdicht) tot 1,0 kg/cm³ (mechanisch verdicht) en voor zand van 0,7 (onverdicht) tot 2,0 kg/cm³ (mechanisch verdicht).

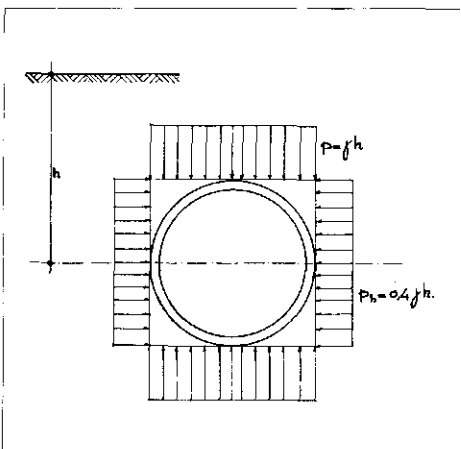
Bossen [2, 3] acht het verloop van de zijdelingse druk in de theorie van Spangler minder juist en is geporteerd voor een rechthoekige drukverdeling (zie afb. 5). Hij heeft speciaal voor kunststofleidingen een theorie ontworpen, die er vanuit gaat dat de zijdelingse druk 40% van de verticale belasting bedraagt als de kunststofleidingen niet op ongeroerde grond worden gelegd, maar hetzij in geroerde grond hetzij in een laag opgebracht zand. Bossen constateert bij spanningloze rioolbuizen, waar dus niet van het rerounding-effect sprake is, dat met name het flexibi-teitscriterium van de buis belangrijk is. Hij stelt de eis, dat de flexibi-leit

$$F = \frac{A}{r} = \frac{\text{amplitude van de uitwijking}}{\text{straal}} < 0,03 \quad (10)$$

Afb. 4 - Drukverdeling volgens Spangler.



Afb. 5 - Drukverdeling volgens Bossen.



De vervorming van de diameter mag dus niet groter zijn dan 3%. In dit flexibi-leitcriterium speelt de elasticiteitsmodulus van de grond een belangrijke rol. Van Buisman is de formule

$$E' = C \gamma h \quad (11)$$

waaruit blijkt, dat de elasticiteitsmodulus van de grond (E') te benaderen is, door deze evenredig te stellen aan de heersende gronddruk ($C \gamma h$), waarin γ de volumieke massa van de grond is, h de hoogte van het maaiveld tot aan het hart van de buis en C de zogenaamde constante van Buisman.

- $C = 20$ voor slappe veengrond
- $= 30$ voor stevige kleigrond
- $= 40$ voor los en kleihoudend zand
- $= 50-200$ voor zand

Afhankelijk van de voordruk γh_0 , waarmee de grond wordt aangestampt, is de speci-

fieke diktevermindering $\frac{W}{r}$ van een laag grond met een dikte van r cm te stellen op

$$\frac{W}{r} = \frac{1}{C} \ln 2.7 \frac{h}{h_0} = \frac{n}{C} \quad (12)$$

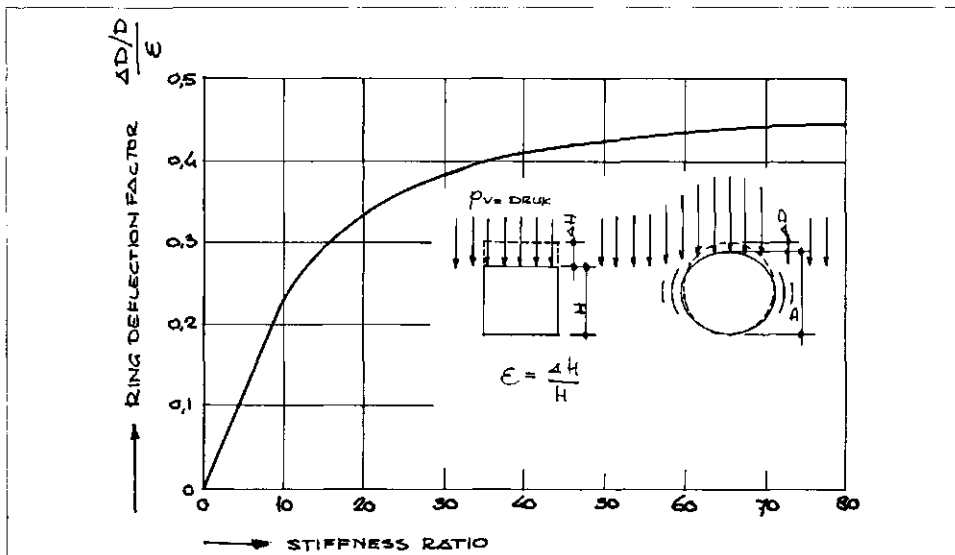
Bossen heeft dit verder uitgewerkt bij

- a. verschillende mate van aanstampen van de grond naast de buis, dus bij verschillende waarden van h_0 ;
- b. verschillende zettingscoëfficiënten n , afhankelijk van a , van C en van h ;
- c. verschillende diameters;
- d. verschillende wanddikten.

