

GRONDWRIJVING LANGS
BUISLEIDINGEN

GRONDWRIJVING LANGS BUISLEIDINGEN

CO-265772/4

juli 1987

Her/Oos/23

Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat

Dienst Weg- en Waterbouwkunde

Delft

Opgesteld door:

ir. A.E. Inckel

ir. P. Meijers

ir. H.J.A.M. Hergarden

Projectbegeleider: ir. L.P.M. Posthumus

AFDELING ONDERGRONDSE EN GRONDKERENDE CONSTRUCTIES

Hoofd: ir. J. Kruizinga

bladnummer : - 1 -
ons kenmerk: CO-265772/4
datum : juli 1987

INHOUD:

blz.:

1.	INLEIDING	1
2.	WRIJVING TUSSEN GROND EN BUISLEIDING	3
2.1	Algemeen	3
2.2	De berekening van de grenswaarde $\tau_{\max}$	4
2.3	De verplaatsing (v_e) waarbij de grenswaarde optreedt	7
3.	METING VAN DE WRIJVING TUSSEN GROND EN BUISLEIDING	8
3.1	Proeven in het laboratorium	8
3.1.1	Schuifproeven	8
3.1.2	Proefopstelling in het laboratorium	17
3.2	Proeven in het terrein	17
3.2.1	Metingen aan korte buizen	17
3.2.2	Metingen aan lange buizen, waarvan het onbelaste uiteinde vrij kan verplaatsen	19
3.2.3	Metingen aan lange buizen, waarvan het onbelaste uiteinde in de grond is verankerd	22
4.	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	26
5.	LIJST VAN GERAADPLEEGDE LITERATUUR	33
6.	LIJST VAN SYMBOLEN	36

bladnummer : - 2 -
ons kenmerk: CO-265772/4
datum : juli 1987

LIJST VAN APPENDICES:

- I Theoretisch verloop van kracht en verplaatsing in een oneindig lange buis
- II Proefopstelling in het laboratorium
- III Proeven op een buis in klei en zand te Kesteren
- IV Proeven op een buis in zand te Vilsteren
- V Metingen tijdens het voorspannen van warmtetransportleidingen in klei en in zand

bladnummer : - 3 -
ons kenmerk: CO-265772/4
datum : juli 1987

LIJST VAN BIJLAGEN:

Bijlage II-1	Voorbeeld resultaat laboratoriumproef
Bijlage IV-1	Verloop van normaalspanning in buis
Bijlage IV-2	Verband tussen τ_{gem} en v_{gem}
Bijlage V-1A	Situatie warmtetransportleiding Utrecht-Nieuwegein
Bijlage V-1B	Situatie warmtetransportleiding Geertruidenberg- Tilburg
Bijlage V-2	Dwarsprofiel km 38.287 westelijke kade A'dam-Rijn- kanaal
Bijlage V-3	Resultaten verplaatsingsmeting A
Bijlage V-4	Resultaten verplaatsingsmeting B
Bijlage V-5	Middelzware sondering 10 en boring
Bijlage V-6	Middelzware sondering 11 en boring
Bijlage V-7	Middelzware sondering 12 en boring
Bijlage V-8	Resultaten proctorproeven
Bijlage V-9	Resultaten verplaatsingsmeting C
Bijlage V-10	Resultaten verplaatsingsmeting D
Bijlage V-11	Resultaten directe schuifproeven op klei (w = 35%)
Bijlage V-12	Resultaten directe schuifproeven op klei (w = 26%)
Bijlage V-13	Resultaten handsonderingen in klei
Bijlage V-14	Resultaten directe schuifproeven op zand
Bijlage V-15	Resultaten handsonderingen in zand

bladnummer : - 1 -
ons kenmerk: CO-265772/4
datum : juli 1987

1. INLEIDING

Voor de sterkteberekening van buisleidingen in de grond en voor het ontwerp van bijvoorbeeld leidingstelsels voor stadsverwarming is het van belang het verband te kennen tussen de verplaatsing van de buis in langsricting of rotatie van de buis om de as en de daarbij opgewekte tegenwerkende grondwrijving.

De verplaatsing of rotatie van de buis kunnen worden veroorzaakt door vormveranderingen (bijvoorbeeld expansie) waaraan een buisgedeelte is onderworpen of zijn een rechtstreeks gevolg van uitwendige krachten. Zijn geen andere tegen de verplaatsing of rotatie weerstand biedende uitwendige krachten werkzaam, dan is de grootte van de door de grond uitgeoefende wrijving bepalend voor het verloop van de langsspanningen in de leiding en van de verplaatsingen. Bij een aanzienlijke wrijving zullen grote leidinglengten als in de grond verankerd kunnen worden beschouwd, hetgeen onder andere bij warmtetransportleidingen van belang is.

In dit rapport zijn gegevens verzameld over de grondwrijving, die ingegraven leidingen ondervinden.

In eerste instantie zal in het algemeen worden ingegaan op de wrijving tussen grond en buisleiding en de gebruikelijke wijze van berekenen ervan. Daarna zullen de aldus berekende waarden worden vergeleken met de resultaten van in het verleden uitgevoerde proeven en metingen:

- een terreinmeting in samenwerking met TNO aan een 36" buis te Vilsteren voor de Gasunie (onderdeel van CO-18183, 1968);
- proeven met een 12,75" buiselement in een laboratoriumopstelling en directe schuifproeven met staal en zand in het LGM voor Petroland BV (BO-259500, 1981);
- metingen aan de, in het kader van een stadsverwarmingsproject, aangelegde warmtetransportleiding Utrecht - Nieuwegein voor het Centrum voor Onderzoek Waterkeringen (CO-265771, 1982/1983);



Provincie Zuid-Holland
d.a.v. de Heer dr. R.A.J. de Kock
Koningskade 1
2596 AA 's-Gravenhage
Onderwerp: Norm TPL : grondmech. parameters

Bijlagen: 1

Uw kenmerk:

Ons kenmerk: afg.

Dict./type:

Doorkiesnummer: 015-693771

Datum: 1991-05-02

Hierbij zenden wij U bijgaande stukken:

☒ ter kennisneming

☒ volgens afspraak d.d.

☐ met verzoek om commentaar, gaarne voor

☐ voor de vergadering d.d.

Kopie van hoofdtekst
rapport Grondwijn lay
beslissingen.

Toelichting:

Inclusie toelichting van het gehele rapport
is gewenst, gaarne seintje.

GRONDMECHANICA DELFT

M-v-g

Prov. Bestuur van Zuid-Holland Dienst Water en Milieu		
Ingekomen dd. 3 MEI 1991		Reg. nr. DWM
Klass.nr.		Zaak nr.
Afd.	Bur.	Stapnr.
Projectnr.		1e stapstuknr.



Provincie Zuid-Holland
d.a.v. de Heer *dr.* R.A.J. de Kock
Koningsskade 1
2596 AA 's-Gravenhage
Onderwerp: Norm TPL ; grondmech. parameters

Bijlagen:

Uw kenmerk:

Ons kenmerk:

alg.

Dict./type:

Doorkiesnummer: *015-693771*

Datum: *1991-05-02*

Hierbij zenden wij U bijgaande stukken:

 ter kennisneming

 volgens afspraak d.d.

 met verzoek om commentaar, gaarne voor

 voor de vergadering d.d.



Toelichting:

*Indien toezending van het gehele rapport
is gewenst, gaarne seintje.*

m-v-g.
GRONDMECHANICA DELFT

H. Hergarzen

bladnummer : - 2 -
ons kenmerk: CO-265772/4
datum : juli 1987

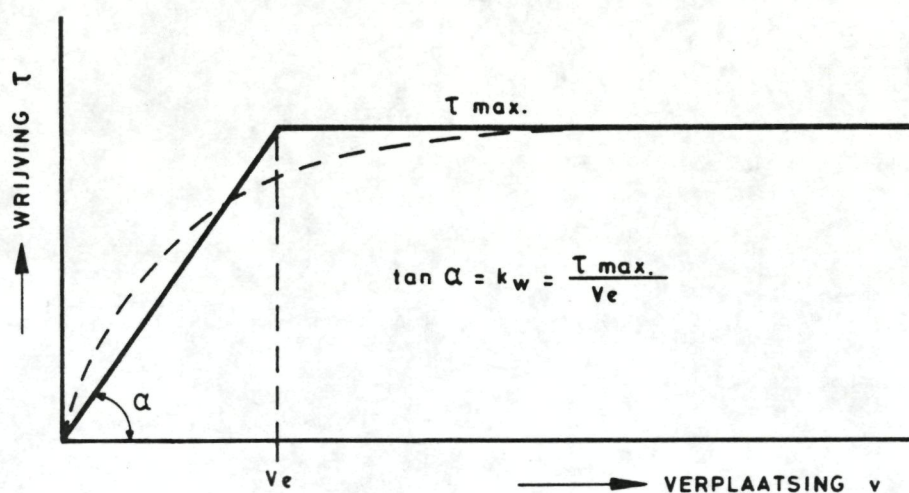
- metingen aan de aangelegde warmtetransportleiding Amercentrale - Tilburg voor het COW (CO-265771, 1983);
- een terreinmeting aan een 24" buiselement te Kesteren (CO-272040, 1984).

