



laboratorium voor grondmechanica delft
delft soil mechanics laboratory

S-76.039

4

S-76.03g

BUNDEL RAPPORTEN ONDERZOEK
INVLOED MIDDELSTE HOOFDSPANNING
OP SCHUIFWEERSTANDSEIGENSCHAP-
PEN VAN KLEI

december 1980

In deze bundel zijn de rapporten verzameld van de verschillende onderzoeken met betrekking tot de invloed van de middelste hoofdspanning op de schuifweerstandseigenschappen van klei.

Deze onderzoeken werden in opdracht van het Centrum Onderzoek Waterkeringen uitgevoerd in de periode 1977 - 1980 in het kader van de werkzaamheden van Werkgroep 3 (Materialen voor de dijkbouw) van de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen.

december 1980

Laboratorium voor Grondmechanica

INHOUD

- | | |
|---|-----|
| 1. Informatie omtrent onderzoeken | I |
| "Invloed middelste hoofdspinning" | |
| "Invloed anisotropie" | |
| CO-230660/8 | |
| CO-230670/7 | |
| } maart 1977 | |
| 2. Invloed middelste hoofdspinning op bezwijkgedrag van klei | II |
| Verslag literatuurstudie | |
| CO-230661/15 - december 1978 | |
| 3. Invloed middelste hoofdspinning op schuifweerstandseigenschappen van klei | III |
| CO-230660/1 - juni 1978 | |
| 4. Resultaten van de samendrukkingsproeven, welke uitgevoerd zijn op klei van lokatie 13-2 uit Empel en Gewande | IV |
| CO-230662 - januari 1979 | |
| 5. Invloed middelste hoofdspinning op schuifweerstandseigenschappen van klei (Empel en Gewande) | V |
| CO-230662/10 - september 1979 | |

INFORMATIE OMTRENT ONDERZOEKINGEN:

- "Invloed middelste hoofdspinning"
- "Invloed anisotropie"

Informatie omtrent onderzoeken:

"Invloed middelste hoofdspinning"

"Invloed anisotropie"

In opdracht van:

Centrum voor Onderzoek Waterkeringen

CO-230660/8

CO-230670/7

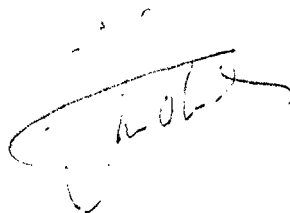
maart 1977

Dit rapport is samengesteld door Ir. J. Lindenberg.
Behandeld worden de verschillende aspecten, die verband houden met een vlakke vormveranderingstoestand zoals die bij het bezwijken van een dijk zal optreden en de triaxiale vormveranderingstoestand van de normale beproevingsmethoden.
Ook wordt de invloed van eventuele anisotropie in de beschouwingen betrokken.

Delft, maart 1977.

A handwritten signature in dark ink, appearing to read 'Heijnen', written over a horizontal line.

Ir. W.J. Heijnen.

A handwritten signature in dark ink, appearing to read 'Lindenberg', written over a horizontal line.

Ir. J. Lindenberg.

"Invloed middelste hoofdspinning"

"Invloed anisotropie"

Inhoud

	blz.
1. Inleiding	1
2. Toelichting achtergronden	2
2.1. Invloed middelse hoofdspinning	4
2.2. Invloed anisotropie	10
3. Korte beschrijving ISC-opstelling	15
4. Voorstel proevenprogramma	18
5. Enkele belangrijke aspecten betreffende het proeven- programma, de uitvoering en de interpretatie ervan	21
6. Slotopmerkingen	26

Notaties

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ resp. grootste, middelste en kleinste totale hoofdspanning

$\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3$ idem voor effectieve hoofdspanningen

u waterspanning

$\sigma = \sigma' + u$

σ'_V, σ'_H vert., resp. hor. korrelnormaalspanning
(in triaxiaal- en plane-strainapparaat zijn σ'_V en σ'_H tevens hoofdspanningen)

τ schuifspanning

τ_f, σ'_n grensschuifspanning resp. normaalspanning op glijvlak

ϕ hoek van inwendige wrijving } parameters Mohr-Coulomb criterium
 c cohesie } m.b.t. effectieve spanningen

$\sigma'_1 = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3}{3}$ gemiddelde effectieve normaalspanning

$p = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2}$ }
 $q = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2}$ } spanningspad grootheden

$b = \frac{\sigma'_2 - \sigma'_3}{\sigma'_1 - \sigma'_3}$ maat voor het uitdrukken van de relatieve grootte van de middelste hoofdspanning

α hoek tussen glijvlakrichting en horizontale richting

β hoek waarover de oorspronkelijk verticale richting in het terrein geroteerd is in de proefopstelling

1. Inleiding

In dit verslag wordt technische informatie gegeven omtrent de 2 COW onderwerpen

CO-230660 Invloed middelste hoofdspinning

CO-230670 Invloed anisotropie.

In beide gevallen wordt gedacht aan de invloed ervan op de resultaten van proeven op kleimonsters. Voorlopig wordt alleen gezocht naar de grootte van beide invloeden op het bezwijkgedrag d.w.z. op de bezwijkparameters c en ϕ . De verschillen in spannings-rek gedrag worden niet intensief geëvalueerd.

Er komen 3 aspecten aan de orde. Allereerst worden de achtergronden belicht die tot de opzet van de 2 onderzoeken hebben geleid. Uitgegaan wordt daarbij van de glijvlakberekening waardoor een snelle begripsvorming mogelijk wordt.

Als 2^e punt wordt nagegaan op welke wijze de grootte van de 2 invloeden kunnen worden achterhaald. Dit resulteert in enkele proevenseries, uit te voeren in het triaxiaal- en ISC-apparaat. Tenslotte worden enkele opmerkingen gemaakt over de praktische uitwerking van het geheel. Waar moeten de monsters vandaan komen, op welke wijze moeten ze worden geconditioneerd, met welke snelheid dienen de proeven te worden uitgevoerd, hoe moeten ze worden geïnterpreteerd?

2. Toelichting achtergronden

Voor verschillende typen praktijkproblemen worden bezwijkberekeningen uitgevoerd, die meestal gebaseerd zijn op effectieve spanningen in de grond.

Voor het beoordelen van de stabiliteit van dijken wordt vrijwel steeds gebruik gemaakt van een glijvlakberekening. Hierbij wordt voor een aantal opgegeven cirkelvormige doorsnijdingen van het dwarsprofiel nagegaan wat de veiligheidsfactor is, uitgaande van bekende bezwijkparameters c en ϕ voor de grond.

Het door het cirkelvormige glijvlak doorsneden deel wordt in een aantal verticale lamellen verdeeld. Per lamel wordt aangenomen dat de verhouding τ/σ'_n die op het door de lamel doorsneden deel van het glijvlak werkt maximaal is en gelijk aan

$$(1) \quad \tau = \tau_f = \sigma'_n \operatorname{tg} \phi + c$$

De grootte van τ_f en σ'_n wordt verkregen met σ'_v , d.w.z. uit het gewicht van de lamel. De wijze waarop dit wordt gedaan of anders gezegd de aannamen die daarbij noodzakelijk zijn worden hier niet beschreven.

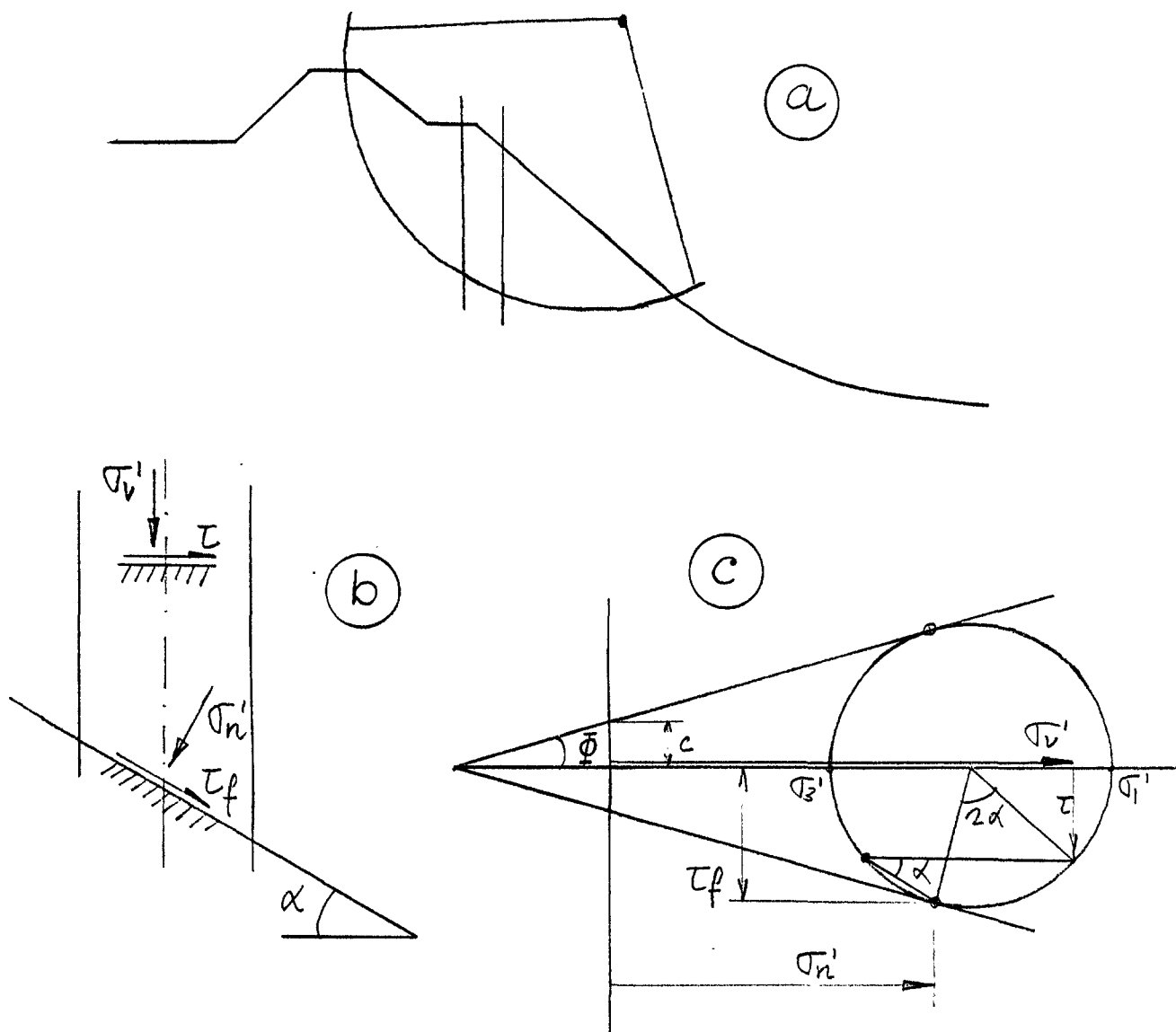
Ook hoe men tot een veiligheidsfactor kan geraken valt buiten het bestek van dit verslag.

Voor het huidige onderzoek is de grootte van ϕ en c en de manier waarop beiden bepaald worden, van belang. Meestal worden ze verkregen uit triaxiaaldrukproeven of celproeven.

3 belangrijke kenmerken van dit type proeven zijn:

- a - de grootste hoofdspanning σ'_1 is steeds verticaal
- b - de middelste hoofdspanning is altijd even groot als de kleinste ofwel $\sigma'_2 = \sigma'_3$.

Beide kenmerken gelden zowel voor de totale als voor de effectieve spanningen.



Figuur 1

- c - Omdat de monsters verticaal gestoken zijn komt de richting van de grootste hoofdspanning in het triaxiaalapparaat overeen met de verticale richting in het terrein.

De mogelijke consequenties van de randvoorwaarden a en b voor de grootte van de bezwijkgrootheden c en ϕ worden onder 2.1. "Invloed middelste hoofdspanning" besproken. De gevolgen die het samenvallen van de bij c genoemde 2 richtingen kunnen hebben voor de uitkomsten worden in 2.2. "Invloed anisotropie" behandeld.

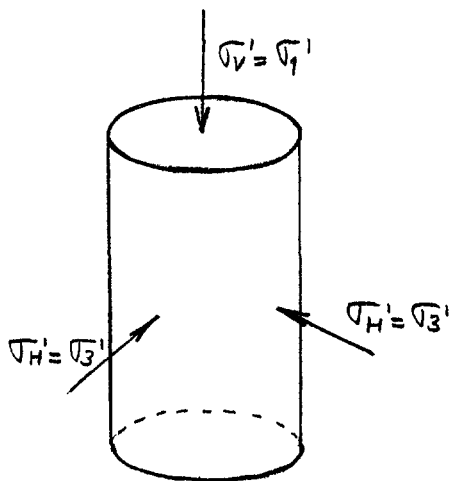
2.1. Invloed middelste hoofdspanning

Bij zowel een cel- als triaxiaalproef kan het bezwijken worden gedefinieerd uitgaande van een juist ontoelaatbare deformatie of deformatiesnelheid of gebaseerd op het bereiken van een topwaarde in de deviatorspanning.

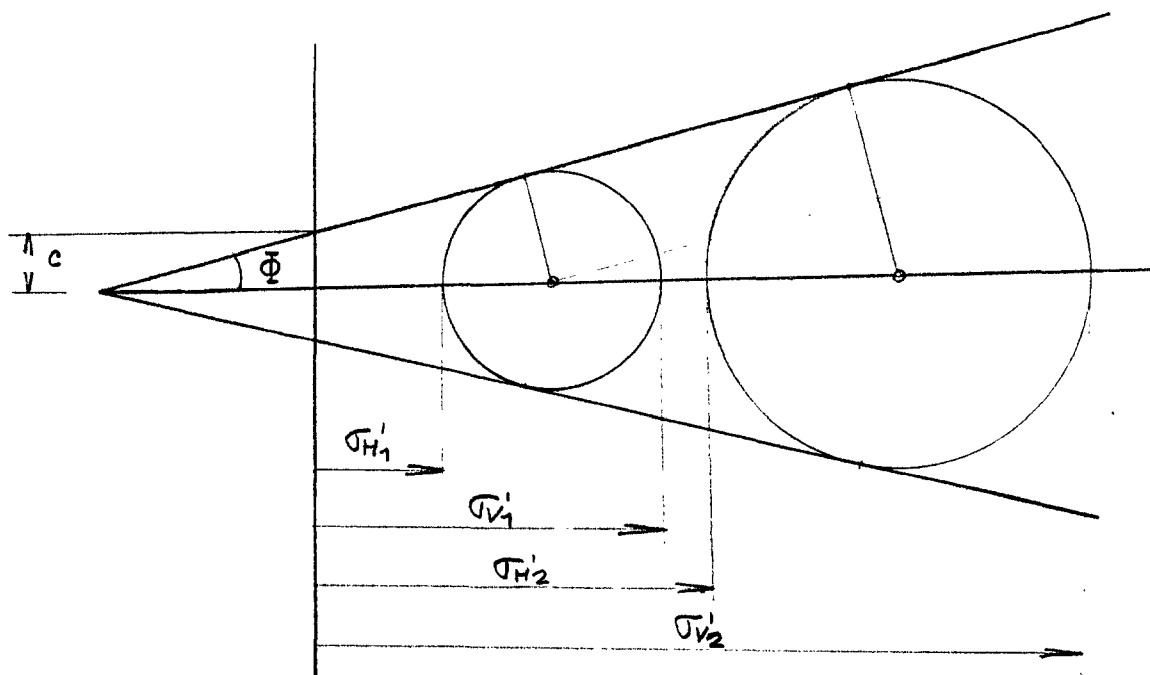
De verschillen in omstandigheden tijdens beide typen axiaalsymmetrische proeven hebben tot gevolg dat deze definities in het algemeen niet dezelfde zullen zijn. Met de spanningen $\sigma'_V = \sigma'_1$ en $\sigma'_H = \sigma'_3$ op het moment van bezwijken kunnen de bezwijkgrootheden

worden bepaald.

Omdat bij cohesieve gronden sprake is van 2 onbekenden c en ϕ dient de bezwijkweerstand bij minstens 2 normaalspanningsniveau's bekend te zijn.



Figuur 2



Figuur 3

Met de grenswaarden σ_{H1}' , σ_{V1}' , σ_{H2}' en σ_{V2}' uit 2 proeven of uit 1 proef met 2 trappen, kan ϕ en c worden berekend, volgens

$$(2) \quad \phi = \arcsin \frac{\sigma_{V2}' - \sigma_{H2}' - \sigma_{V1}' + \sigma_{H1}'}{\sigma_{V2}' + \sigma_{H2}' - \sigma_{V1}' - \sigma_{H1}'}$$

$$(3) \quad c = \frac{\sigma_{V1}' - \sigma_{H1}'}{2 \cos \phi} - \frac{\sigma_{H1}' + \sigma_{V1}'}{2} \operatorname{tg} \phi$$

In deze uitdrukkingen komen per bezwijktoestand slechts 2 hoofdspansingen voor. Dit is een gevolg van de aanname dat het Mohr Coulomb bezwijkcriterium geldig is, dat zegt dat alleen de grootte van de 2 extreme hoofdspansingen bepalend zijn voor het optreden van bezwijken. De vraag is nu of dit laatste correct is, of anders gezegd: blijven ϕ en c , berekend met de grootste en kleinste hoofdspanning

volgens (2) en (3), dezelfde, wanneer de middelste hoofdspanning σ'_2 toeneemt vanaf $\sigma'_2 = \sigma'_3$ (cel- of triaxiaaldrukproef) tot $\sigma'_2 = \sigma'_1$. Een antwoord op deze vraag is belangrijk vanwege het feit dat de spanningstoestand voor en tijdens afschuivingen in het terrein vaak nagenoeg plane-strain mag worden verondersteld waarbij σ'_2 groter dan σ'_3 zal zijn.

Hierna zal de grootte van de σ'_2 door middel van de parameter b worden uitgedrukt in σ'_1 en σ'_3 volgens

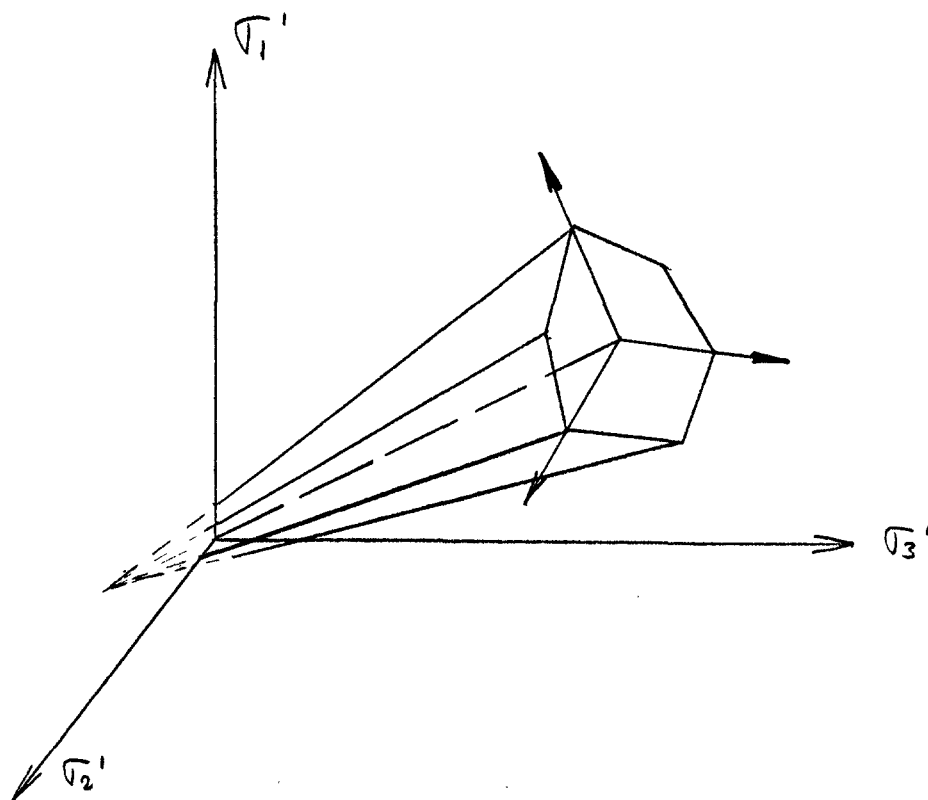
$$(4) \quad b = \frac{\sigma'_2 - \sigma'_3}{\sigma'_1 - \sigma'_3}$$

Voor de cel- en triaxiaaldrukproef geldt dus $b = 0$. Tijdens de triaxiaaltrekproef waarbij $\sigma'_2 = \sigma'_1$ (met de kleinste hoofdspanning σ'_3 in verticale richting) is $b = 1$ van toepassing.

Bij de vlakke vervormingstoestand wordt σ'_2 bepaald door de voorwaarde $\varepsilon_2 = 0$ en σ'_2 kan wanneer de schuifspanning relatief laag is elke waarde innemen tussen σ'_1 en σ'_3 .

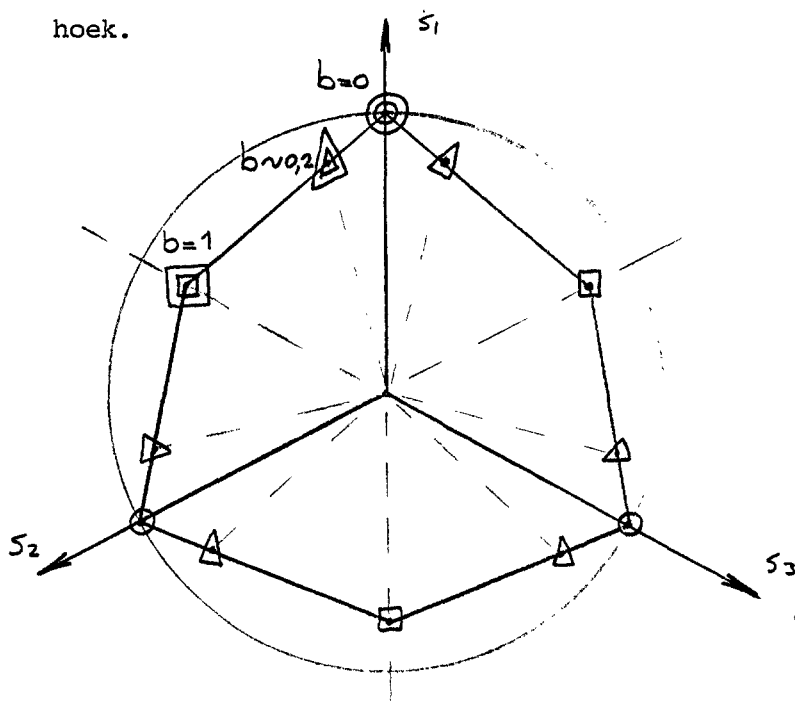
Wordt echter de schuifspanning opgevoerd tot in de bezwijkzone dan zal b een waarde innemen tussen 0,1 en 0,5 m.a.w. tijdens bezwijken zal σ'_2 altijd groter zijn dan de kleinste hoofdspanning σ'_3 .

In de 3-dimensionale hoofdspanningsruimte kan het Mohr-Coulomb criterium worden weergegeven door een zeskantige kegel met de ruimte diagonaal als kegelas.



Figuur 4

De doorsnijding met het deviatorvlak geeft een onregelmatige zes-hoek.



De punten aange-
geven met $\odot$ geven
de 3 mogelijke
toestanden van de
cel- of triaxiaal-
drukproef weer.

Figuur 5

De met $\square$ en Δ omgeven punten staan voor de triaxiaaltrekproef, respectievelijk ongeveer de plane-strain proef. Elk punt op de zeshoek geeft eenzelfde combinatie van ϕ en c weer (of bij $c = 0$ dezelfde ϕ).

Omdat het deviatorvlak een vlak met constante $\sigma'_1 = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3}{3}$ is zijn de grootste en kleinste hoofdspanning voor al deze punten niet gelijk. Toch is deze manier van weergeven overzichtelijk wanneer grensspanningstoestanden met variërende b moeten worden beoordeeld.

Vooraf verschillen tussen het Mohr-Coulomb criterium en andere, in de grondmechanica minder vaak gebruikte, criteria komen duidelijk naar voren.

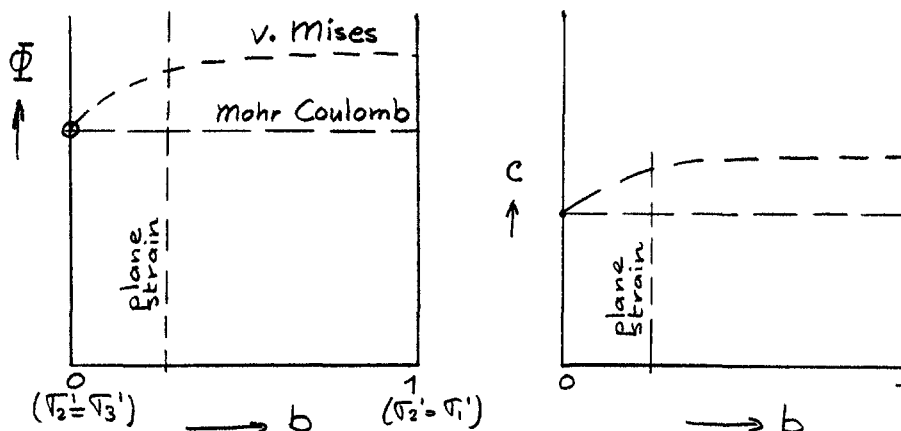
De in de figuur getekende cirkel b.v. geeft de doorsnijding van het deviatorvlak met het kegelvormige vonMises criterium.

Bij dit von Mises criterium, dat soms in de plasticiteitsleer wordt gehanteerd, is de bezwijkweerstand afhankelijk van de grootte van alle 3 de hoofdspanningen. Een relatief hogere σ'_2 ($b > 0$) geeft hierbij een grotere schuifweerstand of in Mohr-Coulomb termen gesproken een hogere ϕ .

Wanneer de grootte van de cirkelstraal eveneens wordt vastgelegd aan een cel- of triaxiaaldrukproef (cirkel gaat door de met $\odot$ aangegeven punten) dan is het in de figuur duidelijk dat het von Mises criterium t.o.v. het Mohr-Coulomb criterium hogere bezwijkweerstand verwacht voor spanningstoestanden met $b > 0$.

Voor σ'_1 , σ'_2 en σ'_3 gelijk aan respectievelijk de grootste, middelste en kleinste hoofdspanning geven de in de figuur 5 met $\odot$, Δ en $\square$ aangegeven punten de resultaten van een cel- of triaxiaaldrukproef, plane-strain proef en triaxiaaltrekproef weer.

De proefresultaten kunnen ook op de volgende wijze worden uitgezet (resultaten van 2 proeven bij verschillend normaalspanningsniveau beschikbaar).



Figuur 6

De hoogte van de horizontale lijn die Mohr-Coulomb's gedrag aangeeft kan worden vastgesteld met een cel- of triaxiaalproef. Uitgaande van dit punt kan de von Mises relatie worden bepaald. (De vorm van de von Mises lijn is namelijk afhankelijk van de grootte van Φ resp. c bij een celproef).

Invullen van b.v. ISC-proefresultaten in deze 2 diagrammen zal dan de werkelijke lijn opleveren, waarbij vooral de hoogte van de punten uit een plane-strain proef van belang is voor de praktijk.

Uit de literatuur zijn meerdere pogingen bekend om een relatie te leggen tussen bezwijkgrootheden verkregen uit triaxiaal en plane-strain proeven. In het algemeen wordt geconcludeerd dat de plane-strain bezwijkweerstand gelijk of iets groter is dan die volgens triaxiaaldrukproeven. Meestal wordt dit verschil uitgedrukt in ongedraineerde parameters. Wanneer geen verloop van de water-spanning is gemeten dan kan geen uitspraak worden gedaan over een verschil in Φ en/of c waarde, gebaseerd op effectieve spanningen.

In de gevallen dat de waterspanning wel gemeten is wordt gevonden dat $\phi_{p.s.}$ gelijk of iets hoger is dan $\phi_{t.r.}$.

Vaak zijn de door verschillende onderzoekers gevonden resultaten niet met elkaar in overeenstemming.

Waarschijnlijk is dit een gevolg van de verschillen in gebruikte plane-strain apparatuur, de afwijkingen in proefprocedures en de soms sterk afwijkende eigenschappen van de onderzochte klei-monsters. In een volgende informatie zal dieper worden ingegaan op de belangrijkste in de literatuur gevonden aspecten.

2.2. Invloed anisotropie

Tijdens cel- en triaxiaaldrukproeven is de grootste hoofdspanning σ'_1 verticaal gericht en omdat de monsters verticaal gestoken zijn, komt deze richting overeen met de verticale richting in het terrein. Uitgaande van Mohr-Coulombs gedrag kan worden gevonden dat de glijrichting van een bezwijkend monster in het cel- of triaxiaalapparaat een hoek van $\alpha = (45 + \phi/2)$ met het horizontale vlak moet maken. Aannemende dat ϕ_{max} voor klei ongeveer 30° is, betekent dit dat de uiterste waarden voor α 45° ($\phi = 0$) en 60° ($\phi = 30^\circ$) zullen zijn, d.w.z. in de proefopstelling is slechts een kleine range van schuifvlakrichtingen mogelijk.

Tijdens een afschuiving in de natuur zijn glijvlakoriëntaties tussen 0 en 90° mogelijk (zie figuur 1a).

Wanneer nu de opneembare schuifweerstand, uitgedrukt in de parameters c en ϕ , afhankelijk is van de richting van het glijvlak t.o.v. de verticale richting, of anders gezegd wanneer de grond zich anisotroop gedraagt, dan zijn de met cel- en triaxiaalproeven bepaalde c en ϕ waarden niet correct voor glijvlakrichtingen afwijkend van de schuifvlakrichting in de proefopstelling.

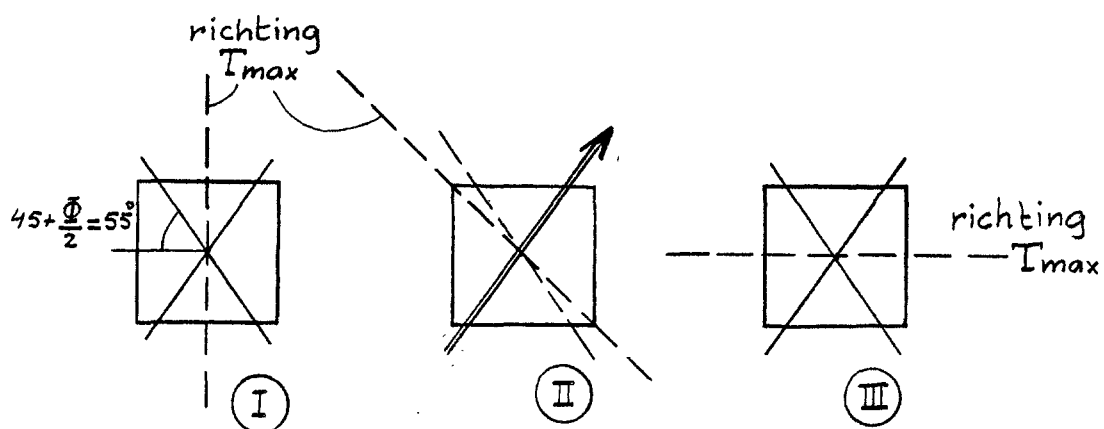
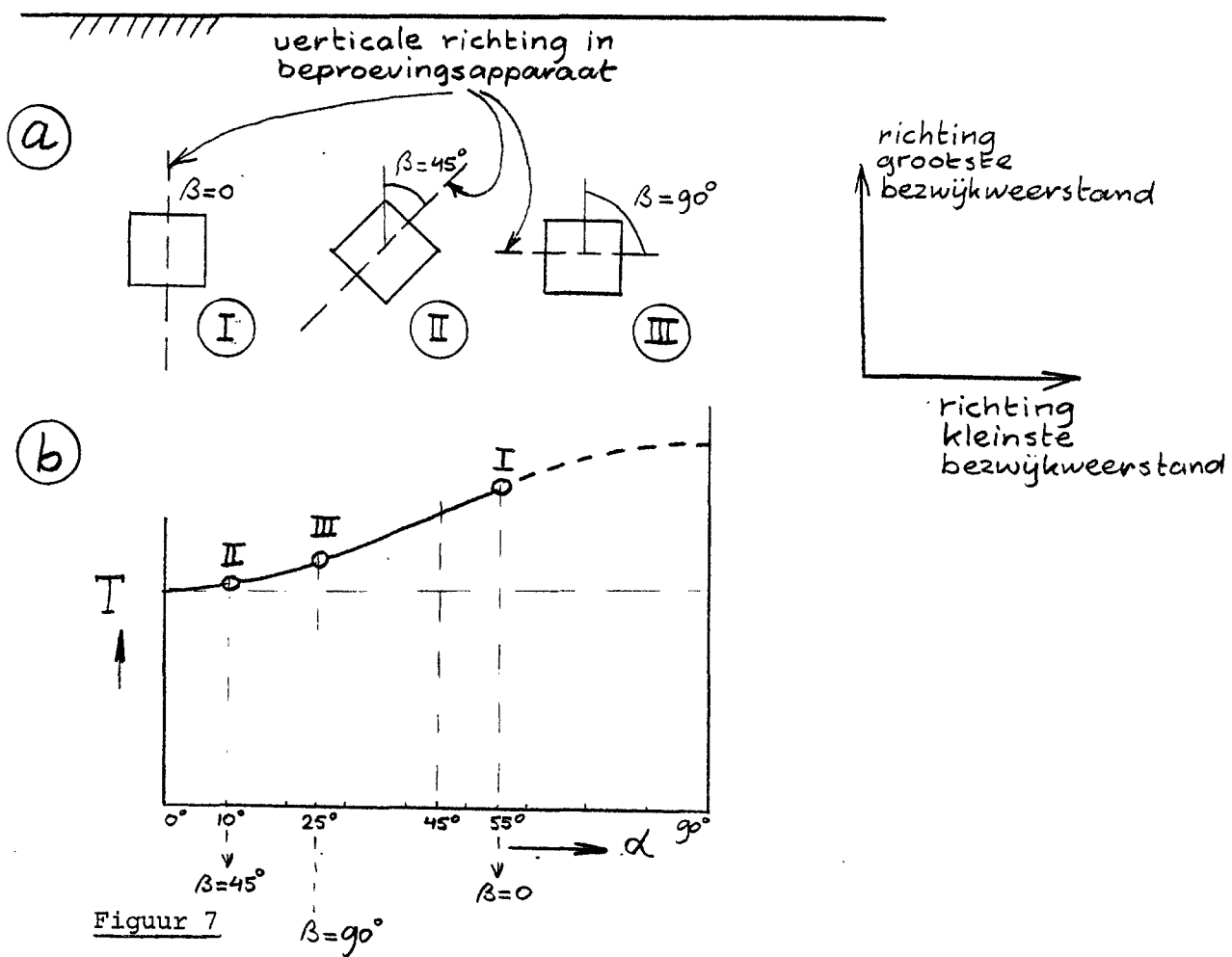
We kunnen nu denken aan 2 soorten richtingsafhankelijk gedrag. Allereerst werkelijke anisotropie, d.w.z. het materiaal, dat homogeen van samenstelling is, vertoont verschillende stijfheids- en wrijvingseigenschappen bij draaiing van de hoofdspanningsrichtingen. Daarnaast kan worden gedacht aan gelaagde grond. De richtingsafhankelijkheid is hierbij het gevolg van de niet-homogene samenstelling en niet van anisotropie.