De verhouding van de wanddikte t tot de diameter (de klasse van de buis) is afhankelijk van de grond (C) en van de variabele coëfficiënt B , die weer afhangt van de zettingscoëfficiënt n , zodat de theorie van Bossen resulteert in de formule:

$$\frac{r^3}{t^3} < \frac{E}{0,94 \gamma h (142 B + 6 - C)} \quad (13)$$

Ook de ISO (International Standard Organization) houdt zich bezig met het berekenen van plastic buizen. Een eerste ontwerp voor een internationale norm hiervoor wordt voorbereid in ISO/TC 138. Een KOMO-Commissie houdt zich momenteel intens bezig met deformatie-metingen van vrij-verval-rioolleidingen van PVC. Uit interessante meetresultaten, die hieruit volgen, worden empirische formules geboren. Ook voor het ontwerp van rioolpersleidingen, die regelmatig leeg kunnen komen te staan, zijn deze meetresultaten van nut. Bij waterleidingen, waarvan mag worden verwacht, dat er vrijwel altijd een



Afb. 6 - Ringdoorbuiging volgens Watkins.

behoorlijke inwendige druk in aanwezig is, zijn de kunststofbuizen over het algemeen ook met een dikkere wand uitgevoerd, zodat deformatie van de buizen in deze sector niet is geconstateerd.

Terwijl in Nederland door veel onderzoek en denkwerk andere theorieën ontstaan en worden toegepast, doet de vertrouwde formule van Spangler [9] het in het buitenland nog best. Het blijkt daar ook uit verschillende experimenten, dat met deze formule in het algemeen een betrouwbaar resultaat kan worden bereikt. Toch zijn er ook in het buitenland andere theorieën in opkomst.

Een van de bekendste is die van Watkins [22, 29, 30]. Watkins berekent de afname van de verticale diameter van de buis, terwijl Spangler zijn berekening baseert op de toeneming van de horizontale diameter. Deze rekenmethode (zie afb. 6) is vooral gebaseerd op proeven met stalen buizen met een cement-lining, waar als eis voor het niet-scheuren van de inwendige cement-bekleding werd gesteld, dat geen grotere 'ring deflection' dan 3% kon worden toegestaan. Ook bij dit type buizen bleken de vervormingen bepalend voor de berekening van het buismateriaal en niet de spanningen.

Bij stalen buizen met een kunststof of bitumen-bekleding worden overigens ook geen grotere vervormingen dan 5% toegestaan. In de theorie van Watkins is de stijfheidsfactor (Stiffness-ratio) de ver-

houding van de bodemstijfheid $\frac{p_v}{\epsilon}$ tot de

ringstijfheid $\frac{EI}{D^3}$

$$R_s = \frac{p_v D^3}{\epsilon EI} \quad (14)$$

Deze methode komt er op neer dat de vervorming van de diameter in principe voorspeld kan worden als een functie van enige dimensieloze parameters, gebaseerd op gegevens van de bodem en de buis.

In de literatuur zijn hiervoor tabellen en grafieken uitgewerkt [22, 29]. Uiteraard spelen hierbij de soort grond en de graad van verdichting een belangrijke rol. En ook bij deze rekenmethode geldt dat de inwendige druk niet in de berekening wordt betrokken. Later is de berekeningswijze aan nieuwere inzichten aangepast [16], waardoor een grotere spreiding in de resultaten ontstaat dan in afb. 6 is aangegeven.

In het algemeen kan worden opgemerkt, dat de vervorming van flexibele buizen afneemt, als de verdichting van de grond naast de buis optimaal wordt uitgevoerd. Bovendien moet er aan worden gedacht,

dat niet alleen elastische vervorming optreedt, maar ook plastische. Het kruipgedrag moet bij de beoordeling van de toepasbaarheid van de verschillende buismaterialen in de tijd mede in de beschouwing worden betrokken.

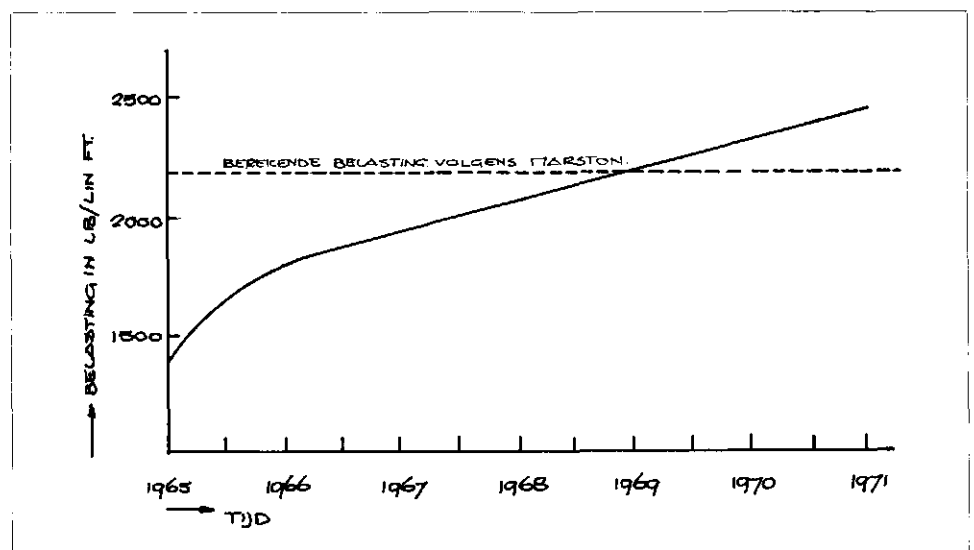
Enkele slotopmerkingen bij de berekening van gronddrukken

