B2-83-5

laboratorium voor grondmechanica delft
delft soil mechanics laboratory

(1)

Grondwijziging langs Budelerdiep

laboratorium voor grondmechanica delft

stichting waterbouwkundig laboratorium

postbus 69, 2600 AB delft
stieltjesweg 2, delft
telefoon 015-569223
telex: 38234 soil nl
postgiro: 234342
bank: mees en hope nv delft
rek.nr. 25.92.35.911
(giro: 6400)

II / 13 / 13
pag. 4, 19, 21.
10 15 10

Grondwrijving langs buisleidingen

0 0

0 criterk: II, 1, 3, 15, 20.

CO-263560/4

februari 1983

Ic/Nn

pag. van belang: 4, 8, 10, 18, 19, 20, 21.

INHOUD

		Blz.
I	Inleiding	1
II	Grondwrijving in het algemeen	2
III	Terreinmetingen te Vilsteren	6
IV	Proefopstelling in het laboratorium	9
V	Directe schuifproeven	12
VI	Samenvatting van de resultaten	17
VII	Conclusies	20

. . .

Bijlagen

1	theoretische krachtsverdelingen
2	berekening van normaalspanningen
3	terreinproef te Vilteren, meetresultatem
4	idem, spanningen en verplaatsingen
5-7	laboratoriumproef, serie 1-3
8	laboratoriumopstelling, resultaten
9	directe schuifproeven volgens Potyondy en Littleton
10	spanningen en verplaatsingen (Littleton)
11	verband δ/ϕ voor proeven in zand

II

CO-263560/4

Theory Principles of Thrust-boring and Jacking (methoden ook!) niet overgenomen. 19

Meer in Jacking? Hoofdstuk Ref!

Geraadpleegde literatuur (o.a. beschikbaar gesteld door COW)

		evt. verwijzing in de tekst
- B.J.J. Soudijn, R.A.J. de Kock: Compendium geo-tubo mechanica Prov. Waterstaat-Zuid Holland	1977	|1|
- J.G. Potyondy: Skin friction between various soils and construction materials Geotechnique XI, no. 4	1961	|2|
- I. Littleton: An experimental study of the adhesion between clay and steel J. of Terramechanics vol. 13, no. 3	1976	|3|
- R. Butterfield, K.Z. Andrawes: On the angles of friction between sand and plane surfaces J. of Terramechanics vol. 3, no. 4	1972	|4|
- Y.B. Alcar, e.a.: Interface properties of sand Proc. Am. Soc. of Civil Engineers Geotechnical division vol. 108, no.GT4	April 1982	|5|
- J. Formazin, R. Siebert: Theoretically fixed thrust in intersections Proc. 10th int.conf.soil mechanics	1981	|6|
- C. van Bree, J.H. Pool: Het trekken van tunnels en duikers Cult. Technisch Tijdschrift	mei,juni 1978	
- Grondleidingen voor warmtetransport ISSO-publicatie no. 7	1979	

- J.E. Gumbel, J. Wilson:
Interactive design of buried flexible pipes — may
Groundengineering, — 1981

- W. Hänig:
Reibungsgrenzlängen bei Druckrohrleitungen — Mai
3R International, — 1977

- T.S. Ingold:
A laboratory simulation of reinforced clay walls
Geotechnique 31, no. 3 — 1981

- R.P. Kennedy e.a.:
Fault movement effects on buried oil pipeline — Sept.
Transp. eng. journal, — 1977

- K.P. Salomo, H. Müller-Kirchenbauer:
Neue Erkentnisse auf dem Gebied der Rohrpressung ... — Okt.
Schweizer Baublatt, Nr. 85 — 1980

- A. Tautz:
Zur Weiterentwicklung des Vakuum-Stahlmantelrohrsystems ... — Okt. 1977
3R International

- A. Blake, M. Zaslawsky:
Friction and bearing loads on buried pipes — June
Soc. of petroleum engs. journal — 1973

- J.E. Bowles:
Foundation analysis and design
McGraw-Hill book Cy., New York — 1968

I. Inleiding

Door het Centrum voor Onderzoek Waterkeringen werd ons bij het schrijven no. 701 d.d. 82-06-28 gevraagd gegevens te verzamelen over de grondwrijving, die ingegraven buizen in langsrichting ondervinden. De wrijving kan een reactie zijn op uit- en inwendige krachten (b.v. vloeistofdruk) of op verplaatsingen (b.v. door expansie), waaraan een buisgedeelte is onderworpen. Zijn geen andere uitwendige krachten werkzaam, dan is de grootte van de door de grond te leveren wrijving bepalend voor het verloop van de langsspanningen in de leiding en van de verplaatsingen. Bij een aanzienlijke wrijving zullen grote leidinglengten als onbeweeglijk in de grond verankerd kunnen worden beschouwd, hetgeen o.a. bij warmtetransportleidingen van belang is. De grondwrijving zal dus niet alleen de sterkteberekening van een leiding beïnvloeden, maar ook het ontwerp van een leidingenstelsel kunnen bepalen.

Ter beantwoording van de vraag hebben wij enige metingen en proeven nader geanalyseerd, die eerder over het gedrag van buizen in zand waren uitgevoerd. Dit waren:

- een terreinmeting in combinatie met TNO aan een 36" buis te Vilsteren voor de Gasunie (onderdeel van CO-18183, 1968),
- een laboratoriumopstelling van een 12,75" buiselement en directe schuifproeven met staal en zand in het LGM voor Petroland b.v. (BO-259500, 1981).

Voor een vergelijking met andere grondsoorten vonden wij in de literatuur een beschrijving van enige directe schuifproeven met staal en klei.

Metingen of proeven over de wrijving tussen staal en veen zijn niet bekend.

lab.

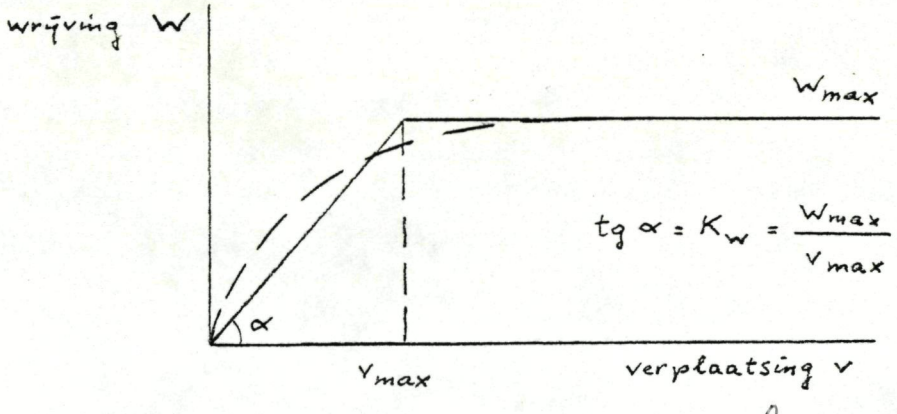
II. Grondwrijving in het algemeen

De grondwrijving wordt geleverd door schuifspanningen langs de omtrek van de leiding, die alleen bij (relatieve) verplaatsingen van de buis in de grond tot stand kunnen komen. Het verband tussen verplaatsing en schuifweerstand is niet lineair. Bij grote verplaatsingen nadert de wrijving asymptotisch tot een grenswaarde W_{max}.

Om praktische redenen wordt echter aangenomen dat er wel een evenredigheid is tussen de wrijving w en de verplaatsing v tot een zekere waarde v_{max}. De evenredigheid wordt dan gekarakteriseerd door de betrekking

$$\frac{w}{v} = \frac{W_{max}}{v_{max}} = K_w \qquad (1)$$

waarin K_w de frictionele beddingsconstante wordt genoemd.
Voor verplaatsingen groter dan v_{max} wordt voor de wrijving de grenswaarde W_{max} aangehouden (zie figuur).



geen residual strength.

Met deze aanname zou ook de spanningsverdeling vastliggen in een lange, rechte leiding onder invloed van een daarop uitgeoefende belasting. Deze verdeling bestaat

I voor het traject $v \geq v_{max}$ uit een lineair verloop, dat geheel bepaald wordt door W_{max},

II voor het traject $v < v_{max}$ uit een e-functie, die afhankelijk is van v_{max} of K_w.

Enige formules zijn gegeven op bijlage 1, voor de afleiding wordt verwezen naar litt. |1|.

In verband met deze praktijk zal men voor leidingberekeningen moeten beschikken over een opgave van

a) de grenswaarde w_{max} (in kN/m^2)

b) de grootte van de verplaatsing v_{max} (in mm).

Bij de opgave is zowel rekening te houden met de grondsoort en de - vermoedelijke - dichtheid van de aanvulling om de sleuf als met de ruwheid van het buismateriaal. Als regel zullen de te beschouwen verplaatsingen langzaam verlopen en een lange tijd voortduren of zich een groot aantal malen herhalen. Daarom behoeven eventuele hoge wrijvingswaarden, die alleen bij eenmalige kleine verplaatsingen optreden (o.a. als gevolg van dilatantie van dicht gepakt zand), maar bij doorgaande verstoringen weer afnemen, niet in aanmerking te worden genomen.

a) De grenswaarde w_{max} kan worden berekend met de formule:

$$w_{max} = a + \sigma_n \operatorname{tg} \delta, \qquad (2)$$

waarin: a = adhesie tussen grond en buis

$\operatorname{tg} \delta$ = wrijvingscoëfficiënt grond/buis

σ_n = gemiddelde normaalspanning langs de omtrek van de buis

Veelal wordt w_{max} uitgedrukt in de cohesie en tg ϕ van de grond alleen door het invoeren van coëfficiënten

$$w_{max} = f_a\, c + \sigma_n\, f_\delta\, \text{tg}\, \phi \qquad (2a)$$

waarin $f_a = \frac{a}{c}$ en $f_\delta = \text{tg}\, \delta / \text{tg}\, \phi$.

Zowel f_a als f_δ kunnen slechts kleiner zijn dan of hoogstens gelijk zijn aan 1.

In grondsoorten zonder cohesie is dan:

$$w_{max} = \sigma_n\, \text{tg}\, \delta \quad \text{of} \quad \sigma_n\, f_\delta\, \text{tg}\, \phi \qquad (2b)$$

De grenswaarde van de wrijving in zand is dus in hoge mate afhankelijk van σ_n. Deze wordt in de praktijk berekend als het gemiddelde van de vertikale en horizontale korrelspanningen langs de omtrek van de buis. Bij de vertikale spanningen wordt ook het gewicht van de buis en de buisinhoud boven of onder water in rekening gebracht, zie de voorbeelden van bijlage 2.