De uit een proef op een gelaagd monster volgende bezwijkgrootheden ϕ en c zullen een soort gemiddelde zijn van de ϕ en c waarden van de afzonderlijke grondsoorten waaruit het monster bestaat.

Het huidige onderzoek richt zich op de eerstgenoemde soort richtingsafhankelijkheid, dus op de werkelijk anisotrope materiaaleigenschappen.

In de literatuur wordt wel gesteld dat anisotrope eigenschappen het gevolg kunnen zijn van een voorkeursrichting van de kleideeltjes. Hierdoor zal er een richting kunnen zijn waarin een schuifvlak het moeilijkst tot ontwikkeling te brengen is en een richting waarin dit met de minste schuifweerstand gepaard gaat.

Wanneer we aannemen dat voor een verticaal gericht glijvlak in het terrein de meeste schuifweerstand T nodig is, voor een horizontaal vlak de minste en dat voor glijvlakoriëntaties tussen 0 en 90° tussengelegen waarden voor T vereist zijn, dan is het in principe mogelijk deze verschillen te vinden door dezelfde soort proeven te doen op monsters waarvan de oorspronkelijk verticale richting in het terrein een verschillende hoek β maakt met de verticale monsteras in de proefopstelling.



Figuur 8

In figuur 8 zijn voor 3 monsters met β resp. 0° , 45° en 90° de mogelijke glijvlakrichtingen α getekend bij aanname $\phi = 20^\circ$ (variaties in ϕ zijn klein verondersteld).

Bij monsters I en III zal er geen voorkeur bestaan voor één van beide glijvlakken omdat voor glijden in beide richtingen (uitgaande van figuur 7b) dezelfde relatieve schuifspanning nodig is.

Wel zal de bezwijkweerstand bij monster I hoger zijn als bij monster III. Punten I en III in figuur 7b zijn nu bekend.

Monster II zal echter bezwijken in de richting die het meest overeenkomt met de zwakste richting. Dit geeft punt II in figuur 7b. Ook voor alle andere monsterrotaties β tussen 0 en 90° zal er een voorkeursglijrichting zijn. Het gevolg is dat de maximale schuifweerstand voor $\alpha = 90^\circ$ nooit gevonden kan worden uit triaxiaal- of plane-strain proeven waarbij altijd keus is uit 2 glijvlakrichtingen. In de natuur bij het tot ontwikkeling komen van een glijvlak wordt de richting echter ook nog door een continuïteitsvoorwaarde bepaald, die er voor zorgt dat de maximale schuifweerstand kan worden aangesproken.

Vanzelfsprekend kunnen over anisotropie nog veel diepgaander, meer theoretische, beschouwingen worden opgezet.

Omdat het hier een oriënterend onderzoek betreft zal dit niet worden gedaan. Voorlopig is het doel van het onderzoek alleen het vaststellen van een eventueel aanwezige belangrijke invloed van anisotropie op het bezwijkgedrag.

Hiervoor is de hierna in hoofdstuk 3 voorgestelde proevenserie in principe voldoende.

De juiste grootte van de invloed kan dan later worden bepaald, gebaseerd op een fundamentele beschouwing over anisotropie.

In de literatuur wordt in vele gevallen een aanzienlijke invloed van anisotropie gerapporteerd.

Ook hier wordt deze invloed vaak in ongedraineerde parameters uitgedrukt. Afhankelijk van de kleisoort blijkt soms een verticaal gestoken monster sterker, in andere gevallen een horizontaal gestoken monster. Vrijwel steeds werden de proeven uitgevoerd in het triaxiaalapparaat. Ook voor het onderwerp anisotropie zal in een later stadium een literatuuroverzicht worden samengesteld.

3. Korte beschrijving ISC proefopstelling

Het eerste ontwerp van het Independent Stress Control apparaat is afkomstig van Imperial College, Londen.

Het LGM heeft sinds enkele jaren 2 van deze apparaten in bedrijf, een derde wordt momenteel opgebouwd en zal over enkele maanden gereed zijn voor proefnemingen op grondmonsters.

In een perspex cel met inwendige diameter van 35 cm wordt een blok-vormig monster met afmetingen ca 8,5 x 8,5 x 5,5 cm opgebouwd (zie figuur 9). De verticale zijvlakken van het monster zijn begrensd door een rubberzak. In verticale en in één horizontale richting is het monster opgesloten tussen starre platen. De laatste 2 platen worden beltplaten genoemd.

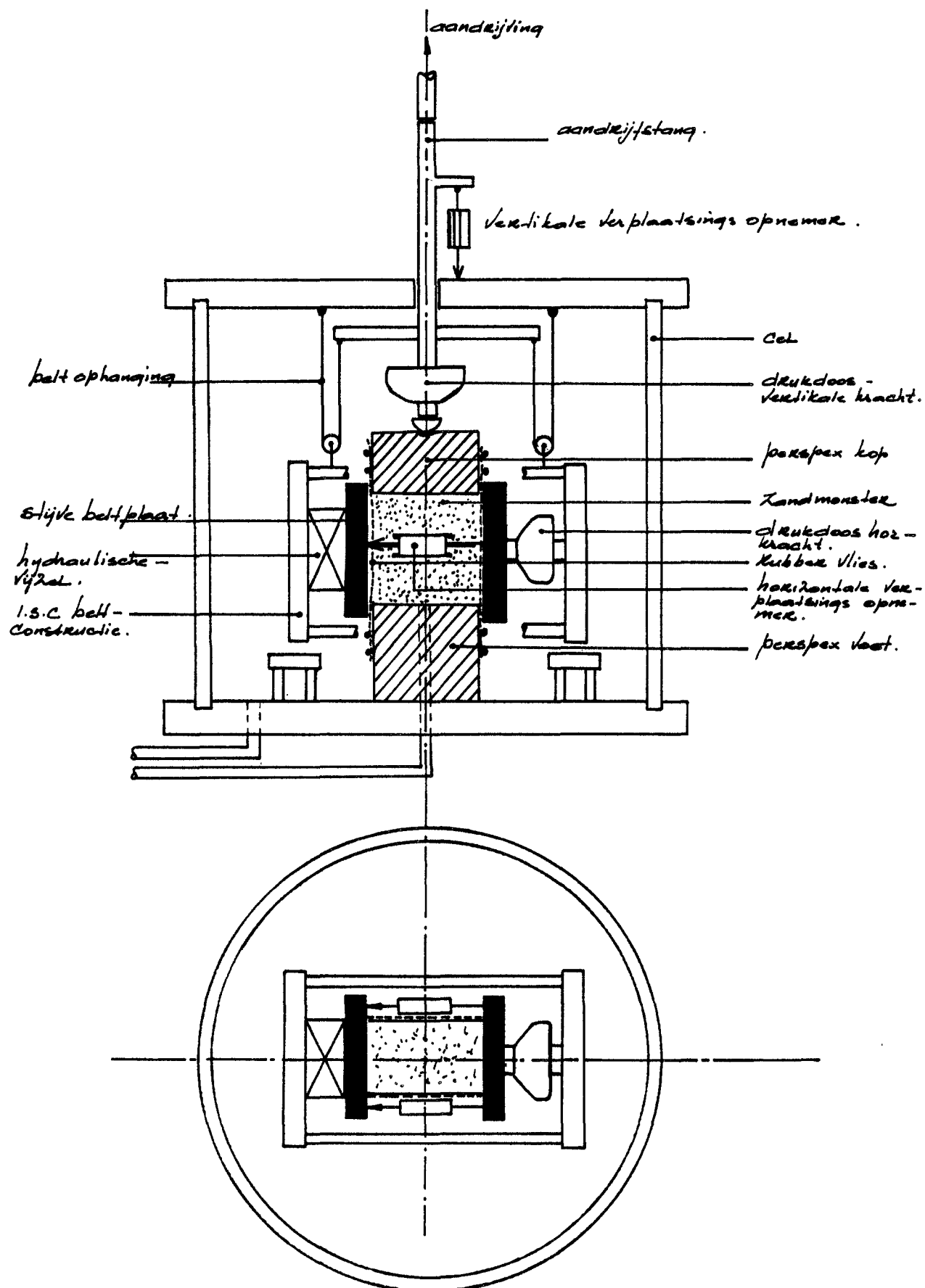
Tussen monster en platen zijn smeerlagen aangebracht om te voorkomen dat zich hier onaanvaardbaar grote schuifspanningen kunnen ontwikkelen. In de tweede horizontale richting met afmetingen 5,5 cm is de rubberzak direct in contact met het celwater.

In het ISC-apparaat is het in principe mogelijk de bovenste horizontale plaat met een te kiezen snelheid naar boven of naar beneden te laten bewegen en tegelijkertijd de beltplaten met een andere snelheid naar elkaar toe of (tot op zekere hoogte) van elkaar af te laten bewegen.

Met de celspanning als 3^e variabele kan dan vrijwel elk gewenst spanningspad (of vervormingspad) in de 3 dimensionale spanningsruimte (of vervormingsruimte) worden opgelegd. Tot nu toe zijn met de 2 in het LGM beschikbare apparaten alleen plane-strain proeven uitgevoerd.

Het niet tegen het monster plaatsen van de beltplaten heeft tot gevolg dat de celspanning in beide horizontale richtingen werkt zodat de spanningstoestand overeenkomstig die van een triaxiaal-proef is.

Tijdens de proef worden alle van belang zijnde grootheden elektrisch gemeten (verticale kracht, beltcracht, verticale verplaatsing, belt-verplaatsing, celdruk, waterspanning in het monster, volumeverandering).



Figuur 9

De signalen worden steeds binnen een te kiezen tijdsinterval (min. ca 20 sec) met een ADDO getallendrukker afgetast en vastgelegd op een papierstrook en een ponsband.

De meetgegevens op de ponsband worden tesamen met een invoerlijst waarin o.a. monsterafmetingen en correctietabellen zijn opgenomen, in de computer ingevoerd waar ze door een verwerkingsprogramma tot direkt bruikbare spanningen en deformaties worden omgerekend.

Een meer uitgebreide beschrijving van de proefopstelling is te vinden in de publicatie van G.E. Green "Strength and deformation of sand measured in an Independent Stress Control cell" Proc. Roscoe Memorial Symposium blz. 285-323, maart 1971.

4. Voorstel proevenprogramma

In hoofdstuk 2 werd aangegeven dat er rond het gebruik van uit cel- of triaxiaalproeven verkregen ϕ en c waarden voor glijvlakberekeningen enkele onzekerheden bestaan.

In de eerste plaats is de spanningstoestand voor en tijdens een afschuiving in het terrein een vlakke vervormingstoestand waarbij de middelste hoofdspanning σ'_2 in de bezwijkfase groter zal zijn dan σ'_3 .

Daarentegen is in de cel- of triaxiaaldrukproef steeds $\sigma'_2 = \sigma'_3$. Welke invloed dit verschil heeft op ϕ en c is niet bekend.

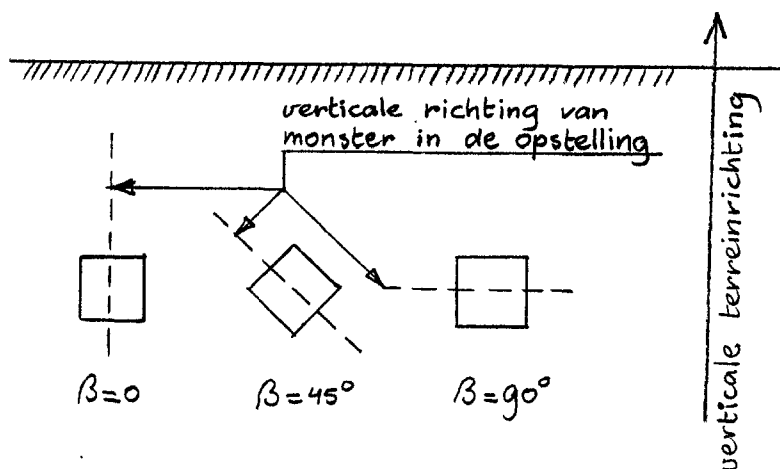
Wel mag worden verwacht dat de plane-strain grootheden niet lager zullen zijn dan die in axiaal-symmetrische omstandigheden. Dit betekent dat wat de invloed van de middelste hoofdspanning σ'_2 betreft, cel- en triaxiaalproeven altijd een veilige waarde opleveren.

De uit glijvlakberekeningen verkregen veiligheidsfactoren, gebruik makend van cel- of triaxiaal bezwijkgrootheden, zullen echter te laag kunnen zijn. Om een beter inzicht te verkrijgen in de juiste mate van veiligheid van in het verleden uitgevoerde en nog uit te voeren dijklichamen is een oriënterend onderzoek zeker verantwoord. In hoofdstuk 2 is aangegeven dat voor het bepalen van c en ϕ 2 proeven nodig zijn bij verschillend normaalspanningsniveau. Wanneer we ons voor het bepalen van de invloed van de middelste hoofdspanning zouden beperken tot de axiaalsymmetrische spanningstoestand ($\sigma'_2 = \sigma'_3$) en de plane-strain toestand dan zijn minstens 4 proeven noodzakelijk. Al deze proeven dienen in het ISC-apparaat te worden uitgevoerd op blokvormige monsters.

Daarnaast is het uitvoeren van 2 proeven op cilindrische monsters in een triaxiaalapparaat onvermijdelijk om de eventuele invloed van de monstervorm te leren kennen. De omstandigheden tijdens deze laatste 2 proeven dienen zoveel mogelijk identiek te zijn aan die bij de axiaalsymmetrische proeven op blokvormige monsters in het ISC-apparaat.

Het 2^e te onderzoeken aspect betreft de invloed van anisotropie op de bezwijkgrootheden ϕ en c . Bij de gebruikelijke procedure worden ϕ en c verkregen uit cel- of triaxiaalproeven waarbij de richting van de grootste hoofdspanning steeds verticaal is en overeenkomt met de verticale richting in het terrein. De glijrichting in het monster is dan steeds ongeveer dezelfde, in tegenstelling tot de richting van het schuifvlak in het terrein die veel meer kan variëren.

Om de eventueel aanwezige richtingsafhankelijkheid van ϕ en c te onderzoeken worden 3 series van elk 2 ISC proeven voorgesteld, d.w.z. 2 proeven bij verschillend spanningsniveau waarbij de ver-



Figuur 10

ticale richting van het blokvormige monster in het beproevingsapparaat overeenkomt met de verticale terreinrichting

$\beta = 0$, 2 proeven met $\beta = 45^\circ$ (zie figuur 10) en 2 proeven met $\beta = 90^\circ$.

De 2 proeven met $\beta = 0$ kunnen identiek zijn aan de 2 bij invloed middelste hoofdspanning genoemde proeven.

De omstandigheden tijdens de 4 overige anisotropie proeven kunnen in principe zowel axiaalsymmetrisch als plane-strain zijn.

Omdat de invloeden van middelste hoofdspanning en anisotropie hier steeds gescheiden behandeld zijn is het wellicht beter de anisotropie-invloed alleen axiaalsymmetrisch te onderzoeken. Het geheel wordt dan wat simpeler.

Eventueel is het dan onder bepaalde voorwaarden zelfs mogelijk de serie anisotropie-proeven in het triaxiaalapparaat uit te voeren.

Wanneer we ervan uitgaan dat de invloed van anisotropie bepaald zal worden aan de hand van proeven op blokvormige monsters is het ISC-apparaat dan zijn voor het oriënterende onderzoek in totaal $4 + 6 - 2 = 8$ ISC proeven op blokvormige monsters noodzakelijk en 2 triaxiaalproeven op cilindrische monsters. Wanneer we ervan uitgaan dat per proef 1,5 manweek vereist zal zijn en rekenend met 2 extra "speel" weken dan komen we op totaal 14 manweken in het ISC-apparaat.

Hierna wordt meer gedetailleerd ingegaan op de uitvoering van de proeven, de keuze van de kleisoort, het aanvoeren en conditioneren van de klei enz.

5. Enkele belangrijke aspecten betreffende het proevenprogramma, de uitvoering en de interpretatie

- De te gebruiken klei.

Omdat hier sprake is van een vergelijkend onderzoek moeten de verschillende monsters steeds vrijwel dezelfde samenstelling hebben en dezelfde voorgeschiedenis hebben gehad. Een natuurlijke klei verdient de voorkeur boven een aangemaakte klei, omdat we dan zeker zijn dat een uit het onderzoek volgende invloed een natuurlijke oorzaak heeft en we eventueel direkt kunnen concluderen dat het invloed kan hebben in de praktijk. Een nadeel van natuurlijke klei is dat we de eigenschappen en met name de voorgeschiedenis minder goed kennen. Momenteel wordt gedacht aan een rivierklei uit de omgeving van Arnhem.

- De bedoeling is de klei aan te voeren in het laboratorium in de vorm van een "brood" met afmetingen van ca. 20 x 20 x 50 cm. In het laboratorium moet dit blok zodanig worden bewaard dat geen uitdroging kan optreden. Voor het afsnijden van de monsters is een speciaal snijapparaat ontworpen, waarmee de juiste monsterafmetingen (ca 8,5 x 8,5 x 5,5 cm) kunnen worden verkregen. Met dit apparaat kunnen de tegenover elkaar liggende zijvlakken optimaal parallel worden afgesneden, wat vooral bij de plane-strain proeven van belang is. Wanneer dit snijapparaat niet tijdig beschikbaar is, zullen als eerste proeven de 2 triaxiaalproeven ($\sigma'_2 = \sigma'_3$) op de blokvormige monsters worden uitgevoerd. De benodigde monsters worden met een simpeler snijapparaat verkregen.

- Welk type proef dient te worden uitgevoerd?

Er moet hierbij een keuze worden gedaan uit gedraineerde of ongedraineerde uitvoering.

Bij geheel gedraineerde uitvoering moet bij een vrij vaste klei worden gedacht aan een proefduur van enkele weken. Afgezien van

het feit dat bij de huidige ISC opstelling geen aandrijving beschikbaar is waarmee het monster zeer langzaam kan worden gedeformeerd, zouden de proeven zeer hoge kosten met zich meebrengen. Blijft over de ongedraineerde uitvoering met meting van de water-spanning in het monster. De verticale verplaatsingssnelheid kan bij goede verzadiging van het monster zodanig worden gekozen dat de proef afgezien van de consolidatiefase binnen één werkdag kan worden voltooid. De laagste, nog goed instelbare snelheid is ca 0,02 mm/minuut wat bij een monsterhoogte van 8,5 cm neerkomt op ca 1,5% van de hoogte per uur.

Bij 12% deformerende duurt de proef dus 8 uur.

Om de totale bezettingstijd van het apparaat per proef te beperken zal het consolideren onder de alzijdige spanning (de latere beginspanning in het ISC-apparaat) in een aparte cel kunnen plaatsvinden.

Omdat hier extra voorzieningen voor nodig zijn en omdat overbrengen van het monster van de consolidatiecel naar het ISC-apparaat complicaties kan geven, zal deze mogelijkheid alleen overwogen worden wanneer aan de hand van de vooronderzoekresultaten een lange consolidatietijd mag worden verwacht.

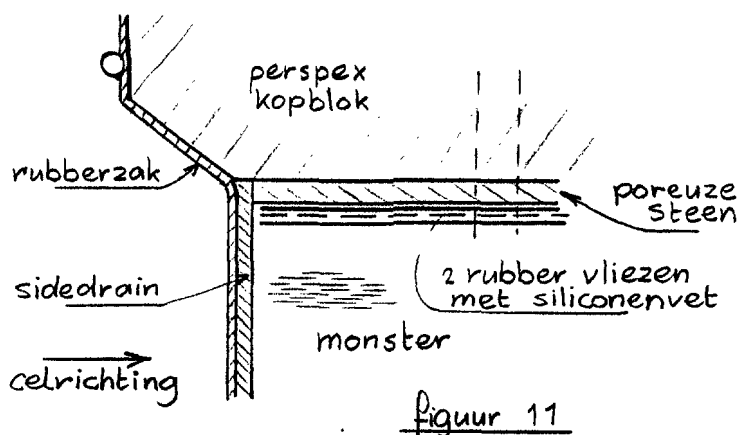
- Opvoeren drainagemogelijkheden bij consolideren.

Opgemerkt is dat consolideren in de ISC-cel de voorkeur verdient boven consolideren in een aparte consolidatiecel.

De hoge kosten die de bezetting van een ISC-apparaat met zich meebrengt noodzaken tot het verbeteren van de drainagemogelijkheden.

In de huidige opstelling is slechts drainage mogelijk d.m.v. 2 ronde gaatjes ca $\varnothing$ 1 cm in het midden van de onder en bovenkant van het monster.

Gedacht wordt aan het toepassing van 2 poreuze stenen aan de eindvlakken en verticale side drains in de celrichting (= met 5,5 cm



de kortste richting).

De poreuze stenen dienen dan voornamelijk om het door de side drains aangevoerde water af te voeren.

De rubber vliezen ter beperking van de additionele schuifspanningen

aan de eindvlakken kunnen dan gehandhaafd blijven.

- Vooronderzoek

Het vooronderzoek heeft een tweeledig doel nl.:

- het kwalificeren van de klei.

Hiervoor kan worden gedacht aan: vloeï- en uitrolgrens

korrelverdeling

kalk- en humusgehalte

mineralogische samenstelling.

Deze bepalingen zijn niet direkt essentieel voor randvoorwaarden van het ISC onderzoek. Er wordt verder niet op ingegaan.

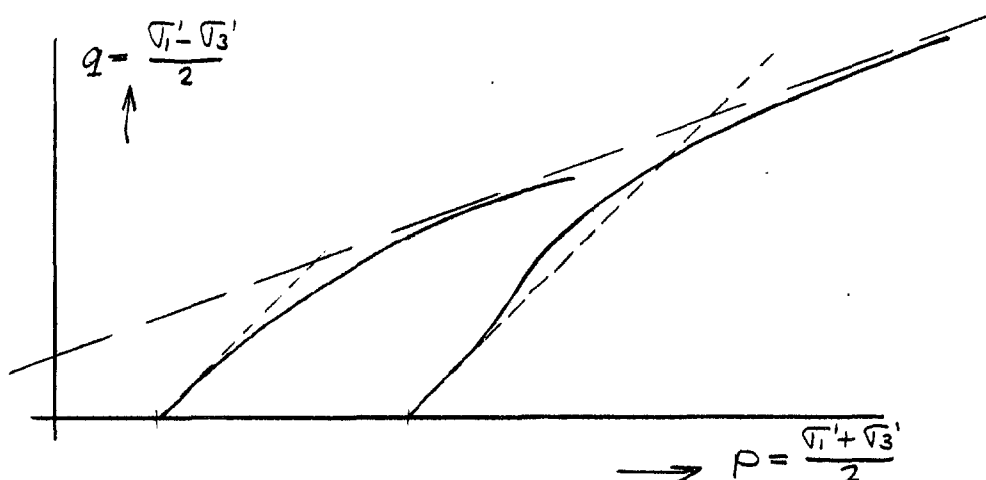
- Vooronderzoek dat nuttige informatie kan opleveren voor het onderzoek.

Voordat met de eigenlijke proeven wordt begonnen moet een schatting gemaakt kunnen worden van de benodigde consolidatietijd en moet bekend zijn welke 2 beginspanningen bij de proeven zullen worden aangebracht. Geprobeerd zal worden de benodigde informatie vast te stellen aan de hand van de uitkomsten van een samendrukkingsproef.

- Op welke wijze zullen de proeven worden geïnterpreteerd?

Zoals hiervoor is aangegeven ligt het in de bedoeling geconsolideerde ongedraineerde proeven uit te voeren met meting van de waterspanning tijdens de proef.

Van elke serie van 2 proeven bij verschillend beginspanningsniveau zullen zowel de totale als de effectieve spanningen worden beoordeeld. Voor de effectieve spanningen zal het spanningspad worden geconstrueerd in het p-q diagram.



De raaklijn aan de 2 spanningspaden levert een omhullende. Bovendien zal getracht worden een karakteristieke uiterste deviatorspanning te onderscheiden bij beide proeven die gekoppeld aan de totale spanningen σ_1 en σ_3 een ongedraineerde omhullende oplevert. Het vergelijken van de omhullenden van triaxiaal- en plane-strain proeven en van de proeven met de verschillende oriëntatierichtingen van de monsters levert een indicatie voor de aanwezige invloeden van middelste hoofdspanningen en anisotropie.

Bij het bespreken van de proefresultaten zal dieper ingegaan worden op de wijze van interpreteren van de proeven.

- Opgemerkt is reeds dat voor het slagen van ongedraineerde proeven met waterspanningsmeting een volledige verzadiging van het monster vereist is. Met een willekeurig kleimonster zal vooraf worden nagegaan of en hoe dit te bereiken is. Tegelijkertijd zal een programma worden opgesteld waarbij ervan uitgegaan wordt dat het gehele onderzoek zo snel mogelijk kan worden afgerond.

6. Slotopmerkingen

Het in 4 voorgestelde onderzoek is bedoeld als een oriënterend onderzoek. Om harde conclusies te kunnen trekken is het vanzelfsprekend te beperkt van opzet.

Wanneer de proefresultaten duidelijke verschillen te zien geven in bezwijkgedrag bij plane-strain en triaxiaal en/of duidelijke verschillen vertonen bij variatie van de oriëntatierichting van de monsteras dan is het overwegen van een voortgezet onderzoek zinvol. Het onderzoeken van meerdere kleisoorten van verschillende samenstelling zal wellicht kunnen leiden tot een meer algemeen bruikbare uitspraak ten aanzien van beide invloeden.

Een voortgezet onderzoek mag in principe echter niet alleen afhangen van het feit dat duidelijke verschillen in ϕ en c zijn gevonden bij het oriënterende onderzoek.

Ook indien geen duidelijk waarneembare invloeden zijn gevonden maar de opzet van het onderzoek is in principe wel bruikbaar gebleken, zal een voortgezet onderzoek verantwoord kunnen zijn.

Andere kleisoorten kunnen namelijk wel sterk anisotrope eigenschappen bezitten en duidelijke verschillen in plane-strain en triaxiaal bezwijkweerstand vertonen.

Het trekken van conclusies uit de proeven is vanzelfsprekend alleen mogelijk wanneer de spreiding in de resultaten niet te groot is. Enerzijds vanwege het feit dat we belang stellen in verschillen in ϕ en c waarden en anderzijds omdat het totale aantal proeven in het oriënterende onderzoek klein is, is slagen van het onderzoek op dit moment niet geheel zeker.

Het feit dat met deze proevenserie voor het eerst kleimonsters in het ISC-apparaat zullen worden beproefd geeft een extra onzekerheid.

Afgaande op de conclusies die buitenlandse onderzoekers in diverse publicaties hebben gerapporteerd blijkt dat het vaststellen van beide invloeden wel degelijk mogelijk is.

Dit maakt dat een vrij optimistische verwachting t.a.v. het slagen van ons onderzoek op zijn plaats is.

INVLOED MIDDELSTE HOOFDSPANNING OP BEZWIJK-

GEDRAG VAN KLEI

Verslag Literatuurstudie

Invloed middelste hoofdspinning op
bezwijkgedrag van klei

Verslag Literatuurstudie

CO-230661/15

december 1978

I N H O U D

	<u>Blz.</u>
Symbolen	I/II
1. Inleiding	1
2. Vorm en afmetingen kleimonsters en proeftype (globaal)	3
3. Benaming en eigenschappen gebruikte kleisoorten	5
4. Wijze van consolideren en proeftype (meer gedetailleerd)	6
5. Proefresultaten	10
5-1 spannings-deformatiegedrag en poriën- waterspanning	10
5-2 bezwijkgedrag	11
5-3 diversen	15
6. Conclusies bezwijkgedrag	18
7. Literatuur	19
Tabel proef en monstergegevens	21

Symbolen

$$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$$

totale hoofdspanningen met

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$$

$$\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3$$

effectieve hoofdspanningen met

$$\sigma'_1 > \sigma'_2 > \sigma'_3$$

$$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$$

hoofdrekken

bij vlakke vervormingstoestand

$$\text{geldt } \varepsilon_2 = 0$$

$$u = \sigma_i - \sigma'_i$$

(i = 1, 2, 3)

poriënwaterspanning

$$\sigma'_c$$

(soms ook σ'_{3c} of σ'_{1c})

effectieve spanning na consolidatie, direkt voor eigenlijke schuifproef

$$\sigma_{\text{oct}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$

oktaheden of gemiddelde normaalspanning (totaal)

$$I_1 = \sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3$$

1^e spanningsvariant (effectief)

$$\tau_{\text{oct}} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

oktaheden schuifspanning
(2^e spanningsvariant)

$$I_3 = \sigma'_1 \sigma'_2 \sigma'_3$$

3^e spanningsvariant

$$b = \frac{\sigma'_2 - \sigma'_3}{\sigma'_1 - \sigma'_3}$$

maat voor relatieve grootte van middelste hoofdspanning

$$n = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_{\text{max}_c}}$$

overconsolidatiegraad

$$K_o = \frac{\sigma'_{3c}}{\sigma'_{1c}}$$

quotiënt grootste en kleinste hoofdspanning na consolidatie

a	waterspanningsparameter
$v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$	volumedeformatie (1 ^e rekinvariant)
$\gamma_{\text{oct}} = \frac{1}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}$	oktahederschuiFREK (2 ^e rekinvariant)
$\phi' = \arcsin \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3}$	effectieve hoek van inwendige wrijving
c'	cohesie in Mohr-Coulomb diagram voor effectieve spanningen
C _u	ongedraineerde schuifweerstand
PL	uitrolgrens (Plastic Limit)
LL	vloeigrens (Liquid Limit)

1. Inleiding

Eind 1977 is in opdracht van het Centrum Onderzoek Waterkeringen een eerste oriënterend onderzoek uitgevoerd op blokvormige kleimonsters in het ISC-apparaat.

Dit onderzoek, genaamd "Invloed middelste hoofdspanning op bezwijkgedrag van klei" had tot doel na te gaan of er verschillen bestonden in de bezwijkgrootheden onder plane strain en triaxiaal-omstandigheden van een uit de Betuwe afkomstige klei.

Hoewel het aantal uitgevoerde proeven minimaal was (en er daardoor geen uitspraak mogelijk was omtrent de betrouwbaarheid van de resultaten) vertoonden de plane strain uitkomsten een iets grotere effectieve schuifsterkte dan de proeven met $\sigma'_2 = \sigma'_3$ (triaxiaalproeven).

Dit resultaat en de bevredigende proeftechnische ervaringen, opgedaan bij deze eerste ISC proevenserie hebben ertoe geleid dat het COW besloten heeft het onderzoek uit te breiden met een 2^e proevenserie.

Momenteel wordt onderzocht welke klei voor deze 2^e serie in aanmerking komt.

Bovendien heeft het COW gemeend dat het toetsen van de eigen bevindingen aan datgene wat elders in de wereld op dit terrein is gevonden, het inzicht zal kunnen vergroten. Hiertoe is een literatuurstudie uitgevoerd, waarvan in dit rapport verslag wordt uitgebracht.

Bij de literatuurstudie en in de literatuurlijst achterin dit verslag is niet naar volledigheid gestreefd. Wel is getracht de belangrijkste artikelen te evalueren en het totaal zodanig op te bouwen dat de meeste "stromingen" vertegenwoordigd zijn.

Ten opzichte van het aantal publicaties over het gedrag van zand bij plane strain is het aantal publicaties dat aan het plane strain gedrag van klei is gewijd niet groot.

Bovendien is het niet eenvoudig eenduidige conclusies te destillieren omtrent de verschillen in het bezwijkgedrag van klei onder plane strain- en triaxiaaltoestand.

Er is een grote verscheidenheid in gebruikte apparatuur en bij de onderzochte kleisoorten bestaan soms grote verschillen. Bovendien werd niet steeds op dezelfde wijze geconsolideerd en worden resultaten van verschillende typen proeven beschreven. Als gevolg van deze afwijkingen in aanpak wordt onderlinge vergelijking van de uitkomsten bemoeilijkt.

Er kan dan ook niet worden volstaan met een simpele opsomming van de door de verschillende onderzoekers gevonden ϕ en c waarden en van de verschillen in ϕ en c bij plane strain en triaxiaal-omstandigheden.

Dit verslag van de literatuurstudie is daarom als volgt opgebouwd. In hoofdstuk 2 worden de gebruikte apparatuur en vorm en afmetingen van de monsters beschreven.

In 3 worden enkele eigenschappen van de onderzochte kleisoorten, voor zover ze in de publicaties werden vermeld, in tabelvorm weergegeven.

Hoofdstuk 4 is gewijd aan de wijze van consolideren en aan het type proef waarmee de resultaten werden verkregen.

In hoofdstuk 5 worden de resultaten beschreven waarbij onderscheid wordt gemaakt in het spanningsrekgedrag en het bezwijkgedrag. De nadruk wordt hierbij vooral gelegd op de verschillen in beide gedragingen bij plane strain- (of proeven met $\sigma_2 > \sigma_3$) en triaxiaalproeven.

Er is in hoofdstuk 5 relatief meer aandacht besteed aan het bezwijkgedrag omdat dit aspect het belangrijkste oogmerk van het onderzoek "Invloed middelste hoofdspinning" is.

In hoofdstuk 6 wordt getracht enkele conclusies te formuleren.

De literatuurstudie, alsmede de rapportage ervan is uitgevoerd door Ir. J. Lindenberg,

2. Vorm en afmetingen monsters en proeftype (globaal)

Uitgezonderd in [15], worden in alle bij dit onderzoek bestudeerde publicaties resultaten gegeven van proeven op blokvormige monsters.

In de apparatuur voor het beproeven van blokvormige monsters onder spanningstoestanden $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ (waaronder vlakke vervormingstoestand of plane strain toestand) is een ontwikkeling te bespeuren.

In de beginfase werden bij plane strain proeven vaak relatief lange monsters beproefd, veelal zonder eindplaten tegen 2 van de verticale eindvlakken. Aan de voorwaarde voor de deformatie $\epsilon_2 = 0$ kan in die gevallen toch tot op zekere hoogte worden voldaan dankzij de op boven- en ondervlak werkende schuifspanning.