Scott Griffith en Keeney hebben geconstateerd [23] dat de gronddruk op stijve buizen bij toeneming van de tijd groter wordt, zij het in afnemende mate (zie afb. 7). Zij hebben hun metingen verricht op gresbuizen die ingekapseld waren in de meetapparatuur. Het bleek onder andere dat in natte perioden de belastingen op de buizen, die boven het grondwaterpeil waren gesitueerd, opliepen en in droge perioden weliswaar minder werden maar niet in dezelfde mate.

Wolfer heeft ditzelfde verschijnsel ook bemerkt bij buizen in lössgrond [31]. Ook in ons land en met name in Zuid-Limburg zijn in lössgrond onaangename ervaringen opgedaan. Meerdere malen is geconstateerd dat buizen sneuvelden geruime tijd nadat deze waren geïnstalleerd.

Toch is het ook weer niet zo dat we dan altijd met een toename van de belasting rekening moeten gaan houden. Er zijn ongetwijfeld ook omstandigheden waarbij de grootste belastingen alleen in de bouw-fase voorkomen. Te denken valt hier bijv. aan zettingen en zakkings, mede ten gevolge van het bouwverkeer. Het zou interessant zijn om, zoals dit bij kunststofbuizen deels al gebeurt, metingen over lange tijdsperioden te gaan nemen bij verschillende materialen in verschillende omstandigheden.

Afb. 7 - Belastingtoename volgens Scott Griffith en Keeney).



Verkeersbelastingen en bovenbelastingen

De aloude theorie van Boussinesq [4] gaat uit van de formule

$$P_v = \frac{3 P}{2 \pi R^2} \cdot \cos^3 \beta \tag{15}$$

en van een berekende druk onder punt A (zie afb. 8) [8].

De belasting op de buis is vervolgens:

$$P_v = p_v \cdot D \cdot S \tag{16}$$

waarin:

P_v = belasting op de buis in t/m¹

p_v = druk per m² volgens afb. 8

D = uitwendige diameter van de buis in m

S = stootcoëfficiënt

De ontlastende werking van het wegdek is hierbij niet meegerekend.

De vergelijking van Boussinesq is gebaseerd op de aanname dat de bodem isotroop en homogeen is, dat wil zeggen dat de elasticiteit van de bodem niet verandert in één zelfde richting en ook in elke richting even groot is.

Na Boussinesq (1885) kwamen onderzoekers tot de conclusie, dat de elasticiteitsmodulus met de diepte toeneemt en daarna is dan ook een 'gemodificeerde' Boussinesq-formule ontstaan [5], waarvan de uitkomsten overigens niet erg veel afwijken van de oude formule (15).

Een ander bezwaar gold de berekening van de belasting op buizen met een gronddekking van minder dan 1 m. Uit afb. 8 is duidelijk op te maken dat aan de nauwkeurigheid van de waarden van p_v bij kleine gronddekkingen kan worden getwijfeld.

Holl en Newmark [5] hebben de vergelijking van Boussinesq speciaal met het oog op deze kleine gronddekkingen bekeken.

De 'spanningsklok' in de grond onder een wiellast is afhankelijk van de grootte van de wiellast, maar bij de berekening van de buis onder deze last interesseert ons niet de totale belasting van de 'spanningsklok' maar alleen dat gedeelte dat boven de buis is gesitueerd.

Braunstorfinger werkt dit verder uit [5] en vindt:

$$P_v = p_m P_{\text{wiel}} D \cdot S \tag{16}$$

waarin:

P_v = belasting op de buis in t/m¹

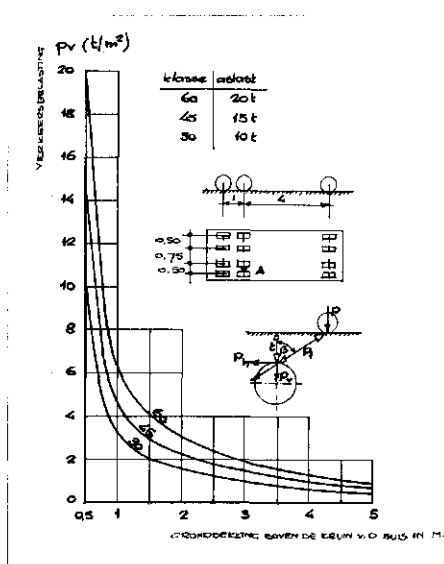
p_m = factor uit afb. 9 in 1/m²

P_{wiel} = wiellast P in t

D = uitwendige diameter van de buis in m

S = stootcoëfficiënt

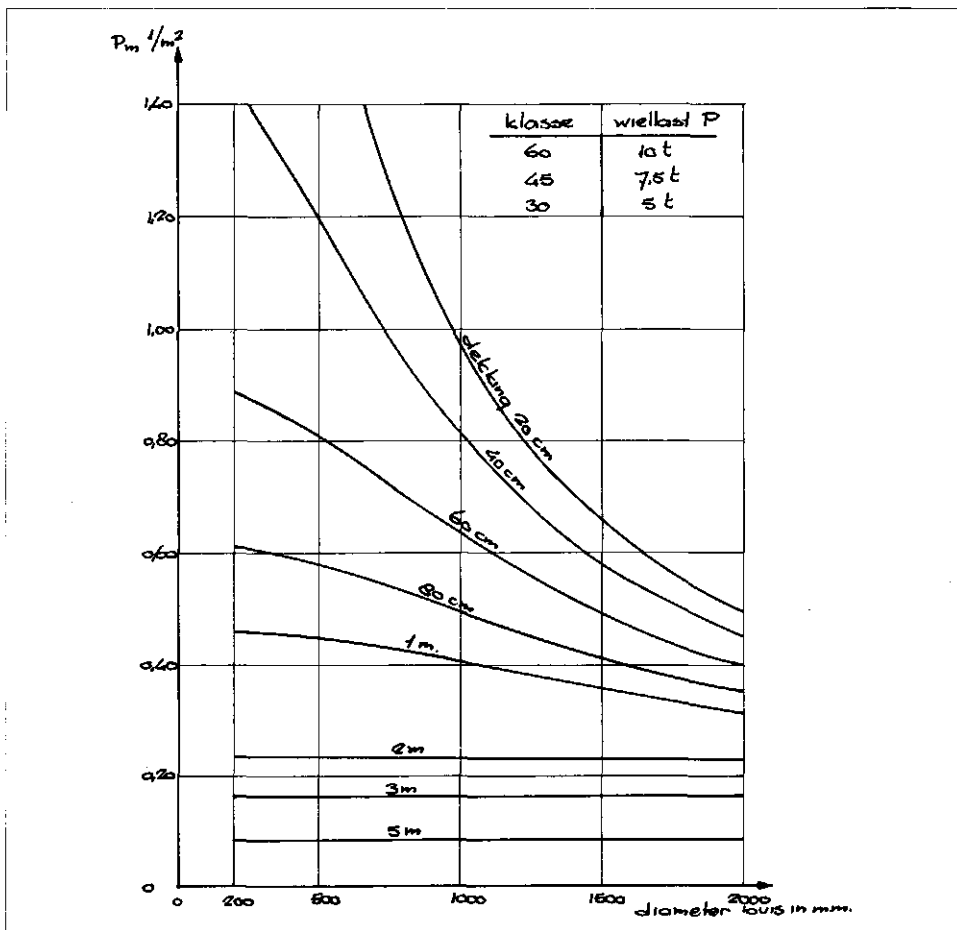
Uit afb. 9 blijkt duidelijk het verschil met de methode Boussinesq. In plaats van een gelijke druk per m² onafhankelijk van de



Afb. 8 - Verkeersbelastingen volgens Boussinesq.

diameter blijkt nu dat er bij kleine gronddekking grote verschillen ontstaan tussen grote en kleine buisdiameter. Het blijkt bovendien dat, in vergelijking met Boussinesq, de belastingen bij kleine gronddekkingen in het algemeen lager zijn en daarmee meer overeenkomen met de resultaten uit de praktijk.

Afb. 9 - Drukaandeel p_m volgens Duits eenheidslaststelsel.



Voor de stootcoëfficiënt wordt in ons land

$$\text{algemeen } 1 + \frac{0,3}{t}$$

de gronddekking boven de kruin van de buis is. Er moet wel rekening worden gehouden met het feit, dat veel materialen een lagere sterkte bezitten als ze aan dynamische belastingen worden blootgesteld dan wanneer zij statisch worden belast. Een en ander hangt uiteraard af van de hoogte en de frequentie van deze wisselende belastingen.