Ook zal de gebruikelijke wijze van berekenen worden getoetst met in de literatuur beschreven metingen. Een lijst van geraadpleegde literatuur is als hoofdstuk 5 toegevoegd.

2. WRIJVING TUSSEN GROND EN BUISLEIDING

2.1 Algemeen

De wrijving tussen buis en grond wordt geleverd door schuifspanningen langs de omtrek van de buis. Deze schuifspanningen komen tot ontwikkeling bij een relatieve beweging van de buis ten opzichte van de grond. De grootte van de wrijving is afhankelijk van de grootte van de verplaatsing, de grondsoort en, vooral bij zand, van de dichtheid. Bij klei speelt het vochtgehalte en ook de verplaatsingssnelheid een grote rol. Het verband tussen wrijving en verplaatsing is niet lineair. Bij grote verplaatsingen bereikt de wrijving een min of meer constante grenswaarde $\tau_{\max}$. Een mogelijke relatie tussen de wrijving die een buisleiding in de grond ondervindt en de verplaatsing van de buis is door middel van een onderbroken lijn in figuur 1 aangegeven. Opgemerkt wordt dat het optreden van piekwaarden zoals bij directe schuifproeven met dicht gepakt zand wordt geconstateerd niet of slechts in geringe mate het geval zal zijn bij buisleidingen. Wel kan bijvoorbeeld door verkneding van klei bij doorgaande vervorming de wrijving minder worden.



figuur 1

bladnummer : - 4 -
ons kenmerk: CO-265772/4
datum : juli 1987

Om praktische redenen wordt in leidingberekeningen van het geschematiseerde verloop (getrokken lijn) uitgegaan, dat wil zeggen bij een relatieve verplaatsing groter dan v_e heeft de wrijving een constante waarde $\tau_{\max}$ en bij een relatieve verplaatsing kleiner dan v_e wordt aangenomen dat er een evenredigheid bestaat tussen v en τ .

Deze evenredigheid wordt gekarakteriseerd door de betrekking:

$$\frac{\tau}{v} = \frac{\tau_{\max}}{v_e} = k_w \quad (1)$$

Hierin wordt k_w de frictionele beddingsconstante (dimensie: spanning per lengte-eenheid) genoemd. Met deze aanname ligt de spanningsverdeling in een rechte buis waarop een axiale kracht wordt uitgeoefend vast. Voor een afleiding van formules voor de spanningsverdeling in het geval van een oneindig lange buis wordt naar Appendix I verwezen.

2.2 De berekening van de grenswaarde $\tau_{\max}$

De grenswaarde $\tau_{\max}$ kan worden berekend door gebruik te maken van formules waarin naast de normaalspanning σ_n de parameters δ en a voorkomen die aan laboratoriumproeven (directe schuifproeven) zijn ontleend. Voor zand en andere grondsoorten zonder cohesie is gebruik te maken van de formule:

$$\tau_{\max} = \sigma_n \tan \delta \quad (2a)$$

In klei kan hier een meer of minder aandeel van adhesie bijkomen zodat in het algemeen geldt:

$$\tau_{\max} = \sigma_n \tan \delta + a \quad (2b)$$

De in deze formules voorkomende parameters δ en a zijn zowel afhankelijk van de grond zelf als van de ruwheid van het buismateriaal.

bladnummer : - 5 -
ons kenmerk: CO-265772/4
datum : juli 1987

Over het algemeen kunnen de wrijvings eigenschappen van de grond (ϕ en c) bekend worden verondersteld of eenvoudig worden vastgesteld. Ook δ en a kunnen in het laboratorium vrij eenvoudig met behulp van directe schuifproeven worden bepaald. Indien dit niet mogelijk is kunnen δ en a worden geschat. Daarbij wordt de ruwheid van de buis ten opzichte van de grond uitgedrukt door middel van de factoren:

$$f_{\delta} = \frac{\delta}{\phi} \text{ en } f_a = \frac{a}{c} \quad (3)$$

De factoren worden ruwheidsfactoren genoemd.

De formules 2a en 2b voor de berekening van $\tau_{\max}$ gaan, door invoering van f_{δ} en f_a , over in:

$$\tau_{\max} = \sigma_n \tan f_{\delta} \cdot \phi \quad (4a)$$

en

$$\tau_{\max} = \sigma_n \tan f_{\delta} \cdot \phi + f_a \cdot c \quad (4b)$$

Ter verkrijging van representatieve waarden van f_{δ} en f_a worden laboratoriumproeven uitgevoerd. Het eenvoudigst zijn directe schuifproeven (zie ook 3.1.1), waarbij de bovenste helft van het apparaat die steeds grond bevat kan afschuiven hetzij over grond hetzij over diverse soorten buismateriaal. De directe schuifproef heeft een aantal nadelen. Zo zal losgepakt zand door het aanbrengen van bovenbelasting een vastere pakking aannemen. Een ander nadeel is dat het grondmonster horizontaal is ingesloten waardoor het proefresultaat alleen informatie geeft over de schuifweerstand (maximale en restwaarde). De uit de proef verkregen gegevens over de verplaatsing waarbij de maximale schuifweerstand optreedt zijn sterk beïnvloed door het horizontaal opgesloten zijn van het grondmonster. De proef geeft een te kleine waarde van v_e . Voor de bepaling van ϕ en c of δ en a zijn series van minimaal 3 proeven nodig waarbij de bovenbelasting op het monster varieert.

Het vochtgehalte (klei) en de dichtheid (zand) zal tijdens een serie proeven constant en op een relevante waarde moeten worden gehouden. Omdat bij klei de snelheid van verplaatsing een rol kan spelen is ook per serie de snelheid van uitvoering van de proeven nog enigszins te variëren. De ruwheidsfactoren f_{δ} en f_a zullen altijd kleiner zijn dan of hooguit gelijk zijn aan één. Een aantal resultaten van directe schuifproeven wordt besproken in hoofdstuk 3.

bladnummer : - 6 -
ons kenmerk: CO-265772/4
datum : juli 1987

In de formules 4a en 4b komt nog σ_n voor, die bepaald wordt door de gronddekking van de leiding, het volumegewicht van de grond en het gewicht van de buis met eventuele inhoud.

De normaalspanning σ_n is het gemiddelde van de radiale korrelspanningen langs de omtrek van de buis. Voor praktische doeleinden kan deze gelijk gesteld worden aan het gemiddelde van de verticale en horizontale korrelspanningen langs de omtrek van de buis, dus:

$$\sigma_n = \frac{\sigma'_{v,boven} + \sigma'_{v,onder} + 2\sigma'_{h,midden}}{4}$$

Hierin is:

$\sigma'_{v,boven}$ = de verticale korrelspanning ter hoogte van de bovenkant van de buis

$\sigma'_{v,onder}$ = de verticale korrelspanning ter hoogte van de onderkant van de buis

$\sigma'_{h,midden}$ = de horizontale korrelspanning ter hoogte van de buis-as.

Bij de bepaling van $\sigma'_{v,boven}$ wordt uitgegaan van de gronddekking. Schuifspanningen tussen de grond boven en naast de leiding worden hierbij verwaarloosd. Bij de bepaling van $\sigma'_{v,onder}$ wordt uitgegaan van $\sigma'_{v,boven}$ en het effectieve gewicht van de buis met eventuele inhoud. De gemiddelde horizontale korrelspanning tegen de zijkant van de buis is gelijk aan de verticale korrelspanning ter hoogte van de as van de buis, vermenigvuldigd met een factor K. Voor de ongestoorde situatie wordt $K = K_0$.

In de literatuur wordt wel voor K_0 aangehouden $1 - \sin\phi$. Het komt er dan op neer dat voor ingegraven leidingen bij vrijwel iedere grondsoort en normale kwaliteit van de sleufaanvulling $K = 0,6$ gesteld kan worden. Het is echter denkbaar dat bij een goede verdichting van de grond om de buis met een hogere waarde van K gerekend moet worden. De keuze van K bepaalt mede de uitkomst van de berekende τ_{max} .

In de literatuur wordt soms in plaats van $\tan\delta$ een zogenaamde wrijvingsfactor μ gehanteerd.

bladnummer : - 7 -
ons kenmerk: CO-265772/4
datum : juli 1987

2.3 De verplaatsing (v_e) waarbij de grenswaarde optreedt

In paragraaf 2.2. (blz. 5) is als nadeel van de directie schuifproef vermeld dat door het horizontaal opgesloten zijn van het grondmonster geen goede informatie wordt verkregen over de verplaatsing waarbij de grenswaarde van de wrijving optreedt. De proef geeft een te kleine v_e -waarde. Betrouwbare waarden voor v_e moeten daarom aan terreinproeven op ongeveer ware grootte worden ontleend. Het uitvoeren van een ring-schuifproef in het laboratorium kan mogelijk ook informatie geven over de grootte van v_e .