De overige in de formules (2) voorkomende factoren moeten de eerdergenoemde eigenschappen van de grond en de buis omvatten. Zij kunnen per voorkomend geval als regel rechtstreeks uit terrein- of modelproeven in het laboratorium worden afgeleid. Ook de literatuur geeft enige aanknopingspunten.

b) Anders dan de grenswrijving heeft v_{max} alleen betekenis als rekengrootheid. De op te geven waarde ligt tussen de verplaatsing, die bij het bereiken van W_{max} aan zuiver elastische deformatie kan worden toegeschreven en die waarbij grondbreuk zal intreden. De grootte van deze beide verplaatsingen kan aan terrein- of laboratoriumproeven worden ontleend. Overigens blijft de keuze van v_{max} binnen deze verplaatsingen enigszins arbitrair. Er bestaat dan ook

geen zekerheid of met deze praktijk voldoende aansluiting wordt verkregen bij de rekenmodellen, waarin de opgegeven waarden worden gehanteerd (bijvoorbeeld volgens bijlage 1).

Opgemerkt wordt nog dat de in formule (1) gedefinieerde grootheid K_w suggereert dat v_{max} afhankelijk is van W_{max} en daarmee van σ_n. Aangenomen mag echter worden dat v_{max} voornamelijk door de grondsoort wordt bepaald en zich beter dan K_w leent tot onderlinge vergelijking van proefresultaten met verschillende diepten van de buis.

III Terreinmetingen te Vilsteren

Over het gedrag in zand vond een aantal grootschalige proeven plaats op 36 m lange stalen buizen, Ø uitw. 36" (914 mm), wd 11,82 mm, met een bescherming van bitumen en glasvezeldoek (tamelijk ruw). Steeds werden met een vijzel twee van deze buizen van elkaar af gedrukt, waarbij de belasting stapsgewijs met 10 tonf. werd verhoogd tot een van de buizen ging schuiven.
Iedere belasting werd snel opgebracht en 1 uur gehandhaafd.

Aan het eind van iedere belasting werden door middel van rekstrookjes de spanningen in een van de twee betreffende buizen bepaald in 5 enigszins onregelmatig gekozen doorsneden. Ook werden optisch enige verplaatsingen gemeten (nauwkeurigheid ca 0,5 mm). Bij elkaar werden 3 proeven uitgevoerd. Hierbij bedroeg de granddekking steeds 1,10 m, naar werden door verandering van de grondwaterstand de korrelspanningen gevarieerd. De buis, die van rekstrookjes was voorzien, was in twee van de drie proeven de reactiebuis (grenswrijving nog niet bereikt) en in de derde de buis, die zelf een doorgaande verplaatsing onderging. Alle buizen bevonden zich in zeer losgepakt zand (poriënvolume n = 44 - 47%, relatieve dichtheid 25 - 30%).

De spanningen, die bij het belasten op vijf verschillende afstanden uit de vijzel werden gemeten en de globale verplaatsingen van de uiteinden van de buis zijn verzameld op bijlage 3. Uit de spanningstabel kan worden afgeleid, dat voor alle proeven en bij alle belastingen over de lengte van de buis praktisch dezelfde spanningsverdeling is opgetreden. Deze verdeling in % van de aangebrachte belasting is onderaan in bijlage 3 weergegeven. Ter vergelijking is eveneens het percentage vermeld, dat zou zijn ge-

vonden als de grondwrijving over de gehele lengte van de buis constant zou zijn geweest.

Op bijlage 4 zijn bovenaan de beide spanningsverdelingen in % in tekening gebracht. Onderaan zijn per proef de gemeten verplaatsingen van de uiteinden A en B uitgezet tegen de belasting. De vorm van de spanningsverdeling lijkt op het eerste gezicht enigszins op die voor het theoretisch geval van een oneindig lange buis, waarbij de wrijving evenredig is met de verplaatsingen (bijlage 1, traject II). Hieraan wordt door een eindig, vrij bewegend leidinggedeelte echter alleen voldaan zolang het uiteinde B niet verplaatst, dus bij zeer kleine belastingen. De grens zou kunnen liggen bij hooguit 30 - 50 tonf. (proeven I en II) en ca 10 tonf. (proef III).
In ieder geval blijken de verplaatsingen bij grotere belastingen niet meer beperkt te blijven tot een elastische samendrukking van de buis. Dat wij daarbij toch ook een spanningsverdeling vinden, die een verhoogde wrijving aangeeft over het begin van de buis, zal dan ook het gevolg zijn van spanningsconcentraties door de daar aanwezige discontinuïteit (plotseling aangrijpende belasting). Het blijft echter merkwaardig, dat de spanningen in % van de aangebrachte belasting eenzelfde verdeling uitwijzen als beneden de eerder genoemde belastinggrenzen.
Wellicht dat men in bepaalde gevallen, bijvoorbeeld bij korte toevoerleidingen eveneens discontinuïteiten en derhalve een verhoogde wrijving in rekening mag brengen. Bij lange doorgaande leidingen echter zullen zij niet voorkomen en is de maximum wrijving W_{max}, waarmee gerekend mag worden, de bij de grootste belasting gemeten wrijving over het middelste gedeelte van de buis. Deze blijkt praktisch gelijk te zijn aan de gemiddelde wrijving over de gehele lengte.

Uit de proeven worden de volgende waarden gevonden voor w_{max} langs stalen buizen in losgepakt zand.
Achter deze resultaten zijn vermeld de gemiddelde korrelspanningen, tg δ en δ.

proef	w_{max} kN/m²	σ_n kN/m²	tg δ	δ
I	10,6	15,6	0,68	34°
II	9,7	14,5	0,67	33,5°
III	4,35	7,8	0,56	29°

Van het zand, waarin de proeven werden uitgevoerd, zijn geen ϕ-waarden bepaald. Volgens een globale schatting zullen zij ongeveer even groot geweest zijn als bovenstaande uitkomsten van δ (29 - 34°). Derhalve kan voor de gemiddelde waarde van de wrijving f_δ = 1 worden aangehouden.

Uit de verplaatsingen van de buizen, die bij de proeven tot de grenswaarde werden belast, kan over de grootte van v_{max} en K_w nog de volgende globale informatie worden verkregen.

proef	v_{max} mm	w_{max} kN/m²	K_w MN/m³
I	8	10,6	1,3
II	4-5	9,7	1,95-2,4
III	3	4,35	1,45

) factor 2 à 4

De verschillen in uitkomsten van de proeven I en II in hetzelfde zand en bij nagenoeg gelijke wrijving tonen duidelijk de betrekkelijkheid aan van de beide grootheden.

Het. spreiding.

IV Proefopstelling in het laboratorium

Metingen werden verricht aan een stalen buiselement, lang 1.50 m, Ø uitw. 12,75" (D = 0,325 m), w.d. 23,4 mm. Hoewel een enige mm's dikke epoxylaag was opgespoten, had het oppervlak een zekere ruwheid. De opstelling bestond uit een stalen bak waarin tussen twee vaste uiteinden, die van rubber manchetten waren voorzien, de buis vrij kon bewegen. De weerstand van de manchetten werd aanvankelijk verwaarloosbaar geacht.

Bij iedere proef werd aan de buis 50x een verplaatsing in langsrichting opgelegd van 7,5 à 8 mm (gemiddeld 15 mm per cyclus) bij een snelheid van 0,5 mm/sec. De aan langswrijving ondervonden reactiekracht werd continu geregistreerd.
Alle proeven werden uitgevoerd met een lege buis geheel onder water. Als bodemmateriaal werd één soort zand gebruikt, waarbij onderscheid werd gemaakt tussen een losse pakking (poriënvolume n = 45,5%, relatieve dichtheid 30%) en een vaste pakking (n = 41,5% d_r = 60%). De buis varieerde in diepteligging van juist in de bodem (dekking o) tot een dekking van 2,5D (0,80 m zand).

Enige resultaten zijn weergegeven in de bijlagen 5, 6 en 7. Duidelijk is dat de proefopstelling niet volledig heeft voldaan. Zo hebben de effectieve verplaatsingen van het buiselement slechts $\frac{1}{2}$ à $\frac{2}{3}$ bedragen van de slag van het bewegingsmechanisme. De wrijving vertoont wel de neiging bij verplaatsingen van 1,5 à 3 mm een constante waarde aan te nemen, maar wordt daar voorbij weer aanzienlijk groter. Blijkbaar hebben de rubber manchetten wel een extra weerstand opgeleverd en heeft de stijfheid van de bak bij toenemende verplaatsingen aan de uiteinden van de buis tot spanningsconcentraties geleid.
De eigen weerstand van de manchetten kon achteraf worden bepaald door een calibrering buiten het zand, zoals in de figuren met ---lijnen is aangegeven. Voor de verdere correctie zijn de -.-.-lijnen aangehouden. Daarmee is een feitelijk verband tussen wrijving en verplaatsing verondersteld als op de bijlagen 5, 6 en 7 grijs is ingekleurd.

De op deze wijze verkregen waarden van w_{max} zijn vermeld in de bovenste tabel van bijlage 8.

Uit deze tabel blijkt dat de uitkomsten een grote spreiding vertonen. De verhouding tussen de maxima en de minima bedraagt per proefserie bij eenzelfde pakking en belastingscyclus ongeveer 1,5. Verder is te zien, dat de verschillen tussen de waarden van w_{max} bij een losse en een dichte pakking van het zand het grootst zijn bij een ondiepe ligging van de buis en zich vooral voordoen bij de eerste belastingen. Met een toenemend aantal herhalingen gaan de resultaten in los zand meer die van de vaste pakking benaderen. Vermoedelijk is hier sprake van een combinatie van verdichting en een zich verder ingraven van de buis. Bij de diepere liggingen is de invloed van de pakking van het zand en het aantal herhalingen kleiner.
Tenslotte is nog op te merken, dat bij alle proeven met vaste pakking de wrijving bij een aantal eerste belastingsherhalingen iets achteruit gaat. Mogelijk is dit een gevolg van een herschikking van de zandkorrels in een nauwe zone om de buis.

In bijlage 8 onderaan zijn de resultaten op verschillende diepten weer vergeleken met de theoretische normaalspanningen σ_n.
Gezien de onzekerheden bij de metingen en de uitgevoerde correcties, zijn hierin alleen de minima van de uitkomsten van de bovenste tabel verwerkt. Worden de verkregen waarden van δ gesteld naast de ϕ-waarden, die voor hetzelfde zand bij overeenkomstige relatieve dichtheden werden bepaald door middel van directe schuifproeven (verg. hoofdstuk V onder A), dan zien we:

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

Ook als bij de laboratoriumopstelling ϕ enigszins van bovenvermelde waarden zal hebben afgeweken, blijft voor het eindresultaat van alle proeven gelden dat $f_{\delta} = 1$.