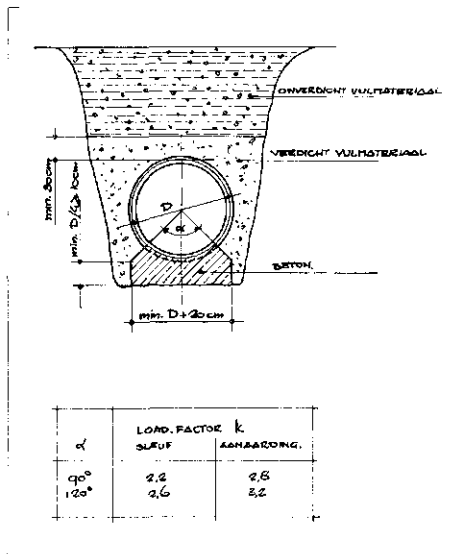
Bij situering van leidingen onder wegen met een goed uitgevoerd wegdek is het zinvol bij de berekening van de verkeersbelastingen op de buizen rekening te houden met de ontlastende werking van dit wegdek. De equivalentenmethode van Brandt [37, 5] geeft hiervoor aanbevelingen. Naast de bovengenoemde methoden voor de berekening van de verkeersbelastingen, die in de literatuur in grafieken en tabellen zijn uitgewerkt [onder andere 8, 13, 21, 32] gaan de meeste andere auteurs ook in op de verkeersbelastingen en op de belastingen ten gevolge van andere bovenbelastingen. In het algemeen zijn hun berekeningswijzen geënt op die van Boussinesq. In Nederland wordt voor de zwaarte van

het wegverkeer in het algemeen verwezen naar de VOSB 1963 (Voorschriften voor het Ontwerpen van Stalen Bruggen-(NEN 1008). Volgens het wegenverkeersreglement is een vrachtauto met aslasten van 10 ton en met een laststelsel als is getekend in afb. 8, de zwaarste vrachtauto, die normaal op onze wegen mag rijden. In uitzonderingsgevallen en met speciale vergunningen mogen zwaardere transporten over bepaalde wegen rijden. Een laststelsel conform klasse 60 komt niet voor! We moeten bij de berekening van buisleidingen dus oppassen niet automatisch klasse 60 in de berekeningen te stoppen, want in feite vermenigvuldigen we daarmee de veiligheid ten aanzien van deze belasting met een factor twee.

Beddingsfactor

De beddingsfactor (E: loadfactor, D: Einbauziffer) is van doorslaggevend belang voor de berekening en dus voor de sterkte van de buis, zeker bij stijve of semi-stijve buizen. In het algemeen wordt onder beddingsfactor verstaan het quotiënt van de breukbelasting in de grond bij een aangegeven type bedding met beddingshoek en de breukbelasting bij beproeving volgens het betreffende normblad in een laboratorium. Bij betonbuizen geschiedt de beproeving volgens de normbladen met een opleggingshoek van 150° en een lijnbelasting bij de kruin, bij asbestcementbuizen met twee lijnbelastingen.

De eerder aangehaalde ISO/DIS 2785 [7] geeft 3 typen van beddingen: A, B en C en stelt bij elk type weer verschillende beddingsfactoren vast, afhankelijk van de mate van uitvoering van de sleufondergrond en de verdichting van het vulmateriaal (afb. 10, 11 en 12). Het te verdichten vulmateriaal bij A en B moet zodanig worden uitgekozen — in ieder geval zonder brokken grond of stenen — dat het kan worden verdicht. Het te verdichten vulmateriaal bij C is de normale uitgegraven grond, mits deze verdichtbaar is. In de meest beroerde situatie (een harde ondergrond, die praktisch gelijk is te stellen met een lijnbelasting en geen verdichting van het vulmateriaal (zie afb. 12), bedraagt de beddingsfactor 1,1, terwijl deze beddingsfactor 3,0 kan bedragen bij bedding type B met een beddingshoek van 180° en een 90% proctordichtheid van het vulmateriaal. Uit deze cijfers blijkt wel, dat de legmethoden van de aannemer en het toezicht van de opdrachtgever zeer belangrijke invloed hebben op de sterkte van de leiding, hetgeen niet door iedere aannemer en opdrachtgever wordt onderkend. Er blijkt hieruit tevens, dat een zeer nauwkeurige berekening van grond- en verkeers-



Afb. 10 - Bedding type A.

belastingen op zijn zachtst gezegd niet zo zinvol, is, als de uitvoering van het leggen van de buizen niet even nauwkeurig wordt gecontroleerd. Het zou daarom ook zeker aanbeveling verdienen als er in ons land verwerkingsrichtlijnen voor buizen opgesteld zouden kunnen worden, die daarna in de bestekken zouden kunnen worden voorgeschreven en door aannemers en directies kunnen worden nageleefd. In de huidige situatie, waarin deze verwerkings-

richtlijnen ontbreken, wordt er teveel aan het inzicht van de individuele uitvoerder en opzichter overgelaten, hetgeen soms tot calamiteiten leidt.

De in de afb. 9, 10 en 11 genoemde beddingsfactoren zijn opgesteld voor asbestcementbuizen ten opzichte van een lijn-lijnbelasting. De beddingsfactoren wijzigen, wanneer andere beproevingsmethoden zijn voorgeschreven (zie bijv. [6, 13, 21]. Olander [34] heeft bij proeven gevonden, dat een hoek van 90° (zie afb. 3) in de praktijk is te verwachten bij normale situaties.