In een later stadium werden meestal eindplaten ter handhaving van $\epsilon_2 = 0$ toegepast en werden minder lange monsters beproefd. Bovendien wordt zeker in de meer recentere publicaties melding gemaakt van toepassing van smering op de met starre eindplaten begrensde vlakken.

Alle in dit verslag genoemde onderzoekers die plane strain proeven beschrijven, hebben eindplaten gebruikt ter handhaving van $\epsilon_2 = 0$. De door Bishop [1], [2] en Henkel/Wade [7] gebruikte monsters hebben nog wel de lange vorm. Als motivatie voor de lange monsters geeft Bishop op dat de invloed van schuifspanningen op de kleinste verticale vlakken minimaal wordt (zie tabel, blz. 21).

Met uitzondering van [12], [14] en [16] hebben 2 monsterzijden vaak ongeveer gelijke lengte en is de derde zijde korter. Soms wordt in de kortste richting $\epsilon_2 = 0$ gehandhaafd, soms in één van de langere richtingen.

Hambly [5], Hambly/Roscoe [6] en Sketchley/Bransby [13] beschrijven proeven in het zogenaamde biaxiaalapparaat, waarin de tegenover elkaar liggende zijden naar elkaar toebewogen kunnen worden.

In de richting loodrecht $\perp$ hierop wordt $\epsilon_2 = 0$ gehandhaafd. Wu/Loh/Malvern [15] gebruiken holle cilinderproeven voor het bepalen van de invloed van de middelste hoofdspanning. De door hen beschreven proeven zijn geen plane strain proeven. Ook Shibata/Karube [12], Lade/Musante [9] en Yong/McKyes [16] gebruiken geen plane strain proeven.

De eersten [12] voerden plane stress proeven uit. In [9] en [16] worden proeven beschreven, waarbij na consolidatie, het quotiënt $\frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$ op een constante waarde wordt gehandhaafd. Hierdoor worden rechte spanningspaden in het deviatorvlak doorlopen vanuit de bolspanningstoestand.

Voor het overige worden resultaten van plane strain proeven beschreven en met uitzondering van [5] en [13] worden deze resultaten vergeleken met resultaten van proeven waarbij $\sigma_2 = \sigma_3$ werd gehandhaafd (soms tevens $\sigma_2 = \sigma_1$), met andere woorden met zogenaamde triaxiaalproeven.

Deze triaxiaalproeven werden meestal op cilindrische monsters uitgevoerd.

3. Benaming en eigenschappen gebruikte kleisoorten

In enkele artikelen worden vrij uitgebreide gegevens van de gebruikte kleisoorten vermeld (tabel, blz. 21).

In sommige artikelen echter [1], [2], [3], worden geen gegevens verstrekt. Ladd [7] volstaat met het noemen van de benaming van de gebruikte klei.

Het meest veelvuldig worden, behalve de naam van de klei, de vloeigrens (LL) en de uitrolgrens (PL) vermeld.

Ook het percentage kleimineralen ($\% < 2 \mu\text{m}$) kan vrij vaak worden teruggevonden. De andere kwalificaties van de gebruikte kleisoorten komen zo sporadisch voor dat ze in tabel 1 achterwege zijn gelaten. Zo werden nauwelijks dichtheden van de monsters opgegeven.

4. Wijze van consolideren en proeftype (meer gedetailleerd)

Zie tabel blz. 21.

Bishop [1], [2] rapporteert zeer summier enkele resultaten van ongedraineerde plane strain proeven op klei en vergelijkt deze met uitkomsten van ongedraineerde triaxiaalproeven.

De wijze van consolideren wordt niet genoemd, evenals de toegepaste consolidatiedruk. Wel werd vermeld dat tijdens de proeven de poriënwaterdruk en de grootte van de middelste hoofdspansing σ_2 werden gemeten.

Duncan/Dunlop [3] gaan in hun publicatie in op de verschillen in proefresultaten bij gesmeerde en niet gesmeerde eindvlakken. Zij beschrijven die verschillen voor plane strain en triaxiaalproeven, doch gaan nauwelijks in op de proefuitkomsten zelf. Bij de plane strain proeven werd 1-dimensionaal geconsolideerd.

Duncan/Seed [4] consolideerden de kleimonsters 1-dimensionaal (ook wel K_0 genoemd) tot σ'_1 niveaus tussen 70 en 400 kN/m² in het plane strain apparaat en isotroop ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$) in het triaxiaalapparaat. Daarna wordt ongedraineerd afgeschoven met meting van waterspanning "in het monster". De nadruk wordt in [4] meer gelegd op anisotropie dan op verschillen tussen plane strain en triaxiaal.

Hambly [5] en Hambly/Roscoe [6] consolideren in het biaxiaalapparaat zowel 1-dimensionaal als 2-dimensionaal (beide paren tegenover elkaar liggende platen bewegen naar elkaar toe, in de 3^e richting $\epsilon = 0$). De consolidatiespanningen liggen tussen 40 en 450 kN/m². Het na consolideren opgelegde afschuiven gebeurt bij alle proeven gedraineerd (proeftijd ca 2 weken) volgens verschillende spanningspaden. Bij enkele van deze proeven werd het monstervolume constant gehouden, zodat een met ongedraineerde proeven vergelijkbaar resultaat ontstaat.

Bij de 1-dimensionaal geconsolideerde kleimonsters wordt zowel in de compressierichting afgeschoven (σ'_1/σ'_3 neemt toe na consolidatie) als in de extensierichting (σ'_1/σ'_3 neemt direct na consolidatie af). De 2-dimensionaal geconsolideerde monsters worden alle bij toenemende σ'_1/σ'_3 beproefd.

Hoewel resultaten van normale triaxiaalproeven niet gedetailleerd worden beschreven, worden toch enkele aspecten vergeleken met uitkomsten van plane strain proeven.

In [7] geven Henkel/Wade resultaten van plane strain proeven en triaxiaalproeven. In beide opstellingen werd 1-dimensionaal geconsolideerd tot spanningsniveaus tussen 300 en 830 kN/m² ($= \sigma'_{1c}$) en het afschuiven gebeurt ongedraineerd met meting van de monsterwaterspanning.

In [8] (Ladd) worden resultaten gegeven van ongedraineerde plane strain-, triaxiaal- en simple shear proeven met meting van de waterspanning. In alle gevallen werd K_0 geconsolideerd tot een niet genoemd niveau.

Lade/Musante beschrijven in [9] resultaten van proeven met constante waarde van $b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$.

Vooraf werd steeds isotroop geconsolideerd tot spanningsniveaus 100 kN/m², 150 kN/m² en 200 kN/m².

Door in een proevenserie b te variëren tussen $b = 0$ ($\sigma_2 = \sigma_3$, triaxiaalcompressie) en $b = 1$ ($\sigma_2 = \sigma_1$, triaxiaalextensie) wordt de invloed van de middelste hoofdspanning op het gedrag van klei gevonden.

Lee/Shubeck beschrijven in [10] resultaten van K_0 -geconsolideerde plane strain proeven en K_0 - en isotroop geconsolideerde triaxiaalproeven. Alle proeven ongedraineerd met meting van de waterspanning. De consolidatieniveaus waren vrij hoog tot 10700 kN/m². In [10] worden tevens resultaten gegeven van ongeconsolideerde ongedraineerde proeven.

Liam Finn/Mittal [11] beschrijven resultaten van geconsolideerde ongedraineerde plane strain en triaxiaal compressieproeven met meting van waterspanning. De triaxiaalproeven zowel op blokvormige als op cilindrische monsters uitgevoerd. De toegepaste wijze van consolidatie was waarschijnlijk isotroop tot 2 niveaus, 420 en 525 kN/m².

Shibate/Karube [12] voerden ongedraineerde plane stress proeven uit, met meting waterspanning. De proeven met $\sigma_2 = \sigma_3 = \text{constant}$ en $\sigma_2 = \sigma_1 = \text{constant}$ leveren informatie over de beide triaxiaal-toestanden. De proeven met $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ geeft de invloed van de middelste hoofdspinning. Steeds werd isotroop geconsolideerd tot effectieve spanningsniveaus van 100, 200 en 300 kN/m².

Sketchley/Bransby [13] gebruiken net als Hambly het biaxiaal apparaat en beschrijven resultaten van ongedraineerde plane strain proeven op normaal en overgeconsolideerde klei (met meting waterspanning). Het consolideren wordt bij alle monsters zowel 1-dimensionaal als 2-dimensionaal uitgevoerd tot een verticale spanning van ca 600 kN/m². Een aantal monsters kreeg hierna gelegenheid tot zwellen tot verschillende spanningsniveaus waardoor overgeconsolideerde monsters werden verkregen.

Het afschuiven geschiedde na 1-dimensionaal consolideren, zowel in compressie- als extensierichting, na 2-dimensionaal consolideren alleen in compressierichting.

Vaid/Campanella [14] vergelijken resultaten van gedraineerde en ongedraineerde plane strain- en triaxiaalproeven op klei met waterspanningsmeting. Bij alle typen proeven worden de monsters zowel in compressie- als extensierichting belast. Steeds werd 1-dimensionaal geconsolideerd (K_0) tot een effectieve spanning van 600 kN/m².

Wu/Loh/Malvern [15] beschrijven resultaten van ongedraineerde triaxiaal en holle cilinder proeven op klei met meting van de waterspanning. Het consolideren gebeurt in alle gevallen isotroop, tot niet genoemde niveaus.

Yong/McKyes [16] consolideerden hun blokvormige monsters isotroop tot 5 spanningsniveaus tussen 18 en 420 kN/m^2 . Vervolgens werden ongedraineerde proeven uitgevoerd (behalve bij spanningsniveaus lager dan $36 \text{ kN/m}^2 \rightarrow$ gedraineerd), waarbij $b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$ op een constante waarde werd gehandhaafd (overeenkomstig Lade/Musante [9]).

De proeven met $b = 0$ werden zowel op blokvormige als op cilindrische monsters uitgevoerd.

Behalve in [3], [10], [11] wordt steeds melding gemaakt van meting van de grootte van de middelste hoofdspanning σ_2 . Bij de beschrijving van de resultaten wordt echter niet altijd op de grootte van σ_2 ingegaan.

In de meeste artikelen wordt de toegepaste deformatiesnelheid tijdens het ongedraineerde afschuiven vermeld.

Extremen hierbij zijn: 3% deformatie per uur in de in [15] beschreven holle cilinderproeven (proefduur maximaal 4 uur) en de door Henkel/Wade [7] gehanteerde deformatiesnelheid van 0,03% per uur met proefduur maximaal 12 dagen.

5. Proefresultaten

In dit hoofdstuk worden de voornaamste resultaten weergegeven van de in de diverse artikelen beschreven proeven.

Onderscheid wordt gemaakt in het spannings-deformatiegedrag en het bezwijkgedrag. De nadruk wordt in dit verslag gelegd op het bezwijkgedrag, en met name op de gevonden verschillen in de bezwijkgrootheden bij triaxiaalproeven en proeven met $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$.

5.1. Spannings-deformatiegedrag en poriënwaterspanning

Indien het spanningsrekgedrag bij plane strain proeven en triaxiaalproeven wordt vergeleken, wordt melding gemaakt van stijver gedrag (meestal in $\sigma'_1/\sigma'_3 - \epsilon_{\text{vert}}$ grafiek) en kleinere deformatie bij bezwijken (= topwaarde van σ'_1/σ'_3 of $\sigma_1 - \sigma_3$) bij plane strain.

Ook wordt enkele malen gewezen (o.a. Lee/Shubeck [8]) op de grotere en "snellere" terugval na het bereiken van de top bij plane strain proeven in vergelijking met triaxiaalproeven. Dit aspect komt sterker naar voren naarmate de klei meer overgeconsolideerd is.

Ten aanzien van de waterspanning is de tendens dat bij plane strain compressie proeven een hogere waterspanning ontstaat dan bij triaxiaalcompressieproeven.

Vaid/Campanella [12], echter, maken melding van een ongeveer gelijk waterspanningsverloop tijdens compressieproeven.

Henkel/Wade [7] noemen een ongeveer gelijke waterspanning voor plane strain en triaxiaal bij $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{max}}$. Omdat $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{max}}$ bij plane strain bij een aanzienlijk lagere verticale deformatie wordt bereikt en omdat de waterspanning na de top nog sterk stijgt, wordt de waterspanning bij plane strain proeven wel groter dan bij triaxiaalproeven. Sketchley/Bransby [13] melden een afnemende waterspanning (ook relatief, bijvoorbeeld ten opzichte van σ'_{1c} na consolidatie en eventueel zwellen) bij overgeconsolideerde klei.

5.2. Bezwijkgedrag

Bishop [1], [2] vindt voor plane strain proeven $\phi' = 41^\circ$ bij maximale (σ'_1/σ'_3) en $\phi' = 37^\circ$ bij maximale $(\sigma'_1 - \sigma'_3)$. Triaxiaalproeven leverden respectievelijk $\phi' = 37^\circ$ en $\phi' = 35^\circ$.

De gevonden verschillen in c' zijn klein.

Plane strain omstandigheden leveren dus ongeveer 10% hogere effectieve schuifsterkte. De wateroverspanning bij plane strain is echter groter dan bij triaxiaal zowel voor $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{\max}$ als $(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{\max}$. De ongedraineerde schuifsterkte kan daardoor volgens Bishop, voor plane strain kleiner zijn dan voor triaxiaal.

De publicatie van Duncan/Seed [4] is meer op anisotropie gericht, dat wil zeggen op verschillen in bezwijkweerstand (zowel gedraineerd als ongedraineerd) bij verschillende asoriëntatie van de monsters. Voornamelijk worden hiervoor resultaten van plane strain proeven gebruikt, hoewel ook wel triaxiaalproeven.

Vergelijking van uitkomsten van beide proeftypen laat zien dat een normaal monster (monsterras overeenkomend met verticale terreinrichting) in vlakke vervormingstoestand $\phi' = 38^\circ$ oplevert en bij $\sigma_2 = \sigma_3$ (triaxiaal) $\phi' = 34,5^\circ$. In beide gevallen bij aanname van $c' = 0$.

Hambly [5] en Hambly/Roscoe [6] beschrijven voornamelijk plane strain proeven in het biaxiaalapparaat.

In [6] wordt in het kort ingegaan op de verschillen in bezwijkgedrag volgens plane strain- en triaxiaalbeproeving. Geconcludeerd wordt dat voor het op effectieve spanningen gebaseerde bezwijkgedrag het Mohr-Coulomb criterium voldoet.

Henkel/Wade [7] geven resultaten van ongedraineerde plane strain (K_o) en triaxiaalproeven (K_o en isotroop). In bijlage 1 zijn de resulterende waarden van c_u/σ'_{1c} (ongedraineerd) en $\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3}$ (gedraineerd) uitgezet tegen respectievelijk de grootste effectieve spanning na consolidatie σ'_{1c} en de gemiddelde effectieve spanning bij bezwijken $\frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2}$.

In de onderste op effectieve spanningen gebaseerde figuur is bezwijken gedefinieerd bij maximale $\sigma'_1 - \sigma'_3$ tijdens de proef. De plane strain ϕ' blijkt iets hoger dan de ϕ' voor K_o geconsolideerde triaxiaalmonsters. (respektievelijk $28,1^\circ$ en $25,9^\circ$.)

Wanneer ϕ' bepaald wordt bij $(\sigma'_1/\sigma'_{3\max})$ dan wordt in beide gevallen een iets hogere waarde gevonden (respektievelijk $27,4^\circ$ en $26,2^\circ$).

In tegenstelling tot de op effectieve spanningen gebaseerde bezwijk-grootheid $\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3}$ die niet afhankelijk van het normaal spanningsni-veau is, neemt de dimensieloze ongedraineerde schuifweerstandsparemeter c_u/σ'_{1c} bij lager spanningsniveau iets toe. Dit is het gevolg van iets lagere wateroverspanning tijdens proeven bij lagere consolidatie-druk.

Ladd [8] vergelijkt eveneens resultaten van ongedraineerde plane strain en triaxiaalproeven. De plane strain proeven met de grootste hoofdspanning vertikaal leverden iets grotere maximale $(\sigma_1 - \sigma_3)$ en σ'_1/σ'_3 waarden dan triaxiaal compressieproeven. Evenzo de plane strain proeven met grootste hoofdspanning horizon-taal ten opzichte van triaxiaal extensie proeven.

Ook Lee/Shubeck [10] vergelijken uitkomsten van plane strain- en triaxiaalproeven.

In bijlage 2 zijn de maximale $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ waarden voor beide onderzochte kleisoorten tegen zowel de gemiddelde effectieve als de gemiddelde totaalnormaalspanning uitgezet. Hieruit blijkt dat de bezwijkgroot-heden voor plane strain en triaxiaalomstandigheden vrijwel identiek zijn. De ϕ' -waarde blijkt wel afhankelijk van $\frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2}$ spannings-niveau. Bij lage spanning wordt voor Kaolinite ongeveer $\phi' = 26^\circ$ gevon-den en bij hoge spanning $\phi' = 13^\circ$.

Liam Finn/Mittal [11] geven enkele ϕ' waarden bij maximale σ'_1/σ'_3 van plane strain en triaxiaalproeven. Voor $\sigma_{3c} = 420 \text{ kN/m}^2$ werden $\phi' = 40^\circ$ bij plane strain en $\phi' = 38^\circ$ bij triaxiaalcompressie, onder aanname van $c' = 0$, gevonden.

Bij $\sigma_{3c} = 525 \text{ kN/m}^2$ resulteerden respectievelijk $\sigma' = 42,5^\circ$ en $\sigma' = 38,3^\circ$.

De triaxiaaluitkomsten ($\sigma_2 = \sigma_3$) bleken dezelfde voor cilindrische en blokvormige monsters.

Vaid/Campanella [14] geven resultaten van verschillende typen gedraineerde en ongedraineerde triaxiaal en plane strain proeven. Uitgaande van $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{\max}$ en bij aanname van $c' = 0$ worden de onderstaande ϕ' waarden gevonden:

	gedraineerd	ongedraineerd	
	ϕ'	ϕ'	c_u/σ'_{1c}
plane strain compr.	$29,4^\circ$	$31,6^\circ$	0,296
plane strain ext.	$34,7^\circ$	$34,3^\circ$	0,211
triaxiaal compr.	$28,6^\circ$	$29,8^\circ$	0,268
triaxiaal ext.	$34,3^\circ$	$33,8^\circ$	0,168

Compressie betekent dat in een plane strain proef de verticale spanning (σ_1) groter is dan de beide horizontale spanningen. Bij plane strain extensie is één horizontale spanning de grootste (σ_1) en de verticale spanning de kleinste (σ_3).

Compressieproefing resulteert dus bij plane strain in iets hogere ϕ' waarde dan bij triaxiaal. Extensieproeven leveren nauwelijks hogere ϕ' waarden. De dimensieloze ongedraineerde schuifweerstand is echter onder plane strain extensie omstandigheden veel groter dan onder triaxiaal extensie. Dit is een gevolg van de aanzienlijk lagere wateroverspanning bij plane strain extensie.

Sketchley/Bransby [13] rapporteren alleen ongedraineerde plane strain proeven, uitgevoerd in het biaxiaalapparaat. Het accent ligt bij hen op het gedrag van klei bij verschillende overconsolidatiegraad n en bij het verschil in gedrag bij deformerende compressie- en in extensierichting.

Gebaseerd op effectieve spanningen wordt bij gelijke n geen verschil in bezwijkparameters gevonden tussen compressie en extensie. Ten gevolge van niet gelijk waterspanningsverloop zijn de C_u waarden wel afwijkend. Verder blijken de effectieve eindpunten van proeven van gelijke soort, doch verschillende n op een rechte lijn te liggen, waarbij wel een cohesie c kan worden onderscheiden.

In [9], [12], [15] en [16] worden resultaten van proeven gerapporteerd met andere waarden van de middelste hoofdspanning σ_2 dan die behorend bij de vlakke vervormingstoestand. In alle 4 de gevallen wordt wel vergeleken met triaxiaalproefresultaten (zowel compressie als extensie).

Lade/Musante [9] en Yong/McKyes [16] voerden proeven uit waarbij $b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$ op een constante waarde werd gehandhaafd. Zij komen tot een ietwat tegenstrijdige conclusie omtrent het Mohr-Coulomb bezwijkcriterium. Yong/McKyes vinden dat het Mohr-Coulomb criterium redelijk voldoet voor alle waarden van b (zie bijlage 3 boven). Lade/Musante vinden dat de effectieve schuifweerstand uitgedrukt in ϕ' voor $b = 0$ (triaxiaalcompressie) het laagst is, namelijk $28,2^\circ$, voor $b \sim 0,4$ het hoogst ($\phi' = 34,7^\circ$) en voor $b \rightarrow 1$ ongeveer 31° . Alle genoemde ϕ' waarden behoren bij $\sigma_{3c} = 150 \text{ kN/m}^2$. De waarde van $b = 0,4$ komt ongeveer overeen met $\epsilon_2 = 0$ en dus ongeveer met de vlakke vervormingstoestand (zie projecties op deviatorvlakken, bijlage 3, midden, en bijlage 4, onder). De eerder voor zand afgeleide bezwijkformule $I_1^3/I_3 = K$ blijkt ook voor klei redelijk te voldoen.

Verder blijkt ϕ' afhankelijk van het consolidatieniveau.

Voor $b = 0$ wordt bij $\sigma_{3c} = 100 \text{ kN/m}^2$ $\phi = 30,6^\circ$ gevonden en bij $\sigma_{3c} = 200 \text{ kN/m}^2$ $\phi' = 27,4^\circ$.

De ongedraineerde schuifweerstand C_u is het grootst bij $b = 0$ (triaxiaalcompressie) en ca 7% hoger dan bij $b = 1$.

Daartussen wordt vrijwel lineair verloop gevonden (bijlage 3, onderaan). Dit aspect is onder meer een gevolg van de grotere waterspanning tijdens de proeven met grotere b in de range b van 0 tot 0,6.

Shibate/Karube [12] voerden plane stress proeven uit met verschillende σ_2 .

Voor $\sigma_2 = \sigma_3$ en $\sigma_2 = \sigma_1$ werd $\phi' = 33,7^\circ$ en $c' = 2 \text{ kN/m}^2$ gevonden. De bezwijkgrootheden volgend uit proeven met $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ lagen hier iets boven.

Wu/Loh/Malvern [15] concludeerden uit de resultaten van de holle cilinderproeven dat het Mohr-Coulomb bezwijkkriterium van toepassing is voor de door hen beproefde kleisoort.

Er is in [15] sprake van een vrij grote spreiding in de proefresultaten (zie bijlage 4, midden).

5.3. Diversen

Duncan/Dunlop [3] gaan in op de verschillen in proefresultaten bij gesmeerde en niet gesmeerde eindvlakken. Zij doen dit voor plane strain- en triaxiaalproeven. Geconcludeerd wordt dat voor een onderzoek waarbij het vergaren van informatie omtrent verschillen in gedrag bij plane strain- en triaxiaalomstandigheden hoofddoel is, toepassing van gesmeerde of niet gesmeerde eindvlakken in beide opstellingen vereist is.

In de meeste publicaties wordt aangegeven dat de grootte van de middelste hoofdspanning tijdens de plane strain proeven is gemeten. Er wordt echter slechts in enkele gevallen dieper op de gemeten σ_2 waarden ingegaan. Hambly [5] en Hambly/Roscoe [6] vonden voor normaal geconsolideerde kaolinite dat $\frac{\sigma'_2}{\sigma'_1 + \sigma'_3}$ na 1-dimensionaal consolideren ca 0,39 was en na 2-dimensionaal consolideren 0,36. In beide gevallen was sprake van weinig spreiding.

Tijdens afschuiven onder plane strain condities veranderde de waarde van $\frac{\sigma'_2}{\sigma'_1 + \sigma'_3}$ niet veel.

De waarden van σ'_2 lagen steeds binnen de range $0,39 (\sigma'_1 + \sigma'_3) \pm 10\%$. Henkel/Wade [7] vinden na 1-dimensionaal consolideren $\frac{\sigma'_2}{\sigma'_1 + \sigma'_3} = 0,38 (\sigma'_1 + \sigma'_3)$ ($K_0 \sim 0,6$). Tijdens deformereren neemt de waarde van $\frac{\sigma'_2}{\sigma'_1 + \sigma'_3}$ toe tot maximaal ca 0,45, en gemiddeld tot 0,42.

Sketchley/Bransby [13] vinden in het biaxiaal apparaat (ook gebruikt door Hambly) dat $\sigma'_2 = 0,39 (\sigma'_1 + \sigma'_3)$ na zowel 1-dimensionaal als 2-dimensionaal consolideren. Na zwellen (introduceren overconsolidatie) neemt σ'_2 toe tot ca 0,46 $(\sigma'_1 + \sigma'_3)$ bij een overconsolidatiegraad $n = 3$. Bij 1-dimensionaal zwellen betekent dit ongeveer:

$$K = \frac{\sigma'_2}{\sigma'_1} = \frac{\sigma'_3}{\sigma'_1} = 0,85.$$

Tijdens afschuiven neemt $\frac{\sigma'_2}{\sigma'_1 + \sigma'_3}$ steeds af tot ca 0,4 onafhankelijk van de wijze van consolideren en de mate van overconsolidatie n . Lade/Musante [9] doen proeven met constante $b = \frac{\sigma'_2 - \sigma'_3}{\sigma'_1 - \sigma'_3}$. Uit hun figuur 4a (zie bijlage 4, onderaan) blijkt dat bij $b = 0,4$ ongeveer $\epsilon_2 = 0$ geldt.

In enkele artikelen wordt een relatie voor de wateroverspanning tijdens de proeven getoetst aan proefuitkomsten.

Henkel/Wade [7] vinden dat de waterspanningen tijdens ongedraineerde plane strain- en triaxiaalproeven beschreven kan worden met:

$$\Delta u = \frac{\Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_2 + \Delta \sigma_3}{3} + \frac{a}{3} \Delta \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

of

$$\Delta u = \Delta \sigma_{\text{oct}} + a \Delta \tau_{\text{oct}}$$

De waterspanningsparameter a is afhankelijk van de soort klei, de wijze van consolidatie en de plaats in de spanningsruimte, doch niet van de soort proef.

Ook Shibata/Karube [12] concluderen dat de genoemde relatie voor de waterspanning voldoet voor alle door hen onderzochte waarden van $\frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} = b$. Zij onderkennen tevens een kritieke, oktaheder-schuifspanning τ_{oct_c} waarbeneden $a = 0$ geldt.

Ook Vaid/Campanella [14] vinden dat de waterspanning tijdens ongedraineerde plane strain- en triaxiaalcompressieproeven in de oktahederspanning kan worden uitgedrukt. Hetzelfde geldt voor de deformaties γ_{oct} tijdens ongedraineerde proeven en γ_{oct} en ϵ_{vol} tijdens gedraineerde proeven.

Yong/McKyes [16] vinden dat een vergelijking voor de deformaties gebaseerd op oktahederspanning goed voldoet tot ongeveer 50% van de bezwijkspanning.

In de artikelen [7], [12], [14] en [16] wordt dus in feite aangegeven dat de deformaties (en waterspanning tijdens ongedraineerde proeven) tijdens proeven met $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ tot op zekere hoogte kunnen worden beschreven door uitdrukkingen met spanningsparameters σ_{oct} en τ_{oct} .

Het bezwijkgedrag, echter, wordt niet bepaald door σ_{oct} en τ_{oct} , met andere woorden het Von Mises bezwijkcriterium voldoet niet.

Yong/McKyes [16] vinden dat het Mohr/Coulomb criterium voldoet.

Henkel/Wade [7], Shibata/Karube [12] en Vaid/Campanella [14] vinden voor $\sigma'_1 > \sigma'_2 > \sigma'_3$ ϕ' -waarden die iets boven de triaxiaal ϕ' waarden liggen.

6. Conclusies bezwijkgedrag

Van de 16 bij deze literatuurstudie beschouwde publikaties wordt 13 maal het bezwijkgedrag bij triaxiaal- en plane strain (of $\sigma'_1 > \sigma'_2 > \sigma'_3$) omstandigheden vergeleken.

Van deze 13 keer wordt 4 keer geconcludeerd dat de ϕ' waarden (meestal bepaald onder aanname van $c' = 0$) bij plane strain- en triaxiaalproeven identiek of nagenoeg identiek zijn.

Grotere plane strain ϕ' -waarden worden 9 maal gerapporteerd.

Nergens werden lagere plane strain ϕ' waarden gevonden.

Van de 9 keer dat hogere ϕ' waarden uit plane strain proeven volgden, worden in 7 gevallen de verschillen getalsmatig genoemd. Het grootste verschil wordt door Lade/Musante [9] genoemd, namelijk ongeveer $6,5^\circ$.

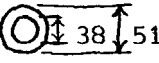
De kleinste genoemde verschillen worden door Vaid/Campanella [14] gerapporteerd, namelijk tussen $0,4^\circ$ en $1,8^\circ$.

De door de andere onderzoekers gerapporteerde verschillen liggen tussen $1,2^\circ$ en $4,2^\circ$.

7. Literatuur

- 1 Bishop, A.W.
Discussion "Soil Properties and their Measurement".
Proc. 4th Int.Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., 1957,
Londen, Vol. III, blz. 103-104
- 2 Bishop, A.W.
Discussion "Soil Properties and their Measurement".
Proc. 5th Int.Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., 1961,
Paris, Vol. III, blz. 97-100.
- 3 Duncan, J.M./Dunlop, P.
"The significance of cap and base restraint".
J.S.M.F.D., Proc. A.S.C.E., januari 1968, blz. 271-290.
- 4 Duncan, J.M./Seed, H.B.
"Strength variation along failure surfaces in clay".
J.S.M.F.D., Proc. A.S.C.E., november 1966, blz. 81-104.
- 5 Hambly, E.C.
"Plane strain behaviour of soft clay".
Dissertation for Doctor of Philosophy at Cambridge Univ.,
Emmanuel College, januari 1969.
- 6 Hambly, E.C./Roscoe, K.H.
"Observations and predictions of stresses and strains during
plane strain of wet clays".
Proc. 7th Int.Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., 1969.
Mexico, Vol. I, blz. 173-181.
- 7 Henkel, D.J./Wade, N.H.
"Plane strain tests on a saturated remolded clay".
J.S.M.F.D., Proc. A.S.C.E., november 1966, blz. 67-80.
- 8 Ladd, C.C.
"A plane strain device for testing undisturbed samples of
soft clay".
Proc. 7th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., 1969.
Mexico, Vol. III, blz. 527-528.