Tenslotte kunnen voor v_{max} en K_w aan de bijlagen 5 - 7 de volgende waarden worden ontleend:

proefserie	v_{max} mm	w_{max} kN/m²	K_w MN/m³
1	3	1,25	0,4
2	2	3,05	1,5
3	1,5	5,45	3,6

Van de beide grootheden is de spreiding van v_{max} (1,5 - 3 mm) duidelijk kleiner dan die van K_w.

V Directe schuifproeven

Veelal gebruikt men dit soort laboratoriumproeven om de wrijving van de grond te vergelijken met die tussen grond en staal. Voor het laatste wordt de onderste helft van het monster in het apparaat door de te onderzoeken staalsoort vervangen. De proeven zijn kleinschalig; de standaardafmeting bedraagt ⌀ 60 mm, de maximum verplaatsing als regel 10 mm. Voor iedere bepaling worden tenminste 3 proeven verricht onder uiteenlopende normaalspanningen, die bij voorkeur overeenkomen met de belasting in de praktijk.
Meestal wordt pas met iedere proef begonnen als de grondmonsters onder deze normaalspanning zijn geconsolideerd.
Een moeilijkheid is om per proefserie de aanvangsconditie (o.a. dichtheid) steeds gelijk te maken.

In de proeven kan de afschuifsnelheid worden gevarieerd. Dit is voor zand, binnen zekere grenzen van weinig belang. Bij cohesieve gronden, zoals klei, lopen de resultaten van langzaam en snel uitgevoerde proeven sterk uiteen. Dit hangt er mee samen of bij snelle proeven een voldoende drainage aanwezig is om wateroverspanningen te voorkomen. Indien hierover geen zekerheid bestaat, kunnen de resultaten alleen gebruikt worden voor onderlinge vergelijking.

A. Proeven op het zand en staal van hoofdstuk IV

Het L.G.M. voerde een aantal directe schuifproeven uit op het zand afzonderlijk en in combinatie met het buismateriaal, beschreven in blz. 9. Hierbij werd ook de temperatuur gevarieerd, hetgeen niet van invloed bleek te zijn op de resultaten. Voor de normaalspanningen is 10, 30 en 50 kN/m² aangehouden. De afschuifsnelheid bedroeg 5 µm/sec.

Door een iets gewijzigde uitvoering van deze proeven werd bij de wrijving zand/staal ook een zekere wrijving staal/staal meegemeten. Na correctie werden de volgende resultaten verkregen:

zand		temp.	zand/staal	
dichtheid	ϕ		δ	f_δ
los	34°	20°	26°	0,73
		40°	27°	0,74
vast	36°	20°	25°	0,65
		40°	24,5°	0,64

Deze cijfers zijn alle belangrijk lager dan die van hoofdstuk IV. Wellicht gedragen de gekozen stukken staal zich gladder dan bij de grotere oppervlakken in het laboratorium. Ook is niet goed verklaarbaar dat in de resultaten het verschil in dichtheid zo slecht naar voren komt.

Voor v_{max} werd over het algemeen 1 mm gevonden.

B. Proeven beschreven in de literatuur

Als min of meer systematische proefseries, waarin ook kleien zijn betrokken, kozen wij die van Potyondy (lit. |2|) en Littleton (lit. |3|). Beiden hadden verschillende uitgangspunten.

Potyondy beschrijft directe schuifproeven op grof zand, silt, een zand-kleimengsel en klei alleen. Voor het staal werd onderscheid gemaakt tussen een ruw en een glad oppervlak. Alle grondmonsters werden voor beproeving geconsolideerd; de laagste normaalspanning bedroeg ca 50 kN/m². De (voor klei vermoedelijk vrij hoge) afschuifsnelheid is niet vermeld. De belangrijkste resultaten zijn verzameld in tabel I van bijlage 9.

De eerste groep grondsoorten omvat middelmatig tot grof zand en een qua korrelverdeling meer met de LGM-proeven overeenkomend silt. De meeste monsters waren vastgepakt (ϕ = 38° à 44°). Hiervoor blijkt δ te variëren van 24° à 31,5° voor glad staal en van 34° à 38° voor ruw staal. De verhouding van δ tussen glad en ruw is derhalve ca 0,75; die van f_δ ca 0,7.

De tweede groep grondsoorten bestaat uit een 50 - 50% zand-kleimengsel en klei alleen. De laatste wordt omschreven als glaciaal, matig plastisch (L.L. 40%) met 50% deeltjes < 2 µ.
Gezien de vochtgehalten (w = 13 - 26%) waren de monsters niet verzadigd.

In de opgegeven resultaten is onderscheid gemaakt tussen f_δ en f_a volgens formule (2a) van blz. 4. Voor de groep als geheel zien we dat het zandgehalte voornamelijk van invloed is op f_δ bij ruw staal en op f_a bij glad staal. Op de verdere cijfers wordt aan het eind van dit hoofdstuk nader teruggekomen.

Littleton [3] gebruikte alleen glad geslepen staal, ruwheid 7 ru (0,18 µm) en onderzocht twee soorten klei, namelijk kaoliniet (L.L. = 80%) en illiet (L.L. = 50%), beide geheel verzadigd.
Hij onderscheidde een langzame, gedraineerde uitvoering en twee soorten ongedraineerde proeven. Bij de eerste soort werd de klei nog normaal voorgeconsolideerd onder verschillende normaalspanningen vanaf 20 tot 50 kN/m². Bij de tweede soort zogenaamde snelle proeven was de voorconsolidatiespanning bij alle trappen steeds dezelfde en bedroeg 100 kN/m². De afschuifsnelheid bij de langzame uitvoering is niet vermeld, voor de ongedraineerde proeven was deze 10 µm/sec. Voor de resultaten wordt verwezen naar tabel II van bijlage 9.

In de langzame proeven 1a en 1b wordt voor de schuifweerstand van de klei alleen en voor die tussen klei en staal een maximum-waarde en een restwaarde opgegeven.

Fig. A van bijlage 10 laat zien, dat de maxima bij verschillende verplaatsingen werden bereikt. Dit is van invloed op de keuze van f_δ. In de praktijk zal men namelijk bij bepalingen van ϕ als regel de maximum waarde aanhouden. Daarentegen moet voor δ de restwaarde in rekening worden gebracht en blijft een eventuele piekwaarde buiten beschouwing. Bij de onderhavige proeven is derhalve te rekenen met ϕ = 19,5 à 20° en de bijbehorende f_δ = 0,56 à 0,58.
In verzadigde toestand is de cohesie c = 0 en dus ook a = 0.

De snelle proeven 3a en 3b geven een mogelijke opgave van extreme waarden voor f_δ en f_a in het geval van grote of volledige wateroverspanningen. De uitkomsten, respektievelijk f_δ = ± 0,4 en f_a = ± 0,6 zijn echter mede bepaald door de hoge normaalspanning (100 kN/m²) bij de tijdelijke voorconsolidatie. Deze snelle proeven zijn echter voor de wrijving van buisleidingen niet van belang.

Een tussengelegen groep vormen de ongedraineerde proeven 2a en 2b, die zich onderscheiden in een verband tussen spanningen en verplaatsingen volgens respektievelijk fig. B en fig. A van bijlage 10. Ook bij deze beide proeven kunnen wateroverspanningen zijn opgetreden, zoals blijkt uit de ϕ-waarde van 15° tegenover 19,5 à 20° bij de nrs. 1a en 1b. Gaat men er van uit, dat in de praktijk met de laatstgenoemde ϕ zou worden gerekend, dan bedraagt f_δ 0,69 en 0,50 in plaats van 0,92 en 0,69, zoals in de tabel is vermeld.
Door de wateroverspanningen zal in proef 2a de cohesie 9 kN/m² grotendeels schijnbaar zijn. Dit lijkt bevestigd te worden door de uitkomst f_a = 0.

Ook de proeven op zand met klei en klei alleen van tabel I zijn, naar het zich laat aanzien, ongedraineerd verlopen.
De ϕ-waarden van de monsters nemen bij toenemend watergehalte sterk af. Echter valt uit de cohesies op te maken, dat de grond gedurende de gehele beproeving onverzadigd is gebleven, zodat deze afname niet

of nauwelijks verband kan houden met overdrukken in de poriën.
Ondanks de wisselende ϕ-waarden zijn de uitkomsten van f_δ tamelijk constant. Opvallend is, dat zij voor klei bij zowel glad als ruw staal eenzelfde waarde van 0,5 à 0,6 uitwijzen, die ook voor de verzadigde toestand werd afgeleid.
Voor klei-zand mengsels werden wel verschillen gevonden.

VI Samenvatting van de resultaten

A. Wrijving in zand

De meeste proeven, zowel in het terrein en de laboratorium-opstelling als directe schuifproeven, betreffen de combinatie zand/ruwe buis. Voor de combinatie zand/gladde buis staan alleen de directe schuifproeven van Potyondy ter beschikking. Hieraan werd onder andere ontleend dat δ voor glad staal gemiddeld 75% zou bedragen van δ voor ruw staal.

Onder de aanname, dat dit percentage constant zou zijn, werden alle reeds genoemde resultaten bijeengebracht in een $\phi - \delta$ diagram (bijlage 11).
Hierin zijn ook nog enige gegevens opgenomen, die konden worden ontleend aan verdere directe schuifproeven met glad staal, beschreven in lit. |4| en |5|. In het diagram is geen rekening gehouden met uiteenlopende wijzen en kwaliteiten van beproeving, of met verschillen in ruwheid van staaloppervlak die vooral bij gladde buizen een belangrijke rol kunnen spelen. Mede daardoor lopen de uitkomsten sterk uiteen tussen ongeveer $\delta = 0{,}7\ \phi$ en $\delta = \phi$ voor ruw staal en $\delta = 0{,}3\ \phi$ en $\delta = 0{,}75\ \phi$ voor glad staal.

In werkelijkheid moet aan de uitkomsten van de terreinproef en de laboratoriumopstelling, beide uitgevoerd op ruw staal, aanzienlijk meer gewicht worden toegekend dan aan de directe schuifproeven. Daardoor kan voor de wrijving van zand en dit materiaal een hogere gemiddelde waarde worden aangehouden dan uit de verzameling van resultaten zou volgen. Bovendien is het mogelijk deze waarde redelijk nauwkeurig aan te geven. Daarentegen kunnen voor glad staal alleen enige grenzen worden genoemd, waarbinnen de wrijving waarschijnlijk zal liggen. Een en ander is nader uitgewerkt in de volgende tabel:

zand ϕ	ruwe buis		gladde buis	
	δ	f_δ	δ	f_δ
< 30°	-	1,0	-	0,7 -0,4
30°	30°	1,0	20 -15°	0,65-0,4
35°	32,5°	0,7	22,5-15°	0,6 -0,35
45°	35°	1	25 -17,5°	0,5 -0,3

Wellicht is nog van belang dat de bovenste grenswaarden van f_δ voor glad staal ook vermeld zijn in een Duitse norm voor de wrijving, waarop bij doorpersingen moet worden gerekend (lit. |6|, tabel II).