Op basis van resultaten van metingen in het terrein (Vilsteren, Kesteren) worden de navolgende waarden van v_e in de praktijk gehanteerd.

dicht gepakt zand:	1- 3 mm
matig gepakt zand:	3- 5 mm
los gepakt zand :	5- 8 mm
stijve klei :	2- 4 mm
matig stijve klei:	4- 6 mm
slappe klei :	6-10 mm
matig vast veen :	6-10 mm
slap veen :	10-15 mm

3. METINGEN VAN DE WRIJVING TUSSEN GROND EN BUISLEIDING

Zowel in het laboratorium als in het terrein zijn metingen uitgevoerd ter bepaling van de wrijvingskracht tussen grond en een buisleiding. In het navolgende wordt een overzicht gegeven van enige metingen.

3.1 Proeven in het laboratorium

3.1.1 Schuifproeven

Veelal gebruikt men in het laboratorium de directe schuifproef om de wrijvingseigenschappen van de grond te vergelijken met de wrijving tussen grond en het buismateriaal. Voor het laatste wordt de onderste helft van het monster in het apparaat door het te onderzoeken buismateriaal (inclusief de bekleding van de buis) vervangen. De monsterhouder heeft meestal de vorm van een vierkant (zijde 60 mm). De maximale verplaatsing die mogelijk is bedraagt in de regel 10 mm.

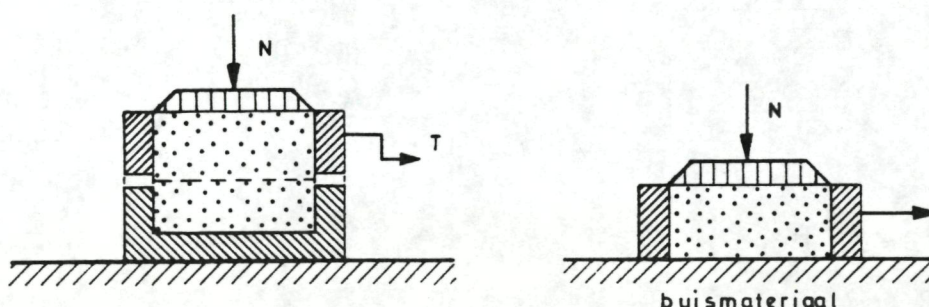
Voor iedere bepaling van de wrijvingseigenschappen worden tenminste 3 proeven verricht bij verschillende normaalspanningen, waarvan de middelste bij voorkeur overeenkomt met de belasting in de praktijk.

Het is moeilijk om in een serie proeven de dichtheid en het vochtgehalte van het monster bij iedere proef gelijk te houden.

De afschuifsnelheid kan worden gevarieerd. Dit is binnen zekere grenzen, voor zand van weinig belang. Bij cohesieve gronden, zoals klei, lopen de resultaten van langzaam en snel uitgevoerde proeven sterk uiteen.

De afschuifsnelheid zal in werkelijkheid sterk variëren. De resultaten van de proeven kunnen dan ook alleen gebruikt worden voor de vaststelling van de meest kritische situatie.

Een aantal uitgevoerde directe schuifproeven wordt hierna beschreven.



figuur 2

bladnummer : - 9 -
ons kenmerk: CO-265772/4
datum : juli 1987

A: Proefopstelling in het laboratorium

Op het zand dat voor de proef aan een 12,75" buiselement in een laboratoriumopstelling (zie Appendix II) is gebruikt is ook een aantal directe schuifproeven uitgevoerd. De proeven betroffen zowel afschuiving van zand over zand als afschuiving van zand over het buismateriaal (van epoxy-coating voorzien staal). Hierbij werd ook de temperatuur gevarieerd. Dit bleek niet van invloed te zijn op de resultaten.

Voor de normaalspanningen is 10, 30 en 50 kN/m² aangehouden. De afschuifsnelheid bedroeg 5 µm/sec.

De volgende resultaten werden verkregen:

zand		temp.	zand/staal *)	
dichtheid	φ		δ	f δ
"los" vast	34°	20°	26 °	0,76
		40°	27 °	0,79
	36°	20°	25 °	0,69
		40°	24,5°	0,68

* met een epoxy-coating

Opmerkelijk is hierbij het geringe verschil tussen het los gepakte en het vast gepakte zand. Vermoedelijk zal het verschil in dichtheid minder groot zijn geweest dan was bedoeld. Door het plaatsen van de bovenbelasting heeft het losgepakte zand een wellicht vastere pakking gekregen. Ook kan het al of niet optreden van dilatantie een rol hebben gespeeld.

B: Stadsverwarmingsproject Nieuwegein

In het kader van wrijvingsmetingen aan de warmtetransportleiding Utrecht - Nieuwegein (zie hierna en appendix V) zijn directe schuifproeven uitgevoerd op de daarbij verkregen kleimonsters. Hierbij zijn 5 kleimonsters bij verschillende bovenbelastingen afgeschoven over een stuk mantelbuis voorzien van een polyethyleen bekleding, die bij dit stadsverwarmingsproject wordt toegepast.

Voor de verplaatsingssnelheid is een waarde genomen van 17 µm/sec (dit komt overeen met de gemiddelde verplaatsingssnelheid van de buis bij elke voorspanstap; zie 3.2.3). In de onderstaande tabel zijn de resultaten van de schuifproeven op klei samengevat (zie ook bijlage 11).

bladnummer : - 10 -
 ons kenmerk: CO-265772/4
 datum : juli 1987

σ_n kN/m ²	τ_{piek} kN/m ²	τ_{rest} kN/m ²	water- gehalte %	γ_{nat} kN/m ³	c_u kN/m ²
15	7,0	4,8	34,80	18,1	30
20	7,0	5,6	34,18	18,3	35
25	5,6	4,3	35,05	18,2	30
30	7,4	6,2	34,38	18,3	35
35	8,0	6,8	34,55	18,2	32

Dit resulteerde in:

piekwaarden: $\delta = 3,5^\circ$ en $a = 6,0$ kN/m²

restwaarden: $\delta = 5^\circ$ en $a = 3,8$ kN/m²

Uit andere metingen bleek nog eens dat voor klei de ongedraineerde cohesie (c_u) sterk afhankelijk is van de heersende capillaire water-spanning en dus van het vochtgehalte. In verband hiermee zijn tevens een drietal schuifproeven uitgevoerd met een kleiner watergehalte. De resultaten zijn in de volgende tabel samengevat (zie ook bijlage 12).

σ_n kN/m ²	τ_{piek} kN/m ²	τ_{rest} kN/m ²	water- gehalte %	γ_{nat} kN/m ³	c_u kN/m ²
20,4	10,8	9,9	26,26	18,9	pp: 105 tv: 77
30,4	15,1	11,6	26,26		
40,4	16,9	15,1	26,26		

pp = pocketpenetrometer

tv = hand torvane

Dit resulteerde in:

piekwaarden: $\delta = 18^\circ$ en $a = 5,0$ kN/m²

restwaarden: $\delta = 15^\circ$ en $a = 4,0$ kN/m²

bladnummer : - 11 -
 ons kenmerk: CO-265772/4
 datum : juli 1987

C: Stadsverwarmingsproject Tilburg

In het kader van wrijvingsmetingen aan de warmtetransportleiding Amer-
 centrale - Tilburg (zie hierna en appendix V) zijn in het laboratorium
 directe schuifproeven uitgevoerd met droog zand. Voor de verplaatsings-
 snelheid is een waarde genomen van 17 $\mu\text{m}/\text{sec}$. Het buismateriaal was in
 dit geval eveneens staal bekleed met polyethyleen. In onderstaande
 tabel zijn de resultaten samengevat (zie ook bijlage 14).

zand			zand/staal *)			
poriëngeh.	ϕ'_{piek}	ϕ'_{rest}	δ_{piek}	δ_{rest}	$f_{\delta_{\text{piek}}}$	$f_{\delta_{\text{rest}}}$
38%	41°	37°	23°	19°	0,56	0,51

*) met een polyethyleen-coating

D: Terreinmeting te Kesteren

In 1984 zijn door het LGM in Kesteren onder andere metingen uitgevoerd
 tijdens het in langsrichting wegdrukken van een korte buisleiding. Deze
 proeven werden zowel in klei als in zand uitgevoerd.