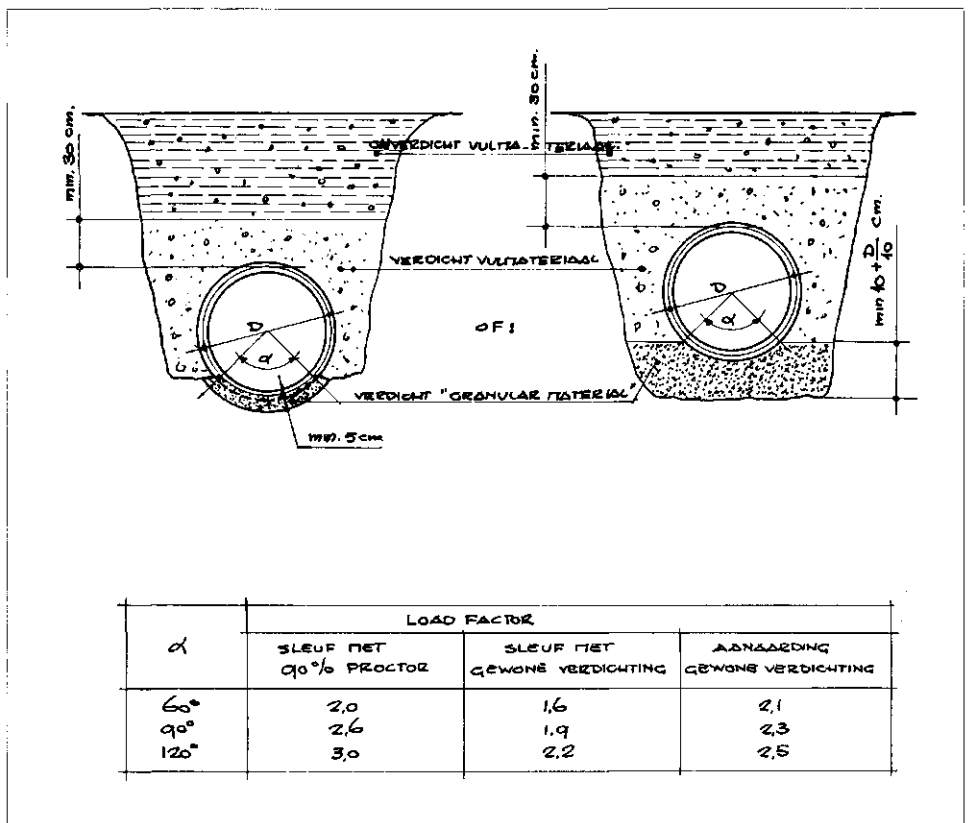
Bij flexibele buizen (zie afb. 4 en 5) wordt ook gerekend op een beddingshoek van 80 tot 120°. Bossen [2, 3] schrijft uitdrukkelijk voor, dat PVC-leidingen niet op ongeroerde grond mogen worden gelegd, maar hetzij in geroerde grond hetzij in een laag opgebracht zand.

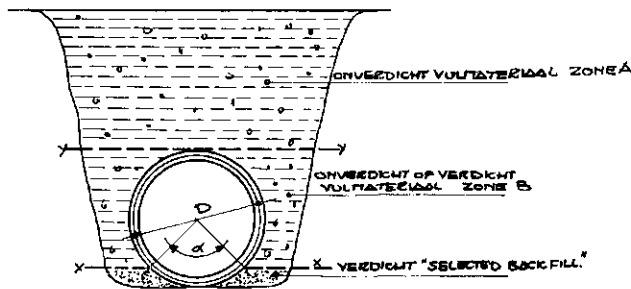
Tenslotte zij nog opgemerkt, dat het over het algemeen niet wenselijk wordt geacht de grond direct *boven* de buis te verdichten, wel *naast* de buis boven het niveau van de kruin van de buizen.

Buizen op palen

In tegenstelling tot het berekenen van buizen van diverse materialen in de grond is het onderwerp 'berekening van buizen op palen' stiefmoederlijk bedeed. Enerzijds

Afb. 11 - Bedding type B.





α	LOADFACTOR k		
	SLEUF MET VERDICTE ZONE B	SLEUF MET ONVERDICTE ZONE B	AANADRING GEWONE VERDICTING
0-20°	1,2	1,1	1,2
30°	1,3	1,1	1,4
60°	1,5	1,2	1,7
90°	1,7	1,3	1,9
120°	1,7	1,3	1,9

Afb. 12 - Bedding type C.

is het wel logisch dat hierover in het buitenland nauwelijks literatuur te vinden is, omdat buizen op palen daar zo goed als niet voorkomen, maar ook in ons eigen land is hierover bijna niets te bespeuren.