B. Wrijving in klei en sterk kleihoudend zand

De wrijving tussen deze grondsoorten en staal is tot op heden alleen door middel van laboratoriumproeven, meestal directe schuifproeven, onderzocht. Zoals bij zand is gebleken, kunnen de uitkomsten hiervan nogal afwijken van de waarden, die uit terreinproeven volgen.

Voor een aantal min of meer systematisch uitgevoerde series directe schuifproeven zijn de resultaten verzameld op bijlage 9. Hierin worden de uitkomsten zowel uitgedrukt in δ en a als in mogelijke coëfficiënten f_δ en f_a. Aan de eerstgenoemde factoren kan alleen een relatieve betekenis worden toegekend, omdat de onderzoekingen beperkt bleven tot een gering aantal kleisoorten met ieder eenzelfde of een weinig variërend vochtgehalte. In werkelijkheid kunnen de eigenschappen van kleigronden veel sterker uiteenlopen. Het zal dan ook meer dan bij zand nodig zijn om in voorkomende gevallen de ϕ- en c-waarden van deze grondsoorten vast te stellen en hieruit met de coëfficiënten f_δ en f_a de vermoedelijke grootte van w_{max} te bepalen.

De grootte van bovengenoemde coëfficiënten kon voor klei nagegaan worden zowel in verzadigde als vochtige toestand. Voor klei en zand zijn zij alleen bij vochtige mengsels bepaald. Echter mag worden aangenomen, dat de f_δ-waarden van gemengde grond in verzadigde toestand overeen zullen komen met die van klei, terwijl zij in droge toestand aan zullen sluiten bij de waarden voor zand. De coëfficiënt f_a heeft vermoedelijk alleen betekenis voor vochtige grondsoorten.

Met deze veronderstellingen kunnen de resultaten voor klei en mengsels van zand en klei globaal als volgt worden samengevat:

langzame deformatie

grondsoort	consistentie	ruwe buis		gladde buis	
		f_δ	f_a	f_δ	f_a
klei en klei met zand	verzadigd-nat	0,5-0,6	0,1-0,2	0,5-0,6	0
klei	vochtig-droog	0,5-0,6	0,5	0,4-0,5	0,3
klei met zand	vochtig-droog	0,6-0,8	0,3-0,5	0,4-0.6	0,1-0,2

Het zal duidelijk zijn dat uit de proefresultaten vrijwel geen aanwijzingen worden verkregen over de mogelijke spreiding van de verschillende coëfficiënten. Bovenstaande tabel kan derhalve alleen gehanteerd worden om uit gegeven grondeigenschappen Ø en c een gemiddelde waarde van w_{max} vast te stellen.

VII Conclusies

1. Voor de spanningsverdeling in een leiding door uitsluitend wandwrijving in lengterichting worden twee trajecten onderscheiden: I geheel bepaald door de maximum wrijving w_{max} en II bepaald door w_{max} en een zekere verplaatsing v_{max} (zie blz. 3). Voor berekeningen wordt een opgave gevraagd van w_{max} en v_{max} of $K_w = \frac{w_{max}}{v_{max}}$.

2. w_{max} kan worden berekend uit de voor de terreinomstandigheden te bepalen Φ (en eventueel cohesie c) en de gemiddelde korrelspanning σ_n door invoering van f_δ en f_a. Deze coëfficiënten, die afhankelijk zijn van de grondsoort en de ruwheid van de buis, zijn af te leiden uit diverse soorten proeven. Hiervoor is steeds het bezwijkstadium (grote verplaatsingen) als maatgevend beschouwd.

3. Voor zand konden f_δ waarden worden afgeleid uit een terreinproef, een laboratoriumopstelling en directe schuifproeven. De resultaten blijken afhankelijk te zijn van ϕ met een maximum voor $\phi \leqq 30°$ van $f_\delta = 1$ voor ruwe en en $f_\delta = 0{,}7$ voor gladde buizen (blz. 18). Voor klei stonden alleen directe schuifproeven uit de literatuur ter beschikking, waarvan de resultaten niet zonder enige reserve kunnen worden overgenomen. Volgens deze proeven zouden afhankelijk van de ruwheid van het staal en het vochtgehalte van de grond gemiddelde waarden van f_δ aangehouden kunnen worden van 0,4 à 0,6. De resultaten zijn verder uitgewerkt in de tabel van blz. 19). Daarin zijn ook mogelijke coëfficiënten aangegeven voor grondmengsels van klei en zand.

4. Gezien de verschillen in uitkomsten zal het nodig zijn de begrippen ruw en glad oppervlak beter te definiëren. Het is denkbaar dat het onderscheid afhankelijk is van de grondsoort en vastgelegd moet worden ten opzichte van de gemiddelde of maximale korrelgrootte.

5. Voor v_{max} werd in de terreinproef in Vilsteren 3 à 8 mm gevonden, hetgeen belangrijk meer is dan de 1 à 2 mm bij de laboratoriumopstelling en in de directe schuifproeven. Het is mogelijk, dat hierbij schaaleffecten een rol spelen en dat bij grotere buisafmetingen inderdaad voor zand en ook voor klei met hoge waarden moet worden gerekend.
   Overigens is het juister opgave te verstrekken van v_{max} dan van K_w.

6. Gezien de onder 3 vermelde reserve ten aanzien van de wrijvingscoëfficiënten in klei en kleihoudend zand en de onzekerheid over de grootte van v_{max}, zou het aanbeveling verdienen ook in deze materialen een of meer terreinproeven uit te voeren. Te denken valt hierbij aan een opzet als in Vilsteren met een ruwe en een gladde buis, waarbij de belastingen zowel langzaam als snel kunnen worden aangebracht en eventueel na verloop van tijd kunnen worden herhaald. Speciale aandacht verdient daarbij een goede bepaling van de ϕ- en c-waarden van de klei in de omstandigheden van de beproeving. Voor een juiste interpretatie behoeft de spanningsverdeling in de buizen niet te worden vastgesteld, wel zullen alle verplaatsingen zeer nauwkeurig moeten worden gemeten.

Delft, Laboratorium voor Grondmechanica,

Inckel

Ir. A.E. Inckel.

zand.
f_a n.v.t.
$f_s \approx 1$.
$v_{max} \approx 0{,}5$ cm.

klei.
$f_a \approx 1/4$
$f_s \approx 1/2$.
$v_{max} \approx 0{,}5$ cm.

veen
2.

BL-83-34.

Aanvulling op BL-83-5.

Toevoeging : VII. Terreinmetingen beschreven in de literatuur

a. Warmtetransportleiding Utrecht-Nieuwegein (LGM CO-265771)

In opdracht van het C.O.W. werden in 1983 metingen uitgevoerd bij het voorspannen van o.a. een recht gedeelte van een stalen mantelbuis in droge klei, die na het leggen zeer zorgvuldig was verdicht. De buis was voorzien van een gladde polyethyleen bekleding en had een diameter van 812,8 mm uitwendig en een wanddikte van 12,5 mm; de gronddekking bedroeg 0,8 m.
De metingen werden verricht bij een effectieve belasting van 3002 en 4172 kN, waarbij direct achter de vijzel verplaatsingen werden bereikt van 31 à 60 mm. Uit het verloop blijkt, dat bij de laatstgenoemde verplaatsing in alle meetpunten de maximale wrijving is opgetreden. Deze bedroeg na correctie voor inwendige verliezen 6,5 kN/m^2, terwijl als normaalspanning om de buis met K_o = 0,58 gemiddeld 14,6 kN/m^2 werd berekend. De wrijvingscoëfficiënt was derhalve μ = 0,445.

In het uitgebrachte concept-rapport wordt voor de klei aan de hand van celproeven ϕ = 25° en c = 0 opgegeven. Daarmee zou δ = 25° en f_δ nagenoeg 1 zijn geweest. Vermeld wordt, dat als in verband met de verdichting een hogere K_o-waarde in rekening gebracht zou zijn, f_δ meer in overeenstemming zou zijn met een verwachte waarde van 0,75.

Gezien het succes van de metingen ten aanzien van het vaststellen van w_{max}, verdient het aanbeveling de grondeigenschappen ϕ en c te verifiëren en te trachten de componenten van de buiswrijving tg δ en a nader vast te stellen. Wellicht is het van belang in aanvullende metingen of proeven na te gaan of de wrijving kan zijn beïnvloed door de snelheid van verplaatsing (orde van grootte 50 µm/sec) en in hoeverre deze door relaxatie met de tijd mogelijk afneemt tot een lagere restwaarde.

b. Stalen waterleidingen onder inwendige druk volgens W. Hänig, Stuttgart

Ter contrôle van de berekende verankeringslengte werden de verplaatsingen gemeten van het uiteinde van twee stalen waterleidingen. De buizen, ø inwendig 1630 en 600 mm met een dekking van resp. 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 14,2 resp. 27,8 bar geheel elastisch te zijn en bedroegen resp. 3,1 en 2,2 mm. Hieruit kan bij veronderstelde constante wrijving een w_{max} berekend worden van 7,5 resp. 8,9 kN/m^2. De auteur vermeldt μ-waarden van 0,4 à 0,45, zodat van een grondspanning van 19 à 19,5 kN/m^2 moet zijn uitgegaan.

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. Hier staat tegenover dat als voor de kleine verplaatsingen de afleiding van het traject $v < v_{max}$ (vergelijk bijlage 1 van het rapport) zou zijn gevolgd, hogere waarden voor de wrijving en voor μ zouden zijn verkregen.

c. De wrijving bij het doorpersen van leidingen

c.1. Analyse van Formazin en Siebert

Voor een groot aantal gladde stalen leidingen van verschillende diameters en lengten zijn gemeten en berekende doorperskrachten vergeleken. Omdat voor de berekening steeds dezelfde methode werd gevolgd, konden bepaalde aspecten van de uitvoering worden uitgedrukt in coëfficiënten. Een van de conclusies is, dat bij doorpersingen een hogere waarde voor K_o in rekening moet worden gebracht van 0,85 à 0,95. De overige coëfficiënten zijn niet relevant.