- 9 Lade, P.V./Musante, H.M.
"Three dimensional behavior of remolded clay".
J.G.E.D., Proc. A.S.C.E., februari 1978, blz. 193-209.
- 10 Lee, K.L./Shubeck, R.J.
"Plane strain undrained strength of compacted clay".
J.S.M.F.D., Proc. A.S.C.E., januari 1971, blz. 219-234.
- 11 Liam Finn, W.D./Mittal, H.K.,
"Shear strength of soil in a general stress field".
A.S.T.M. Special Techn. Publ. 361, Laboratory Shear Testing
of Soils, 1963, blz. 42-48.
Discussion by Nathan and Wittke, blz. 49-51.
- 12 Shibata, T./Karube, D.
"Influence of the variation of the intermediate principal
stress on the mechanical properties of normally consolidated
clays".
Proc. 6th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., 1965,
Montreal, Vol I, blz. 359-363.
- 13 Sketchley, C.J./Bransby, P.L.
"The behaviour of an overconsolidated clay in plane strain".
Proc. 8th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., 1973,
Moskou, Vol. I, blz. 377-384.
- 14 Vaid, Y.P./Campanella, R.G.,
"Triaxial and plane strain behaviour of natural clay".
J.G.E.D., Proc. A.S.C.E., maart 1974, blz. 207-224.
- 15 Wu, T.H./Loh, A.K./Malvern, L.E.
"Study of failure envelope of soils".
J.S.M.F.D., Proc. A.S.C.E., februari 1963, blz. 145-181.
- 16 Yong, R.N./McKyes, E.
"Yield and failure of a clay under triaxial stresses",
J.S.M.F.D., Proc. A.S.C.E., januari 1971, blz. 159-175.

auteurs	proeftype	afmetingen blokmonster a x b x c (mm)	benaming klei	vloei- grens (LL) %	uitrol- grens (PL) %	% < 2 μ m	consolidatie
[1] Bishop	p.s./triax.	102x406x51	-	-	-	-	-
[2] Bishop	p.s./triax.	102x406x51	-	-	-	-	-
[3] Duncan/Dunlop	p.s./triax.	-	-	-	-	-	-
[4] Duncan/Seed	p.s./triax.	71x 71x28	San Francisco Bay Mud	88	43	-	p.s. K_0 triax. isotroop
[5] Hambly	p.s.	90x 50x90	Spertone Kaolin } (remoulded)	72	39	67	p.s. $\begin{cases} 1 \text{ dim. } (K_0) \\ 2 \text{ dim.} \end{cases}$
[6] Hambly/Roscoe	p.s./triax.	90x 50x90	Weald clay	53	18	54	idem
[7] Henkel/Wade	p.s./triax.	102x406x51	Weald clay	46	20	38	p.s. } K_0 triax. }
[8] Ladd	p.s./triax./s.s.	89x 36x89	Boston Blue clay	-	-	-	idem
[9] Lade/Musante	proeven met ($\sigma_2 - \sigma_3$) / ($\sigma_1 - \sigma_3$) = constant	76x 76x76	Grundite clay	55	25	~ 50	isotroop
[10] Lee/Shubeck	p.s./triax.	61x 71x28	Kaolinite clay Higgins clay	44 38	21 21	36 38	p.s. K_0 triax. K_0 +isitr.
[11] Liam Finn/Mittal	p.s./triax.	-	"compacted clay"	36	29	-	p.s. } isotroop triax. }
[12] Shibata/Karube	plane stress (o.a. $\sigma_2 = \sigma_3$ = constant)	60x 35x20	Osaka alluvial clay (remoulded)	69	20	25	isotroop
[13] Sketchley/Bransby	p.s.	90x 50x90	Kaolin (remoulded)	76	39	68	1-dim. (K_0) en 2-dim.
[14] Vaid/Campanella	p.s./triax.	56x100x25	Haney clay	44	26	-	p.s. } K_0 triax. }
[15] Wu/Loh/Malvern	holle cilinder/o.a. tri- axial en plane stress	 38 51	"normally consolidat- ed remoulded plastic clay"	52	28	-	isotroop
[16] Yong/McKyes	proeven met $\frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} = \text{constant}$	102x 38x51	Kaolinite (remoulded)	55	38	78	isotroop

p.s. = plane strain
triax. = triaxiaal
s.s. = simple shear

Tabel: proef- en monstergegevens

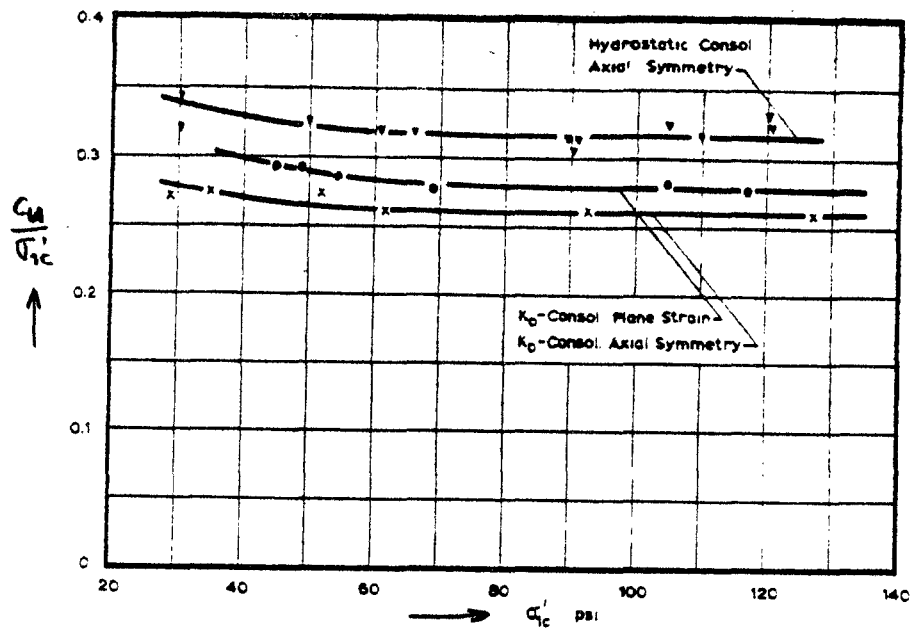


FIG. 2.—COMPARISON OF UNDRAINED STRENGTHS OF PLANE STRAIN AND TRIAXIAL SPECIMENS

Ontleend aan [7], Henkel/Wade

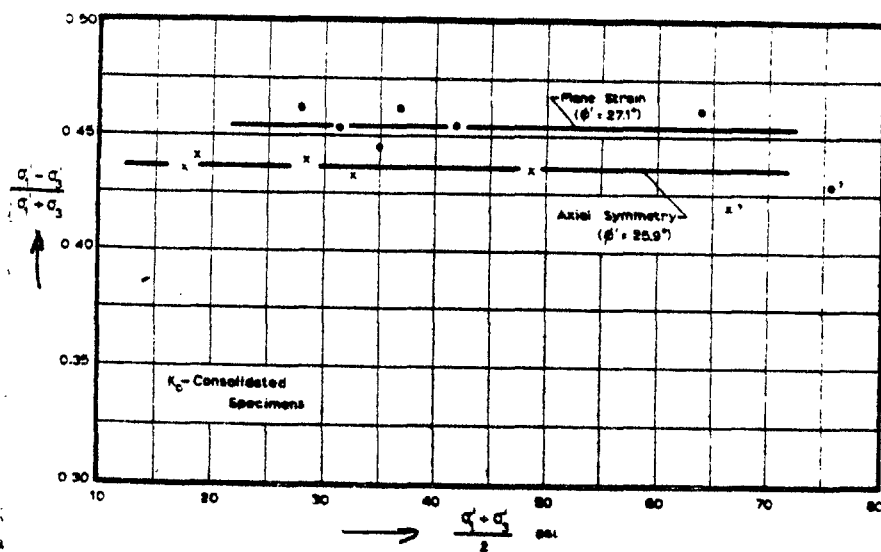


FIG. 3.—COMPARISON OF STRENGTHS OF PLANE STRAIN AND TRIAXIAL SPECIMENS IN TERMS OF EFFECTIVE STRESSES

Ontleend aan [7], Henkel/Wade

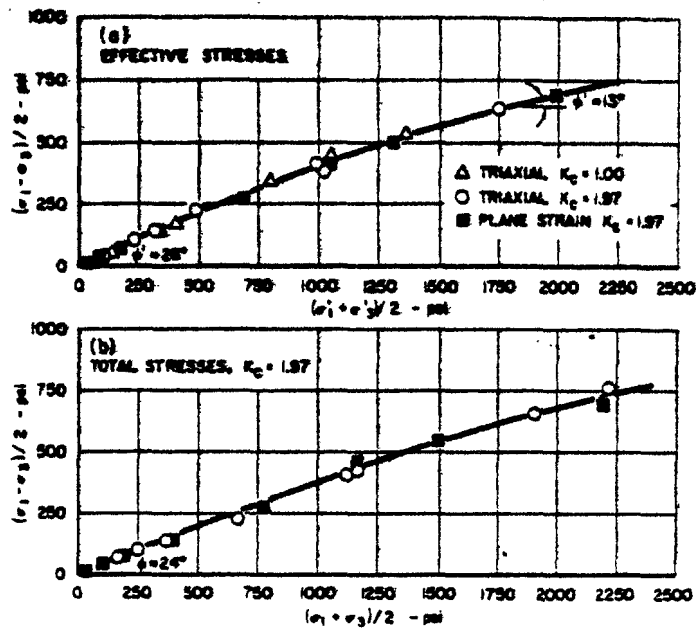


FIG. 8.—MODIFIED MOHR DIAGRAMS FOR TRIAXIAL AND PLANE STRAIN TESTS ON COMPACTED KAOLINITE

Ontleend aan [10], Lee/Shubeck

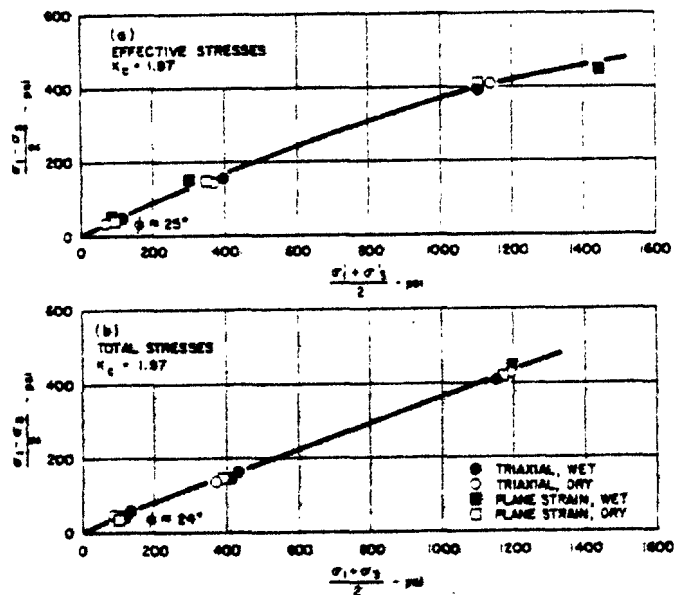


FIG. 9.—MODIFIED MOHR DIAGRAMS FOR TRIAXIAL AND PLANE STRAIN TESTS ON COMPACTED HIGGINS CLAY

Ontleend aan [10], Lee/Shubeck

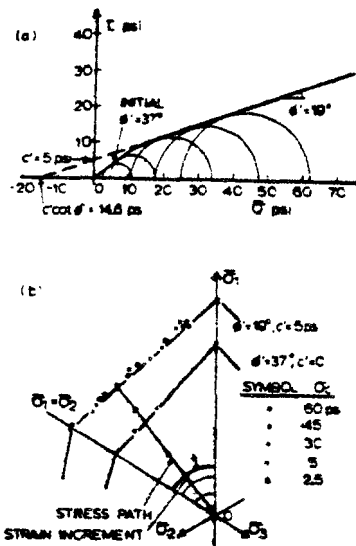


FIG. 9.—FAILURE STRESS COMBINATIONS: (a) ON MOHR PLOT; (b) ON COMMON DEVIATORIC PLANE IN PRINCIPAL STRESS SPACE

Ontleend aan [16], Yong/Mc-Kyes

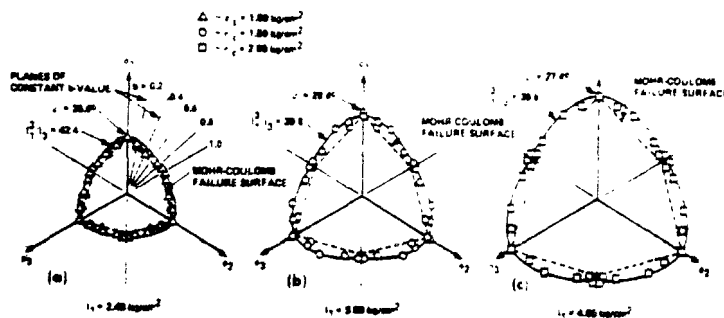


FIG. 6.—Traces of Failure Surface for Grondite Clay in Octahedral Planes

Ontleend aan [9], Lade/Musante

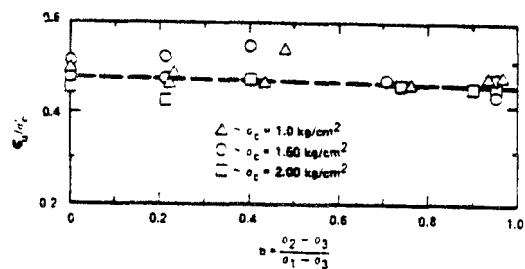


FIG. 7.—Variation of Normalized Undrained Shear Strength with Value of $b = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$

Ontleend aan [9], Lade/Musante

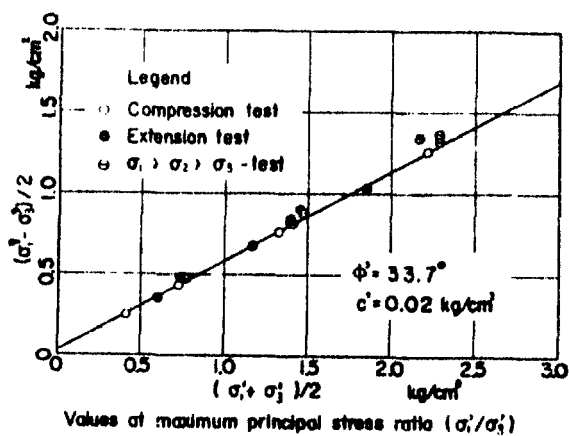


FIG. 8. Relationship between strength and effective normal stress; a comparison of the results of $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ tests and conventional triaxial tests.

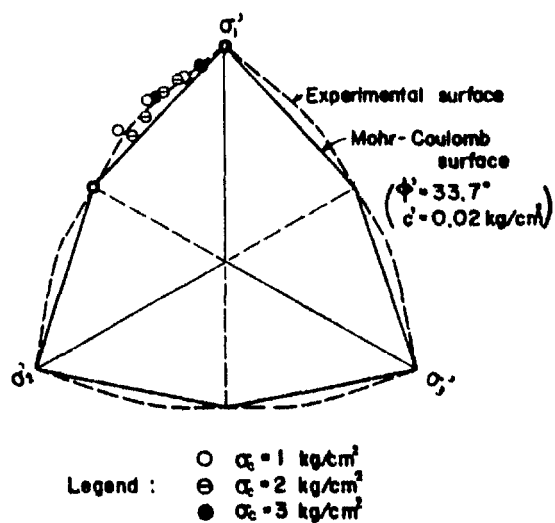


FIG. 9. Right section of experimental and Mohr-Coulomb failure surfaces.

Ontleend aan [12], Shibate/Karube

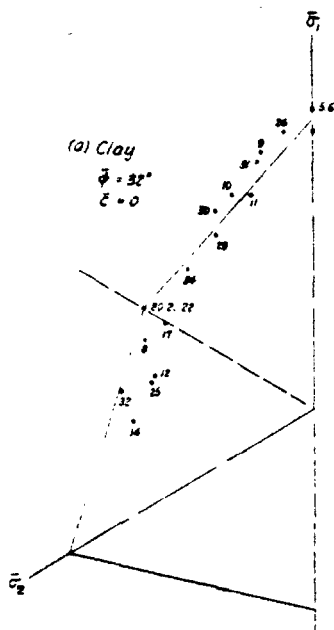


FIG 13.—FAILURE ENVELOPES

Ontleend aan [15], Wu/Ioh/Malvern

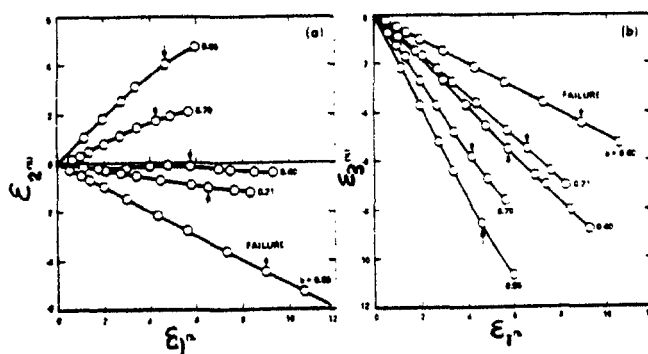


FIG. 4.—Relations Between Principal Strains Obtained in Cubical Triaxial Tests on Grondite Clay with Consolidation Pressure of 1.50 kg/cm²

Ontleend aan [9], Lade/Musante

INVLOED MIDDELSTE HOOFDSPANNING OP SCHUIF-
WEERSTANDSEIGENSCHAPPEN VAN KLEI

Invloed middelste hoofdspanning op
schuifweerstandseigenschappen van klei

CO-230660-1

juni 1978

In dit rapport worden de resultaten besproken van de oriënterende proefnemingen die in opdracht van het Centrum Onderzoek Waterkeringen werden uitgevoerd in het kader van het onderzoek "Invloed middelste hoofdspinning op het gedrag van klei".

De motivering van dit onderzoek, alsmede het voorstel voor het oriënterende programma is neergelegd in nota 230660/8 van maart 1977 over dit onderwerp.

In september 1977 werd een meer gedetailleerde versie met beproevingschema's uitgebracht. Na bespreking hiervan met het C.O.W. werd in oktober 1977 met de uitvoering van de proeven gestart. Het laboratoriumonderzoek kon in januari 1978 worden afgerond.

Dit rapport en de hiervoor vermelde nota's zijn opgesteld door Ir. J. Lindenberg.

INHOUD

	<u>Blz.</u>
1. Algemeen	1
2. Proefresultaten	2
3. Conclusies	3
3.1. Axiaalsymmetrische proeven 1 en 2	
3.1.1. Spanningspaden	
3.1.2. Spannings-rek gedrag	
3.1.3. Bezwijkgedrag	4
3.2. Plane strain proeven 3 en 4	
3.2.1. Spanningspaden	
3.2.2. Spanningsrekgedrag	
3.2.3. Bezwijkgedrag	
3.3. Vergelijking axiaalsymmetrische en plane strain proeven	5
3.3.1. Spanningspaden	
3.3.2. Spanningsrekgedrag	
3.3.3. Bezwijkgedrag	
3.4. Totaalspanningsbenadering	
4. Eindbeschouwing	6

1. Algemeen

In totaal werden 4 proeven verricht op blokvormige monsters in het zogenaamde ISC apparaat, waarbij de proeven 1 en 2 als triaxiaalproeven werden uitgevoerd.

De celspanning werkte bij deze proeven in 2 horizontale richtingen zodat $\sigma'_2 = \sigma'_3$ (triaxiaalproeven).

Bij de proeven 3 en 4 werd door middel van de zogenaamde "beltplaten" in één richting een spanning verkregen groter dan de celdruk dus $\sigma'_2 > \sigma'_3$. Bij deze twee laatste proeven werd als voorwaarde opgelegd dat de monsterafstand in de beltrichting niet toenam (vlakke vormveranderingsproeven of plane-strain-proeven).

De effectieve celspanning bij het begin van de proeven 1 en 3 bedroeg 50 kN/m^2 en bij de proeven 2 en 4, 150 kN/m^2 .

De keuze van deze beginspanningsniveaus werd mede bepaald aan de hand van het resultaat van een samendrukkingsproef.

De genoemde effectieve beginspanningen werden gerealiseerd met een celspanning van 250 kN/m^2 en een backpressure in het monster van 200 kN/m^2 bij de proeven 1 en 3 en met een celspanning van 300 kN/m^2 en een backpressure van 150 kN/m^2 bij de proeven 2 en 4. Alle 4 de monsters zijn verkregen uit een kleiblok van ca $20 \times 50 \times 50 \text{ cm}$. Een goede maatvoering werd bewerkstelligd met een speciaal voor het snijden van blokvormige kleimonsters ontworpen snijapparaat.

De afmetingen van de monsters bedroeg steeds ongeveer $85 \times 85 \times 55 \text{ mm}$. De natte volumegewichten van de monsters zijn opgenomen in tabel 1 en waren steeds nagenoeg gelijk. In tabel 1 zijn tevens de B_f -factoren opgenomen. B_f was steeds groter of gelijk aan 0,9, waaruit blijkt dat in demonsters weinig lucht aanwezig is geweest.

Alle 4 de proeven werden ongedraineerd uitgevoerd met een verticale deformatiesnelheid van $0,02 \text{ mm/minuut}$ wat neerkomt op ca $0,024\%$ van de monsterhoogte per minuut.

Alle uitvoeringshandelingen konden conform het tevoren opgestelde schema worden uitgevoerd. Dit werd als een meevaller gevonden, gezien het feit dat met dit onderzoek voor het eerst klei in het ISC apparaat werd beproefd. Omdat ook de resultaten vrij consistent bleken, hoefden geen aanvullende proeven te worden uitgevoerd. Wellicht dat de redelijk goede kwaliteit van de ISC monsters hiertoe heeft bijgedragen. Dit in tegenstelling tot de laatste cilindrische monsters van het proevenprogramma voor "invloed anisotropie (zie: rapport 230670-I), die moeilijk uit de overgebleven klei te steken waren. De in een groot blok aangevoerde Betuwe klei bleek namelijk vrij bros en het blok vertoonde na het verwijderen van het omhulsel enkele grote scheuren.

2. Proefresultaten

De resultaten van de proeven zijn weergegeven in de bijlagen 2 t/m 13. Voor elke proef zijn 3 figuren gemaakt. De veranderende spanningstoestand is steeds vastgelegd in een p-q-diagram (bijlagen 2, 5, 8 en 11).

Ten behoeve van het spannings-deformatiegedrag zijn voor elke proef 2 bijlagen getekend. De verticale deformatie ϵ_{vert} is uitgezet tegen

de deviatorspanning $\frac{\sigma'_V - \sigma'_H}{2} = q$ (bijlagen 3, 6, 9 en 12) en tegen

de spanningsverhouding σ'_V/σ'_H (een maat voor de relatieve schuifspanning (bijlagen 4, 7, 10 en 13)).

Op de bijlagen 14 t/m 17 worden de proefresultaten onderling vergeleken, waarbij het accent ligt op de bezwijkparameters. Op bijlage 14 is de bezwijklijn getekend in een p-q-diagram voor de 2 blokvormige triaxiaalmonsters. Op bijlage 15 is ditzelfde gedaan voor de 2 plane strain proeven, waarna op bijlage 16 de 2 omhullenden in een τ - σ diagram zijn uitgezet.

Bij de bijlagen 14 t/m 16 werd van korrelspanningen uitgegaan. Dit is voor een wrijvingsmateriaal als grond vanzelfsprekend in principe reëler. Het levert de echte bezwijkgrootheden ϕ' en c' van de grond.

In de funderingstechniek wordt echter ook vaak een totaal-spanningsbenadering toegepast.

Bij het interpreteren van triaxiaalproeven en plane strain proeven gaat men dan uit van de beginceldruk en de deviator-spanning, waarbij de veranderende waterspanning in het monster wordt genegeerd. In bijlage 17 zijn de proefresultaten volgens een dergelijke totaalspanningsbenadering uitgezet.

3. Conclusies

3.1. Triaxiaalproeven 1 en 2 (bijlagen 2 t/m 7, 14 en 16)

3.1.1. Spanningspaden

Beide proeven geven een opbouw van wateroverspanningen te zien. Relatief gezien zijn de maximale waterspanningen tijdens de 2 proeven vrijwel even groot, $u_{\max}$ respektievelijk 29 kN/m^2 en 86 kN/m^2 (tabel 1). Dit wijst erop dat de klei bij beide spanningsniveaus als normaal geconsolideerde klei reageert.

Proef 1 geeft vanaf een verticale deformatie van 7% een kleine afname van de wateroverspanning te zien met tegelijkertijd toenemende deviatorspanning. Proef 2 vertoont dit niet.

3.1.2. Spannings-rek gedrag

De proef bij het lagere spanningsniveau, proef 1, vertoont bij het begin van de proef een relatief stijver gedrag. Dit is vooral goed te zien in het verloop van $\varepsilon_{\text{vert}}$ met $\frac{\sigma_v}{\sigma_h}$ (bijlagen 4 en 7).

3.1.3. Bezwijkgedrag

In tabel 1 zijn de maximale waarden van q en σ'_V/σ'_H weergegeven. Hieruit blijkt dat de proef bij het lage spanningsniveau een hogere $(\sigma'_V/\sigma'_H)_{\max}$ waarde bezit wat wijst op de aanwezigheid van cohesie bij aanname van een rechtlijnige Coulombse bezwijklijn. De bij de omhullende van beide proeven behorende bezwijkgrootheden c' en ϕ' zijn $9,5 \text{ kN/m}^2$ en $26,5^\circ$ (figuren 14 en 16).

3.2. Plane strain proeven 3 en 4 (bijlagen 8 t/m 13, 15 en 16)

3.2.1. Spanningspaden

Ook bij de plane strain proeven trad toenemende wateroverspanning op, bij proef 4 (hoog spanningsniveau) relatief iets meer dan bij proef 3, zodat ook hier van normaal geconsolideerde monsters kan worden gesproken.

Bij beide proeven werd een top in het spanningspad bereikt, dat wil zeggen een top in de deviatorspanning, gevolgd met een daling. Ook bij beide proeven trad aan het eind weer een lichte toename van q op.

3.2.2. Spannings-rek gedrag

Beide proeven vertonen een top in het $q - \epsilon_{\text{vert}}$ verloop. Bij proef 4 is deze top ook aanwezig in het $\sigma'_V/\sigma'_H - \epsilon_{\text{vert}}$ diagram. De proef bij het lagere spanningsniveau, proef 3, vertoont bij het begin van de proef een relatief stijver gedrag (goed zichtbaar in het $\sigma'_V/\sigma'_H - \epsilon_{\text{vert}}$ diagram).

3.2.3. Bezwijkgedrag

In tabel 1 zijn de maximale waarden van q en σ'_V/σ'_H weergegeven. Hieruit blijkt dat de proef bij het lage spanningsniveau een hogere $(\sigma'_V/\sigma'_H)_{\max}$ waarde bezit, dus ook hier is sprake van een cohesie. De bij de omhullende van beide proeven behorende bezwijkgrootheden c' en ϕ' zijn respectievelijk $10,5 \text{ kN/m}^2$ en $28,5^\circ$ (figuren 15 en 16).

3.3. Vergelijking triaxiaal en plane strain proeven

3.3.1. Spanningspaden

De plane strain proeven geven iets meer wateroverspanningen dan de triaxiaalproeven. Dit is met name het geval bij het hoge spanningsniveau.

3.3.2. Spannings-rek gedrag

Er is geen eenduidig verschil in beginstijfheid waar te nemen tussen plane strain en triaxiaalproeven. Dit is wellicht het gevolg van verschillende elkaar tegenwerkende effecten bij ongedraineerde proeven. Het in principe stijvere gedrag tijdens plane strain omstandigheden kan teniet worden gedaan door de invloed van grotere wateroverspanningen en een andere verloop van het spanningspad.

De plane strain proeven vertonen duidelijk een piekgedrag (top in spannings rek gedrag met daarna een sterke afname van de schuifweerstand). Bij de triaxiaalproeven treedt dit veel minder op.

3.3.3. Bezwijkgedrag

Op bijlage 16 zijn de 2 bezwijklijnen voor de effectieve spanningen in een figuur getekend. Hoewel het verschil niet opzienbarend is, blijkt de onderzochte klei onder plane strain omstandigheden meer schuifweerstand te bezitten dan onder triaxiaal-omstandigheden. De ϕ' is 2° hoger en de c' is 1 kN/m^2 wat resulteert in een ongeveer 10% hogere schuifweerstand.

3.4. Totaalspanningsbenadering

In bijlage 17 zijn de omhullenden getekend die resulteren uit een totaalspanningsaanpak. Nu blijkt een ander beeld te ontstaan. De hogere effectieve bezwijkgrootheden voor plane strain worden bij een totaalspanningsbenadering gedeeltelijk teniet gedaan door het negeren van de wateroverspanning. De grotere waterspanningen bij plane strain resulteren namelijk in een grotere verschuiving van de Mohrse cirkels naar links.

Tot een grondnormaalspanning van 100 kN/m^2 leveren triaxiaalomstandigheden meer weerstand.

Voor de praktijk zal van de schuifweerstand gebaseerd op totaalspanningen moeten worden uitgegaan wanneer sprake is van snelle verschijnselen.

Bij dijken is dit meestal niet het geval, zodat hanteren van op effectieve spanningen gebaseerde parameters meer voor de hand ligt.

4. Eindbeschouwing

De uitvoering van het onderzoek is geheel naar wens verlopen. Het vooraf opgestelde schema kon normaal worden afgewerkt. Nergens deden zich grote problemen voor. Ook de resultaten van de proeven bleken vrij consistent. De eindconclusie dat de plane strain proeven hogere effectieve bezwijkparameters opleverden dan de axiaalsymmetrische proeven is vanzelfsprekend betrekkelijk. Allereerst is het gevonden verschil maar relatief klein doch bovendien is deze conclusie gebaseerd op uitkomsten van het minimaal aantal benodigde proeven.

Het hier gerapporteerde onderzoek kan slechts als een oriënterend onderzoek worden beschouwd.

De resulterende grootte van het verschil tussen plane strain en axiaal symmetrische bezwijkgrootheden is, omdat slechts 1 klei werd onderzocht, eveneens zeer betrekkelijk. Het is niet onmogelijk dat andere kleisoorten kleinere of grotere verschillen te zien zullen geven.

Om tot een duidelijker uitspraak te kunnen komen, zou het uitvoeren van onderzoek op meerdere kleisoorten in overweging genomen dienen te worden.

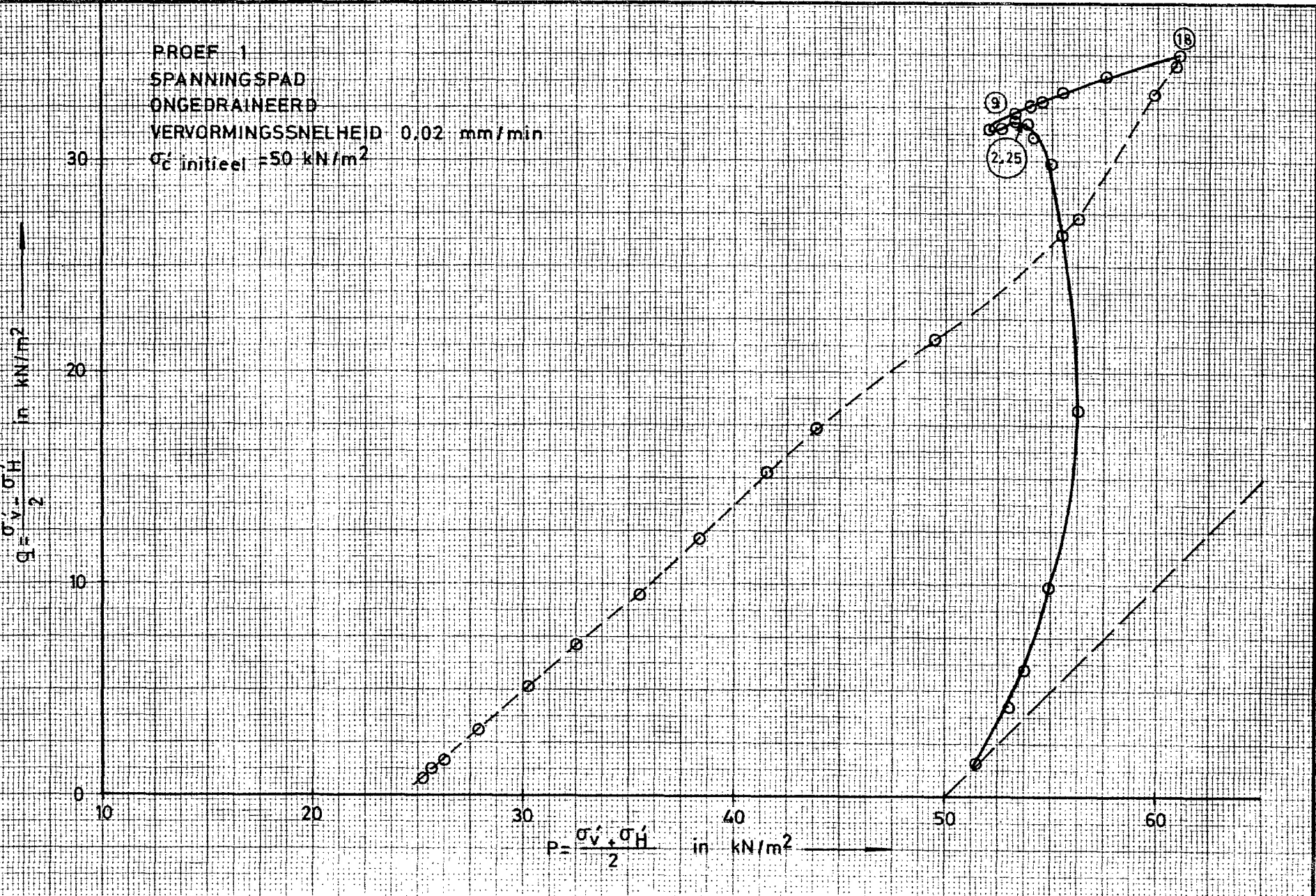
Tabel 1: Monstergegevens ISC-proeven

Monster- nummer (tevens proefnr.)	soort proef		initiële eff. cel- druk (kN/m ²)	begin volume gewicht monster t/m ³	B- faktor	resultaten				
	axiaal symm. $\sigma_2 = \sigma_3$	plane strain $\epsilon_b = 0$				max. deviator spanning q (kN/m ²)	$(\epsilon_{\text{vert}})_{q_{\text{max}}}$ (%)	$(\sigma'_V/\sigma'_H)_{\text{max}}$	$(\epsilon_{\text{vert}})_{\left(\frac{\sigma'_V}{\sigma'_H}\right)_{\text{max}}}$ (%)	maximale water- spanning U _{max} (kN/m ²)
1	x		50	1,80	0,90	35	17	4,03	9,3	29
2	x		150	1,79	0,93	67,5	6,5	3,10	8,0	86
3		x	50	1,78	0,95	37	1,3	4,65	14,5	31
4		x	150	1,79	0,90	62	3,5	3,6	5,6	102

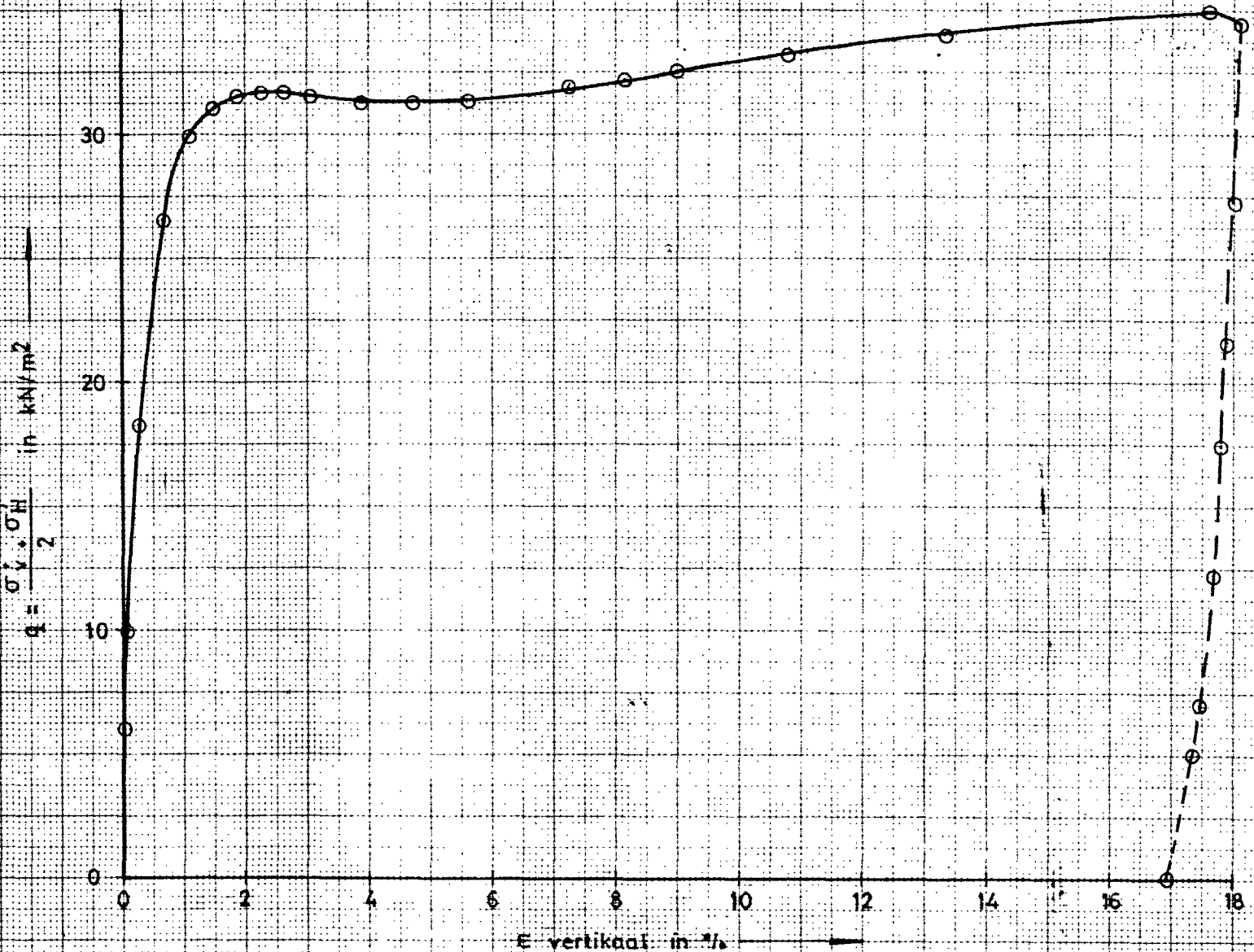


laboratorium voor grondmechanica delft
telefoon : (015) - 56 92 23
telefax : 33326
solab nl

INVLOED	MIDDELSTE	HOOFDSPANNING	CO - 230660	BIL. 2	A ₄
TRIAXIAALPROEF	OP	BLOKVORMIG			
ISC	APPARAAT	PROEF 1			



PROEF 1



$$\frac{2u/Nk \cdot u}{H_0 \cdot \lambda \cdot D} = b$$



laboratorium voor grondmechanica delft

telefoon (015) - 56 92 23

telefax 33326 solab nl

INVLOED MIDDELSTE HOOFDSPANNING

VERLOOP $q - \epsilon$ VERTIKAAL ISC PROEF 1

BUL. 3

CO-230660

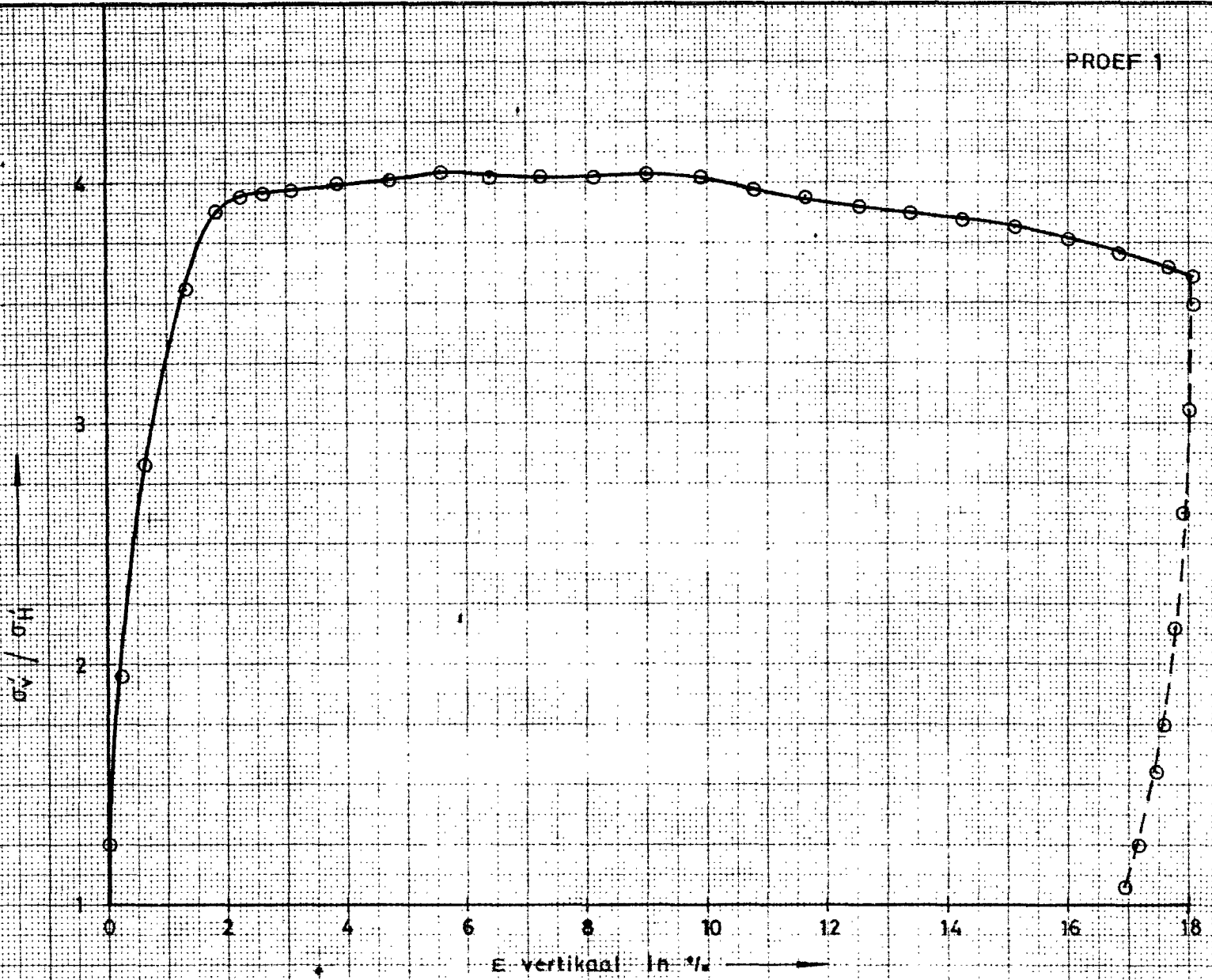
A₄

get
21

sec

dd

PROEF 1



laboratorium voor grondmechanica delft
 telefoon (015) - 56 92 23
 telex 33326 sodab nl

INVLOED		MIDDELSTE		HOOFDSPANNING	
VERLOOP		σ _v / σ' _H - ε		VERTIKAAL	
				ISC PROEF 1	
CO - 230660		BUL. 4		A ₄	



laboratorium voor grondmechanica delft
telefoon (015) - 34 98 23
teleex 33326 sokab nl

get. *[handwritten signature]*
prec.