Toch is dit onderwerp van groot belang, omdat het ontwerpen van buisleidingen op palen vooral in West-Nederland steeds meer voorkomt. Enerzijds komt dit doordat het aantal leidingen toeneemt, anderzijds doordat er strengere eisen aan worden gesteld. Met name hebben de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen in haar Leidraad [38] en de Provincie Waterstaat van Zuid-Holland in haar Pijpleidingencode [35] strenge eisen gesteld aan de kruisingen van waterleidingen met waterkeringen, waardoor veelal een leiding op palen wordt gekozen. In de Pijpleidingcode worden ook diverse berekeningsmethoden genoemd. Het is algemeen bekend, dat de maatschappijen die buisleidingen exploiteren of aanleggen niet zo gelukkig zijn met enkele facetten van deze pijpleidingcode. Daarom hebben de gezamenlijke pijpleidingbeheerders (olie-, gas- en waterbedrijven) samen met TNO-IBBC een speurwerkprogramma opgezet om een berekeningsmethode voor stalen buizen voor dijk kruisingen te ontwerpen, die, naar zij hopen, een belangrijke kostenbesparing zal opleveren. Enkele Zuid-Hollandse waterleidingbedrijven zijn reeds met dit probleem geconfronteerd, getuige het interessante artikel van Nelisse [19] in dit tijdschrift.

Een buisleiding op palen betekent voor de

berekening van het buismateriaal een extra moeilijkheid. De op de buis rustende belastingen worden vanzelfsprekend beïnvloed door de zakking van de grond rondom de buisleiding. In Nederland zal het daarom veel voor kunnen komen dat onder de buis een holle ruimte ontstaat vanwege de zakkingen en dat boven op de buis een belasting ten gevolge van passieve gronddruk optreedt. Bovendien kan in een weg een katterug ontstaan, hetgeen weer extra stootbelastingen met zich meebrengt. Een buisleiding op palen betekent derhalve een zeer zware belasting voor de buizen. Hierbij speelt de wijze van opleggen van de buis vanzelfsprekend een zeer belangrijke rol. Bij asbestcementbuizen op palen is hier reeds enige ervaring mee opgedaan [12, 25, 28] en zijn er handelbare theorieën ontstaan.

Voor stalen buizen wordt momenteel, zoals hierboven uiteen is gezet, een theorie ontwikkeld. Voor betonnen buizen lijkt het, gezien de problemen rondom de berekening hiervan in de laatste tijd, nuttig om te overwegen een berekeningsmethode te ontwerpen, die algemene erkenning vindt. Deze behoefte betreft zowel buizen van voorgespannen beton (over het algemeen 6 m lang) die voor waterleidingen en rioolpersleidingen worden gebruikt, als buizen van gewapend beton voor vrij-verval riolerings. Het is te hopen dat de instanties, die hierbij betrokken zijn elkaar vinden om een dergelijke berekeningsmethode te ontwerpen. Daarmee zal dan het gehele vraagstuk van leidingen op palen, dat ten nauwste samenhangt met het onderwerp

van dit artikel 'grondruk en bovenbelasting' tot een oplossing zijn gebracht.

Tenslotte

Het is duidelijk dat het, zoals bij zoveel problemen, waar onze bodem bij is betrokken, niet eenvoudig is, standaardoplossingen of standaardberekenningsmethoden te ontwerpen, die voor alle situaties gebruikt kunnen worden. Toch zijn door de vele ervaringen, die met buisleidingen van diverse materialen zijn opgedaan, empirische berekeningsmethoden ontstaan, die weliswaar nog telkens worden aangepast of verbeterd, maar die toch alleszins bruikbaar zijn.

Literatuur

- Algra, E. A. H. *Mechanische aspecten van ondergrondse toegepaste drukloze buizen van glasvezelgewapend kunststof*. *Plastica* 26 (1973) 7 blz. 295-308.
- Bossen, M. J. *Hinder en gerief van grondruk op kunststofbuizen*. *Plastica* 24 (1971) nr. 1.
- Bossen, M. J. *Grondmechanische aspecten*. *Publieke Werken* (38) 1970 nr. 1, blz. 12-16.
- Boussinesq, *Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et des mouvements des solides élastiques*, Paris 1885.
- Braunstorfinger, M. *Einfluss von Verkehrslasten gemäss DIN 1072 auf eingeerdete Rohre mit geringer Scheitelüberdeckung*. *Rohre, Rohrleitungsbau, Rohrleitungstransport* 10 (1971) H 4 blz. 232-237.
- Design, construction of sanitary storm sewers. *ASCE M & R* nr. 37 1969.
- Draft international standard ISO/DIS 2785. *Guide to the selection of asbestos-cement pipes subject to external loads with or without internal pressure*. 1973.
- Eternit Amsterdam. *Persleidingbuizen. Hydraulische eigenschappen en berekening van grondstukken en verkeersbelastingen*. 1969.
- Gelok, T. *Buis, een computerprogramma voor het berekenen van momenten, normaalkrachten, dwarskrachten, vervormingen en buigspanningen in ronde buizen*. *Cultuurtechnische Dienst* 1973.
- Guerrin, A. en Daniel, G. *Le calcul des tuyaux en béton armé et non armé*. Eyrolles, Paris, 1952.
- Jong, J. A. de. *De draagkrachtproblematiek van ingegraven flexibele buizen*. *Polytechnisch Tijdschrift*, editie Bouwkunde Water- en Wegenbouw 4-1-1967.
- Kadner, W. *Beitrag zur statischen Berechnung von kreisrunden Kanalisationsrohren*. *GWF-Wasser/Abwasser* 111 (1970) H 5 blz. 287-296.
- Lehr- und Handbuch der Abwassertechnik Band 1, Zweite Auflage, 1973, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn.
- Leonhardt, G. *Einfluss der Bettungssteifigkeit auf die Tragfähigkeit und die Verformungen von flexiblen Rohren*. *Strasse Brücke Tunnel* 3/1972, blz. 63-68.
- Lutz, H. *Ein Vergleich von Steifekriterien für erdverlegte Rohre*. *Rohre, Rohrleitungsbau, Rohrleitungstransport* H 2 april 1972, blz. 100-102.
- Lutz, H. *Ermittlung der Lastkonzentration über erdverlegten Rohren*. *Rohre, Rohrleitungsbau, Rohrleitungstransport* H 5/6 oktober 1972, blz. 254-258.
- Marston, A. *The theory of external loads on*