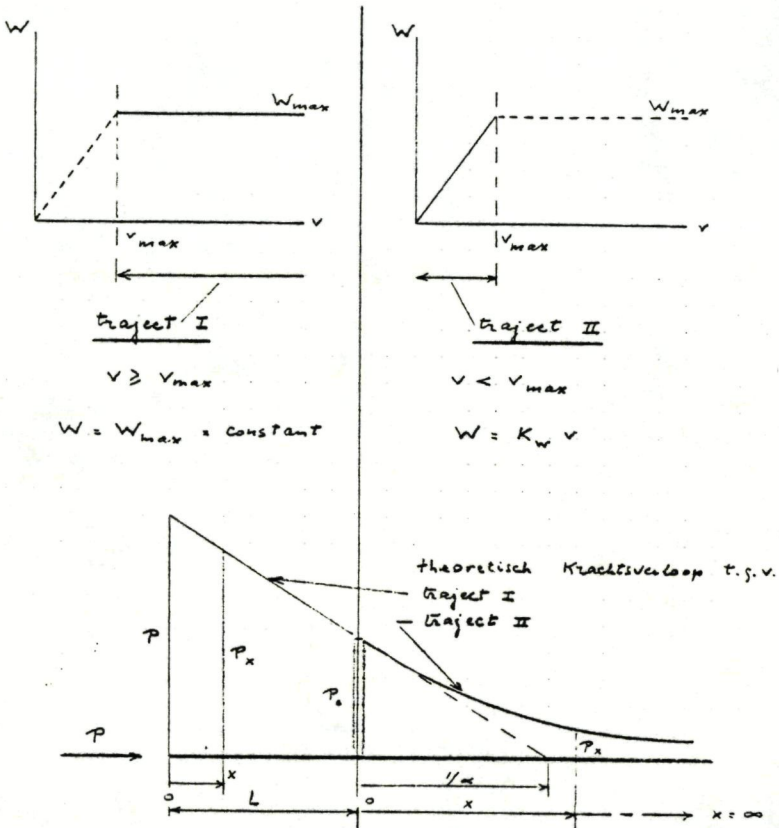
Wel is van belang dat als basis van vergelijk gebruik werd gemaakt van de wijze van berekening voor ingegraven gladde stalen buizen, die eerder in dit rapport werd beschreven. Dit geldt zowel voor de bepaling van σ_n (zij het met $K_o = 0{,}5$ in plaats van 0,6) als voor δ/ϕ-waarden van 0,5 voor klei tot 0,7 voor zand; vergelijk hoofdstuk VI.

c.2. Wrijving bij doorpersingen volgens Salomo en Müller-Kirchenbauer

Ook deze schrijvers concluderen uit enige modelproeven en drie praktijkgevallen dat bij het doorpersen sterk wisselende K_o-waarden kunnen voorkomen. Omdat voor de wrijving de combinatie van μ en K_o maatgevend is, wordt in de voorbeelden de grootheid $\mu\sqrt{K_o}$ (te vergelijken met $\mu \frac{1 + K_o}{2}$) bepaald. Deze bevat tevens variaties van $\mu = tg\delta$, hetgeen de interpretatie bemoeilijkt.

Als voorbeeld is het verloop gegeven van de perskracht voor drie betonbuizen met grote diameters van 1,44 tot 3,57 m, doorgeperst in zand met $\phi = 33°$ à $38°$ en een dekking van 5,5 à 6 m. Over het traject waar nog geen glijmiddel behoefde te worden gebruikt, varieert $\mu\sqrt{K_o}$ van 0,20 tot 0,78. Als uitersten is aangehouden $K_o = 0{,}45$ met $\delta = \frac{1}{2}\phi = 17°$ en $K_o = 1$ met $\delta = \phi = 38°$.
Een toelichting waarom in het laatste geval niet b.v. $K_o = 2$ met $\delta = 0{,}7\ \phi = 27°$ in aanmerking komt, wordt niet gegeven, hetgeen het artikel onduidelijk maakt.

Over het algemeen echter is een analyse van de wrijving bij doorpersingen niet van belang voor ingegraven leidingen.
Wel moet men er op bedacht zijn, dat ook hierbij hogere K_o-waarden en dienovereenkomstige lagere μ-waarden kunnen voorkomen of worden berekend. Te denken valt aan een extra verdichting in het terrein of een zeer snel aangebrachte belasting bij proeven.



$P_x = P - W x$

$\frac{dP}{dx} = - W_{(max)}$

$W_{max} = \frac{P - P_o}{L}$

$P_x = P_o e^{-\alpha x}$, waarin $\alpha = \sqrt{\frac{K_w}{EF}}$

$\frac{dP}{dx} = - \alpha P_o e^{-\alpha x}$; $x = o$ $\frac{dP}{dx} = - \alpha P_o$

$W_{max} = \alpha P_o$

$$P_o = \frac{W_{max}}{\alpha}$$

$$L = \frac{P - P_o}{W_{max}} = \frac{P}{W_{max}} - \frac{1}{\alpha} = \frac{P}{W_{max}} - \sqrt{\frac{EF}{K_w}}$$

N.B. P = normaalkracht
W = wrijving per eenheid van lengte
K_w = kracht per (lengte-eenheid)^2

laboratorium voor grondmechanica delft
telefoon: (015) - 56 92 23 telex: 38234 solab nl

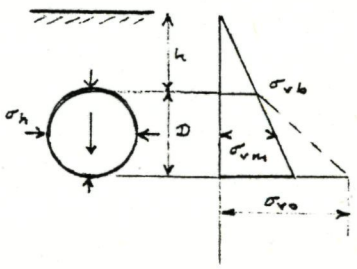
	d.d.	get.
GRONDWRIJVING LANGS BUISLEIDINGEN	CO-263560	gec.
THEORETISCHE KRACHTSVERDELINGEN	BIJL. 1	form. A4

Gemiddelde normaalspanning langs de omtrek van de buis

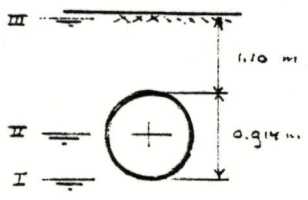
$$\sigma_n = \frac{\sigma_v \text{ boven} + \sigma_v \text{ onder} + 2\sigma_h \text{ midden}}{4}$$

Stel $\sigma_h = 0{,}6\,\sigma_v$ midden en $\gamma_{buis} = a$

$$\sigma_n = \frac{2h\gamma_{grond} + 2.0{,}6(h + \tfrac{1}{2}D)\gamma_{grond} + Da}{4}$$



Voorbeeld A. Vilsteren, proef III



buis ø 914 mm wd 11,8 mm

inhoud 0,671 m³/m'

gewicht droog 2660 N/m'

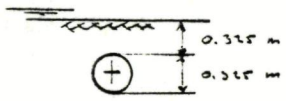
onder water − 4050 N/m' (opdrijf)

γ buis " − 6 KN/m³ "

γ grond " 9 KN/m³

$$\sigma_n = \frac{2.1{,}1.9 + 2.0{,}6.1{,}557.9 - 0{,}914.6}{4} = \frac{31{,}12}{4} = 7{,}8 \text{ KN/m}^2$$

Voorbeeld B. laboratorium opstelling, dekking D



buis ø 12,75" wd 21,4 mm

inhoud 0,083 m³/m'

gewicht droog 1600 N/m'

onder water 770 N/m'

γ buis " 9,3 KN/m³

γ grond (verdicht) 10 KN/m³

$$\sigma_n = \frac{2.0{,}325.10 + 2.0{,}6.0{,}149.10 + 0{,}325.9{,}3}{4} = \frac{15{,}4}{4} = 3{,}85 \text{ KN/m}^2$$

---

laboratorium voor grondmechanica delft
telefoon: (015) - 56 92 23 telex: 38234 solab nl