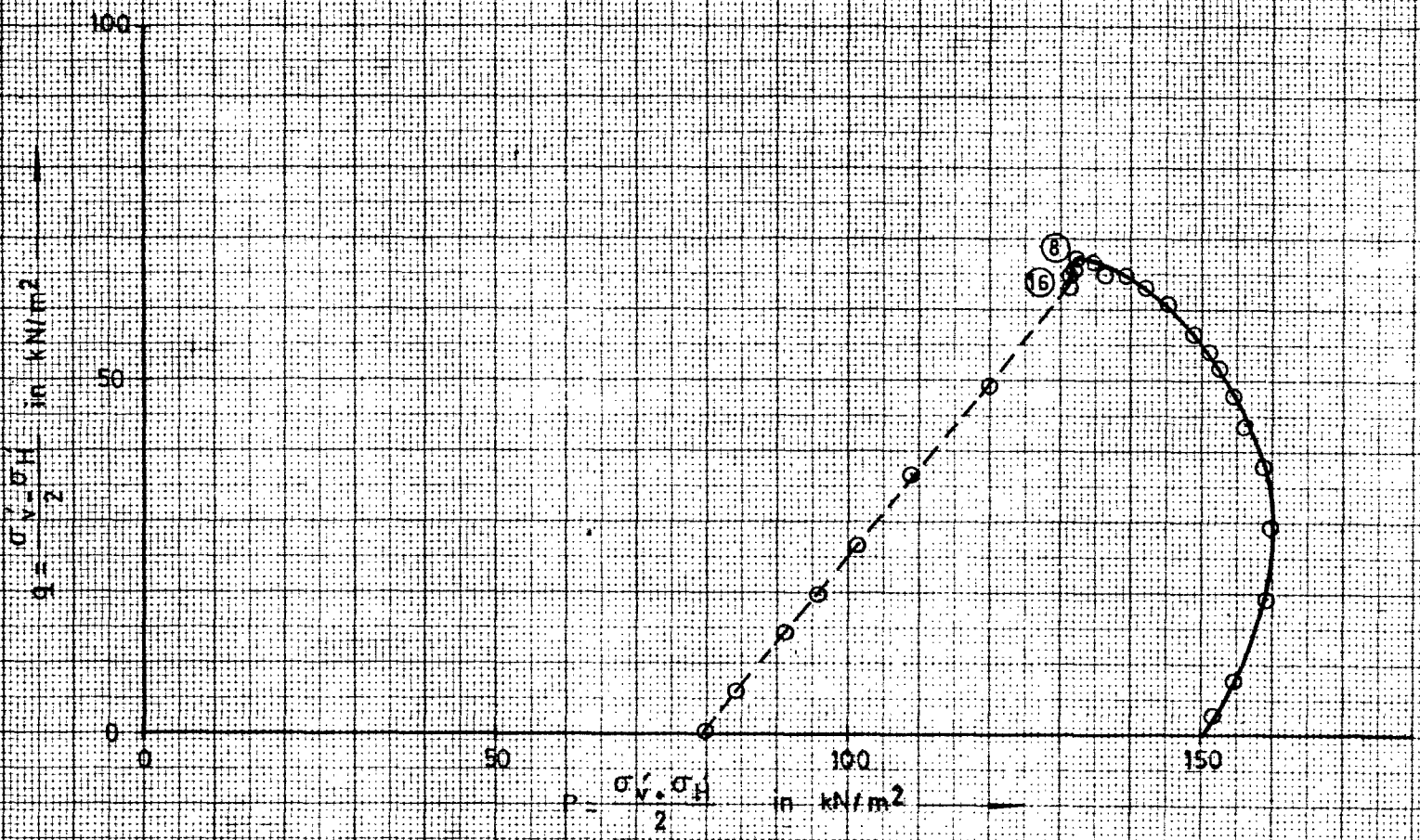
INVLOED MIDDELSTE HOOFDSPANNING

CO - 230660

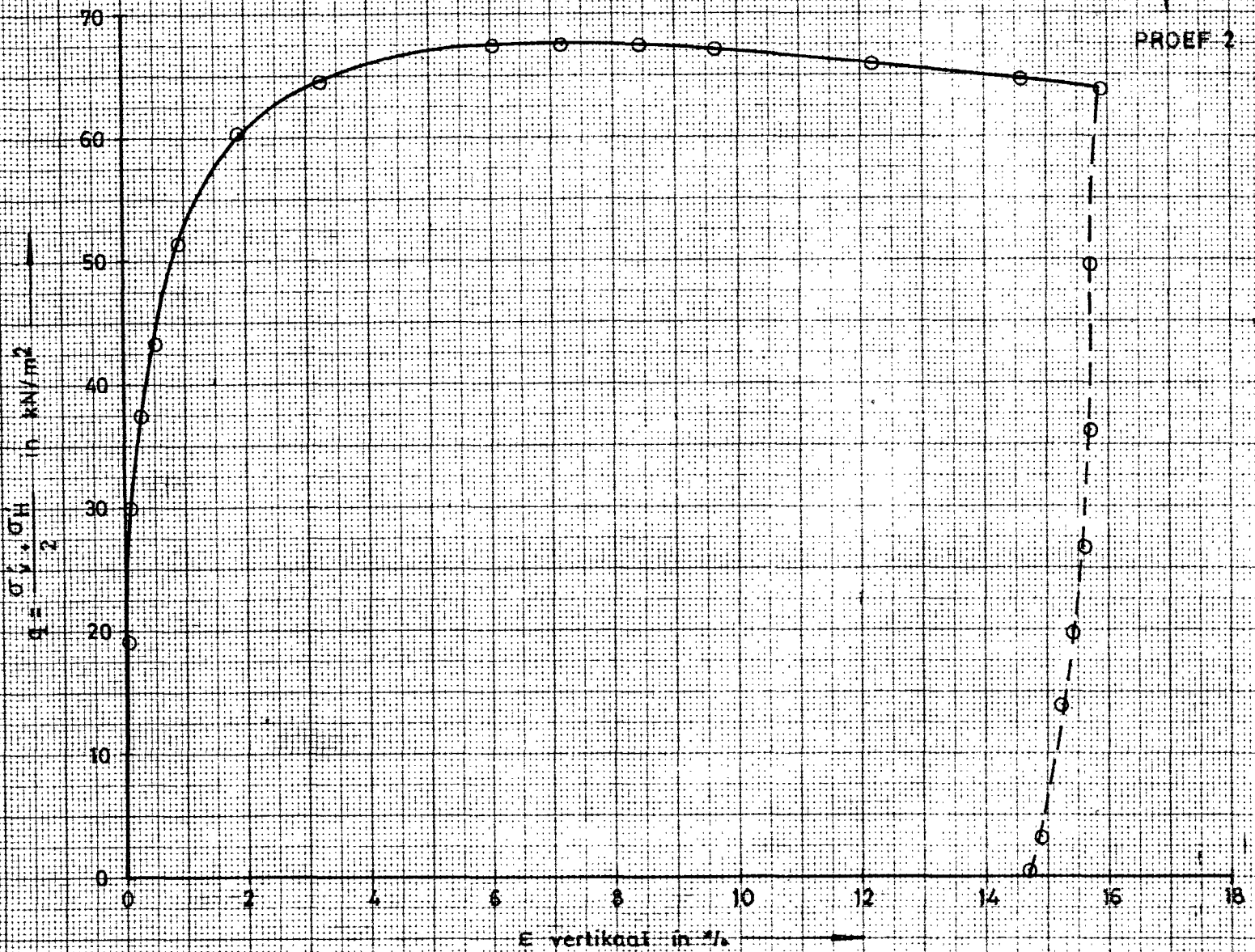
TRIAXIALPROEF OP BLOKVORMIG KLEIMONSTER IN
ISC APPARAAT PROEF 2

BIJL. 5
form. A₄

PROEF 2
SPANNINGSPAD
ONGEDRAINEERD
VERVORMINGSSNELHEID
 σ'_c initieel = 150 kN/m²



PROEF 2



$$\frac{q_{ult}}{N \cdot A} = \frac{H_0}{2} \cdot \frac{1}{1.0} = 1.0$$



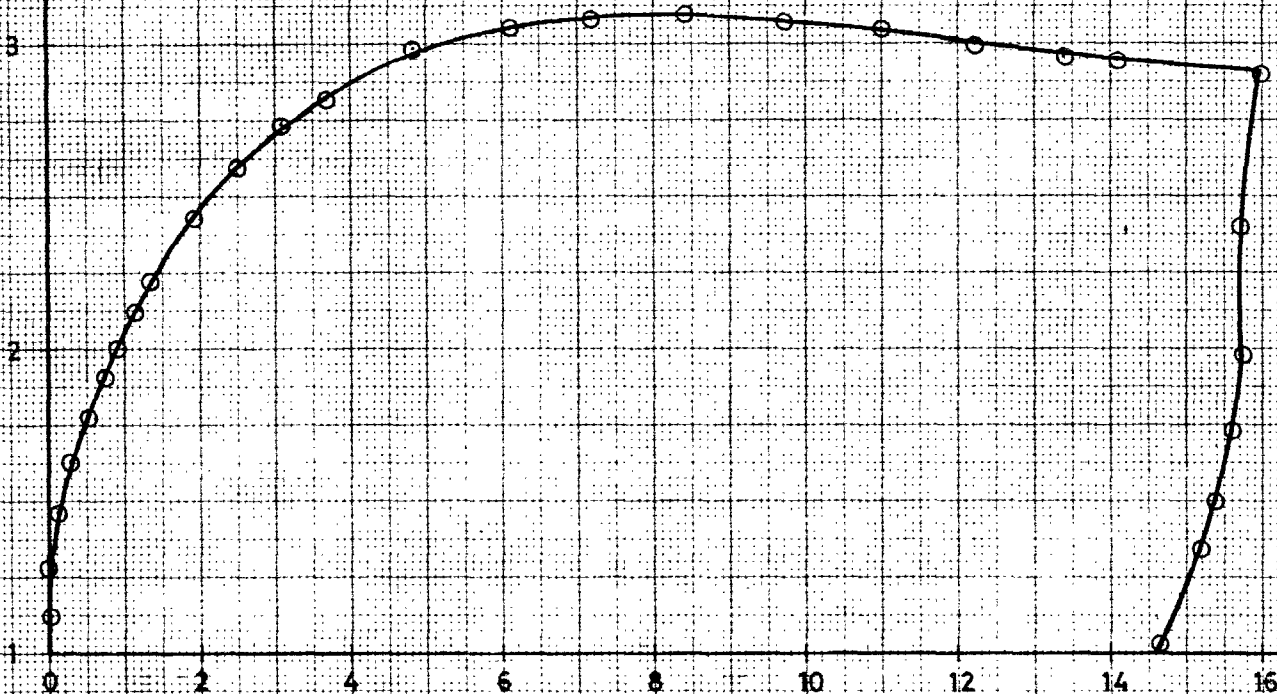
laboratorium voor grondmechanica delft
 telefoon (015) - 56 92 23
 telex 33326 solab nl

INVOED	MIDDELSTE	HOOFDSPANNING	VERLOOP q - ε VERTIKAAL	ISC PROEF 2
CO-230660	BIL. 6	get	form	A ₄

PROEF 2

H_0 / λ_0

ϵ vertikaal in %



laboratorium voor grondmechanica delft
 telefoon (015) - 56 92 23
 telex 33326 SOLAD NL

d.d.

get
 sec

INVLOED MIDDELSTE HOOFDSPANNING
 VERLOOP $\sigma'_v / \sigma'_h - \epsilon$ VERTIKAAL ISC PROEF 2

CO - 230660

BUL. 7

A₄



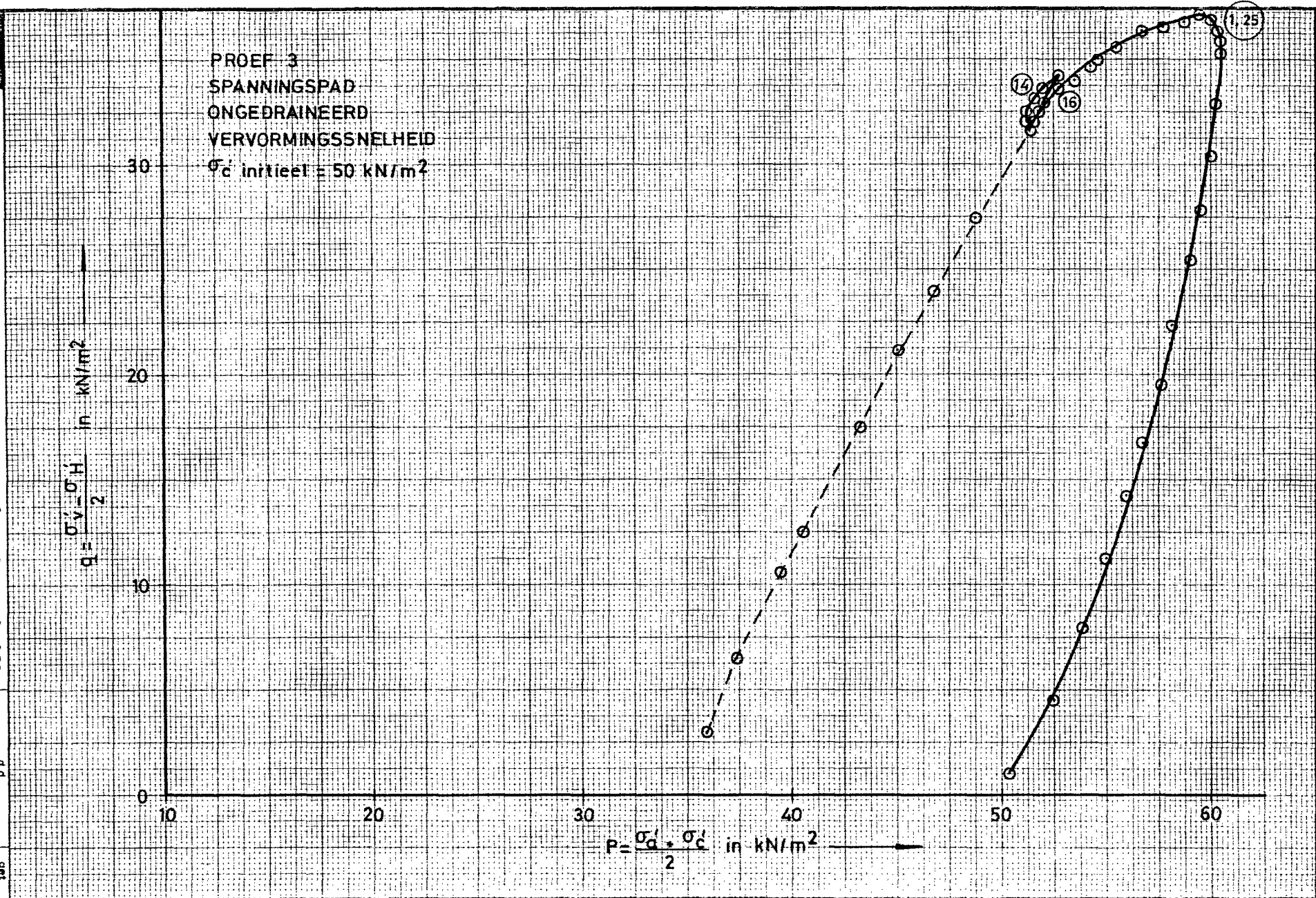
laboratorium voor grondmechanica delft
telefoon: (015) - 56 92 23
teleex: 33326 solib nl

INVLOED MIDDELSTE HOOFDSPANNING
PLANE STRAINPROEF OP BLOKVORMIG KLEIMONSTER
IN ISC APPARAAT PROEF 3

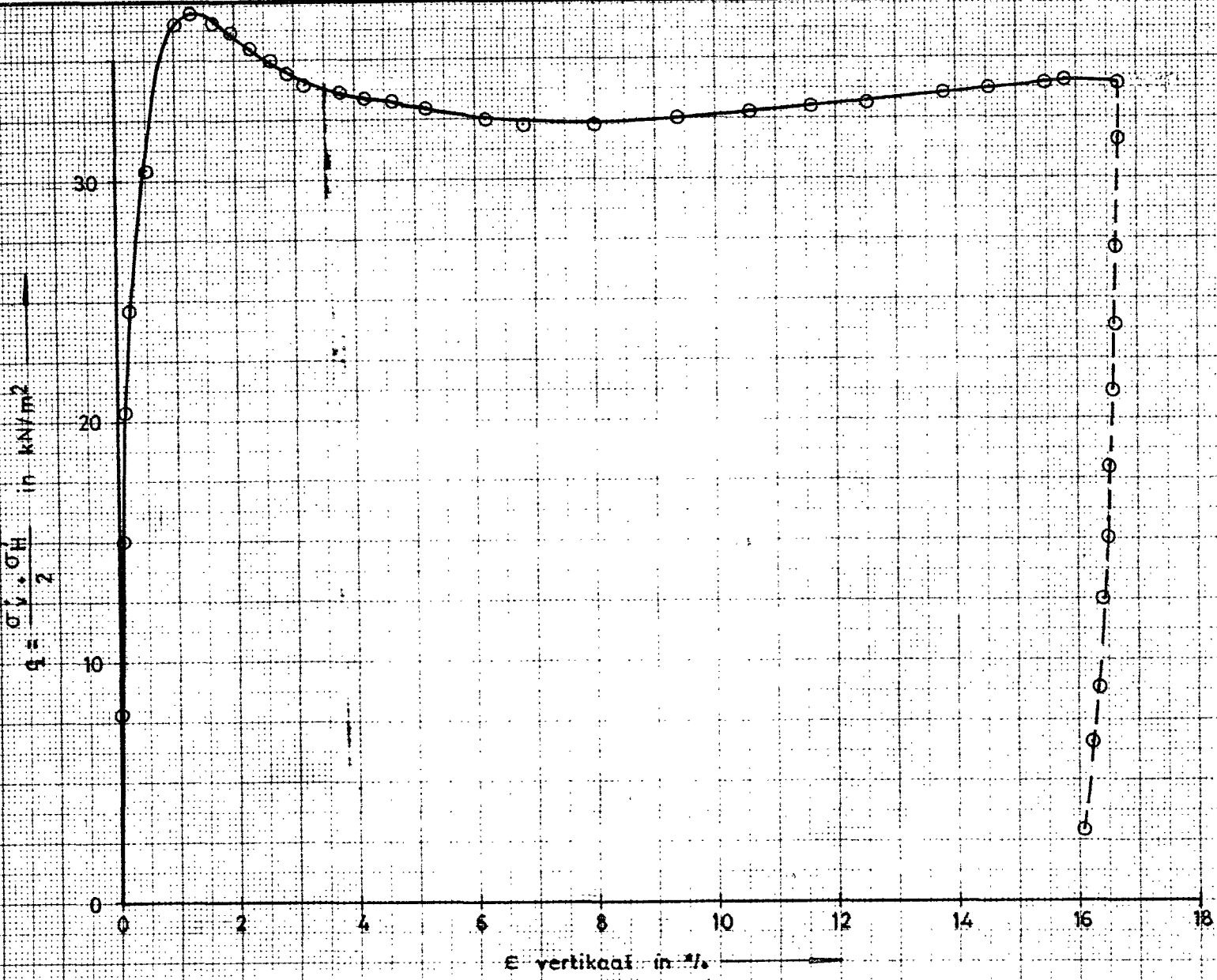
BUL. 8	CO - 230660	get. gec.

PROEF 3
SPANNINGSPAD
ONGEDRAINEERD
VERVORMINGSSNELHEID
 σ'_c initieel = 50 kN/m²

$$\frac{2}{H \cdot \sigma'_c - \sigma'_c} = b$$



PROEF 3



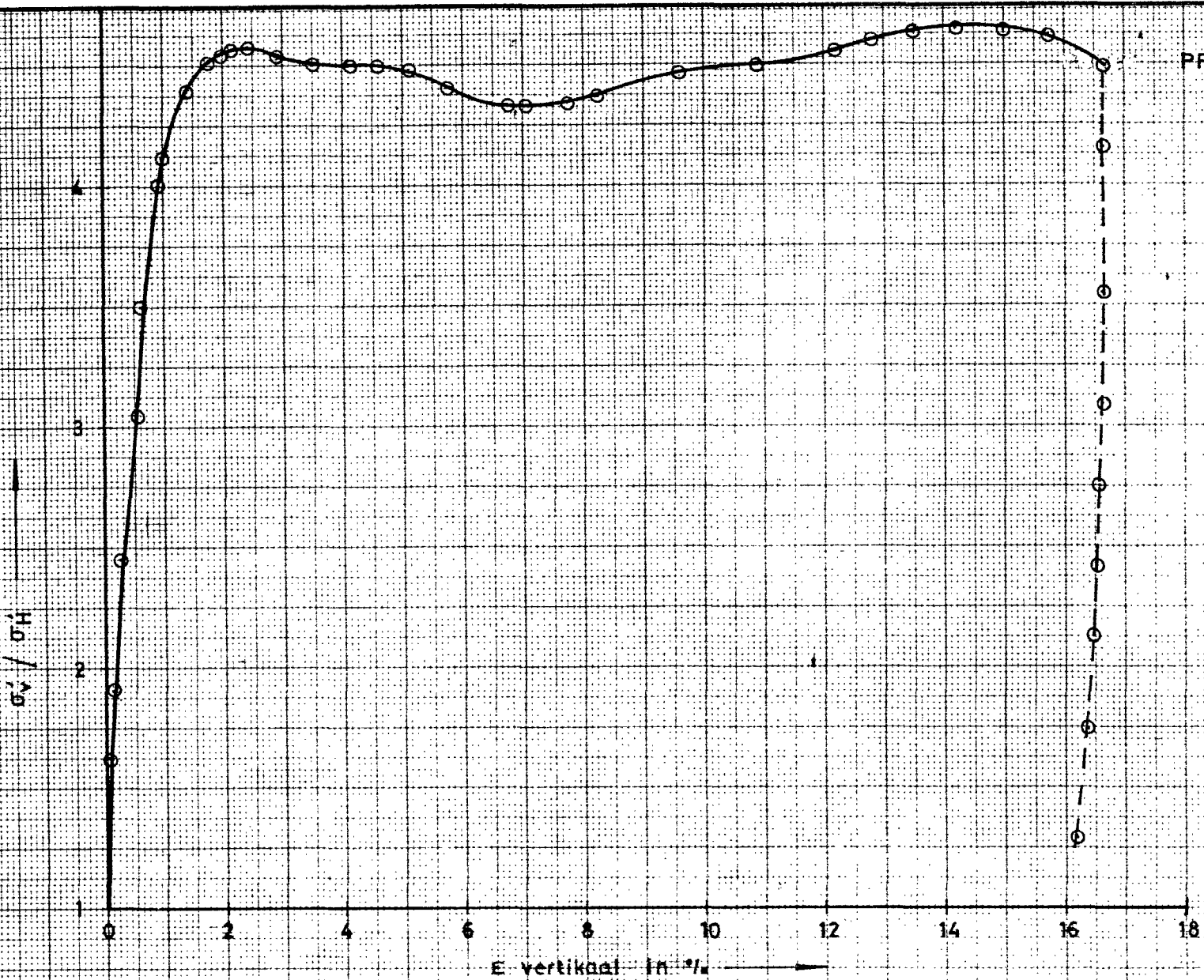
$$\frac{2 \cdot \sigma_v}{H_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{H_0}{2 \cdot \sigma_v}}} = 1$$



laboratorium voor grondmechanica delft
 telefoon (015) - 56 92 23
 telefax 33326 solid nl

INVOED	MIDDELSTE	HOOFDSPANNING	CO-230660	get
VERLOOP	q - ε VERTIKAAL	ISC PROEF 3	BUL 9	form
			A ₄	gec

PROEF 3

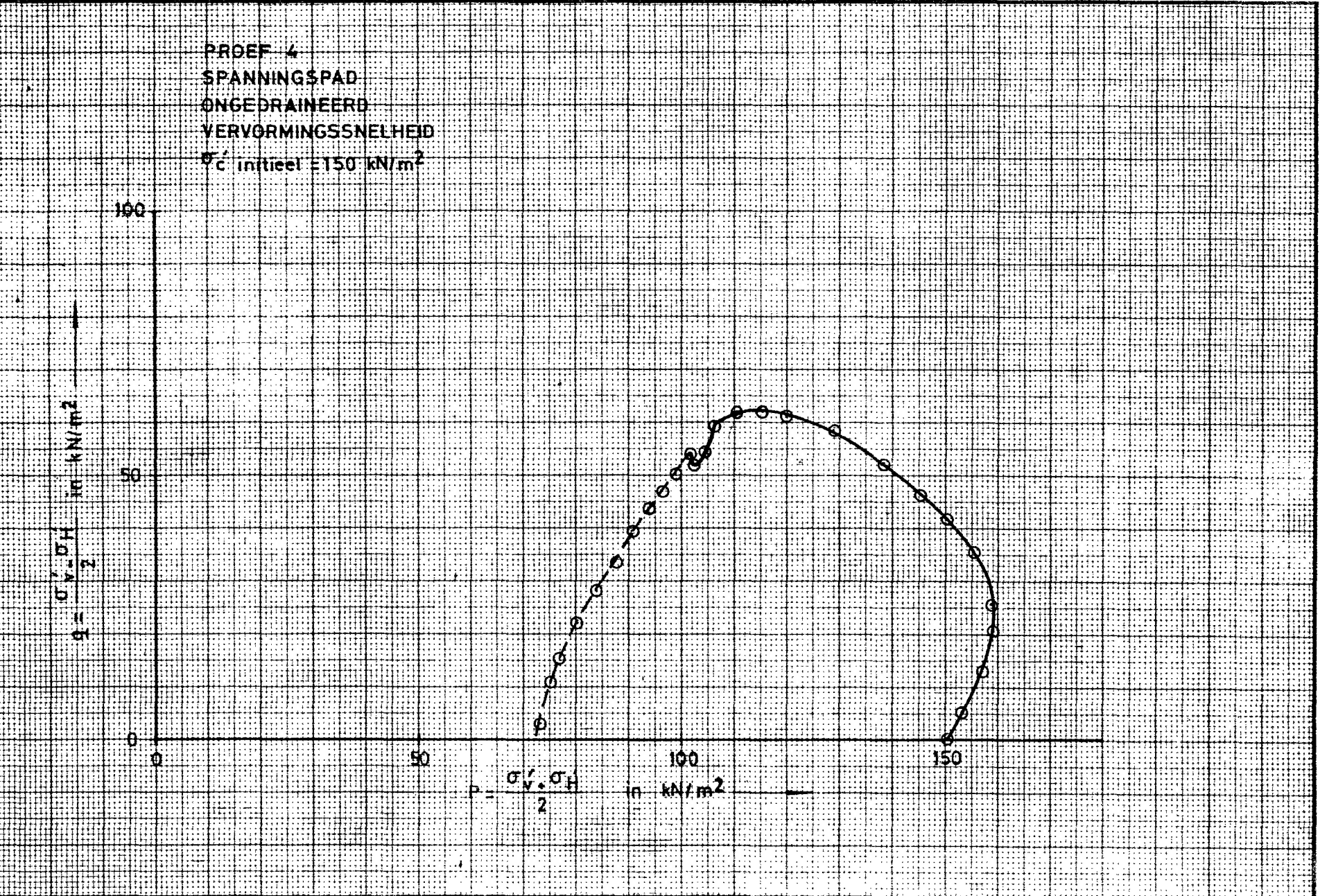


H_0 / λ_0

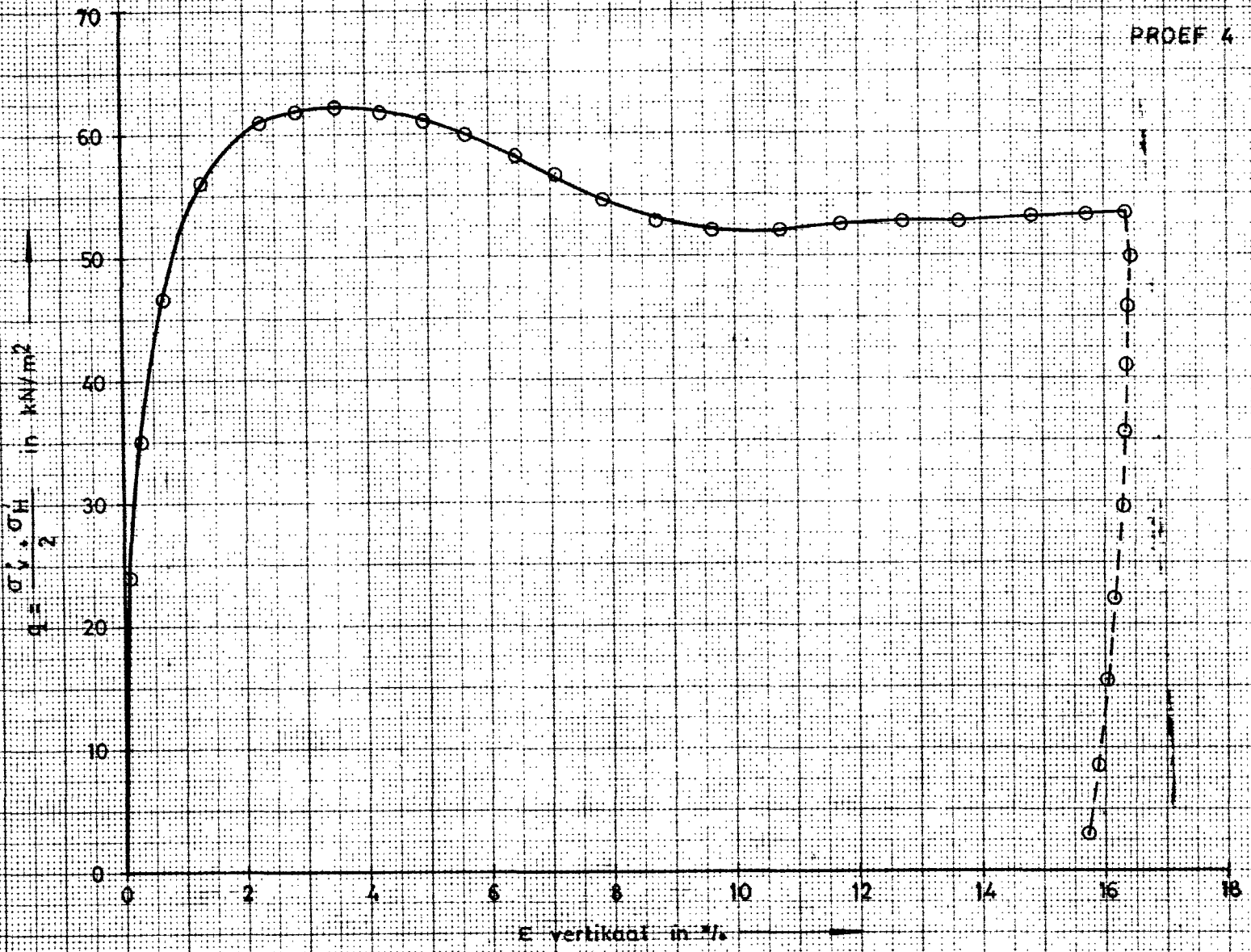


laboratorium voor grondmechanica delft
 telefoon (015) - 34 92 23
 telex 33326 SOLAB NL