In het kader van het onderzoek zijn ook directe schuifproeven uitge-
 voerd waarbij afschuiving van klei over klei en van klei over een met
 polyethyleen beschermd buisstuk plaatsvond. De verplaatsingssnelheid
 bedroeg 17 $\mu\text{m}/\text{sec}$. De resultaten van deze proeven waren als volgt:

klei				klei/polyethyleen				$f_{\delta_{\text{piek}}}$	$f_{\delta_{\text{rest}}}$	$f_{a_{\text{piek}}}$	$f_{a_{\text{rest}}}$
P.I.	watergeh. w	ϕ	c kN/m^2	δ_{piek}	a_{piek} kN/m^2	δ_{rest}	a_{rest} kN/m^2				
31%	35%	15°	33	4°	6,5	5°	5,0	0,27	0,33	0,20	0,15

E: Schuifproeven beschreven in de literatuur

Potyondy [2] heeft vele directe schuifproeven uitgevoerd op zand, silt,
 klei en een mengsel van zand en klei. Voor de proeven werd o.a. gebruik
 gemaakt van de constructiematerialen staal en beton. Zowel voor het
 staal als de beton werd onderscheid gemaakt tussen een glad en een ruw
 oppervlak.

bladnummer : - 12 -
 ons kenmerk: CO-265772/4
 datum : juli 1987

Over de toegepaste afschuifsnelheden is niets en over eventuele aan de afschuiving voorafgaande consolidatie van de proefmonsters is nauwelijks iets vermeld. Het is niet duidelijk welke betekenis aan de voor klei en cohesieve grond gevonden waarden van f_ϕ en f_c moet worden toegekend.

In de navolgende tabel wordt een overzicht gegeven van op basis van de resultaten door Potyondy voorgestelde ruwheidsfactoren.

$$[f_\phi = \delta/\phi, f_c = \frac{c_a}{c}, f_{cmax} = \frac{c_{a\max}}{c_{\max}}; \text{ without factor of safety}]$$

Construction material			Sand		Cohesionless silt			Cohesive granular soil		Clay		
			$0.06 < D < 2.0 \text{ mm}$		$0.002 < D < 0.06$			50% Clay + 50% Sand		$D \leq 0.06 \text{ mm}$		
	Surface finish of construction material		Dry	Sat.	Dry	Sat.		Consist. I. = 1.0-0.5		Consist. Index: 1.0-0.73		
			Dense		Dense	Loose	Dense					
			$f\phi$	$f\phi$	$f\phi$	$f\phi$	$f\phi$	$f\phi$	f_c	$f\phi$	f_c	$f_{c\text{max}}$
Steel	Smooth	Polished	0.54	0.64	0.79	0.40	0.68	0.40	—	0.50	0.25	0.50
	Rough	Rusted	0.76	0.80	0.95	0.48	0.75	0.65	0.35	0.50	0.50	0.80
Concrete	Smooth	Made in iron form	0.76	0.80	0.92	0.50	0.87	0.84	0.42	0.68	0.40	1.00
	Grained	Made in wood form	0.88	0.88	0.98	0.62	0.96	0.90	0.58	0.80	0.50	1.00
	Rough	Made on adjusted ground	0.98	0.90	1.00	0.79	1.00	0.95	0.80	0.95	0.60	1.00

Littleton [3] gebruikte voor zijn directe schuifproeven alleen glad geslepen staal en onderzocht twee soorten klei, namelijk kaoliniet (P.I. = 53%) en het in Nederland veel voorkomende illiet (P.I. = 33%), beide geheel verzadigd. Hij onderscheidde een langzame, gedraineerde uitvoering en twee soorten ongedraineerde proeven. Bij de eerste soort werd de klei normaal voorgeconsolideerd onder normaalspanningen variërend van 50 tot 300 kN/m². Bij de tweede soort, de zogenaamde snelle proeven, was de voorconsolidatiespanning bij alle proeven steeds dezelfde en bedroeg 100 kN/m². De verticale spanning werd daarna veranderd, waarna onmiddellijk met afschuiven werd begonnen. Tot een spanning van 100 kN/m² was dus sprake van een overgeconsolideerd monster. De afschuifsnelheid bij de ongedraineerde proeven was 10 µm/sec, voor de langzame uitvoering is deze niet als zodanig vermeld. Wel is vermeld deze werd vastgesteld aan de hand van de gegevens verkregen tijdens het consolideren van het monster.

bladnummer : - 13 -
 ons kenmerk: CO-265772/4
 datum : juli 1987

In onderstaande tabellen volgt een overzicht van de resultaten van Littleton.

Geconsolideerde, gedraineerde (langzame) proeven

kleisoort	klei over klei			klei over staal			$f_{\delta_{piek}}$	$f_{\delta_{rest}}$
	c	ϕ_{piek}	ϕ_{rest}	a_{piek}	δ_{piek}	δ_{rest}		
kaolinit	0	19°30'	14°30'	0	17°30'	11°30'	0,89	0,80
illiet	0	20°	14° 0'	0	18°15'	11°30'	0,91	0,82

Geconsolideerde, ongedraineerde proeven

kleisoort	klei over klei			klei over staal			$f_{\delta_{piek}}$	$f_{\delta_{rest}}$
	c_u	ϕ_{piek}	ϕ_{rest}	a_{piek}	$\delta_{piek}^{*)}$	δ_{rest}		
kaolinit	9	14°45'		0	13°45'		0,91	
illiet	0	15° 0'	12°30'	0		10°30'		0,84

*) waarde behorend bij een horizontale afschuiving over 2 mm.

Snelle, ongedraineerde proeven

kleisoort	klei over klei			klei over staal			$\frac{a_{rest}}{c_{u,piek}}$	$\frac{a_{rest}}{c_{u,rest} = f_{a,rest}}$
	$c_{u,piek}$	$c_{u,rest}$	ϕ_{piek}	a_{piek}	a_{rest}	δ_{piek}		
illiet	25	19	1°	--	16	1°	0,64	0,84

Butterfield en Andrawes [4] hebben een serie directe schuifproeven uitgevoerd waarbij zand met zowel een hoog poriëngehalte ($n = 43,7\%$) als met een laag poriëngehalte ($n = 35,7\%$) over onder andere glad staal werd geschoven. Het afschuiven gebeurde met een snelheid van 17 $\mu\text{m/sec}$. De resultaten waren als volgt:

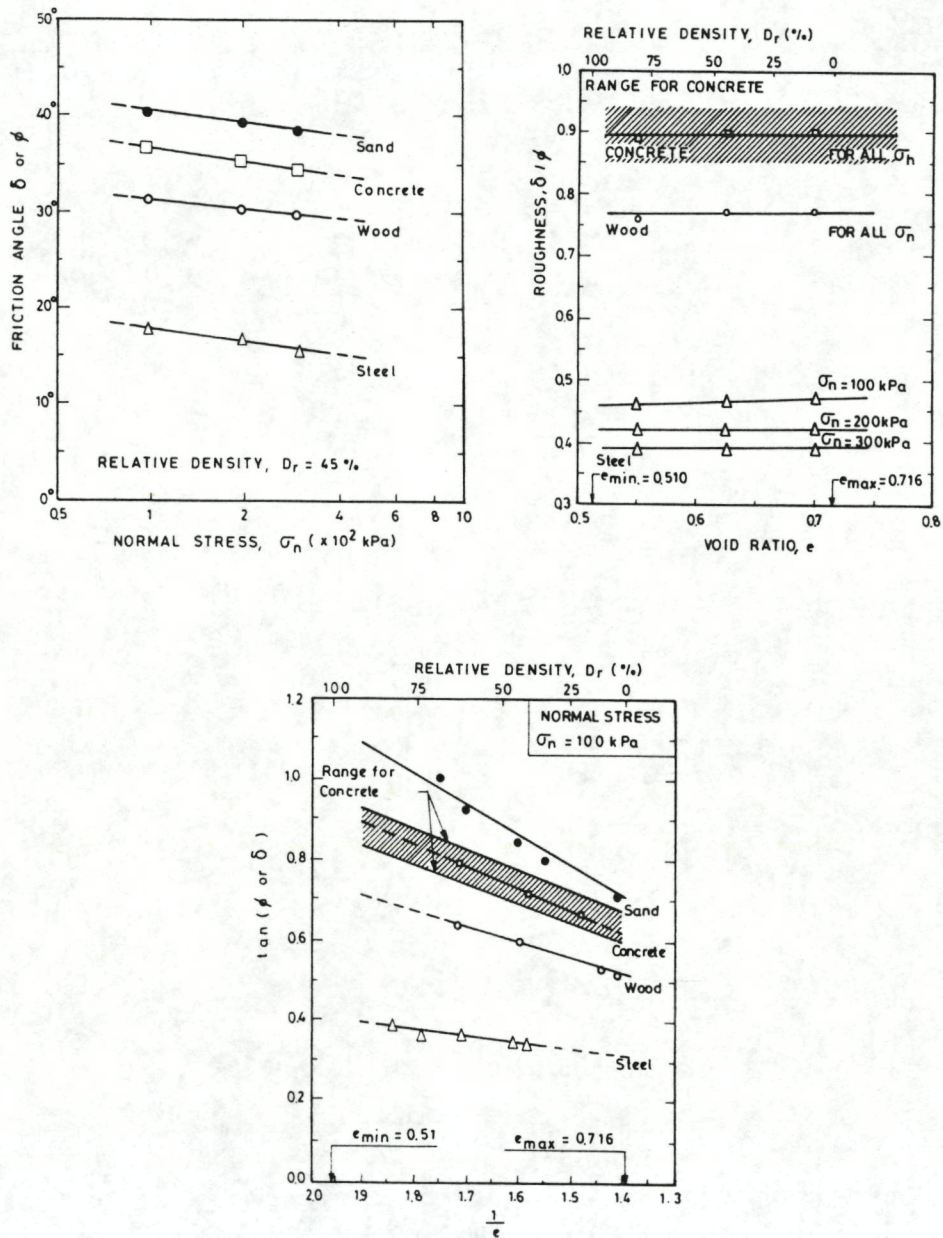
bladnummer : - 14 -
 ons kenmerk: CO-265772/4
 datum : juli 1987

zand		zand/glad staal			
poriën- gehalte	ϕ	δ_{piek}	δ_{rest}	$f_{\delta_{\text{piek}}}$	$f_{\delta_{\text{rest}}}$
43,7%	33°	11,3°	9,8°	0,34	0,30
35,7%	46°	18,0°	15,6°	0,39	0,34