	d.d.	get.
GRONDWRIJVING LANGS BUISLEIDINGEN	CO-263560	gec.
BEREKENING VAN NORMAALSPANNINGEN	BIJL. 2	form. A4

laboratorium voor grondmechanica delft

telefoon: (015) - 569223 telex: 38234 solab nl

GRONDWRIJVING LANGS BUISLEIDINGEN

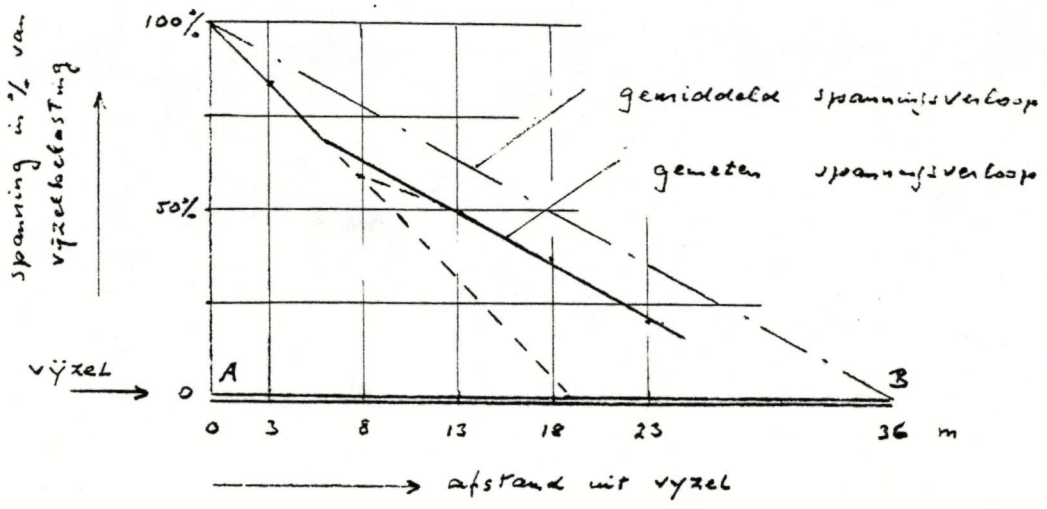
TERREINPROEF TE VILSTEREN

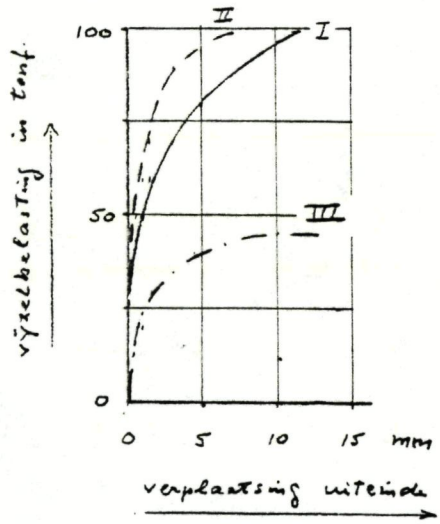
MEETRESULTATEN

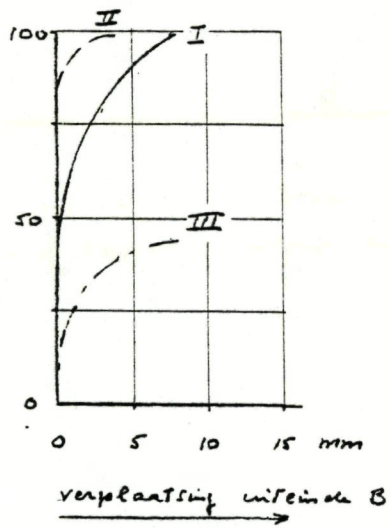
proef	omstandigheden	aangebrachte belasting (ton f.)	spanning in N/mm² op afstand uit vijzel in m						globale verplaatsing uitmeten v in mm		Δv mm	* zie bijl 4
			0	3	8	13	18	23	A*	B*		
I	dekking 1.10 m	10	2,0	2,6	1,3	1,4	0,4	0,5	0	0	0	
	g.w. 2 m-mv	20	6,0	4,1	3,1	2,5	1,9	1,1	0	0	0	
		30	9,0	7,7	5,0	4,7	3,5	1,9	0,5	0	0,5	
		40	11,9	10,4	6,9	6,5	4,7	3,2	1	0	1	
		50	14,9	niet	opgenomen				1	0	1	
		60	17,9	15,1	10,0	8,0	6,5	3,8	1,5	0	1,5	
		70	20,9	17,2	11,8	9,8	7,6	4,6	3	1	2	
		80	23,9	19,8	13,8	11,2	9,8	5,5	5	3	2	
		90	26,9	22,2	15,6	12,7	10,1	6,2	8,5	5,5	3	
	2e buis bezwijkt	100	29,8	24,5	17,3	14,5	11,4	7,0	10,5	7,5	3	
II	dekking 1 m	10	3,0	2,1	1,4	1,0	0,7	0,3	0	0	0	
	g.w. 1,45 m-mv	20	6,0	4,6	3,0	2,3	1,6	0,9	0	0	0	
		30	9,0	7,2	4,7	3,6	2,8	1,3	0	0	0	
		40	11,5	9,8	6,5	5,2	4,0	2,0	0,5	0	0,5	
		50	14,9	12,4	8,4	6,9	5,1	2,3	0,5	0	0,5	
		60	17,9	14,8	10,2	8,7	6,6	3,6	1	0	1	
		70	20,9	17,3	12,1	10,4	8,0	4,4	1,5	0	1,5	
		80	23,9	20,0	14,0	12,1	9,4	5,2	2	0	2	
		90	26,9	23,5	15,8	13,6	10,7	6,0	3	0	3	
	2e buis bezwijkt	100	29,8	25,1	17,4	15,0	11,6	6,7	7	4	3	
III	dekking 1 m	10	3,0	1,9	1,3	1,6	0,8	0,7	1	0,5	0,5	
	g.w. = mv	20	6,0	4,5	3,1	2,7	2,2	1,2	1	1	0	
		30	9,0	7,2	5,1	4,4	3,7	2,1	1,5	1	0,5	
		40	11,9	9,9	6,8	6,0	4,8	2,9	4,5	4	0,5	
	meetbuis bezwijkt	45	14,9	11,1	8,0	6,8	5,5	3,5	12,5	8	4,5	
	spanning in % (alle proeven)		100	82	57	48	37	21				
	spanning in % (lineair verdeeld)		100	92	78	64	50	36				

spanningen en verplaatsingen buislengte 36 m

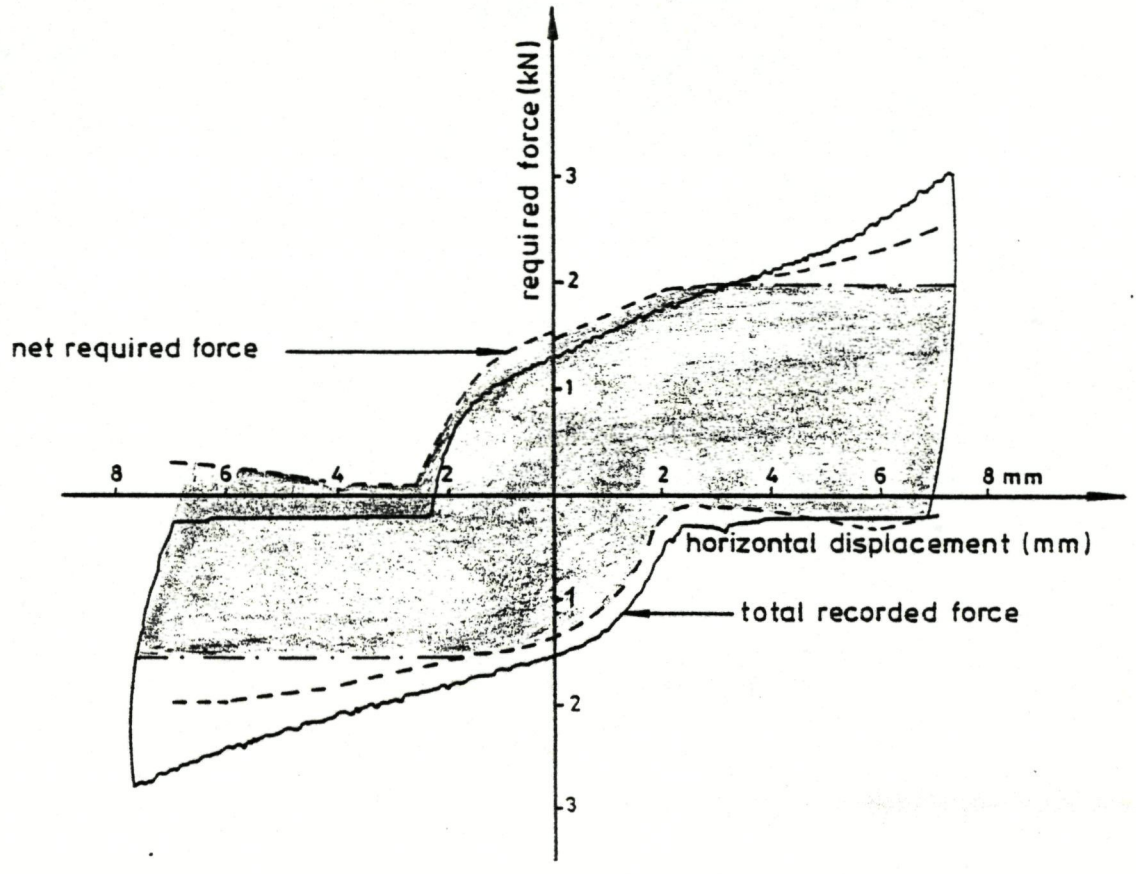
d.d.			
gec.	CO-263560		
get.	BIJL. 3	form.	A4



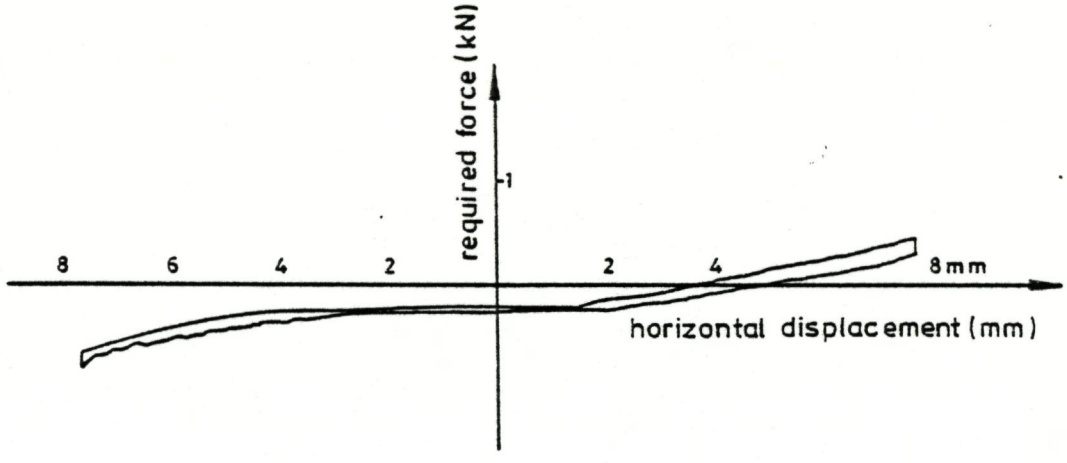




laboratorium voor grondmechanica delft telefoon: (015) - 56 92 23 telex: 38234 solab nl	d.d.	get.
GRONDWRIJVING LANGS BUISLEIDINGEN TERREINPROEF TE VILSTEREN SPANNINGEN EN VERPLAATSINGEN	CO-263560	gec.
	BIJL. 4	form. A4