INVLOED	MIDDELSTE	HOOFDSPANNING	VERLOOP $\sigma_v / \sigma_h - \epsilon$ VERTIKAAL	ISC	PROEF 3
CO-230660	BUL. 10	get. <i>DR</i>	form A_4		



PROEF 4



laboratorium voor grondmechanica delft

telefoon (015) - 56 92 23

telefax 33326

sofab nl

d.d.

get

INVLOED MIDDELSTE HOOFDSPANNING

CO-230660

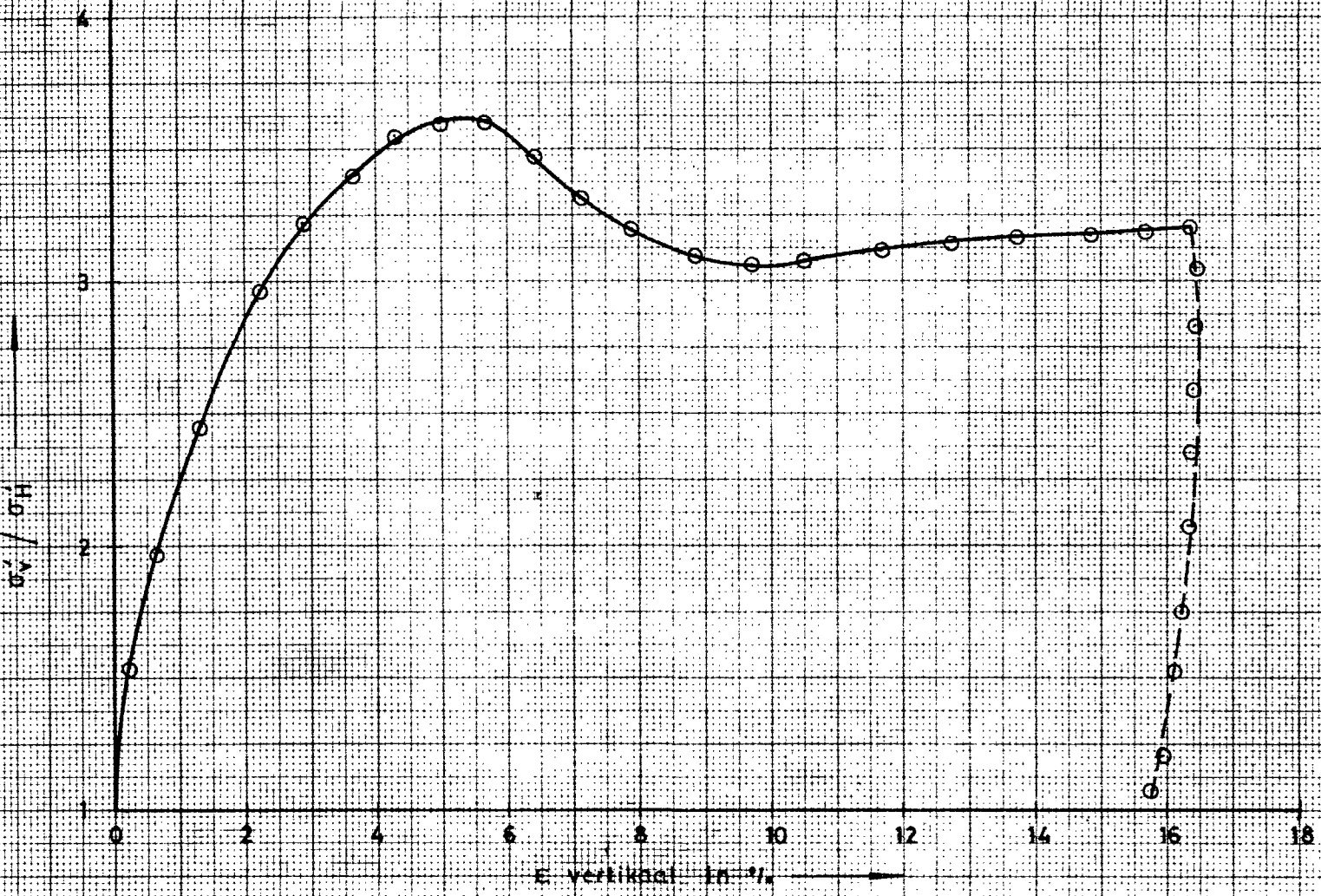
get

VERLOOP $q - \epsilon$ VERTIKAAL ISC PROEF 4

BIJL. 12

A₄

PROEF 4



laboratorium voor grondmechanica delft
 telefoon (015) - 56 92 23
 telex 33326 solab nl

INVLOED	MIDDELSTE	HOOFDSPANNING	VERLOOP $\sigma_v / \sigma_H - \epsilon$	VERTIKAAL	ISC	PROEF 4
						BIL. 13
						A ₄



laboratorium voor grondmechanica delft

telefoon (015) - 34 92 23

telefax 33326 e-mail n1

INVLOED MIDDELSTE HOOFDSPANNING

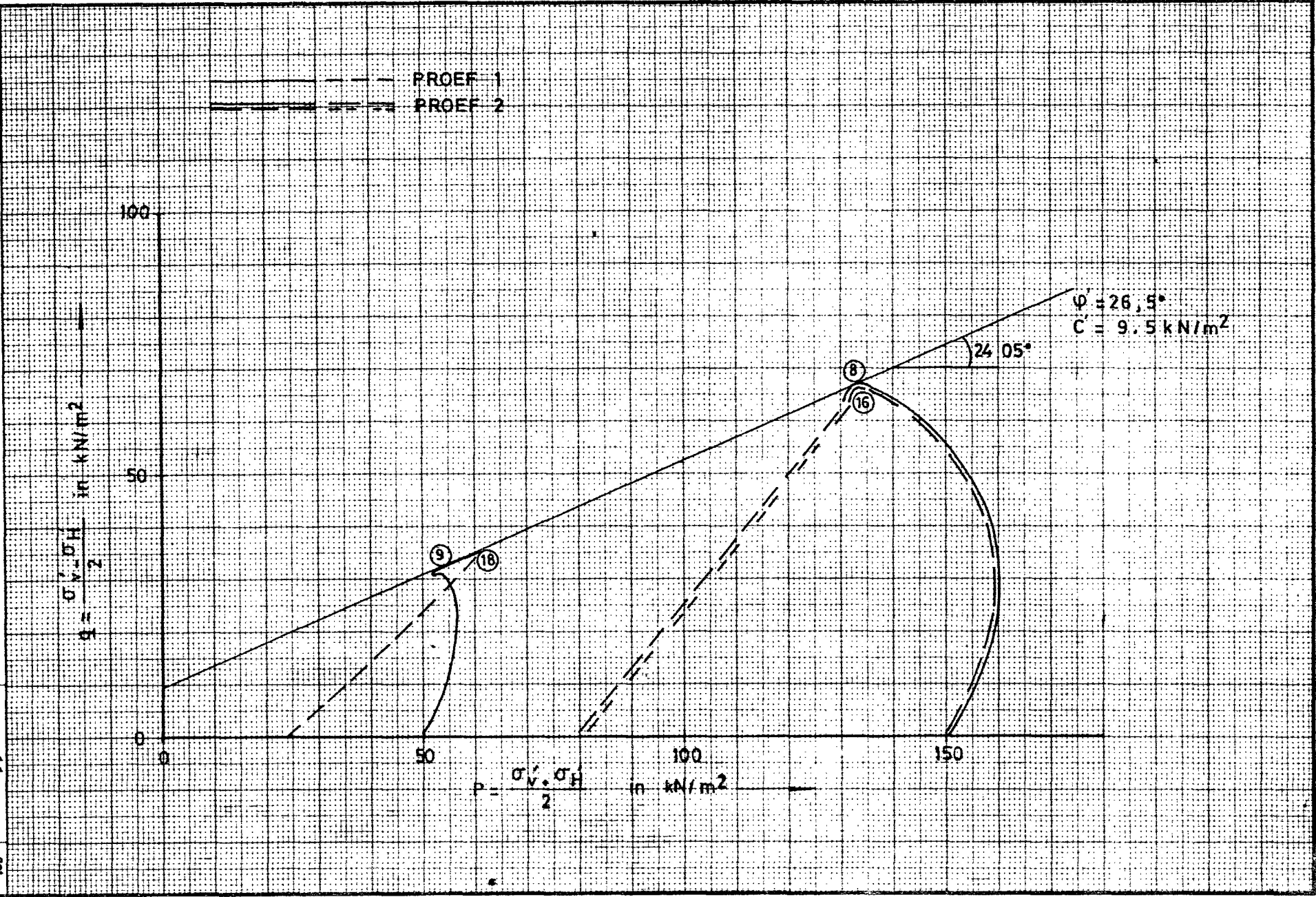
CO - 230660

SPANNINGSPADEN AXIAAL SYMMETRISCHE PROEVEN

1 en 2

BIL. 14

A₄





laboratorium voor grondmechanica delft

telefoon (015) - 56 92 23

telefax 33326 sand nl

INVLOED MIDDELSTE HOOFDSPANNING

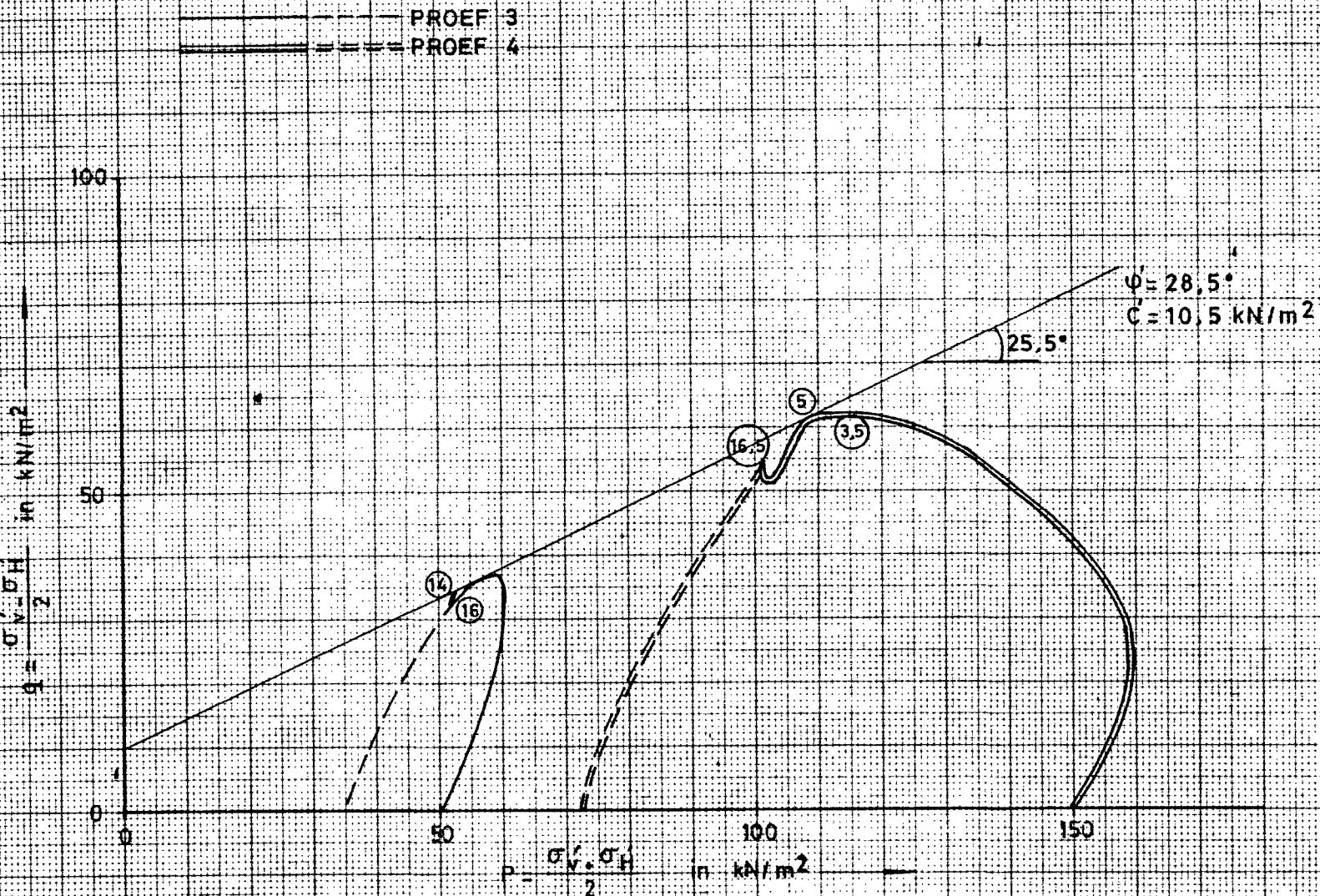
CO-230660

SPANNINGSPADEN PLANE STRAIN PROEVEN 3 en 4

BIL. 15

A₄

get
spec

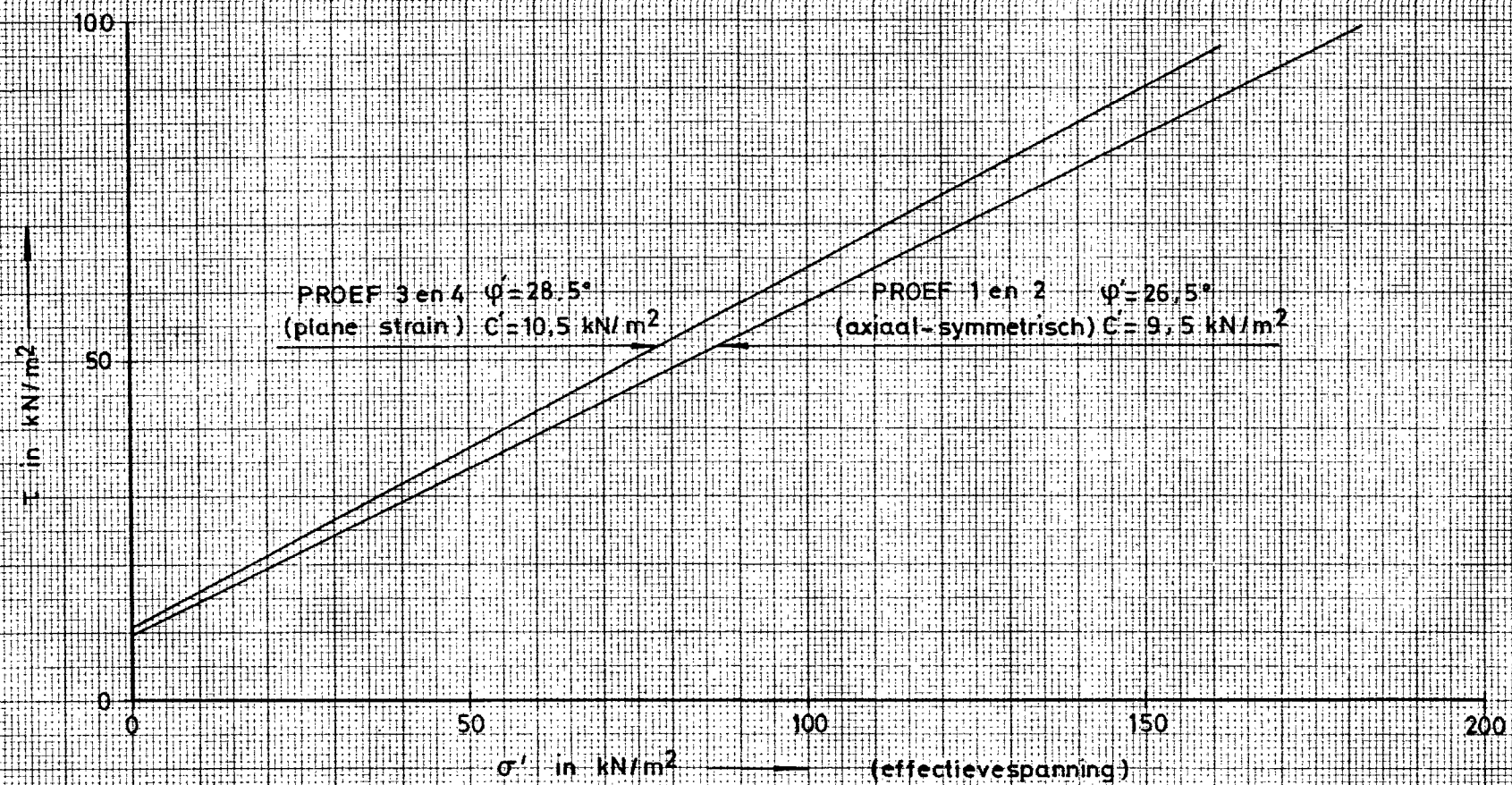




laboratorium voor grondmechanica delft
telefoon: (015) - 56 92 23
telefax: 333 26 5014

INVLOED MIDDELSTE HOOFDSPANNING

CO-230660	Bijl. 16	get.
		gec.





laboratorium voor grondmechanica delft
telefoon: (015) - 56 92 23
telefax: 33326 solab nl

d.d.

get.
gec.

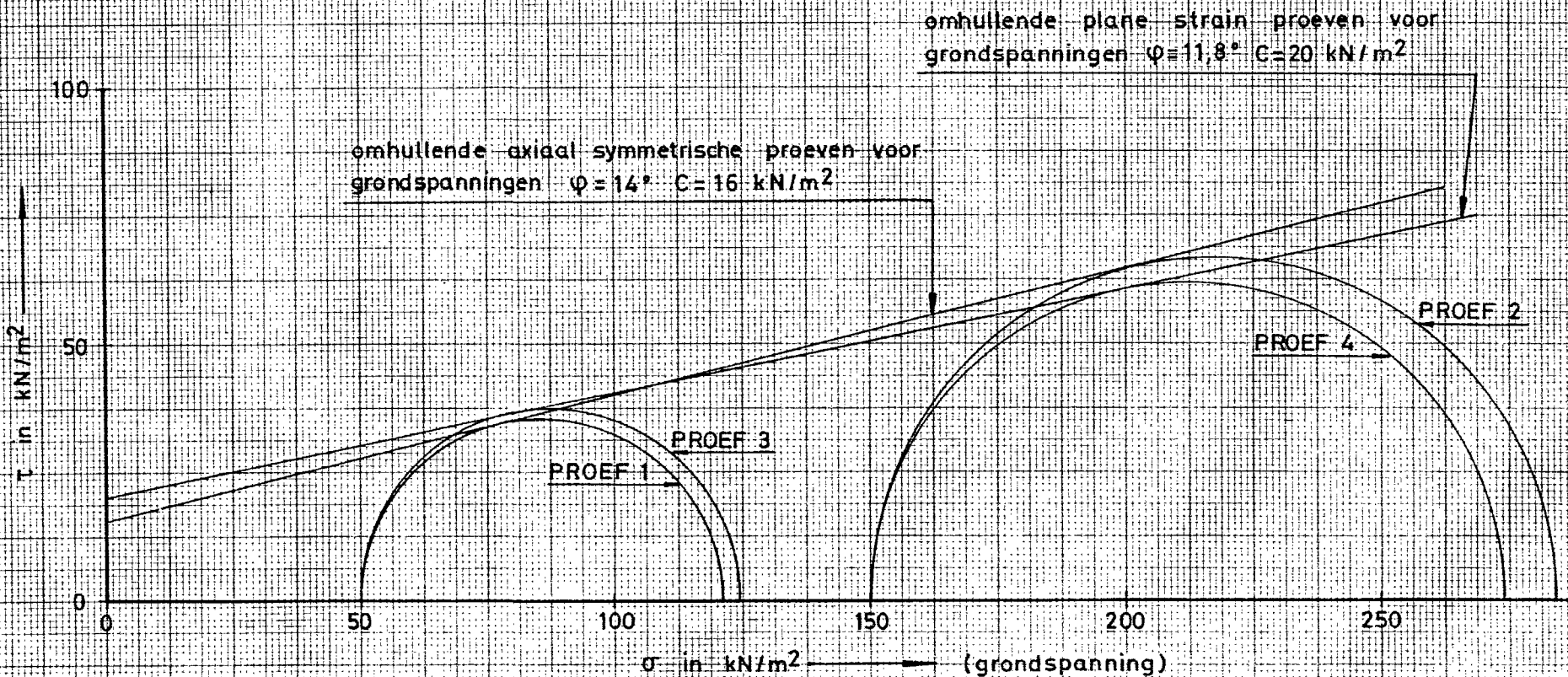
INVOLED MIDDELSTE HOOFDSPANNING

CO - 230660

TOTAALSPANNINGSBENADERING

BIJL. 17

get.
gec.



RESULTATEN VAN DE SAMENDRUKKINGPROEVEN, WELKE
UITGEVOERD ZIJN OP KLEI VAN LOKATIE:

13-2 uit EMPEL en GEWANDE

RESULTATEN VAN DE SAMENDRUKKINGSPROEVEN
WELKE UITGEVOERD ZIJN OP KLEI VAN LOKA-
TIE: 13-2 UIT EMPEL EN GEWANDE

CO-230662

Januari 1979

Opgesteld door: ing. F.M. Schenkeveld

Resultaten Samendrukkings-
proeven (Empel en Gewande klei)

Rapport CO-230662/19
d.d. Januari 1979

Toelichting

Als voortzetting van het eerste oriënterende onderzoek naar de "Invloed van de middelste hoofdspinning" dat op Betuwe klei werd uitgevoerd, is door het Centrum Onderzoek Waterkeringen naar een andere klei gezocht.

Deze klei moest homogeen van samenstelling zijn en normaal geconsolideerd. Tevens zouden op deze klei andere proevenprogramma's starten zoals het onderzoek "Anisotropie".

Het LGM heeft hierbij opdracht gekregen een continue boring tot 5 m - maaiveld uit te voeren op lokatie 13-2 van de binnendijk tussen Empel en Gewande.

Uit deze boring zijn drie monsters t.b.v. samendrukkingsproeven gekozen.

Aanvullend zijn op verschillende hoogten uit de boring verzadigingsgraden bepaald, alsmede natte volumegewichten, watergehaltes en poriënvolumes.

Tevens is de soortelijke massa van de korrels (klei-deeltjes) bepaald om de verzadigingsgraad nauwkeuriger te kunnen bepalen.

Er zijn twee foto's gemaakt, een foto direct na het uitleggen van de boring en een foto na het uitnemen van het benodigde monstermateriaal en het halveren van de boring. (zie bijlagen).

Op de eerste foto is duidelijk kleurverschil te zien op 1,70 m, wat erop kan wijzen dat het laagste grondwaterniveau 1,70 m is geweest.

Boven dit niveau zou een slechte verzadigingsgraad en overconsolidatie door uitdroging aanwezig kunnen zijn.

Een ander punt waarmee rekening gehouden moest worden, is dat niet onbeperkt diep gestoken kan worden, omdat voor de geplande onderzoeken grotere diameter monsters vereist zijn, dan de grootste beschikbare diameter steekapparaat van 66 mm kan leveren.

Tevens dienen voor het onderzoek "Anisotropie" horizontaal georiënteerde monsters verkregen te worden. Dit vereist een steekapparaat met een diameter groter dan 20 cm.

Om de kosten zo laag mogelijk te houden, moet zo dicht mogelijk onder het maaiveld gestoken worden.

De monsters voor de samendrukkingsproeven zijn daarom uit de bovenste 3 meters gekozen. Dieper zou nagenoeg onhaalbaar zijn voor monsterwinning met een steekapparaat waarvan de diameter groter dan 20 cm is.

Omdat uit de verzadigingsgraad (tab. 1) de gehele boring tot aan het maaiveld goed verzadigd bleek, is tevens een samendrukkingsproef uitgevoerd boven de freatische lijn.

Hoe homogeen de klei is, is duidelijk te zien aan de foto van de continue boring. In de klei is een zekere gelaagdheid te zien met in verticale richting enkele kleine kanaaltjes.

Bij Nederlandse klei is gelaagdheid echter normaal.

Schatting van de overconsolidatie

De overconsolidatiefactor wordt hier gedefinieerd als de verhouding tussen de uit de samendrukkingsproeven volgende grensspanning en de berekende verticale korrelspanning.

Voor het berekenen van de korrelspanning zijn enkele aannamen gedaan:

- Het gemiddelde natte volumegewicht ($\rho_{\text{gem}} = 1660 \text{ kg/m}^3$) is gebruikt van alle uit de boringen verkregen natte volumegewichten.
Deze volumegewichten vertoonden een aanzienlijke spreiding.
- Het waterniveau moet blijken de gevonden verzadigingsgraden dicht onder het maaiveld hebben gelegen. Voor berekeningen is het oppervlak van het maaiveld aangenomen.

monster	diepte in m	gem. diepte in m	σ $\rho_{\text{gem.}} \times \text{diepte}$ kN/m^2	U $\rho_{\text{water}} \times \text{diepte}$ kN/m^2	verticale korrelsp. σ' kN/m^2	grenssp. uit samendr.pr. kN/m^2	OCR
3A	1,21-1,26	1,23	20	12	8	48	6
4A	2,48-2,53	2,51	42	25	17	39	2,3
4C	2,88-2,93	2,91	48	29	19	49	2,6

Uit de gevonden grensspanningen zou men kunnen afleiden, dat bij beproevingen waarbij hogere korrelspanningen dan 50 kN/m^2 worden aangebracht, het monster als normaal geconsolideerd zal reageren.

Gegevens

Verdere gegevens zijn verwerkt in de tabel 1. Voor het berekenen van de verzadigingsgraad is gebruik gemaakt van soortelijke massa van de korrels (resp. deeltjes) die bepaald is op 2610 kg/m^3 . Tevens zijn de plots van de samendrukkingsproeven bijgevoegd. Als plasticiteitsindex werd 36,6% gevonden, waarbij de vloeigrens 60,4% en de uitvolgrens 23,8% was.

Conclusie

Gezien de gegevens uit de continueboring (wat betreft verzadigingsgraad) en de verkregen grensspanningen uit de samendrukkingsproeven is besloten (mede in verband met de mogelijke problemen en kosten) monster materiaal te nemen tussen een diepte 1,10 m en 1,60 m beneden maaiveld.

Tabel: 1

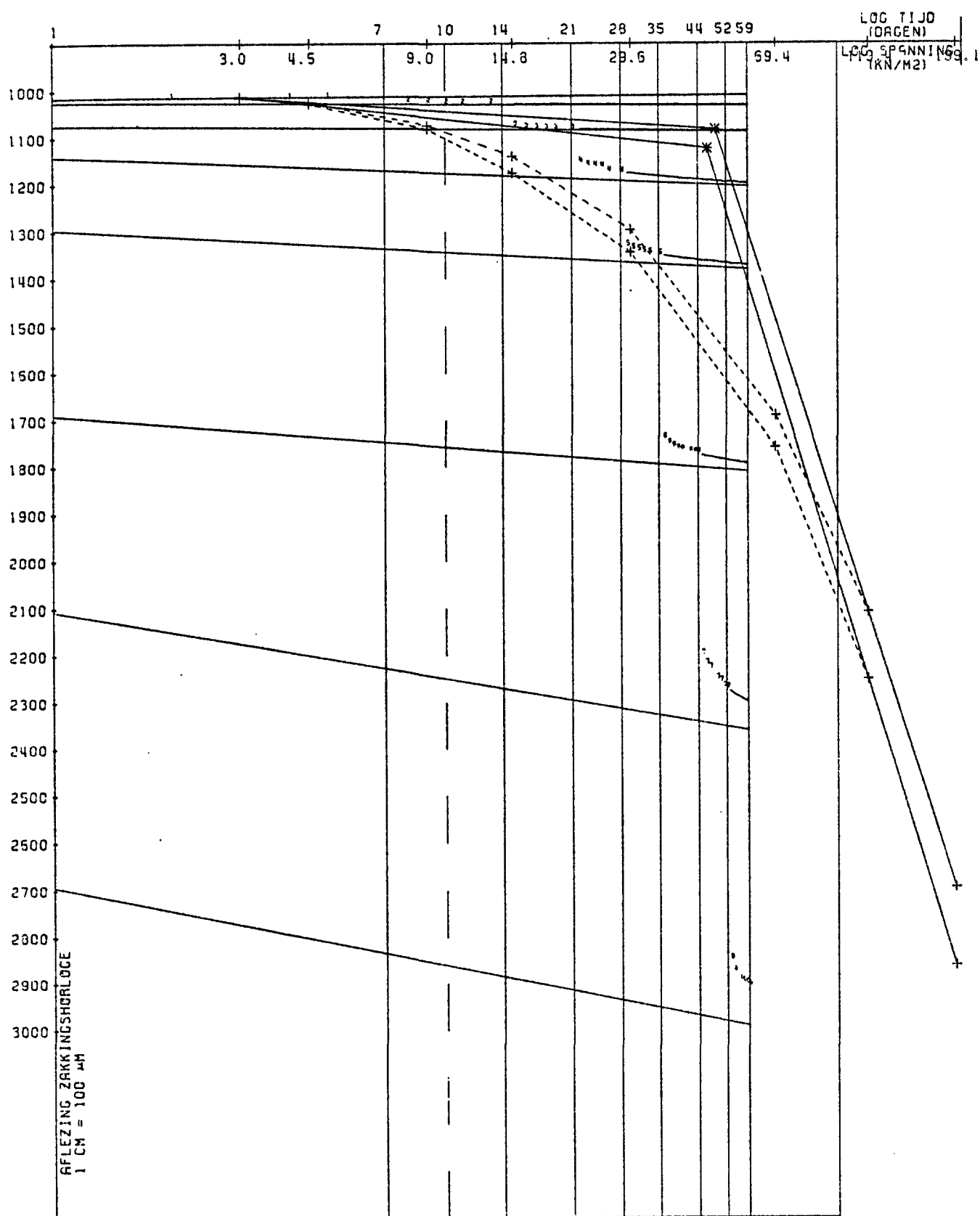
Opdracht: 230662

boring nr.: 13-2

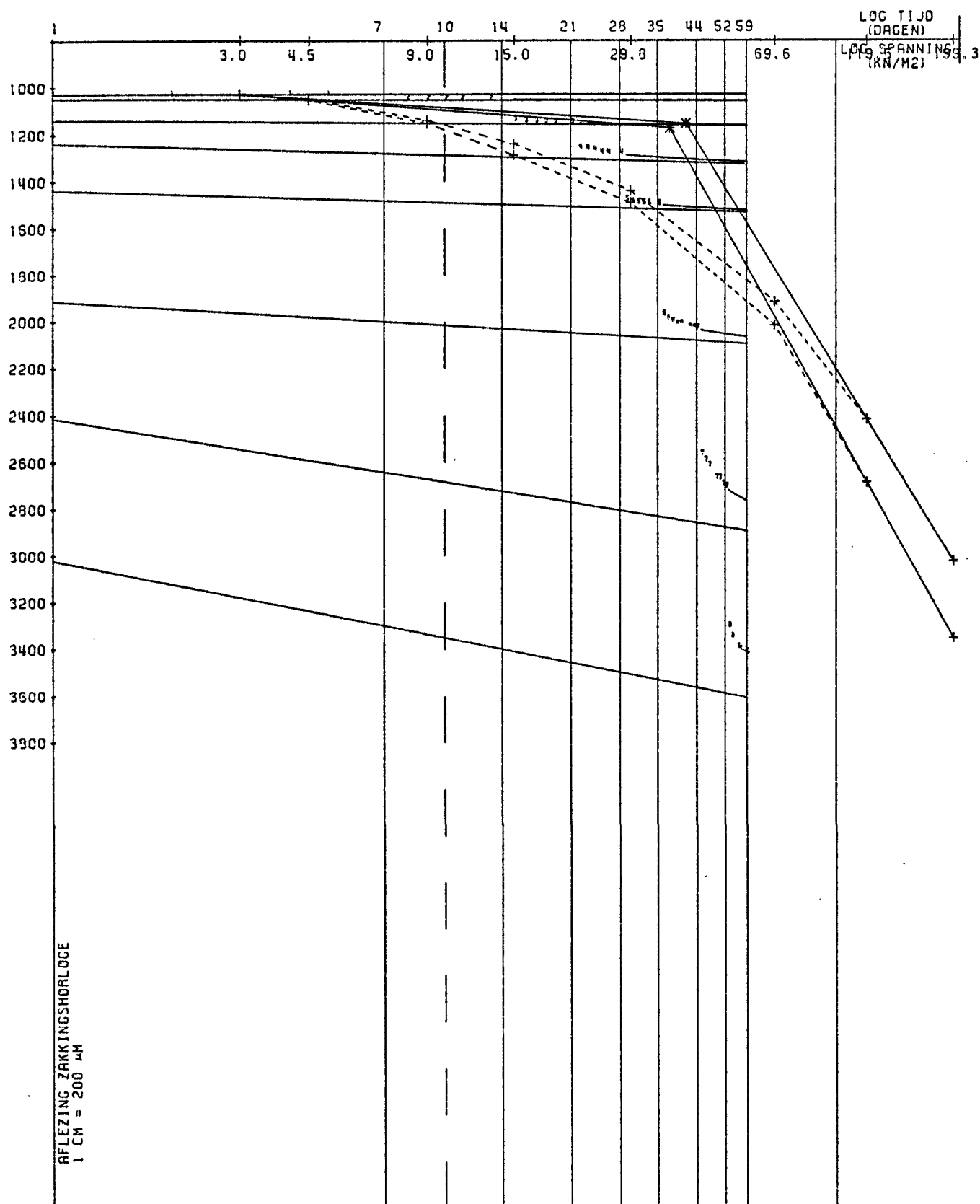
ing.: Schenkeveld

datum: 9-11-78

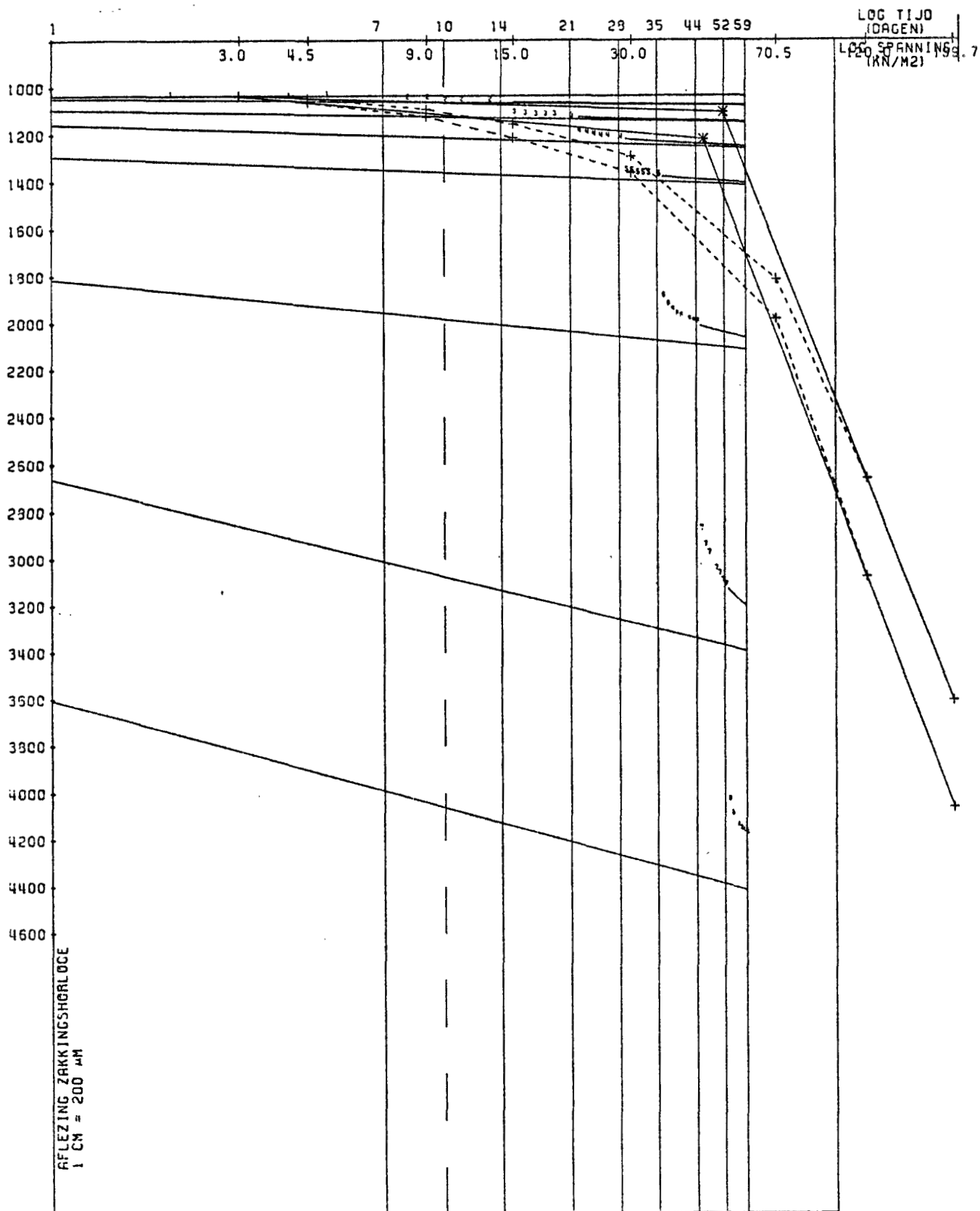
[illegible]