Acar e.a. [5] hebben directe schuifproeven uitgevoerd op één type zand met een uniforme korrelverdeling ($d_{60}/d_{10} = 1,54$). Bij de proeven werd de dichtheid en bovenbelasting gevarieerd. Naast de proeven waarbij zand over zand werd afgeschoven, zijn ook proeven uitgevoerd waarbij het zand over staal (glad), hout en beton werd afgeschoven. De resultaten van de proeven zijn weergegeven in onderstaande grafieken.

Aan de hand van de experimenten stellen de auteurs onder andere vast (zie ook figuur 3) dat de invloed van de normaalspanning (σ_n) weinig en de dichtheid van zand praktisch geen invloed heeft op de ruwheidsfactor $f_{\delta} = \frac{\delta}{\phi}$.

bladnummer : - 15 -
 ons kenmerk: CO-265772/4
 datum : juli 1987



figuur 3

bladnummer : - 16 -
ons kenmerk: CO-265772/4
datum : juli 1987

Blake en Zaslowsky [14] hebben proeven uitgevoerd, waarbij 0,8 m lange buizen (buitendiameter: 3,5"- 4,5" en 5,5") in een cel verticaal door zand en grind werden getrokken. In verticale richting werd het zand of grind in de cel belast. De horizontale drukspanning op de buizen werd door middel van drukopnemers gemeten. De proeven werden een aantal malen herhaald.

Aan de hand van grafieken zijn de volgende resultaten vastgesteld:

zand (Overton sand):

buis ϕ 4,5"; eerste proef $\delta = 29^\circ$

tweede proef $\delta = 18,5^\circ$

grind (Pea gravel)

buis ϕ 4,5"; derde proef $\delta = 15,5^\circ$

(tot $\sigma_n \approx 400 \text{ kN/m}^2$)

De afmetingen van de buizen hadden geen noemenswaardige invloed op het resultaat.

Aan de hand van directe schuifproeven zijn de hoeken van inwendige wrijving vastgesteld. Voor zand wordt een waarde vermeld van $\phi = 33^\circ$. Door de auteurs werd een correctie van deze waarde toegepast in verband met dilatantie ($\phi_{\text{reken}} = 26,5^\circ$).

Opvallend bij deze proeven is dat gedurende de proeven door slijtage de ruwheidsfactor van het buisoppervlak sterk verandert, hetgeen mogelijk veroorzaakt kan worden door onder meer de hoge spanningen (tot circa 600 kN/m^2) waaronder de proeven werden uitgevoerd.

bladnummer : - 17 -
ons kenmerk: CO-265772/4
datum : juli 1987

3.1.2 Proefopstelling in het laboratorium (zie ook appendix II)

Door het LGM zijn in 1985 in het laboratorium metingen verricht aan een stalen buiselement (ϕ 12,75").

De buis, voorzien van een epoxy coating, werd bij verschillende diepteligging in zand cyclisch in langsricting verplaatst. De aan langswrijving gevonden reactiekracht werd continu geregistreerd.

Voor een beschrijving van de proef en de resultaten wordt verwezen naar appendix II.

Een samenvatting van de resultaten van deze proeven is als volgt:

pakking van het zand	ϕ	δ
los	34°	31-37°
vast	36°	35-45°

Vermoedelijk heeft de wisselende belasting een extra verdichting te weeg gebracht. Ook is het proefresultaat beïnvloed door extra weerstanden in de opstelling.

3.2 Proeven in het terrein

3.2.1 Metingen aan korte buizen

De procedure van beproeving is hetzelfde als beschreven in 3.1.2 en appendix III.

Omdat $\tau_{\max}$ bepaald wordt als een gemiddelde over een groter oppervlak zal het resultaat, vooral wat betreft de invloed van het contact tussen buis en grond, representatiever voor het gedrag van buizen zijn dan bij een directe schuifproef.

A: Metingen aan een buiselement te Kesteren [16] (zie appendix III)

Door het LGM zijn in 1984 metingen uitgevoerd aan een korte buis in zowel klei als zand. De metingen werden uitgevoerd op een proefterrein in Kesteren.

bladnummer : - 18 -
 ons kenmerk: CO-265772/4
 datum : juli 1987

De buis had een diameter van ϕ 24" en een lengte van 2,50 m.

De buis was bekleed met polyethyleen.

De diepte van de sleuven waarin de buis werd gelegd bedroeg 1,10 en 2,60 m.

Naast diverse andere metingen werd ook de langswrijving gemeten tijdens het in langsricting verplaatsen van de buis.

De resultaten van de proeven zijn in de navolgende tabel weergegeven.

materiaal	sleufdiepte [m]	$\tau_{\max}$ [kN/m ²]	v_e [mm]
niet verdichte klei	1,10	5,0	4
verdichte klei	1,10	3,8	2
niet verdichte klei	2,60	3,1	5
verdichte klei	2,60	3,8	6
niet verdicht zand	2,60	7,3*	4
verdicht zand	2,60	6,3	1

* buis scheef gezakt

Op basis van de formule

$$\tau_{\max} = a + \sigma_n \tan \delta$$

werden voorafgaand aan de proeven de volgende $\tau_{\max}$ -waarden berekend.

materiaal	sleufdiepte [m]	predictie van $\tau_{\max}$ [kN/m ²]	predictie van v_e [mm]
niet verdichte klei	1,10	6,0	3 - 5
verdichte klei	1,10	8,5	3 - 5
niet verdichte klei	2,60	6,5	3 - 5
verdichte klei	2,60	8,0	3 - 5
niet verdicht zand	2,60	7,6	1 - 3
verdicht zand	2,60	10,2	1 - 3

bladnummer : - 19 -
ons kenmerk: CO-265772/4
datum : juli 1987

3.2.2 Metingen aan lange buizen, waarvan het onbelaste uiteinde vrij kan verplaatsen

Aan de hand van de resultaten van dit soort metingen wordt $\tau_{\max}$ meestal afgeleid uit de belasting waarbij een doorgaande verplaatsing wordt verkregen.

Dit is onder andere bij doorpersingen het geval. Als tevens metingen worden verricht bij lagere belastingen kunnen $\tau_{\max}$ en v_e ook worden berekend volgens de theorie van in de grond verankerde lange buizen.

A: Terreinproef in Vilsteren (zie appendix IV)

In samenwerking met IBBC-TNO zijn door het LGM in 1968 metingen gedaan aan 36 m lange buizen te Vilsteren. De in langsrichting belaste buizen bevonden zich in zeer los gepakt zand ($n = 44-47\%$).

De stalen buizen hadden een diameter van $\phi 36''$ uitwendig. De bekleding ervan bestond uit bitumen en glasvezeldoek (tamelijk ruw).

Uit de proeven worden de volgende waarden gevonden voor $\tau_{\max}$ langs de buis in losgepakt zand.

Achter deze resultaten zijn vermeld de berekende gemiddelde korrelspanning (σ_n) en de daarmee afgeleide δ .

proef	$\tau_{\max}$ kN/m ²	σ_n kN/m ²	δ
I	9,5	20,3	25°
II	9,2	17,1	28°
III	4,2	7,1	31°

Proef I : grondwaterstand beneden buis

Proef II : grondwaterstand ter hoogte van as-lijn buis

Proef III: grondwaterstand boven buis.

Van het zand, waarin de proeven werden uitgevoerd, zijn geen ϕ -waarden bepaald.

Volgens een globale schatting zal voor deze losse pakking van het zand ϕ ongeveer 30° à 33° zijn. Derhalve zal de waarde van de ruwheidsfactor $f_\delta = 0,75$ à 1 hebben bedragen.

bladnummer : - 20 -
ons kenmerk: CO-265772/4
datum : juli 1987

Ten aanzien van de verplaatsing v_e waarbij $\tau_{\max}$ optreedt is de volgende globale informatie verkregen.

proef	v_e mm	$\tau_{\max}$ kN/m ²
I	2-8	9,5
II	1-3	9,2
III	2-4	4,2

B: Proeven en metingen beschreven in de literatuur

- Van Bree en Pool [6] constateren goede overeenstemming tussen gemeten en berekende wrijving bij het doortrekken van een betonnen tunnel in droge zandgrond.