- closed conduits*. Iowa Eng-Exp. Stat. Bull. 96, 1930.
18. Marston, A. *The theory of loads on pipes in ditches*. Iowa Eng. Exp. Stat. Bull. 31, 1913.
 19. Nelisse, W. P. *Onderzoek naar de spanningen en vervormingen in een waterleidingbuis ter plaatse van paalondersteuning*. H₂O (6) 1973 nr. 20, blz. 515-519.
 20. Roske, K. *Erdstatische Berechnungen bei Kunststoffrohre im Kanalisationsbau*. Europäisches Abwasserssymposium 1969, München.
 21. Roske, K. *Betonrohre nach DIN 4032, Belastung und Tragfähigkeit*. Bauverlag GmbH Wiesbaden.
 22. Schmidt, W. en Wartmann, R. *Neues Dimensionierungsverfahren für eingeedete Rohre*. Rohre-Rohrleitungsbau-Rohrleitungstransport H. 6 1967 blz. 209-220.
 23. Scott Griffith, J. en Keeney, C. A. *Load development on a buried rigid conduit*. Journal WPCF vol 44 nr. 9 september 1972, blz. 1713-1717.
 24. Spangler, M. W. *The structural design of flexible pipe culverts*. Iowa Eng. Exp. Stat. Bull. 153, 1941.
 25. Voellmy, A. *Bemessung und Bruchsicherheit von Rohrleitungen, ins besondere von Eternitleitungen*. Schweizerische Bauzeitung 1943, 15-16-17.
 26. Voellmy, A. *Eingebettete Rohre*. Mitteilungen aus dem Institut für Baustatik a.d. Eidgen-TH, Zürich. Mitt nr. 9, Leeman Co Zürich und Leipzig, 1937.
 27. Wagenmaker, F. *Berekening van ondergrondse leidingen*. Polytechnisch Tijdschrift editie Bouwkunde Water- en Wegenbouw nr. 17, 1968.
 28. Wagenmaker, F. *Asbestcementbuizen voor rioleringen*. H₂O 2 (1969) nr. 23.
 29. Watkins, R. K. en Smith, A. B. *Ring deflection on buried pipe*. Journal AWWA Vol 59, nr. 3, maart 1967.
 30. Watkins, R. K. *Failure conditions of flexible culverts embedded in soil*. Highway Research Board, Proceedings 39 Annual Meeting 1960.
 31. Wetzorke, M. *Ueber das Tragverhalten erd-bedeckter Rohre*. H₂O 2 (1969) nr. 23.
 32. Wetzorke, M. *Ueber die Bruchsicherheit von Rohrleitungen in parallelwandigen Gräben*. Veröffentlichung des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft der TU Hannover H 5 1960.
 33. White, H. L. en Layer, J. P. *The corrugated metal conduit as a compression ring*. Highway Research Board Proceedings, Vol 39, 1960.
 34. Olander, H. C. *Stress Analyses of Concrete pipe*. Engineering Monograph nr. 6 US. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, 1950.
 35. *Pijpleidingcode 1972, Eisen te stellen aan pijpleidingen voor het transport van gassen en vloeistoffen met betrekking tot de waterstaatkundige veiligheid*. Provinciale Waterstaat van Zuid-Holland.
 36. Beauchez, H. C. *Ontwerp en berekening van hoge- en lagedruk transportleidingen*. Polytechnisch Tijdschrift, editie Bouwkunde, Wegen- en Waterbouw, jaargang 29 nr. 5, 6-3-1974, blz. 160-168.
 37. Brandt, H. *Der Spannungsermittlung im Mehrschichtensystem*. Der Bauingenieur, Heft 2, 1970.
 38. *Leidraad voor constructie en beheer van vloeistofleidingen in en nabij waterkeringen*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. Staatsuitgeverij, januari 1971.