GRONDMECHANICA DELFT
CO-230661-3A SKV

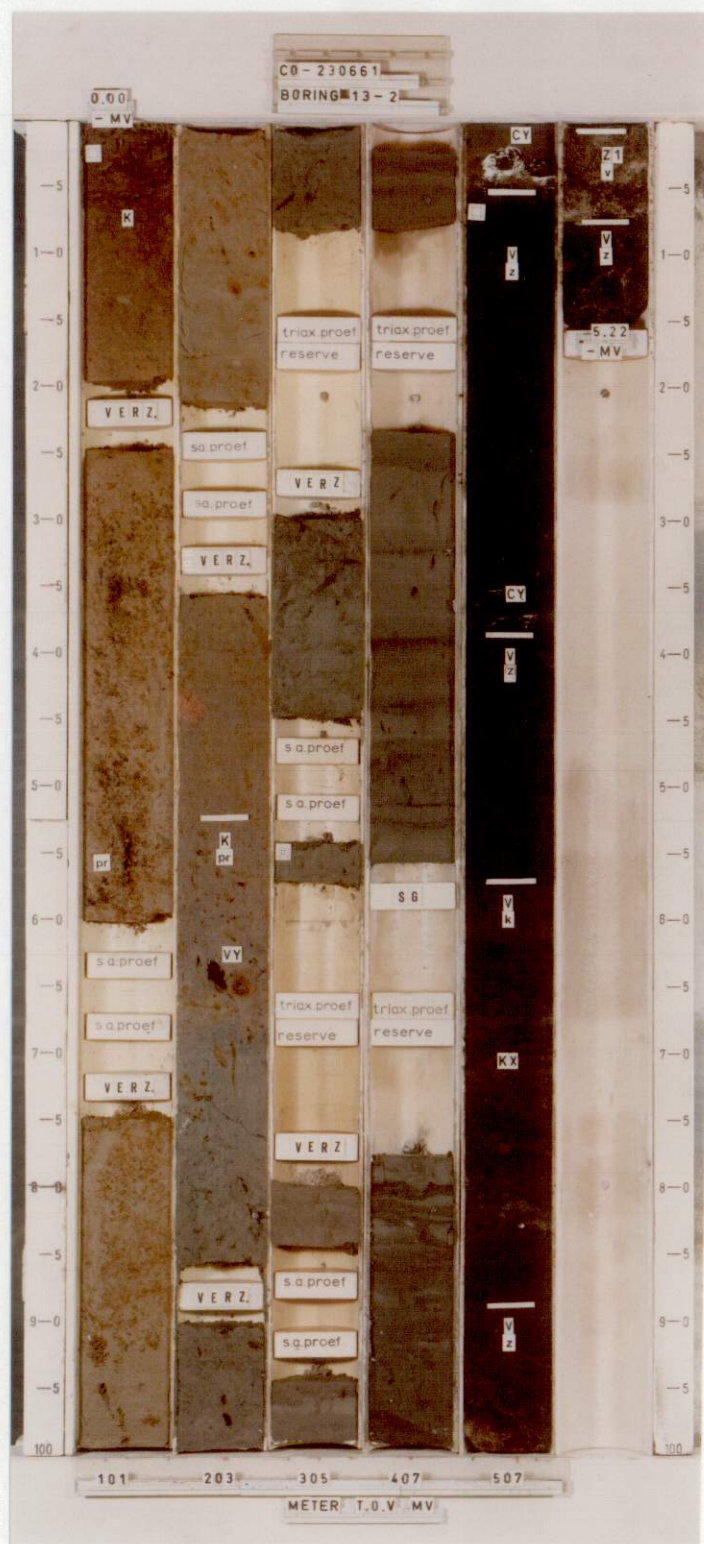


GRONDMECHANICA DELFT
CO-230661-4A SKV



GRONDMECHANICA DELFT
CO-230661-4C SKV





Foto's	Tekeningen	Beschrijving	Boorkolommen
O		Opgebrachte grond	Hoofdbestanddelen met hoofdletters ; bijbestanddelen met kleine letters nader onderscheiden aldus :
T		Teelaarde, zwarte gr.	(...) voor zwak ... houdend of ... ig ,
Lu		Lutum d.i. uitsluitend...	... voor matig ... houdend of ... ig en
K		Klei	... voor sterk ... houdend of ... ig.
M		Mergel	... houdend indien bepaald d.m.v. fractieanalyse
L		Leem	... ig bij alle andere wijzen van bepaling
Lö		Löss	
S		Silt	
Z		Zand	
G		Grind	
R		Stenen, keien, (R)otsblokken	
IJ		(land)-Ijsafzetsel m.n. keileem (keikle)	
P		Potklei	
Pr		Plantenresten	
H		Humus	
V		Veen	
N		Niet nader benoemde (humeuze) slappe grond, modder, e.d.	
A		As, sintels	
Ho		Hout	
B		Brokken, baksteen, puin, e.d.	
Co		Concreties	
C		Schelpen	
W		Water	
			Bijbestanddeel Precisie :
			geschat
			met water geschud
			fractieanalyse
			Laagscheiding Precisie :
			onzeker
			benaderd
			zeker
			Laagjes en/of stukjes
			Hoofdbestanddeel
			bijbestanddeel
Z1 (k) KX		Zand, fijn, zwak kleiig met Kleilaagjes	
K3 Z1 VY		Klei, stijf, fijn zandig met Veenstukjes	
Z1 S KX VY		Zand, fijn, sterk silthoudend met Kleilaagjes en Veenstukjes	
G1 Z3		Grind, fijn, Zand, grof	
KX ZX		Afwisselend Zand - en Kleilaagjes	
KY		Kleistukje (plaatselijk)	
VX		Veenlaagje (plaatselijk)	
			Ongeroerd monster
			Geroerd monster
			Verloren monster, leeg, enz.
			Kalkvrij
			Met sporen kalk
			Met weinig kalk
			Met kalk
			Met veel kalk
			ρ = Massa per volume in t/m ³
			</

INVLOED MIDDELSTE HOOFDSPANNING OP DE SCHUIF-
WEERSTANDSEIGENSCHAPPEN VAN KLEI (EMPEL EN
GEWANDE)

CO-230662/10

september 1979

Invloed middelste hoofdsparing op schuifweerstandseigenschappen van klei.
(Empel en Gewande klei)

Rapport 230662/10 79-09-25

In dit rapport worden de resultaten besproken van proefnemingen die in opdracht van het Centrum Onderzoek Waterkeringen werden uitgevoerd in het kader van het onderzoek "Invloed middelste hoofdspinning op het bezwijkgedrag van klei" (CO-230662).

De motivering van dit onderzoek, alsmede het voorstel voor het proevenprogramma is neergelegd in nota 230660/8 van maart 1977 over dit onderwerp.

Het onderzoek werd uitgevoerd op klei afkomstig uit de maasdijk tussen Empel en Gewande (bij 's Hertogenbosch) lokatie 13-2 en betreft een vervolgonderzoek op het reeds eerder uitgevoerde onderzoek op Betuwe (Arnhemse) klei. (Rapport CO-230660-1, juli 1978).

De monsterwinning heeft eind maart plaatsgevonden. Het laboratoriumonderzoek is begin juni gestart en half juli afgerond.

De proeven in het laboratorium zijn uitgevoerd door A. v. Slingerland. De begeleiding, uitwerking en rapportage is verzorgd door ing. F.M. Schenkeveld. (De rapportagevorm is zoveel mogelijk uniform gehouden met het rapport CO-230660-1).

De eindredactie van het rapport is verzorgd door ir. J. Lindenberg.

INHOUD

	<u>blz.</u>
1. Algemeen	1
2. Proefbeschrijving	3
3. Proefresultaten	6
4. Conclusies	7
4.1. Triaxiaalproeven	
4.1.1. Spanningspaden	
4.1.2. Spanningsrek gedrag	
4.1.3. Bezwijkgedrag	
4.2. Plane-strain proeven	
4.2.1. Spanningspaden	
4.2.2. Spanningsrek gedrag	
4.2.3. Bezwijkgedrag	
4.3. Vergelijking triaxiaal en plane-strain proeven	
4.3.1. Spanningspaden	
4.3.2. Spanningsrek gedrag	
4.3.3. Bezwijkgedrag	
4.4. Totaalspanningsbenadering	
5. Eindbeschouwing	11

1. Algemeen

Ter bepaling van de standzekerigheid van dijken is het uitvoeren van glijvlakberekeningen algemeen gebruikelijk.

Voor deze berekeningen zijn de wrijvingseigenschappen van de te onderscheiden bodemlagen van essentieel belang. Ze bepalen met de geometrie van de dijk en de uitwendige belastingen de grootte van de uiteindelijke uitkomst, de veiligheidsfactor.

Deze wrijvingseigenschappen worden voor praktische doeleinden in het laboratorium meestal bepaald uit cel-, of triaxiaalproeven op uit boringen verkregen grondmonsters. De spanningstoestand in deze opstellingen is axiaal-symmetrisch en daardoor afwijkend van de spanningstoestand in het terrein. In dit laatste geval zal meer sprake zijn van een vlakke vervormings- of plane-strain toestand. Uit de literatuur is bekend dat gedurende beproeving in het laboratorium onder plane-strain condities hogere waarden voor de wrijvingseigenschappen kunnen resulteren dan onder axiaal-symmetrische omstandigheden.

Ter verkrijging van inzicht in de betrouwbaarheid in het algemeen van uitkomsten van conventionele ontwerpprocedures voor dijken is de invloed van de spanningstoestand op de wrijvingseigenschappen een van de aspecten die nader onderzoek vereisen.

Vanuit deze achtergrond is in 1977 in opdracht van het Centrum Onderzoek Waterkeringen (COW) een oriënterend onderzoek uitgevoerd op monsters Betuweklei. Hoewel de resultaten een iets hogere c' en ϕ' voor plane-strain proeven te zien gaven, was het aantal uitgevoerde proeven dusdanig laag, dat zeker geen algemeen geldende conclusie getrokken kon worden. Het COW heeft daarom besloten een vervolgonderzoek op te dragen aan het Laboratorium voor Grondmechanica op een andere kleisoort.

Gekozen is voor klei uit Empel en Gewande lokatie 13-2.

Vooraf aan deze keus is ter beoordeling van de geschiktheid van deze klei een vooronderzoek gedaan op klei uit een continueboring tot 5 m beneden maaiveld.

In dit vooronderzoek werden de grensspanning (d.m.v. samendruk-
kingsproeven) en verzadigingsgraad als functie van de diepte
bepaald (rapport CO-230662/19).

Vanwege de goede verzadiging over de gehele hoogte van de conti-
nueboring en de bepaalde grensspanningen is door het Centrum
Onderzoek Waterkeringen besloten zo dicht mogelijk onder het ter-
reindoppervlak te steken, dit om de kosten en problemen bij het
monster-steken zoveel mogelijk te beperken.

De monster-winning is uitgevoerd op een diepte tussen 1.10 m en
1.50 m beneden maaiveld.

In totaal zijn 8 cilindrische monsters gestoken met een diameter
van 20 cm en een hoogte van 40 cm.

De klei werd tevens voor andere onderzoeken van het COW gestoken
(Anisotropie CO-230672 en Invloed monsterafmetingen CO-230642).

Een situatieschets van de gemaakte put bij de monsterwinning en
de afstanden tussen de onderling gestoken monsters wordt in bijlage
23 aangegeven.

Alle laboratoriummonsters voor het onderzoek "Invloed middelste
hoofdspanning" waren afkomstig uit monsterbus no. 5 (bijl. 23).

2. Proefbeschrijving

In totaal werden 3 triaxiaalproeven en 4 plane-strain proeven uitgevoerd. Alle proeven werden geconsolideerd, ongedraineerd uitgevoerd. De triaxiaalmonsters hadden een diameter van 5 cm en een hoogte van 10 cm.

De plane-strain monsters (of ISC-monsters) hadden een hoogte van 8,5 cm een breedte (loodrecht op beltplaten) van 8,5 cm en een lengte van 5,5 cm (parallel aan beltplaten).

De effectieve beginspanningen werden voor zowel de triaxiaal als de plane-strain monsters gekozen op 50 kN/m^2 , 120 kN/m^2 en 180 kN/m^2 .

Het monstermateriaal uit deze bus werd hierbij opgedeeld in drie lagen van elk 12 cm hoog en 20 cm diameter (fig. 1).

Uit de bovenste schijf (laag 1) werden drie triaxiaalmonsters en één plane-strain monster gehaald. Uit laag 2 waren de andere twee plane-strain monsters afkomstig. Tijdens de beproevingen bleek nog een extra plane-strain monster benodigd. Dit monster was afkomstig uit laag 3.

Extra aandacht is besteed aan de onderlinge overeenkomst tussen de assen van de plane-strain monsters (fig. 2).

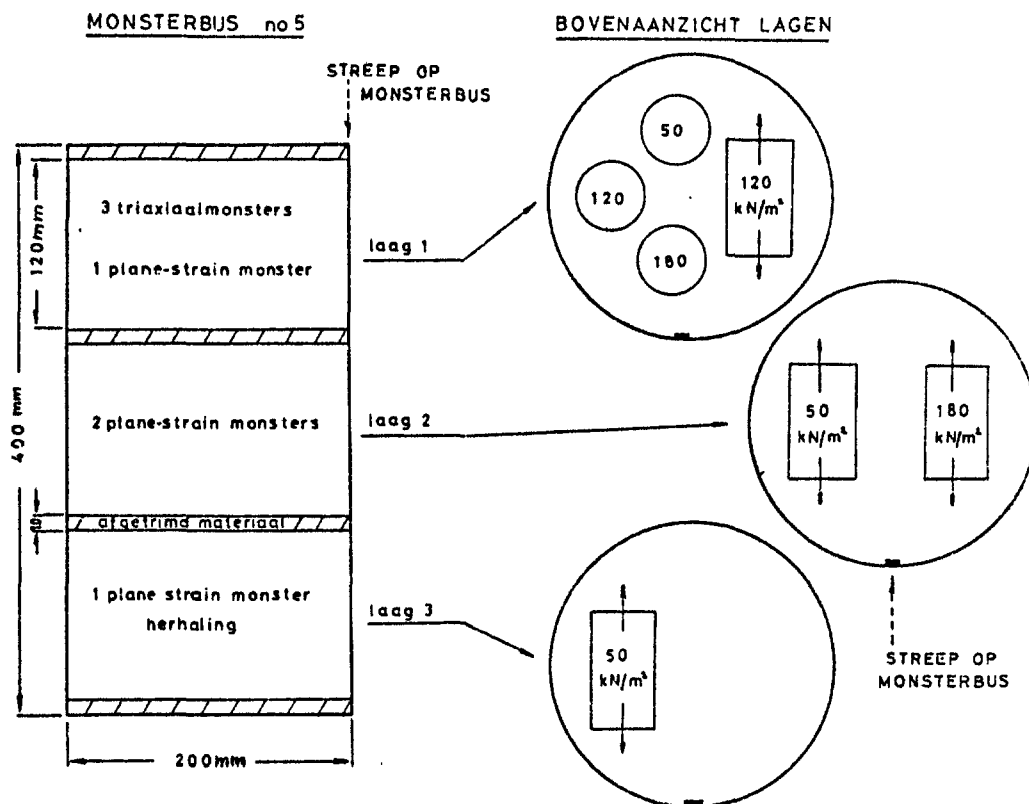


fig. 1

fig. 2

Er is naar gestreeft de omgevingsinvloeden van de triaxiaal- en de ISC apparatuur op elkaar af te stemmen.

De stijfheid van het leidingsysteem dat tijdens beproeving de monsterdruk meet, werd bij de ISC apparatuur afgestemd op de stijfheid van het monsterdrukmetende gedeelte van de triaxiaal-apparatuur (m.b.v. stalen leidingen en opnemers die bij het meten van druk een zeer kleine hoeveelheid water-verplaatsing hebben). Zowel de triaxiaalproeven als de plane-strain proeven werden door een laborant uitgevoerd, die de monsterbehandeling w.b. trimmen en inbouwen en beproeving zo goed mogelijk uniform heeft uitgevoerd.

Tevens zijn voor beide beproevingsmethoden teflon eindvlakken toegepast om spanningsconcentraties aan de eindvlakken te verminderen. De back-pressure is op 300 kN/m^2 gesteld.

Deze back-pressure is langzaam in stappen van 50 kN/m^2 aangebracht, dit om het monster voldoende gelegenheid te geven zich aan de back-pressure aan te passen.

Het opvoeren van de back-pressure heeft gemiddeld 1 uur geduurd. Na het opvoeren van de back-pressure is de consolidatiespanning aangebracht. Dit is in stappen gebeurd om de gelijkvormigheid ook na consolidatie te garanderen.

De consolidatiespanning van 50 kN/m^2 is direct na het aanbrengen van de back-pressure aangebracht.

Een consolidatiespanning van 120 kN/m^2 is in 2 stappen aangebracht. Nadat de eerste stap van 50 kN/m^2 was uitgeconsolideerd, is verder belast naar 120 kN/m^2 .

Zo ook de consolidatiespanning van 180 kN/m^2 , die via de stappen 50 kN/m^2 en 120 kN/m^2 op 180 kN/m^2 werd gebracht.

Per stap is gemiddeld twee dagen geconsolideerd. Voor de laatste stap is een dag extra consolidatietijd genomen.

De proevenserie is gestart met een korrelspanning $\sigma_i = 120 \text{ kN/m}^2$. Uit deze serie is via de $\sqrt{t}-\epsilon_{\text{vol}}$ methode een "time to failure" t_f bepaald. De t_f van deze laatste consolidatiestap is maatgevend genomen voor de bepaling van de afschuifsnelheid.

Uit deze resultaten is gebleken dat voor de korrelspanning $\sigma_i = 120 \text{ kN/m}^2$ een afschuifsnelheid van 2%/uur van de beginmonsterhoogte langzaam genoeg was (aannee hierbij: maximum schuifspanning τ bij een procentuele rek ϵ_z van 2 à 4%).

Daar het hier een vergelijkingsonderzoek betreft, zijn de beide andere series ($\sigma_i = 50 \text{ kN/m}^2$ en $\sigma_i = 180 \text{ kN/m}^2$) voor zowel de triaxiaal- als de plane-strain proeven ook afgeschoven met een afschuifsnelheid van 2%/uur van de monsterhoogte.

Bij de plane-strain monsters is voor het constant houden van de afmetingen loodrecht op de beltrichting rekening gehouden met de samendrukking van de rubbervliezen. Tijdens de beproeving is hiervoor bijgesteld.

Om zoveel mogelijk informatie uit de proeven te verkrijgen, zijn alle monsters tot ongeveer 20% van de beginhoogte gedeformeerd. De triaxiaalserie van de middelste hoofdspanning is aangeduid met een codering 4 en de plane-strain serie met een codering 5. A, B en C zijn hierbij een aanduiding voor de laagste, middelste en hoogste consolidatiespanning (resp. 50, 120 en 180 kN/m^2).

Daar monster 5A werd beproefd met een verkeerde afschuifsnelheid van 1%/uur is een herhalingsproef uitgevoerd (gecodeerd met 5A_{herhaling} die wel uitgevoerd werd bij een afschuifsnelheid van 2%/uur.

Door aanvullende proef is bestudering van de invloed van de afschuifsnelheden 1%/uur en 2%/uur mogelijk.

3. Proefresultaten

De resultaten van de proeven zijn weergegeven in de bijlagen 1 t/m 22.

De veranderende spanningstoestand is steeds vastgelegd in een p-q diagram en een $q-\epsilon_{\text{verticaal}}$ diagram (zie bijlagen).

Voor de plane-strain proeven is tevens de $\epsilon_{\text{verticaal}}$ uitgezet tegen de spanningsverhouding σ'_v/σ'_H resp. σ'_1/σ'_3 (een maat voor de relatieve schuifspanning, bijlagen 8, 11, 14 en 17).

Op de bijlagen 19 t/m 22 worden proefresultaten onderling vergeleken waarbij het accent ligt op de bezwijkparameters. Op bijlage 19 is de bezwijklijn getekend in een p-q diagram van de triaxiaal-monsters en op bijlage 20 de bezwijklijn van de plane-strain monsters.

De bezwijklijn is bepaald op het moment van het bereiken van de maximale schuifspanning.

Eveneens zijn van beide proevenseries in een $\tau-\sigma$ diagram (bijlage 21) de ϕ' en c' getekend die door omrekening uit het p-q diagram bepaald zijn.

4. Conclusies

4.1. Triaxiaalproeven 4A, 4B en 4C (bijlagen 1 t/m 6)

4.1.1. Spanningspaden

Alle proeven geven een opbouw van wateroverspanningen te zien.

De relatieve wateroverspanningen (uitgaande van de wateroverspanning bij $\sigma_1 = 50 \text{ kN/m}^2$) blijkt redelijk lineair te zijn.

Voor $\sigma_1 = 50 \text{ kN/m}^2$, 120 kN/m^2 en 180 kN/m^2 wordt een ΔU gemeten bij max. q van resp. 28, 79 en 105 kN/m^2 . Volgens evenredigheid met σ_1 uitgaande van ΔU bij $\sigma_1 = 50 \text{ kN/m}^2$ werd een wateroverspanning verwacht van ΔU 28, 67 en 101 kN/m^2 . Hieruit lijkt bij proef 4B een wat hogere wateroverspanning gemeten te zijn.

De bovenbeschreven evenredigheid wijst erop dat de klei als normaal geconsolideerde klei reageert.

4.1.2. Spanningsrekgedrag

Proef 4A bij het laagste spanningsniveau vertoont bij het begin van de proef een relatief stijver gedrag. Dit is vooral goed te zien in het verloop van $\epsilon_{\text{vert.}}$ met $\frac{\sigma_1}{\sigma_3}$ (tabel 1).

Bij proef 4A wordt het maximum in $\frac{\sigma_1}{\sigma_3}$ (= 3,90) bij ϵ_z is 3,9% bereikt. Bij 4B en 4C wordt het maximum bij veel hogere ϵ_z is 8 à 10% bereikt.

4.1.3. Bezwijkgedrag

In tabel 1 zijn de maximale waarden van q en σ_1/σ_3 weergegeven.

Hieruit blijkt dat de proef bij het laagste spanningsniveau (proef 4A) de hoogste $(\sigma_1/\sigma_3)_{\text{max.}}$ waarde bezit wat wijst op de aanwezigheid van cohesie bij aanname van een rechtlijnige Coulombse bezwijklijn.

De bij de omhullende van de proeven behorende bezwijkgrootheden c' en ϕ' zijn $11,6 \text{ kN/m}^2$ en $22,5^\circ$ (volgend uit p-q diagram $a' = 10,7 \text{ kN/m}^2$ $\alpha' = 20,9^\circ$) bijlage 19.

4.2. Plane-strain proeven 5A, 5B, 5C en 5A_{herhaling} (bijlagen 7 t/m 18)

4.2.1. Spanningspaden

Ook bij de plane-strain proeven trad toenemende wateroverspanning op. De relatieve wateroverspanningen (uitgaande van de wateroverspanning bij $\sigma_i = 50 \text{ kN/m}^2$) blijkt redelijk lineair te zijn. Voor $\sigma_i = 50 \text{ kN/m}^2$, 120 kN/m^2 en 180 kN/m^2 wordt een ΔU bij q_{max} gemeten van $34,5$; 77 en 128 kN/m^2 .

Bij proef 5B blijkt een iets te lage wateroverspanning en proef 5C een iets te hoge wateroverspanning dan naar evenredigheid gemeten te zijn.

4.2.2. Spannings-rek gedrag

Alle proeven vertonen een top in het q - ϵ_{vert} verloop. Bij verdere vervorming wordt na aanvankelijke afname na deze top weer een toename in de schuifspanning geconstateerd. Mogelijk houdt dit verband met het vastlopen van gevormde schuifvlakken tegen onder- resp. bovenvlak bij grote vervormingen.

Bij proef 5B en 5C is een top aanwezig in het $\frac{\sigma_1'}{\sigma_3'}$ diagram, bij proef 5A en 5A_{herhaling} is geen top te vinden. $\frac{\sigma_1'}{\sigma_3'}$ blijft hierbij constant stijgen.

4.2.3. Bezwijkgedrag

In tabel 1 zijn de maximale waarden van q en $\frac{\sigma_1'}{\sigma_3'}$ weergegeven.

Hieruit blijkt dat bij de proeven met $\sigma_i = 50 \text{ kN/m}^2$ geen maximum in $\frac{\sigma_1'}{\sigma_3'}$ te vinden is, in tegenstelling tot proef 5B en 5C. Ook hier is sprake van een cohesie.

De bij de omhullende van de proeven behorende bezwijkgrootheden c' en ϕ' zijn resp. $4,2 \text{ kN/m}^2$ en $32,5^\circ$ (bijlage 20).

4.3. Vergelijking triaxiaal en plane-strain proeven

4.3.1. Spanningspaden

De plane-strain proeven geven iets meer wateroverspanning dan de triaxiaalproeven (behalve proef 5B t.o.v. 4B).

4.3.2. Spannings-rekgedrag

Uit de proeven blijkt bij de plane-strain monsters eerder een maximum in $q-\epsilon_{\text{vert.}}$ te ontstaan, dan bij de triaxiaalmonsters. Dit wijst op een stijver gedrag van de plane-strain monsters. Zowel de triaxiaal- als plane-strain proeven vertonen een piekgedrag (top in spanningsrekgedrag met daarna een afname van de schuifweerstand). Bij de plane-strain monsters treedt dit in sterkere mate op.

4.3.3. Bezwijkgedrag

Op bijlage 21 zijn de bezwijklijnen vastgesteld door middel van regressie-analyse voor de effectieve spanningen in een figuur getekend. Tevens is de best passende lijn door alle punten getekend. Uit de resultaten zou kunnen worden afgeleid dat de onderzochte klei onder plane-strain omstandigheden meer schuifweerstand bezit dan onder triaxiaal-omstandigheden. De ϕ' voor plane-strain proeven zou dan 10° hoger zijn dan voor triaxiaalproeven. De gevonden cohesie c' van plane-strain proeven ligt echter lager dan de c' van de triaxiaalproeven. Het snijpunt van beide lijnen ligt in de buurt van de gevonden grensspanning uit de samendrukkingsproeven.

Gezien het geringe aantal proeven en de ligging van zowel de triaxiaalpunten als de plane-strain punten ten opzichte van de getrokken lijn in het p-q diagram van bijlage 21 kan in dit stadium niet worden geconcludeerd dat er een significant verschil tussen de resultaten van de beide beproevingsmethoden is.

4.4. Totaalspanningsbenadering

In bijlage 22 zijn de omhullenden getekend die resulteren uit een totaalspanningsaanpak.

De hogere effectieve bezwijkgrootheden voor plane-strain worden bij een totaalspanningsbenadering gedeeltelijk teniet gedaan door het negeren van de wateroverspanning. De grotere wateroverspanningen bij plane-strain resulteren in een grotere verschuiving van de Mohrse cirkels naar links.

De verkregen ϕ en c -waarden uit de totaalspanningsbenadering, waren voor de triaxiaalproeven $\phi = 12,4^\circ$ en $c = 11,3 \text{ kN/m}^2$ en voor plane-strain proeven $\phi = 15,2^\circ$ en $c = 8,3 \text{ kN/m}^2$.

Tot een grondnormaalspanning van 100 kN/m^2 leveren triaxiaalomstandigheden meer weerstand.

Voor de praktijk zal van een schuifweerstand gebaseerd op totaalspanningen moeten worden uitgegaan wanneer sprake is van snelle verschijnselen.

Bij dijken is dit meestal niet het geval, zodat hanteren van op effectieve spanningen gebaseerde parameters meer voor de hand ligt.

5. Eindbeschouwing

De uitvoering van het onderzoek is vrijwel geheel naar wens verlopen. Proef 5A die uitgevoerd werd bij een ongewenste afschuifsnelheid van 1% per uur is door proef 5A_{herhaling} met de gewenste afschuifsnelheid van 2% per uur herhaald.

Proef 5A_{herhaling} liet hierbij naar verwachting een iets hogere schuifsterkte zien dan proef 5A (bij 1%/uur $\rightarrow \tau_{\max} = 27,2 \text{ kN/m}^2$ en 2%/uur $\rightarrow \tau_{\max} = 28,9 \text{ kN/m}^2$).

Zowel voor de toppunten ($= q_{\max}$) van de 3 triaxiaalproeven als voor de toppunten van de 3 plane-strain proeven is de best passende rechte lijn berekend. Het vergelijken van de uit beide rechten volgende ϕ' en c' waarden geeft een aanzienlijk verschil te zien.

Onder triaxiaalomstandigheden werd $\phi' = 22,5^\circ$ en $c' = 11,6 \text{ kN/m}^2$ gevonden en onder plane-strain omstandigheden $\phi' = 32,7^\circ$ en $c' = 4,2 \text{ kN/m}^2$. Dus een verschil in ϕ' van ca. 10° . Dit verschil is aanmerkelijk groter dan de in de literatuur gepubliceerde verschillen.

Gememoreerd wordt dat in het verslag literatuurstudie invloed middelste hoofdspinning CO-230661/15 een grootste verschil van $6,5^\circ$ werd genoemd. In dit verband kan worden gesteld dat de bij het onderhavige onderzoek gemeten afwijking van 10° extreem hoog is. Een mogelijke oorzaak kan worden toegelicht aan de hand van onderstaande tabel.

combinatie p-q van korrelspan- ningen kN/m ²	triaxiaal		plane-strain	
	ϕ'	c' (kN/m ²)	ϕ'	c' (kN/m ²)
50-120	27,6	6,7	28,0	8,8
50-180	22,4	10,6	32,5	5,5
120-180	18,0	20,7	39,6	-5,8
50-120-180	22,5	11,6	32,7	4,2

Op de bovenste 3 regels staan ϕ' en c' waarden vermeld die zijn afgeleid uit steeds 2 proefresultaten. De onderste regel heeft betrekking op de al eerder genoemde uit 3 proefresultaten berekende, best passende, rechte lijn.

Een aspect valt direct op! Bij toename van de gemiddelde consolidatiespanning van 2 beschouwde proeven (van boven naar beneden in de tabel) neemt bij de triaxiaalproeven ϕ' af en c' toe. M.a.w. de omhullende is geen rechte lijn maar een kromme die bol is in het τ - σ diagram (concaaf). Dit is in overeenstemming met datgene wat voor grond mag worden verwacht. Bij de plane-strain proeven echter neemt ϕ' toe en c' af bij beschouwing van tweetallen proeven met toenemende gemiddelde consolidatiespanning.

Of anders gezegd de omhullende is het τ - σ diagram is hol (convex). In tegenstelling tot bij de triaxiaalproeven moet worden opgemerkt dat dit niet volgens de verwachtingen is.