Daarbij zou de wrijving, volgens de berekening met de formule

$\tau_{\max} = \sigma'_n \tan \delta$, 35 à 45 kN/m² bedragen. Gemeten werd een wrijving van 33 kN/m².

Opgemerkt wordt dat bij het trekken een glijmiddel is toegepast.

Bovendien is de omtrek van het snijmes voor de tunnel iets groter dan die van de betonnen elementen, hetgeen met name voor de zijvlakken een reductie van de kleef met zich mee zal brengen.

Het aandeel van de snijkop in de totale ondervonden weerstand is moeilijk te voorspellen. De invloed van de bemaling van de putten op de wrijving is niet onderzocht.

Bij de gemeten wrijvingswaarden moeten dan ook vraagtekens worden geplaatst.

- Formazin en Sibert [7] baseren zich op de doorperskrachten van een niet nader aangegeven aantal stalen waterleidingbuizen in verschillende grondsoorten.

In hun beschouwing wordt uitgegaan van de volgende formule:

bladnummer : - 21 -
ons kenmerk: CO-265772/4
datum : juli 1987

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_v + K \sigma_n}{2} \cdot \tan \delta = \frac{1 + K}{2} \cdot \sigma_n \tan \delta$$

In de bepaling van σ_n wijkt deze formule af van de in hoofdstuk 2.2. gegeven formule. Het gewicht van de buis is terecht niet meegenomen.

Zij voeren voor f_δ waarden in van 0,5 à 0,7 voor gladde stalen buizen en concluderen vervolgens dat K bij doorpersingen 0,85 à 0,96 kan bedragen. De mogelijkheid dat δ groter was dan aangenomen laten zij buiten beschouwing.

Het op zichzelf onduidelijk artikel is toegespitst op grote diameters (1000 - 3000 mm). De meetresultaten worden niet in het artikel vermeld.

- Salomo en Müller-Kirchenbauer [12] analyseren de doorperskracht van 3 betonbuizen ϕ 1,44 à 3,57 m op grote diepte in zand ($\phi = 33^\circ - 38^\circ$).

In de vergelijking hanteren zij de voorgaande formule met de modificatie $\sqrt{K}$ in plaats van $\frac{1 + K}{2}$, hetgeen voor waarden van K tussen 0,5 en 1 vrijwel geen verschil maakt. Zij stellen vast dat over de trajecten waar geen bentoniet-smering werd toegepast de gecombineerde factor $\sqrt{K} \tan f_\delta \cdot \phi$ respectievelijk bedraagt 0,3, 0,65 en 0,78. Aannemend, dat $K = 0,45$ à 1,0 zou dit leiden tot $f_\delta = 0,45$ à 1,0.

Ook maken zij melding van modelproeven waaruit zou volgen dat K tussen 0,5 en 2,0 kan variëren.

bladnummer : - 22 -
ons kenmerk: CO-265772/4
datum : juli 1987

3.2.3 Metingen aan buizen waarvan het onbelaste uiteinde in de grond is verankerd

De axiale belasting op dit soort buizen kan hoog worden opgevoerd zonder dat een duidelijk maximum wordt bereikt. In Appendix I zijn voor deze situatie een aantal formules afgeleid. Hieruit blijkt onder andere dat, bij grote belastingen, de verplaatsing van het belaste einde van de buis recht evenredig is met het kwadraat van de belasting en omgekeerd evenredig met $\tau_{\max}$. Met toenemende afstand vanaf de kop verminderen de verplaatsingen aanvankelijk snel volgens een parabolisch verloop (traject II) en vervolgens langzamer volgens een e-functie (traject I). Met de formules kan uit enige metingen van de verplaatsing van de kop van de buis bij grote belastingen direct een waarde van $\tau_{\max}$ worden berekend. In theorie zou ook v_e uit deze metingen kunnen worden afgeleid. De grootte van v_e is echter zo gering (enige mm's) dat een enigszins betrouwbare bepaling uit de proefresultaten alleen mogelijk is indien een ruim aantal meetpunten over de lengte van de leiding zijn verspreid en een grote nauwkeurigheid van de waarnemingen wordt bereikt.

A: Metingen tijdens het voorspannen van warmtetransportleidingen in klei en in zand

Door het LGM zijn in 1983 in opdracht van het COW verplaatsingsmetingen uitgevoerd tijdens het voorspannen van warmtetransportleidingen tussen Utrecht en Nieuwegein en tussen de Amercentrale en Tilburg.

In Appendix V zijn deze metingen beschreven.

Bij de warmtetransportleiding Utrecht - Nieuwegein (metingen A en B) betrof het een stalen buis met een diameter van 812,8 mm en een wanddikte van 12,5 mm die voorzien was van een polyethyleen bekleding. De buis was gelegd boven de grondwaterstand in klei die na het aanbrengen zorgvuldig was verdicht. De gronddekking bedroeg 0,8 m.

bladnummer : - 23 -

ons kenmerk: CO-265772/4

datum : juli 1987

Uit de analyse van de proefresultaten blijkt dat de gemiddelde grondwrijving in langsrichting de volgende waarden oplevert.

$$\text{meting A} = \bar{\tau}_{\max} = \underline{5,8 \text{ kN/m}^2}$$

$$\text{meting B} = \bar{\tau}_{\max} = \underline{7,7 \text{ kN/m}^2}$$

De gemiddelde korrelnormaalspanning op de buis bedraagt in dit geval $15,7 \text{ kN/m}^2$. Uit de directe schuifproeven in het laboratorium is bij deze normaalspanning gevonden:

$$\text{bij klei met een watergehalte van circa 35\% } \tau_{\max} = \tau_{\text{rest}} = 5 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{bij klei met een watergehalte van circa 26\% } \tau_{\max} = \tau_{\text{rest}} = 8 \text{ kN/m}^2$$

In het terrein is vastgesteld dat het watergehalte (w) maximaal 33% bedraagt. De bij dit watergehalte behorende $\tau_{\max} = \text{circa } 6 \text{ kN/m}^2$, zodat een goede overeenstemming tussen de in het terrein en in het laboratorium gemeten waarden bestaat.

Met de gebruikelijke berekeningsmethode, waarbij de adhesie niet wordt meegerekend, hetgeen voor klei fysisch niet juist is en $\delta = 0,75 \phi'$ wordt gesteld volgt:

$$\tau_{\max} = \sigma_n \tan \delta = 15,7 \tan 18^\circ = 5 \text{ kN/m}^2 \text{ (uit celproeven op ongeroerde monsters: } \phi' = 22 \text{ à } 25^\circ \text{)}.$$

Dit is dus ook redelijk in overeenstemming met de gemeten waarden.

Bij de warmtetransportleiding Amercentrale- Tilburg (metingen C en D) werden de metingen verricht aan een stalen buis met een diameter van 812,8 mm en een wanddikte van 8 mm die voorzien was van een polyetheen bekleding. De buis was gelegd in zand.

Tijdens de aanleg en dus ook tijdens de metingen was de grondwaterstand verlaagd tot beneden onderkant buis. De gronddekking was circa 2 m. Uit een analyse van de proefresultaten volgt dat de gemiddelde grondwrijving in langsrichting de volgende waarden heeft gehad.

bladnummer : - 24 -
ons kenmerk: CO-265772/4
datum : juli 1987

meting C: $\bar{\tau}_{\max} = 5,6 \text{ kN/m}^2$
meting D: $\bar{\tau}_{\max} = 6,5 \text{ kN/m}^2$

Bij een dekking van 2 m bedraagt de gemiddelde korrelnormaalspanning $24,6 \text{ kN/m}^2$. Volgens de in het laboratorium uitgevoerde directe schuifproeven zou bij dit spanningsniveau $\tau_{\max} = 8,5 \text{ kN/m}^2$ moeten bedragen. Deze waarde is hoger dan de in het terrein gemeten waarden. De gebruikelijke berekeningsmethode levert in dit geval op:

$$\tau_{\max} = \sigma_n \tan \delta = 24,6 \times \tan 27,7^\circ = \underline{12,9 \text{ kN/m}^2}.$$

Voor δ is $0,75 \times \Phi'$ aangehouden, waarbij voor Φ' is uitgegaan van de uit de directe schuifproeven verkregen waarden ($\Phi'_{\text{rest}} = 37^\circ$). De in het laboratorium gemeten waarde is beduidend lager, terwijl de in het terrein gemeten waarden ongeveer de helft van de berekende waarde bedragen.

B: Proeven en metingen beschreven in de literatuur

W. Hänig [9] heeft, ter controle van de berekende verankeringslengte, verplaatsingen gemeten van het uiteinde van twee stalen waterleidingen. De buizen met een inwendige diameter van 1630 en 600 mm en met een dekking van respectievelijk 1,30 en 1,60 m waren van een bitumenlaag voorzien en gelegd in een vochtige verdichte grondslag van zandige leem en löss. De gemeten verplaatsingen bleken bij een inwendige druk van 1420 respectievelijk 2780 kN/m^2 geheel elastisch te zijn en bedroegen respectievelijk 2,2 en 3,1 mm. Hieruit kan bij veronderstelde constante wrijving een $\tau_{\max}$ berekend worden van 7,5 respectievelijk 8,9 kN/m^2 . De auteur vermeldt μ -waarden van 0,4 à 0,45, zodat van een gronddruk van 19 à 19,5 kN/m^2 moet zijn uitgegaan.