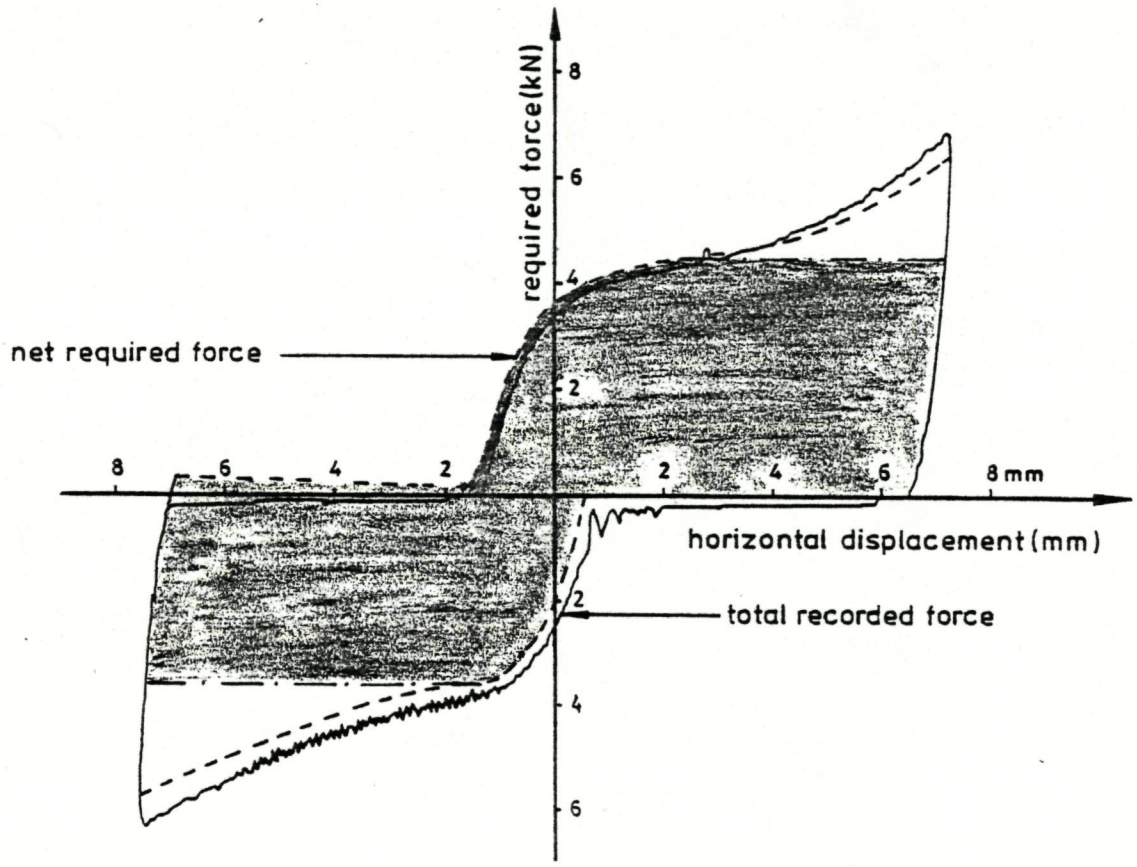


Detail of test cycle 10, including correction for calibration

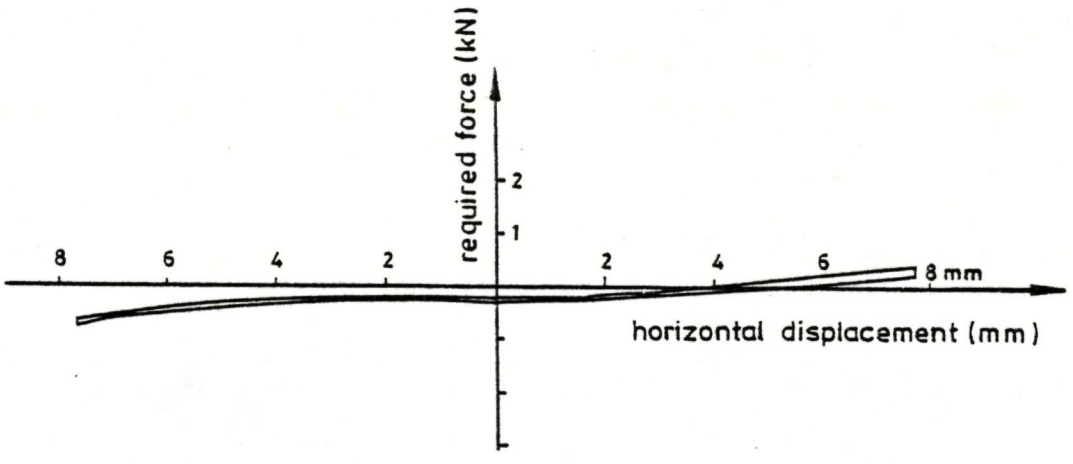


Detail of calibration test cycle

laboratorium voor grondmechanica delft telefoon: (015) - 56 92 23 telex: 38234 solab nl		d.d.	get.
GRONDWRIJVING LANGS BUISLEIDINGEN		CO-263560	gec.
LABORATORIUMPROEF SERIE 1 KRACHTEN EN VERPLAATSINGEN		BIJL. 5	form. A4



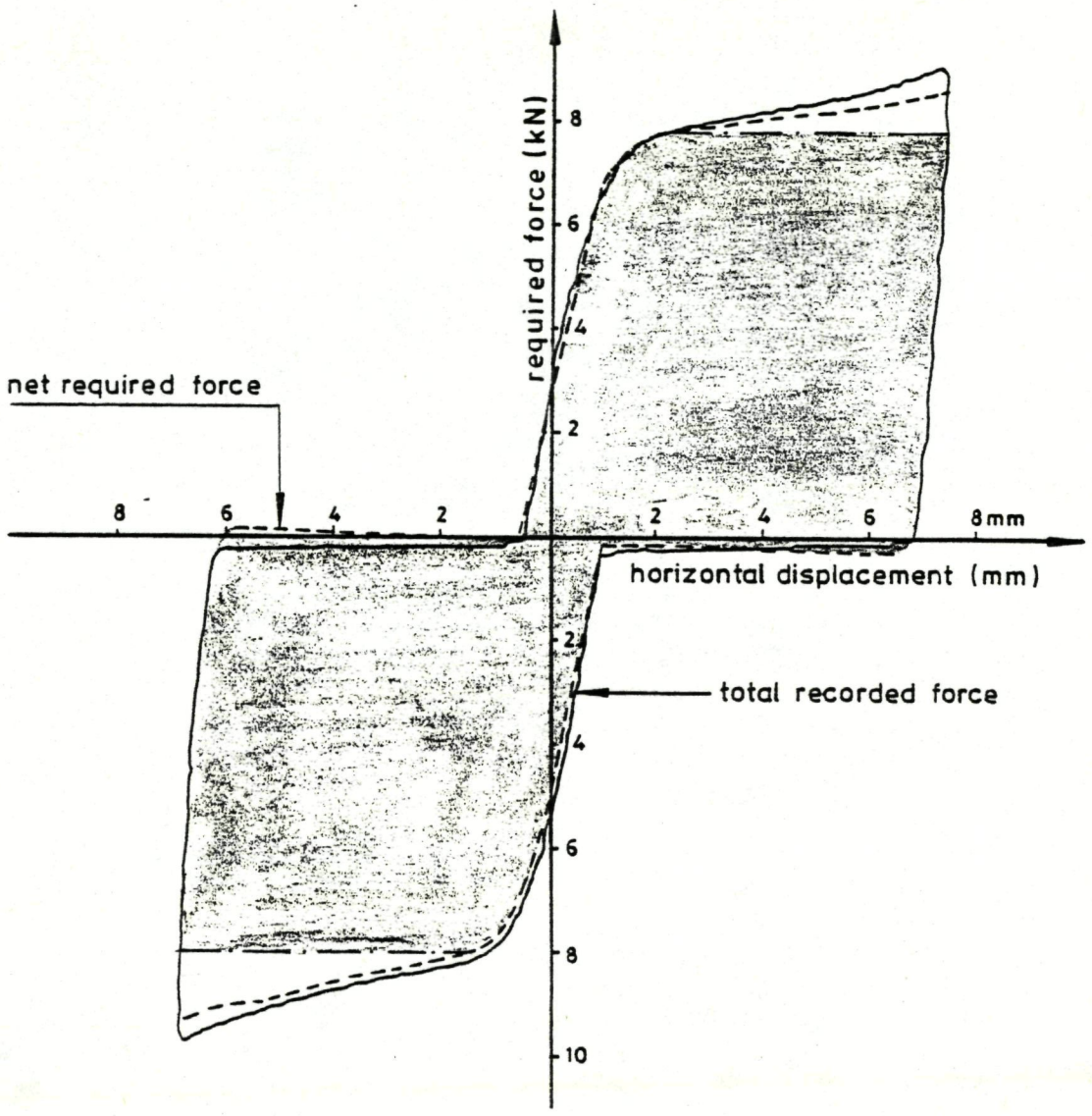
Detail of test cycle 10, including correction for calibration



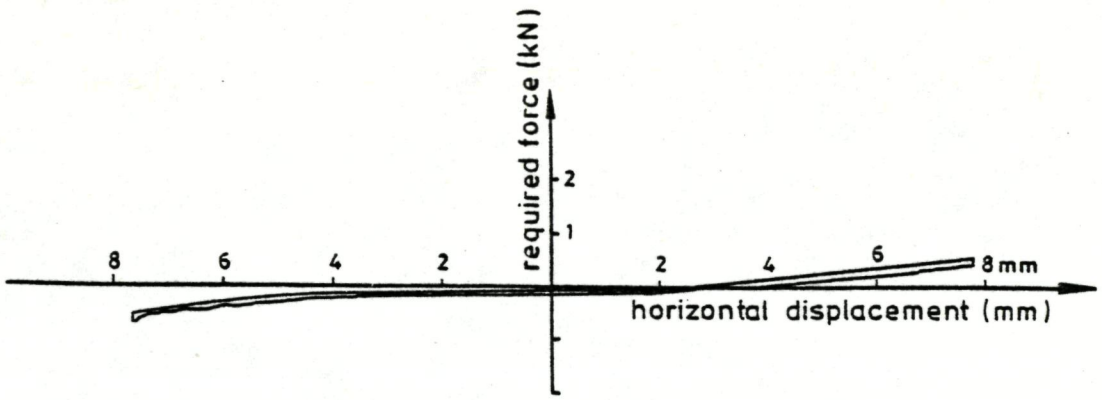
Detail of calibration test cycle

laboratorium voor grondmechanica delft
telefoon: (015) - 56 92 23
telex: 38234 solab nl

	d.d.	get.
GRONDWRIJVING LANGS BUISLEIDINGEN	CO-263560	gec.
LABORATORIUMPROEF SERIE 2 KRACHTEN EN VERPLAATSINGEN	BIJL. 6	form. A4



Detail of test cycle 10, including correction for calibration



Detail of calibration test cycle

laboratorium voor grondmechanica delft telefoon: (015) - 56 92 23 telex: 38234 solab nl		d.d.	get.
GRONDWRIJVING LANGS BUISLEIDINGEN		CO-263560	gec.
LABORATORIUMPROEF SERIE 3 KRACHTEN EN VERPLAATSINGEN		BIJL. 7	form. A4

Langswrijving in KN/m²

serie	grondsoort		losse pakking			dichte pakking		
		cyclus	1e	10e	50e	1e	10e	50e
1	O	min.	0,7	0,95	1,15	1,35	1,25	1,6
		max.	0,9	1,7	2,2	2,25	2,0	2,25
2	D	min.	2,7	2,8	3,0	3,1	3,05	3,4
		max.	4,1	4,6	5,3	—	4,5	4,75
3	2,5 D	gem.	niet uitgevoerd			5,6	5,45	5,9

Vergelijking met σ_n

pakking	verplaatsings-cyclus	serie	berekende σ_n in KN/m²	minimum langswrijving in KN/m²	tg δ	δ
los	1e	1	1,2	0,7	0,6	31°
"	"	2	3,55	2,7	0,75	37°
"	"	3	7,05	—	—	—
vast	10e	1	1,25	1,25	1,0	45°
"	"	2	3,85	3,05	0,8	38,5°
"	"	3	7,75	5,45	0,7	35°

laboratorium voor grondmechanica delft
telefoon: (015)-569223 telex: 38234 solab nl

d.d. | get.

GRONDWRIJVING LANGS BUISLEIDINGEN
LABORATORIUM OPSTELLING
RESULTATEN

CO-263560 | gec.