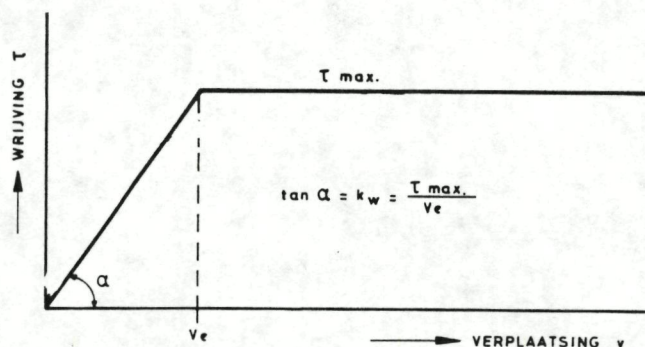
bladnummer : - 25 -
ons kenmerk: CO-265772/4
datum : juli 1987

Het artikel bevat onvoldoende gegevens om de berekening te controleren of de wrijvingswaarden met de grondeigenschappen ϕ en c te kunnen vergelijken. De afgeleide μ van 0,4 à 0,45 lijkt in overeenstemming met de onder A. beschreven metingen aan de warmtetransportleiding Utrecht-Nieuwegein ($\tan \delta = 0,37$ à $0,49$) en de warmtetransportleiding Amercentrale-Tilburg ($\tan \delta = 0,23$ à $0,26$). Hier staat tegenover dat als voor de kleine verplaatsingen de afleiding van het traject $v < v_e$ (vergelijk appendix I van dit rapport) zou zijn gevolgd, hogere waarden voor de wrijving en voor μ zouden zijn verkregen.

4. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

• Schematisering van relatie tussen wrijving en verplaatsing

Uit de terreinproeven in Vilsteren en Kesteren (zie appendices IV en V) kan worden geconcludeerd dat de gehanteerde veronderstelling van een lineair verband tussen verplaatsing (v) en de wrijving (τ) totdat de grenswaarde ($\tau_{\max}$) wordt bereikt redelijk realistisch is. Bij een toename van de relatieve verplaatsing groter dan v_e blijkt de wrijving nagenoeg constant en gelijk aan $\tau_{\max}$ te zijn.



• De berekening van de grenswaarde $\tau_{\max}$

De grenswaarde $\tau_{\max}$ kan worden berekend met de navolgende formule:

$$\tau_{\max} = a + \sigma_n \tan \delta$$

In plaats van $\tan \delta$ wordt soms de wrijvingsfactor μ gebruikt.

De normaalspanning σ_n is het gemiddelde van de radiale korrelspanning langs de omtrek van de buis.

Voor praktische doeleinden kan deze gelijk worden gesteld aan het gemiddelde van de verticale en horizontale korrelspanning langs de omtrek van de buis.

$$\sigma_n = \frac{\sigma_{v, \text{boven}} + \sigma_{v, \text{onder}} + 2 \cdot K \cdot \sigma_{v, \text{midden}}}{4}$$

bladnummer : - 27 -
ons kenmerk: CO-265772/4
datum : juli 1987

Voor buisleiding in sleuven aangelegd kan voor K worden aangehouden

$$K = K_0 = 1 - \sin \phi.$$

Voor sleufaanvullingen komt dit neer op globaal $K = 0,6$.

Voor doorgeperste buisleidingen en bij een zeer goede verdichting van de grond om de buis is het denkbaar dat met een hogere waarde van K gerekend moet worden. Bij de doorpersingen zal dit mede afhangen van de verhouding $\frac{\text{diameter snijkop}}{\text{diameter buis}}$.

De in de formule voor de berekening van $\tau_{\max}$ voorkomende parameters δ en a kunnen in het laboratorium met behulp van directe schuifproeven worden bepaald. Hierbij dient de bovenste helft van het apparaat, die steeds grond bevat, te schuiven over het betreffende buismateriaal (eventueel voorzien van een bekleding). Voor de bepaling van δ en a zijn series van minimaal 3 proeven nodig waarbij de bovenbelasting op het monster varieert.

Indien het uitvoeren van directe schuifproeven niet mogelijk is kunnen δ en a worden geschat door ϕ en c te vermenigvuldigen met de betreffende ruwheidsfactoren, die uit verschillende onderzoeken zijn afgeleid:

$$f_{\delta} = \frac{\delta}{\phi} \text{ en } f_a = \frac{a}{c}$$

Door invoering van deze factoren gaat de formule voor de berekening van $\tau_{\max}$ over in:

$$\tau_{\max} = \sigma_n \tan f_{\delta} \cdot \phi + f_a \cdot c$$

Ten aanzien van de te hanteren ruwheidsfactoren wordt het volgende opgemerkt.

Zand

Voor zand werden ruwheidsfactoren worden afgeleid uit terreinproeven, een laboratoriumopstelling en directe schuifproeven. Het resultaat vertoont een grote spreiding ($f_{\delta} = 0,3 \text{ à } 1$).

Uit de proefresultaten en uit de in de literatuur beschreven resultaten van proeven bleek dat f_{δ} in grote mate afhankelijk is van de ruwheid van het oppervlak en in mindere mate van de dichtheid en de ϕ -waarde [5].

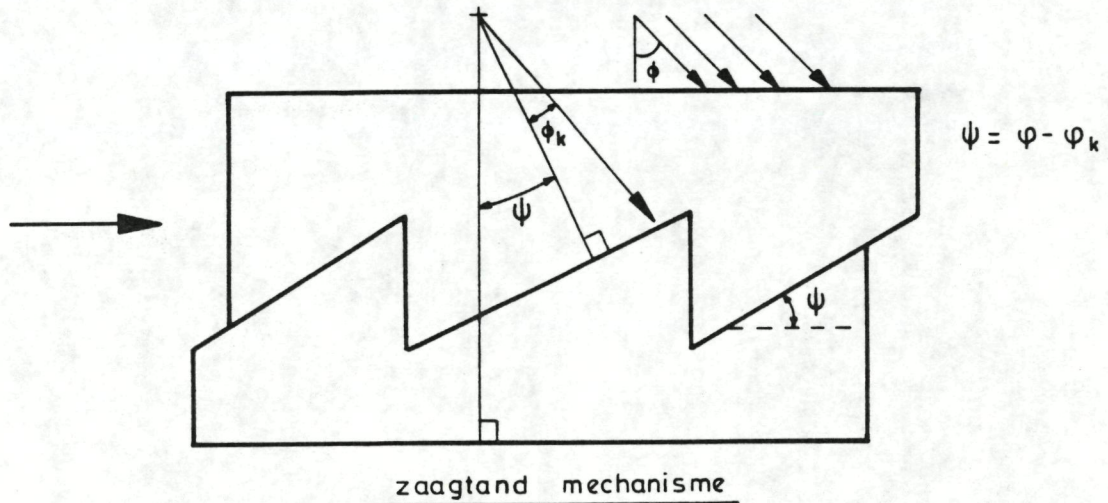
Een ruw oppervlak levert uiteraard een hoge ruwheidsfactor op. De ruwheid van het oppervlak bepaalt ook de mate van invloed van de dichtheid en de ϕ op de ruwheidsfactor.

Dit kan door middel van het al of niet optreden van dilatantie van zand worden verklaard.

Hierbij wordt verondersteld dat de hoek van inwendige wrijving (ϕ) is opgebouwd uit:

ϕ_K = wrijvingshoek kwarts op kwarts

ψ = "uplift"-hoek of hoek van dilatantie
(zie figuur 4).



figuur 4

De waarde van $\phi_K \approx 30^\circ$, zodat voor zand met $\psi = 0^\circ$ (bijvoorbeeld los zand) de hoek van inwendige wrijving (ϕ) = $\phi_K \approx 30^\circ$, terwijl voor dicht zand met bijvoorbeeld $\psi \approx 13^\circ$ de hoek van inwendige wrijving (ϕ) = $\phi_K + \psi \approx 30^\circ + 13^\circ = 43^\circ$.

Bij het schuiven van een glad oppervlak over dicht zand zal ter plaatse van het schuifvlak en daarboven niet of nauwelijks dilatantie optreden, terwijl ϕ wel voor een gedeelte door dilatantie is bepaald. Een lage ruwheidsfactor ($f_\delta = \frac{\delta}{\phi}$) is hiervan het gevolg.

Omgekeerd zou bij het afschuiven van een ruwoppervlak over dicht zand ook op het grensvlak wel dilatantie kunnen optreden, hetgeen een grotere ruwheidsfactor betekent.

Teneinde de variatie van de te hanteren ruwheidsfactor (f_δ) voor zand te verkleinen wordt voorgesteld de hoek van inwendige wrijving te corrigeren in verband met het al of niet optreden van dilatantie (zie ook [14]). De correctie van ϕ is afhankelijk van de ruwheid van het buisoppervlak. De gecorrigeerde ϕ -waarde wordt ϕ_{reken} genoemd.

glad buisoppervlak: $\phi_{\text{reken}} = \phi - \psi \approx 30^\circ$

ruw buisoppervlak : $\phi_{\text{reken}} = \phi$

Opgemerkt wordt dat bij een glad buisoppervlak voor ϕ_{reken} van zand altijd, ongeacht de dichtheid van het zand, een waarde van circa 30° geldt. Het bij de diverse proeven gebruikte buismateriaal met polyethyleen bekleding kan als glad worden beschouwd. Aanbevolen wordt het effect van de ruwheid op de toe te passen correctie nader te bestuderen. Naast de ruwheid van het oppervlak (beton, staal met roestvorming, enz.) zal ook de zachtheid van de buisbekleding (bijvoorbeeld bitumen) in verband met het indringen van zandkorrels hierbij voor snelle belastingen een rol spelen. De bij een relatief ruw oppervlak optredende dilatantie zal invloed hebben op de korrelspanning rondom de buis. Ook dit dient door een nadere studie te worden onderzocht.

Na correctie van ϕ kan voor de ruwheidsfactor $f_\delta = 2/3$ worden aangehouden, zodat voor zand geldt:

$$\tau_{\text{max}} = \sigma_n \tan 2/3 \cdot \phi_{\text{reken}}$$

bladnummer : - 31 -
ons kenmerk: CO-265772/4
datum : juli 1987

Klei en sterk kleihoudend zand

De wrijving tussen deze grondsoorten en buizen wordt voor een belangrijk deel bepaald door adhesie. De grootte van het aandeel van δ en van a hangt onder andere af van het watergehalte van de klei.

Bij nagenoeg met water verzadigde klei is het grotendeels de adhesie die de wrijving bepaalt. Uit de resultaten van de terreinproef in Kesteren en de metingen aan de warmtetransportleiding naar Nieuwegein blijkt dat de adhesie ongeveer gelijk is aan de gedraineerde cohesie (c'), hetgeen betekent $f_a \approx 1$. Voor δ werden waarden gevonden van $3,5$ à 5° . Vergeleken met de gedraineerde hoek van inwendige wrijving (ϕ') betekent dit $f_\delta = 0,15$ à $0,25$.

Een vergelijking van a en δ met niet volkomen gedraineerde waarden van c en ϕ lijkt niet zinvol omdat deze waarden sterk variëren met de deformatiesnelheid bij de beproeving van de grondmonsters.

De cohesie (c) van niet geheel verzadigde klei is sterk afhankelijk van de heersende capillaire waterspanning en dus van het vochtgehalte. De adhesie (a) is daar minder sterk afhankelijk van. Wel neemt, naarmate de klei droger wordt, de wrijvingshoek (δ) toe.

Uit het bovenstaande blijkt dat de eigenschappen van klei en sterk kleihoudend zand kunnen, zelfs in een bepaald geval, sterk uiteenlopen.

Slechts voor een beperkt aantal omstandigheden worden waarden voor f_δ en f_a gegeven:

klei, verzadigd: $f'_\delta = 0,15$ à $0,25$; $f'_a = 1$

Hoewel voor de wrijving tussen klei en een buiswand fysisch minder juist, levert de gebruikelijke berekeningsmethode, waarbij de adhesie niet wordt meegerekend en $\delta = 0,75 \phi'$ wordt gesteld, bruikbare resultaten voor de meest voorkomende gronddekkingen.

bladnummer : - 32 -
ons kenmerk: CO-265772/4
datum : juli 1987

• De verplaatsing (v_e) waarbij de grenswaarde optreedt

De resultaten van directe schuifproeven geven te lage waarden van v_e .

Aan de hand van de uitgevoerde terreinproeven kan worden geconcludeerd dat het verdichten van zand wel effect heeft op v_e . In los gepakt zand werd een waarde van 4 mm gemeten, terwijl in goed verdicht zand $v_e = \underline{1}$ mm. Hierbij moet worden bedacht dat maar zeer beperkte informatie beschikbaar is.

In klei werden waarden gemeten van 2 à 6 mm.

bladnummer : - 33 -
ons kenmerk: CO-265772/4
datum : juli 1987

5. LIJST MET GERAADPLEEGDE LITERATUUR

Onderstaande literatuur is geraadpleegd bij het opstellen van dit rapport. Bij een eventuele verwijzing in de tekst is gebruik gemaakt van de nummering.

1. B.J.J. Soudijn, R.A.J. de Kock:
Compendium geo-tubo mechanica;
Prov. Waterstaat Zuid-Holland (1977).
2. J.G. Potyondy:
Skin friction between soils and construction materials;
Geotechnique XI, No. 4 (1961).
3. I. Littleton:
An experimental study of the adhesion between clay and steel;
J. of Terramechanics Vol. 13, No. 3 (1976).
4. R. Butterfield, K.Z. Andrawes:
On the angles of friction between sand and plane surfaces;
J. of Terramechanics Vol. 3, No. 4 (1972).
5. Y.B. Acar, e.a.:
Interface properties of sand;
Proc. Am. Soc. of Civil Engineers;
Geotechnical Division Vol. 108, No. GT 4 (April 1982).
6. C. van Bree, J.H. Pool:
Het trekken van tunnels en duikers;
Cultuur Technisch Tijdschrift (1978).
7. J. Formazin, R. Siebert:
Theoretically fixed thrust in intersections;
Proc. 10th Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Eng.

bladnummer : - 34 -
ons kenmerk: CO-265772/4
datum : juli 1987

8. Grondleidingen voor warmtetransport;
ISSO-publicatie no. 7 (1979).
9. W. Hänig:
Reibungsgrenzlängen bei Druckrohrleitungen;
3R International, 16. Jahrgang, Heft 5 (mai 1977).
10. T.S. Ingold:
A laboratory simulation of reinforced clay walls;
Geotechnique 31, No. 3 (1981).
11. R.P. Kennedy e.a.:
Fault movement effects on buried oil pipeline;
Transp. Eng. Journal (sept. 1977).
12. K.P. Salomo, H. Müller-Kirchenbauer:
Neue Erkenntnisse auf dem Gebiet der Rohrpressung aus Forschung
und Praxis;
Schweizer Baublatt, Nr. 85 (okt. 1980).
13. A. Tautz:
Zur Weiteren entwicklung des Vakuum-Stahlmantelrohrsystems in
der Fernwärmeversorgung;
3R International (okt. 1977).
14. A. Blake, M. Zaslowsky:
Friction and bearing loads on buried pipes;
Soc. of Petroleum Engs. Journal (June 1973).
15. J.E. Bowles:
Foundation analysis and design;
Mc Graw-Hill, New York (1968).
16. Buisleidingen in klei;
Rapport CO-272040/75 van Laboratorium voor Grondmechanica
(januari 1985).

bladnummer : - 35 -
ons kenmerk: CO-265772/4
datum : juli 1987

17. P.A. Vermeer:

Materiaalmodellen in de grondmechanica;
Collegedictaat, TU-Delft (1983).

bladnummer : - 36 -
ons kenmerk: CO-265772/4
datum : juli 1987

6. LIJST VAN SYMBOLEN

v	= relatieve verplaatsing van de buis ten opzichte van grond
v_e	= relatieve verplaatsing waarbij $\tau_{\max}$ optreedt
τ	= wrijving per oppervlakte-eenheid (schuifspanning)
$\tau_{\max}$ ($\bar{\tau}_{\max}$)	= grenswaarde van de wrijving (gemiddelde waarde)
k_w	= frictionele beddingsconstante
σ_n	= gemiddelde korrelnormaalspanning langs de omtrek van de buis
σ'_v	= verticale korrelspanning
σ'_h	= horizontale korrelspanning
δ	= wrijvingshoek tussen grond en buis
μ	= verhouding tussen wrijving en de normaalkracht op de buiswand (σ_n)
a	= adhesie tussen grond en buis
ϕ (ϕ')	= hoek van inwendige wrijving (gedraineerd)
c (c_u) (c')	= cohesie (ongedraineerd) (gedraineerd)
f_δ	= ruwheidsfactor = $\frac{\delta}{\phi}$ ($\frac{\delta}{\phi'}$)
f_a	= ruwheidsfactor = $\frac{a}{c}$ ($\frac{a}{c'}$)
K	= verhouding tussen verticale en horizontale korrelspanning
K_o	= K in ongestoorde situatie (neutrale gronddrukcoëfficiënt)
γ	= volumegewicht
n	= poriëngehalte
h	= gronddekking boven buisleiding
d	= diameter van buisleiding
w	= watergehalte in gew. % van droge stof
ϕ_K	= wrijvingshoek kwarts op kwarts
ψ	= "uplift"-hoek of hoek van dilatantie