BIJL. 8 | form. A4

GRONDWRIJVING LANGS BUISLEIDINGEN

DIRECTE SCHUIFPROEVEN VOLGENS POTYONDY EN LITTLETON

laboratorium voor grondmechanica delft
telefoon: (015) - 569223 telex: 38234 solab nl

CO - 263560

BIJL. 9

	grondsoort (proef)	bijzonderheden		φ	staal oppervlak	δ	f_δ	c (KN/m²)	a (KN/m²)	f_a
Tabel I	zand	grof	droog	44°	ruw	34°	0,69			
					glad	24°	0,47			
(Potyondy)		"	verzadigd	38°	ruw	niet beproefd				
					glad	24°	0,57			
	silt	vastgepakt	droog	39,5°	ruw	38°	0,95			
					glad	31,5°	0,74			
		"	verzadigd	31,5°	ruw	niet beproefd				
					glad	23°	0,69			
	zand-klei 50-50%	vochtgehalte	w = 13 %	22°	ruw	18,5°	0,83	45	21	0,46
					glad	9,5°	0,41	45	5,1	0,11
		"	w = 15 %	19°	ruw	13°	0,66	25	14	0,56
					glad	8,5°	0,43	25	2,6	0,10
		"	w = 17 %	13°	ruw	10°	0,76	19	4,9	0,26
					glad	7,5°	0,57	19	0,5	0,03
	klei	geconsolideerd	w = 23 %	16,5°	ruw	10°	0,61	36	17	0,47
					glad	9°	0,55	36	10	0,27
			w = 26 %	11,5°	ruw	6°	0,52	22	13	0,58
					glad	6,5°	0,56	22	7	0,30
Tabel II	1a	geconsolideerd, gedraineerd	Kaoliniet	max. 19,5°	glad	max. 17,5°	0,89			
(Littleton)				rest 14,5°	"	rest 11,5°	0,58/0,79			
	1b	"	illiet	max. 20°	"	max. 18°	0,90			
				rest 14°	"	rest 11,5°	0,56/0,82			
	2a	geconsolideerd niet-gedraineerd	Kaoliniet	15°	glad	14°	0,92	9	0	0
	2b	"	illiet	max. 15°	"	max. 14	0,92	0	—	—
				rest 12,5°	"	rest 10,5	0,69/0,84	0	—	—
	3a	snel, (voorgeconsolideerd)	Kaoliniet	20°	glad	9°	0,43	2	8	4
	3b	"	illiet	max 1°	—	1°	—	25		
				rest 1°	"	1°	—	19	16	0,64/0,84

d.d. | get. | gec. | form. A4

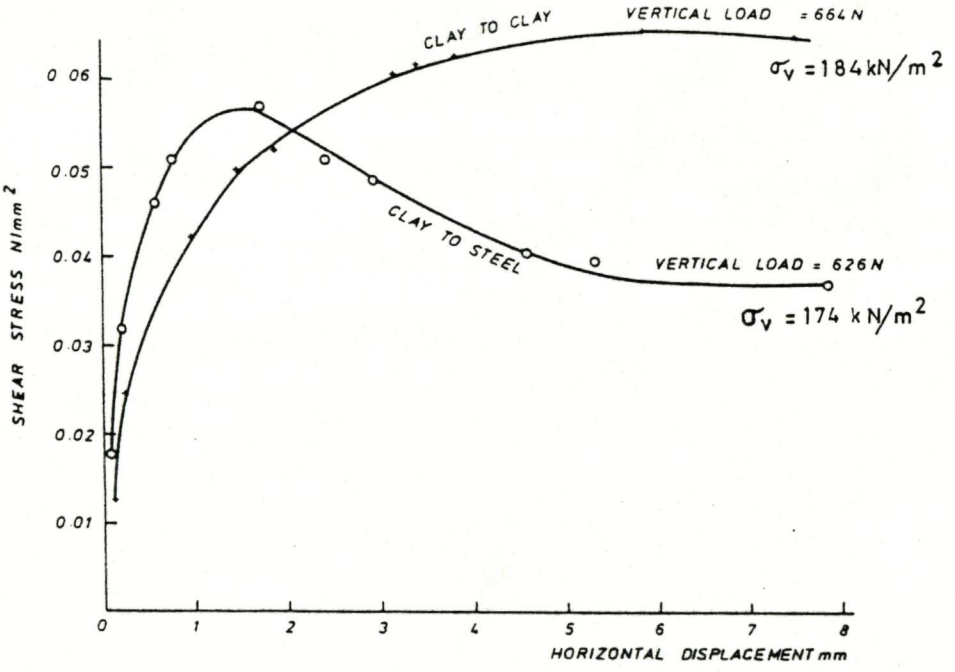


FIG. A Typical stress displacement curves for drained shear box test on illite for clay to clay and clay to steel.

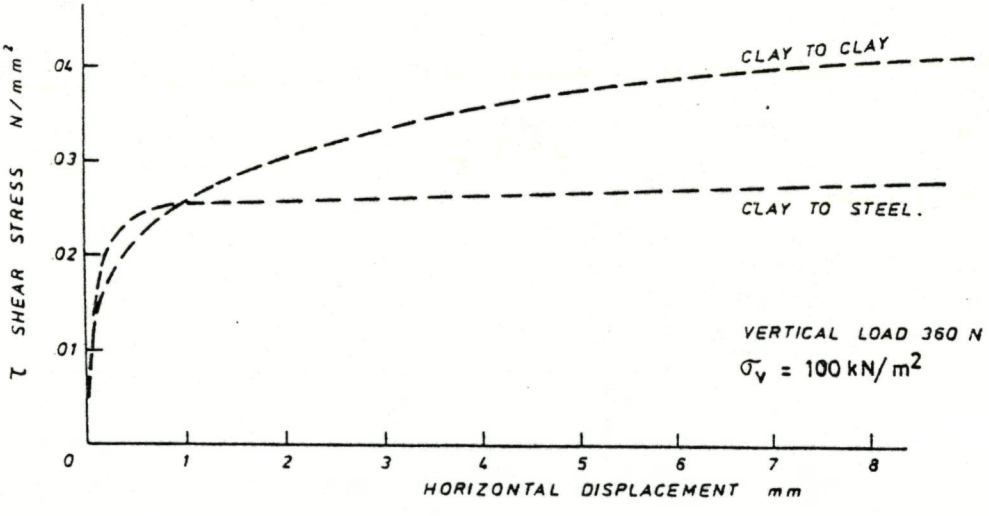
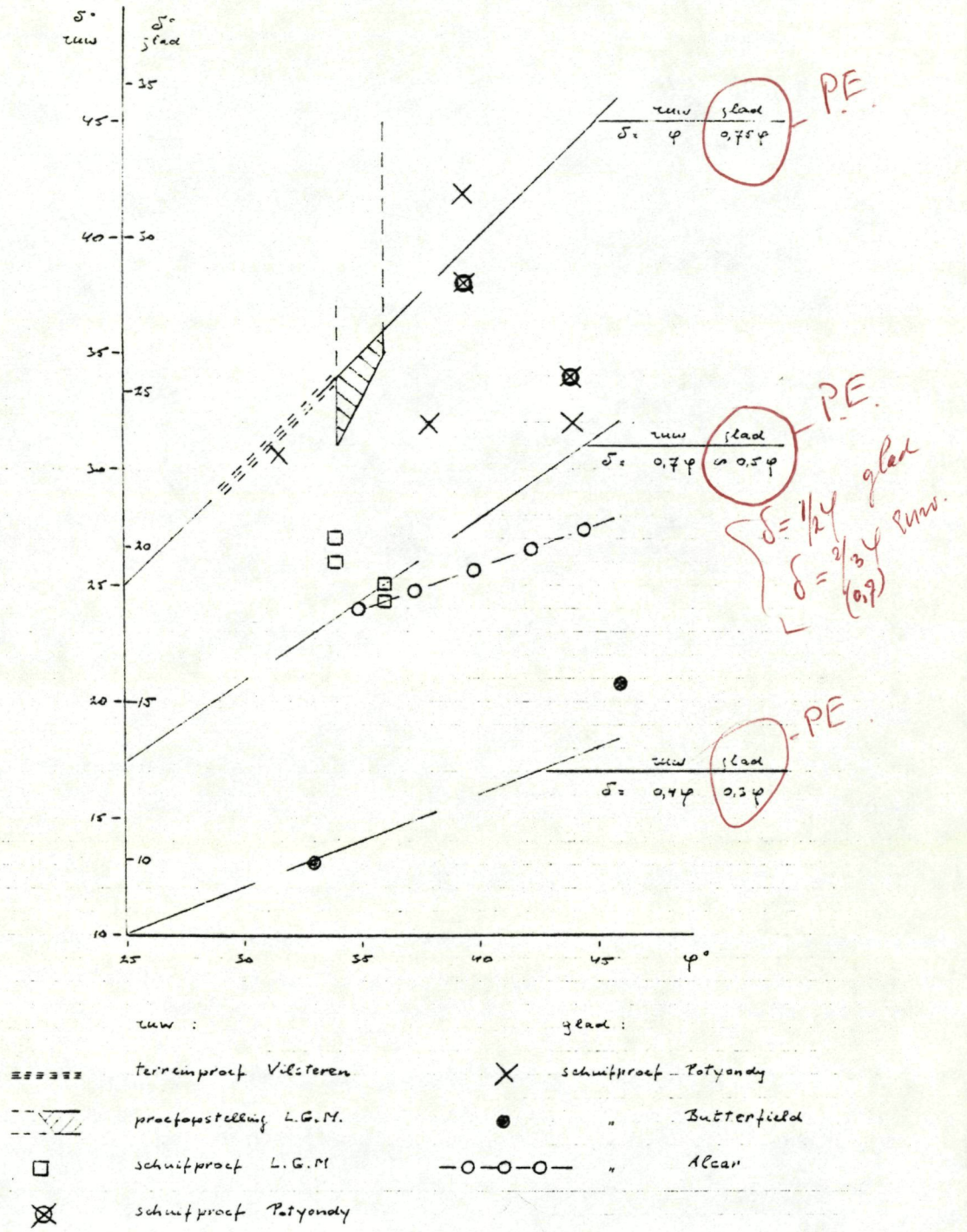


FIG. B Comparison of stress displacement curves for consolidated undrained shear box test for clay to clay and clay to steel (kaolinite), constant vertical load.

laboratorium voor grondmechanica delft
telefoon: (015) - 56 92 23 telex: 38234 solab nl

	d.d.	get.
GRONDWRIJVING LANGS BUISLEIDINGEN SPANNINGEN EN VERPLAATSINGEN BIJ KLEI (VOLGENS LITTLETON)	CO-263560	gec.
	BIJL. 10	form. A4



laboratorium voor grondmechanica delft telefoon: (015) - 56 92 23 telex: 38234 solab nl		d.d.	get.
GRONDWRIJVING LANGS BUISLEIDINGEN		CO-263560	gec.
VERBAND δ/φ VOOR PROEVEN IN ZAND		BIJL. 11	form. A4