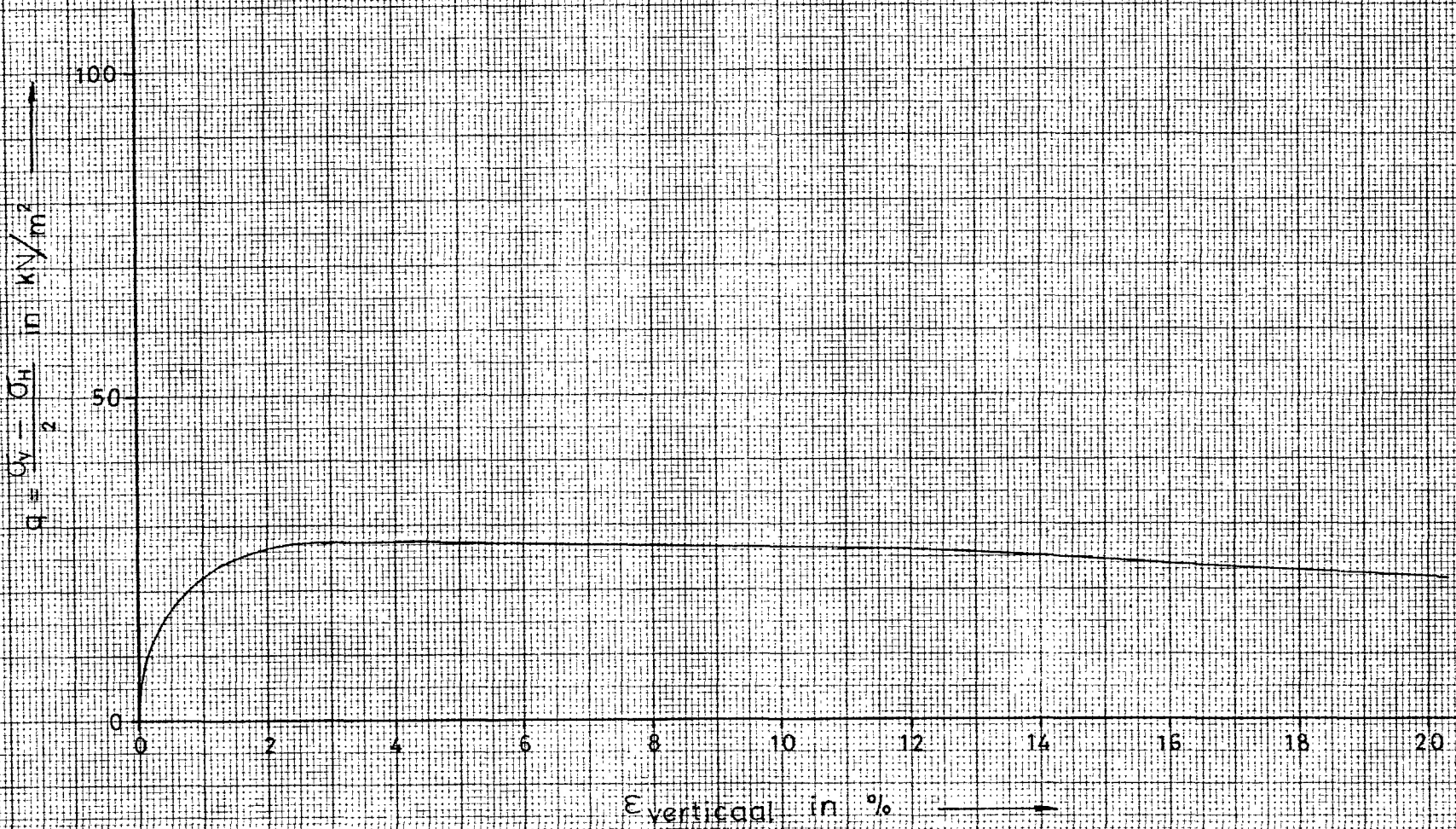
In het algemeen kan deze verrassende uitkomst het gevolg zijn van een te hoge $q_{\max}$ bij een van de proeven met consolidatiespanning 50 kN/m^2 en 180 kN/m^2 of van een te lage $q_{\max}$ bij de proef met 120 kN/m^2 . Omdat echter de omhullende van de plane-strain proeven met 50 kN/m^2 en 120 kN/m^2 een ϕ' en c' oplevert die weinig boven de overeenkomstige uitkomst van de triaxiaalproeven ligt is het het meest aannemelijke dat de plane-strain proef bij 180 kN/m^2 in een te hoge $q_{\max}$ heeft geresulteerd. Een verklaring hiervoor is niet beschikbaar. Wellicht is de beproefde klei toch onvoldoende homogeen van samenstelling geweest.

In verband hiermee en mede op basis van de ligging van de punten bij de spanningsniveaus 50 en 100 kN/m^2 ten opzichte van de gemiddelde lijn van alle proeven is voorlopig de conclusie gerechtvaardigd dat de onderzochte klei onder plain-strain omstandigheden nauwelijks hogere effectieve bezwijkparameters geeft dan onder axiaal symmetrische omstandigheden.

CO-230662 - Invloed middelste hoofdspanning

Monster- nummer (tevens proefnr.)	soort proef		initiële eff. celdruk [kN/m ²]	beginvol. gewicht monster [t/m ³]	B-faktor	Resultaten				
	axiaal symm. $\sigma_2 = \sigma_3$	plane strain $\sigma_b = 0$				max. devia- torsp. q [kN/m ²]	$(\epsilon_{\text{vert}})_{q_{\text{max}}}$ [%]	$(\sigma_1'/\sigma_3')_{\text{max}}$	$(\epsilon_{\text{vert}})_{(\sigma_1'/\sigma_3')_{\text{max}}}$ [%]	max. watersp. U _{max} bij q _{max} [kN/m ²]
4A	x		50	1,71	0,98	27,5	4,24	3,896	3,92	28
4B	x		120	1,73	0,97	47,4	4,22	3,672	9,98	79
4C	x		180	1,71	0,98	63,1	5,98	2,693	8,31	105
5A		x	50	1,73	0,99	27,2	2,01	geen max.	-	32
5B		x	120	1,72	0,98	52,8	1,92	3,571	3,87	77
5C		x	180	1,73	0,97	75,1	2,83	3,851	3,70	128
5A _{her.}		x	50	1,74	0,99	28,9	2,05	geen max.	-	34,5

TABEL 1



$$p = \frac{H_0}{A_0} = \frac{H}{A} = \frac{H_0}{A_0} \cdot \frac{A_0}{A} = p_0 \cdot \frac{A_0}{A}$$



laboratorium voor grondmechanica delft
 telefoon : (015) - 56 92 23
 telefax : 333 26 solab nl

INVLOED MIDDELSTE HOOFDSPANNING
 TRIAXIAALPROEF 4A
 VERLOOP $q - \epsilon_{\text{verticaal}}$ $\beta = 0^\circ$

get.	d.d.	CO-230662	BIL. 1	A ₄
g.c.				form.

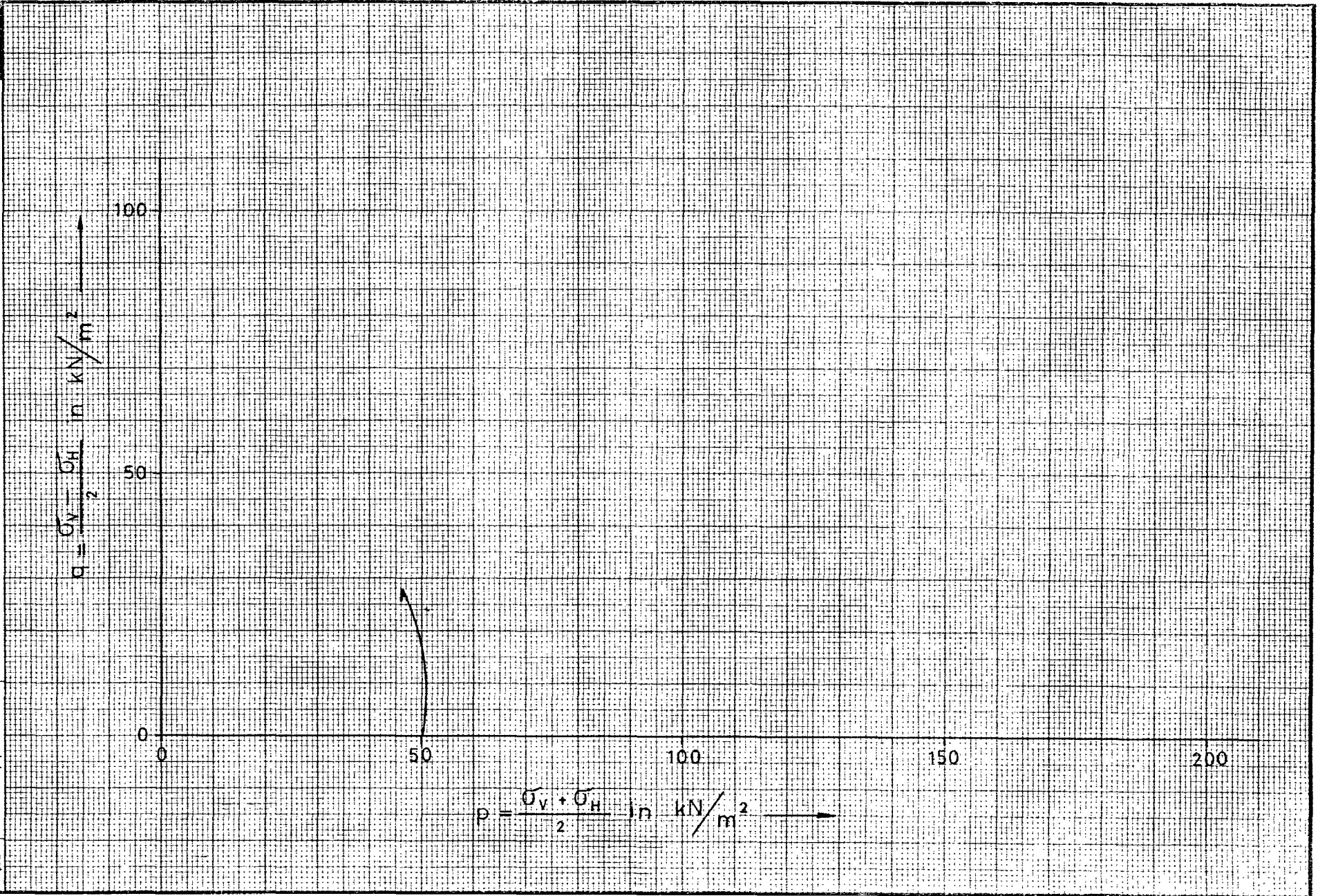


laboratorium voor grondmechanica delft

telefoon: (015) - 56 92 23

telefax: 33326 solid nl

INVLOED MIDDELSTE HOOFDSPANNING
SPANNINGSPAD TRIAXIAALPROEF 4A $\beta = 0^\circ$



d.d.

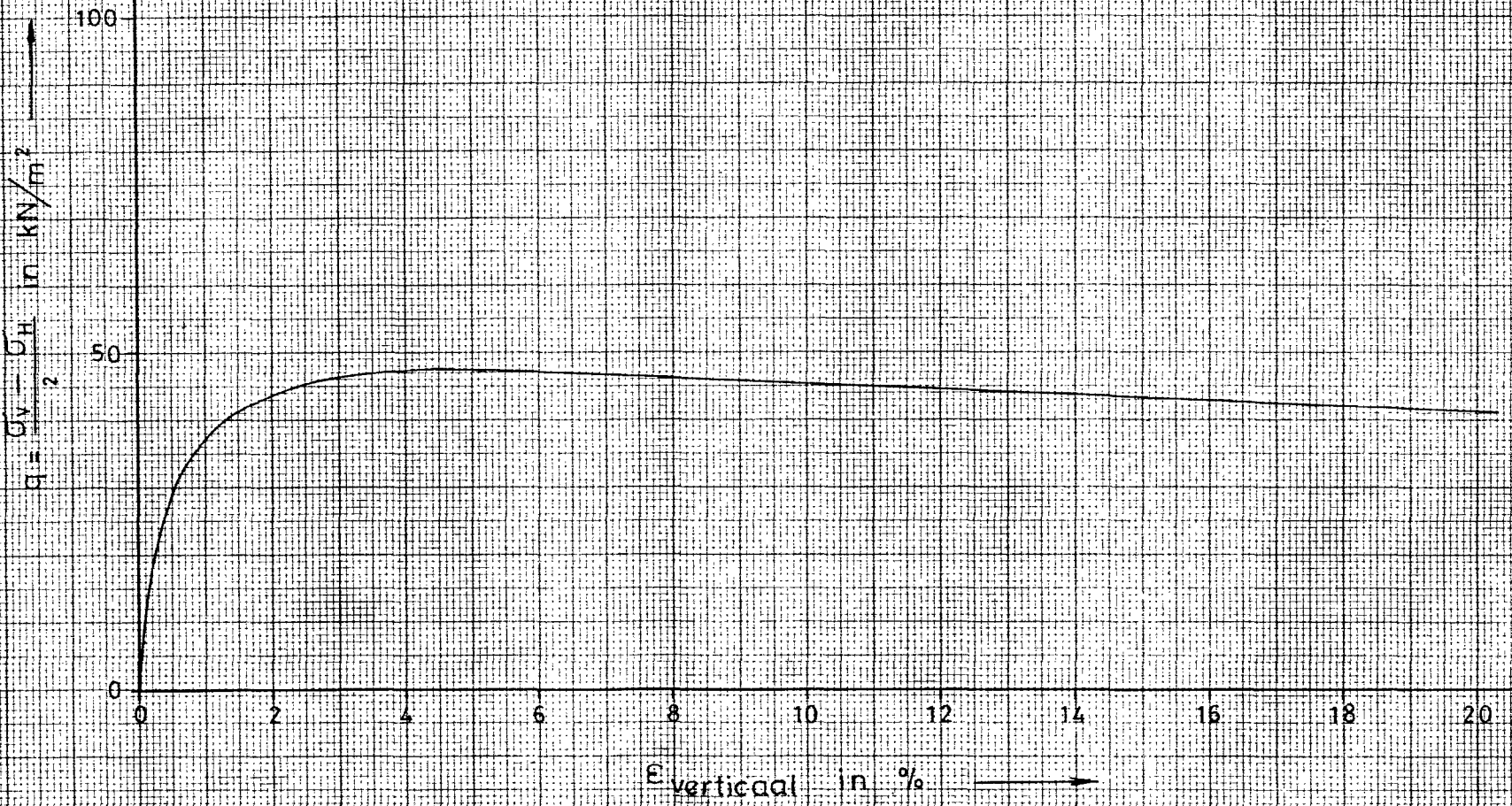
get.

CO-230662

gec.

BUL. 2

form.
A₄



$$q = \frac{\gamma \cdot H}{2} = b$$



laboratorium voor grondmechanica delft
 telefoon: (015) - 56 92 23
 telex: 33320 solab nl

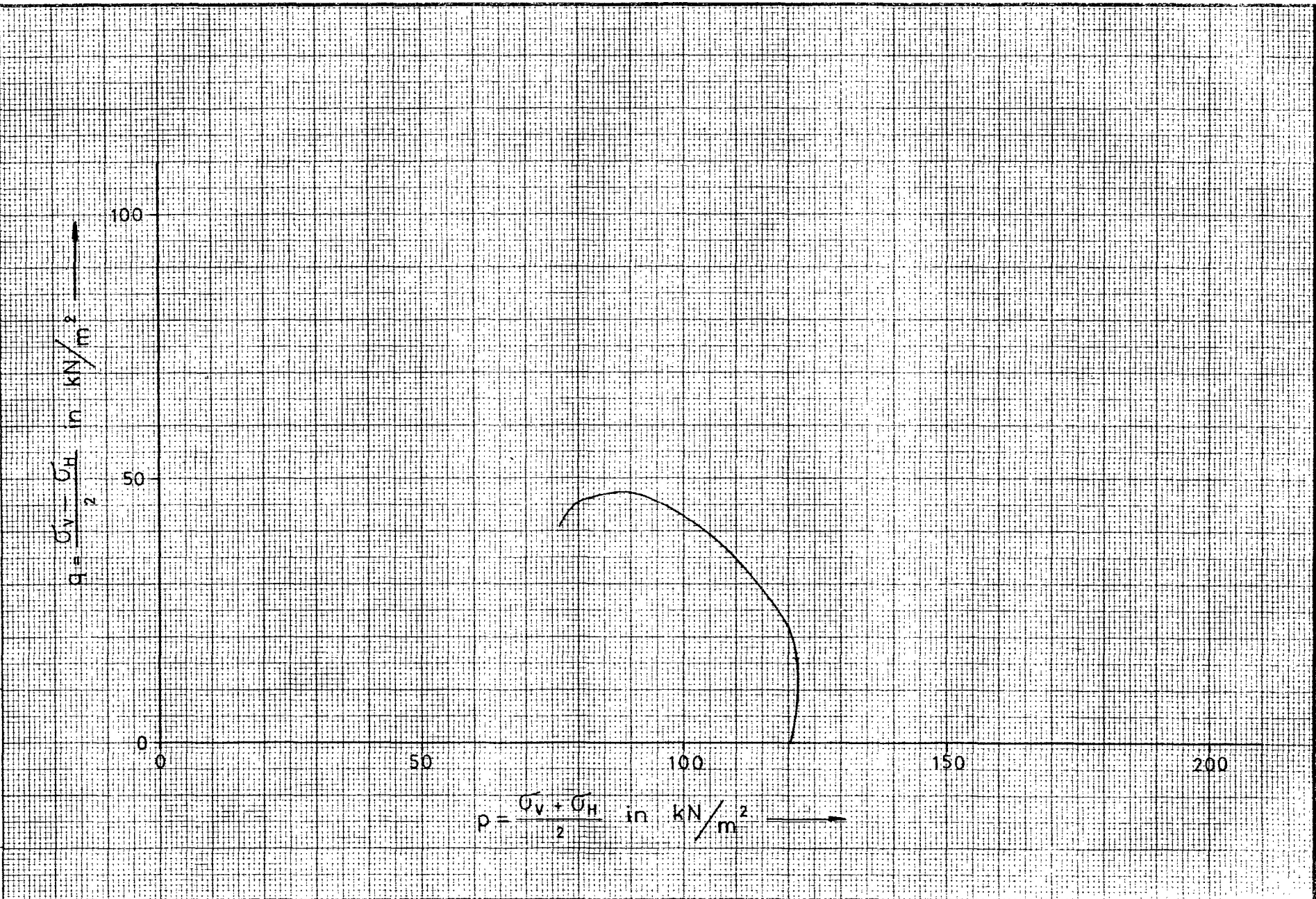
INVLOED MIDDELSTE HOOFDSPANNING		d.d.	get.
TRIAXIALPROEF 4B		CO - 230662	gec.
VERLOOP $q - \epsilon_{\text{verticaal}}$ $\beta = 0^\circ$		BUL. 3	form. A ₄

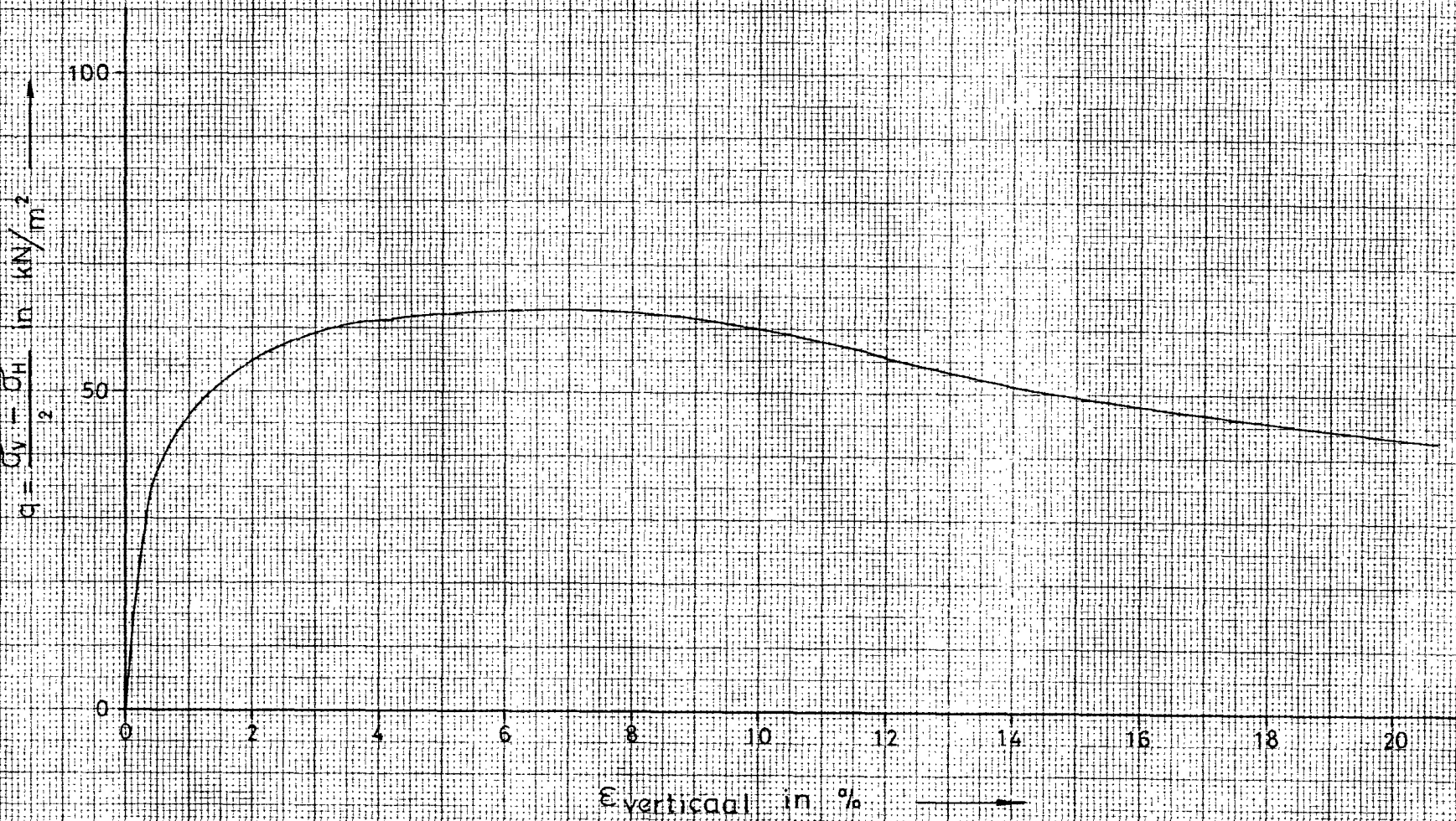


laboratorium voor grondmechanica delft
telefoon: (015) - 56 92 23
telefax: 33326
solab nl

INVLOED MIDDELSTE HOOFDSPANNING
SPANNINGSPAD TRIAXIAALPROEF 4B $\beta = 0^\circ$

d.d.	get.
CO - 230662	gsc.
BIL. 4	loc.m. A ₄

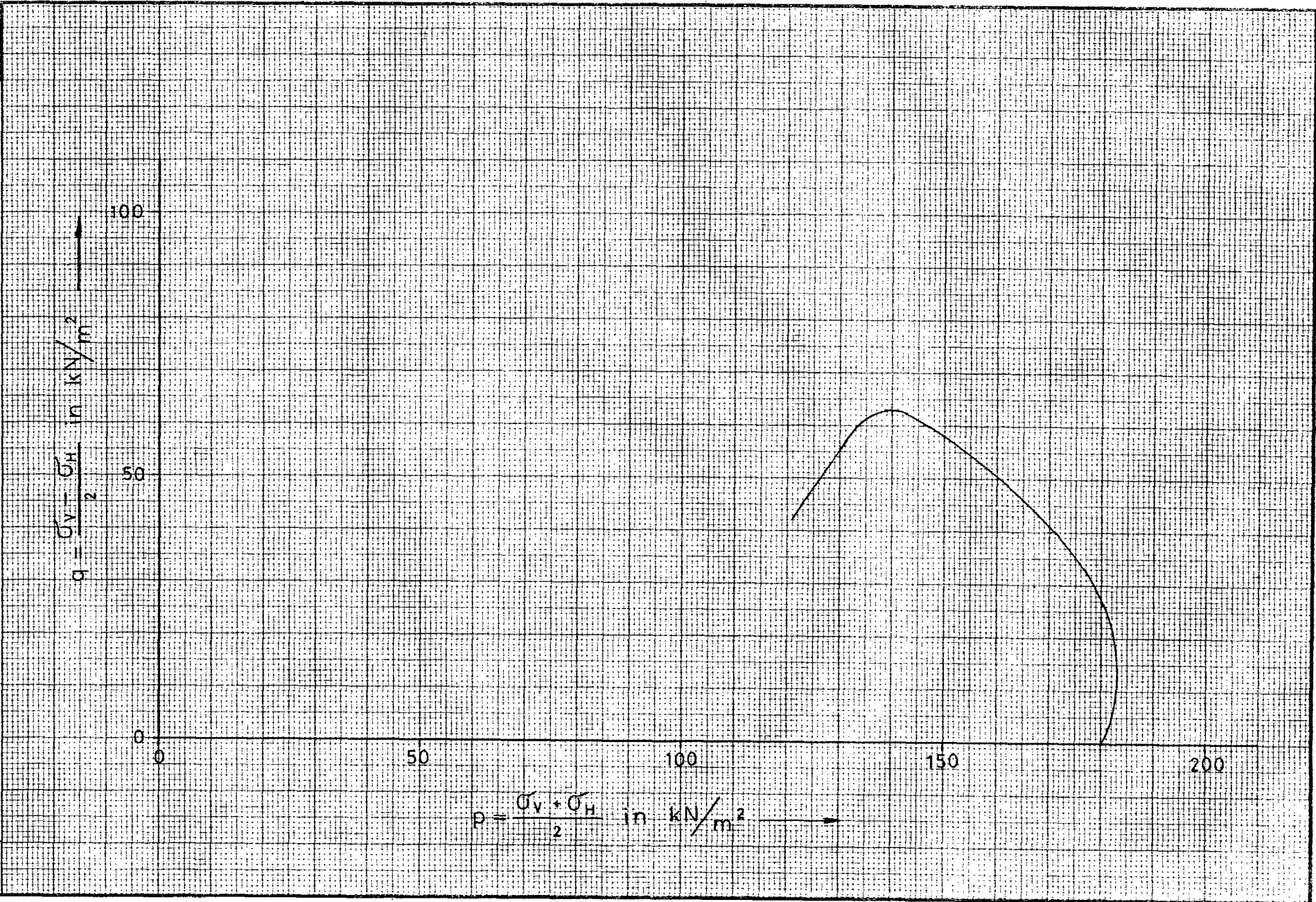




laboratorium voor grondmechanica delft
 telefoon: (015) - 56 92 23
 telex: 33326 solab nl

INVLOED MIDDELSTE HOOFDSPANNING
 TRIAXIAALPROEF 4C
 VERLOOP $q - \epsilon_{\text{verticaal}}$ $\beta = 0^\circ$

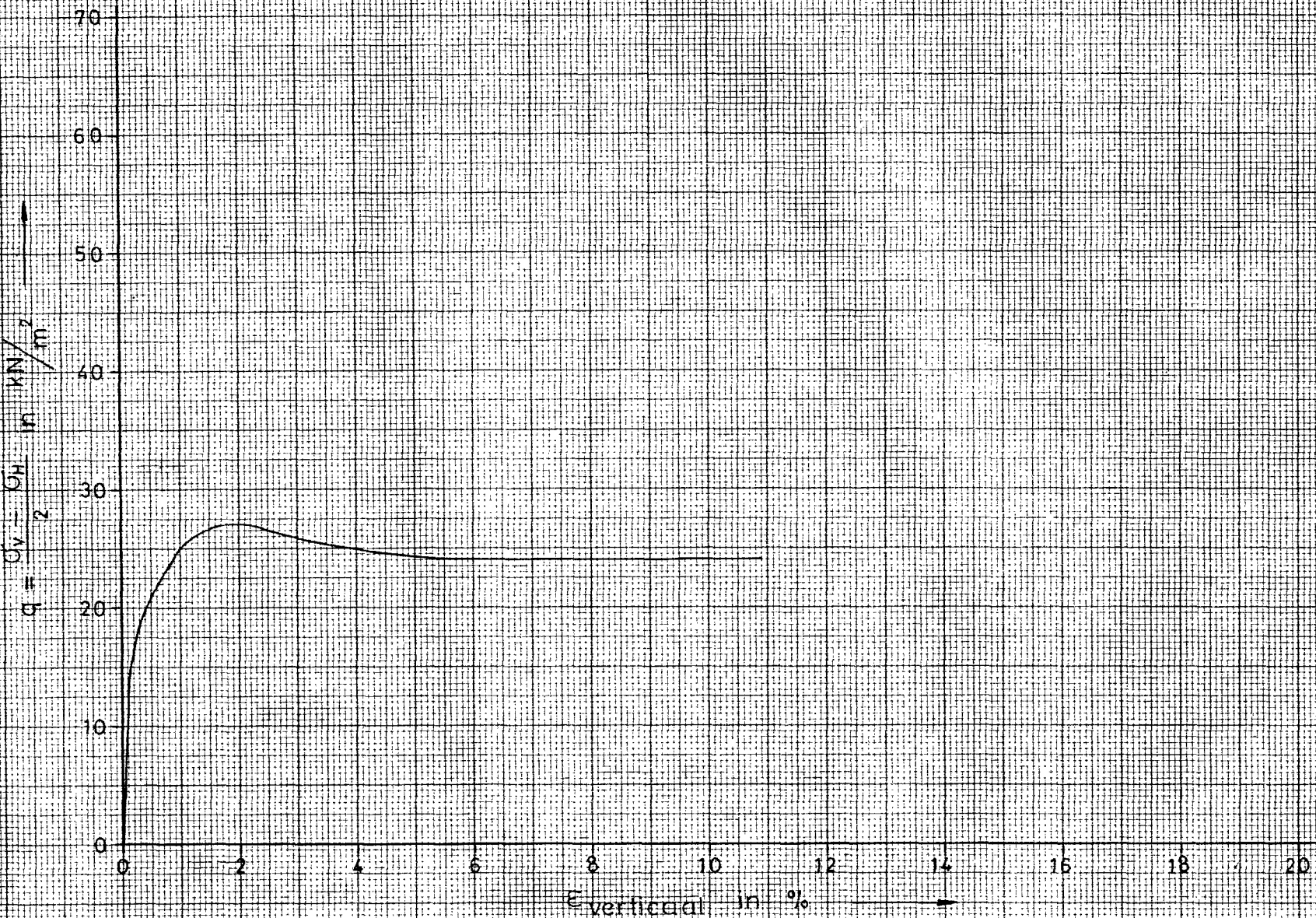
	d.d.	get.
CO - 230662		gec.
BUL. 5		form. A4



laboratorium voor grondmechanica delft
telefoon: (015) - 56 92 23
telefax: 33326 solab nl

INVLOED MIDDELSTE HOOFDSPANNING
SPANNINGSPAD TRIAXIALPROEF 4C $\beta = 0^\circ$

d.d.	get.
CO-230662	gec.
BIL. 6	form.
A4	



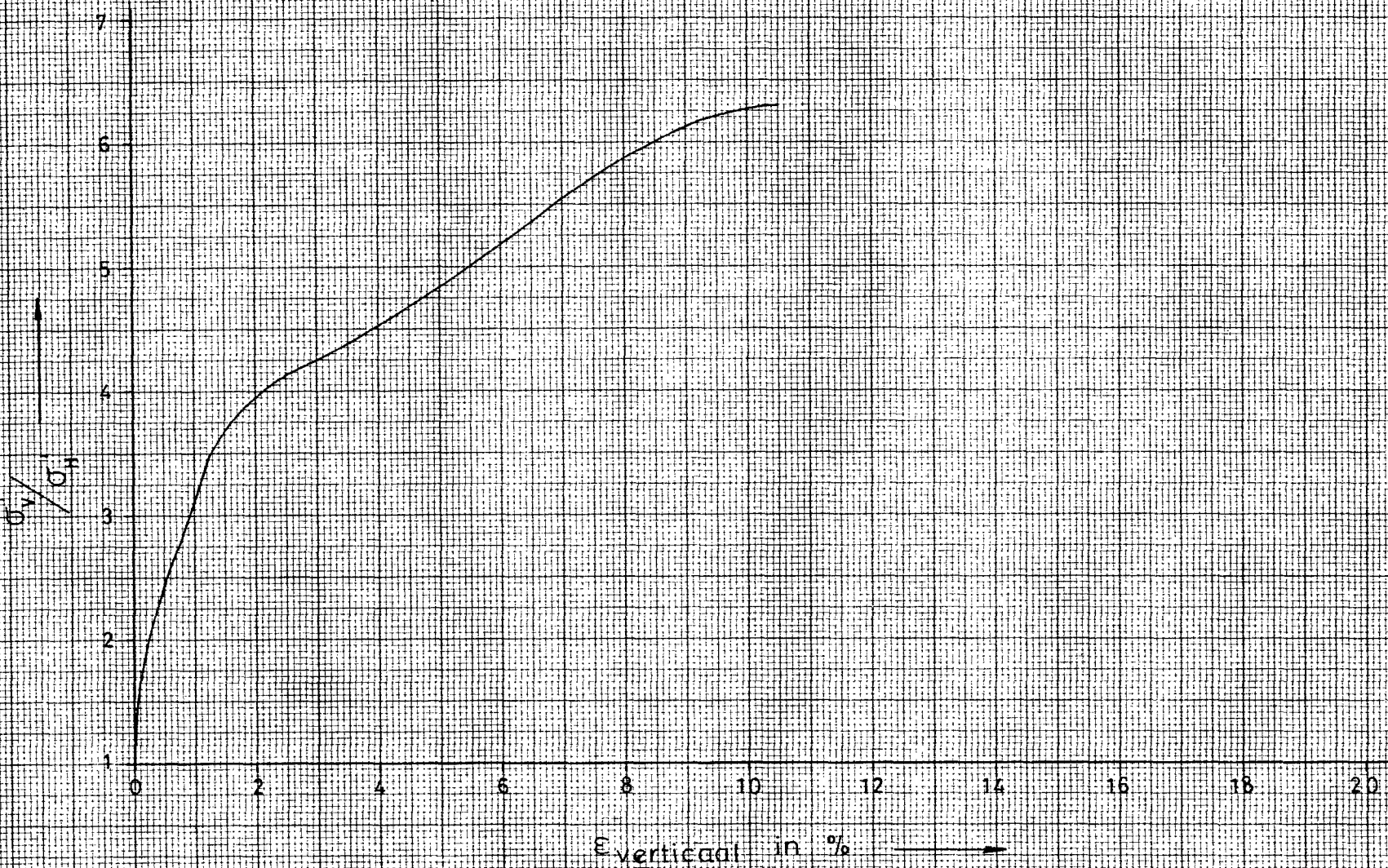
$$\sigma_v = \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2} = b$$



laboratorium voor grondmechanica delft
 telefoon: (015) - 56 92 23
 telefax: 33326 solab nl

INVLOED MIDDELSTE HOOFDSPANNING
 I.S.C. PROEF 5A
 VERLOOP q - $\epsilon_{\text{verticaal}}$

CO-230662	BUL. 7	A ₄	g.d.	get.
			gec.	form.



laboratorium voor grondmechanica delft
 telefoon: (015) - 36 92 23
 telex: 33326 solab nl

INVLOED MIDDELSTE HOOFDSPANNING
 I.S.C. PROEF 5A
 VERLOOP $\sigma'_v / \sigma'_H - \epsilon$ verticaal

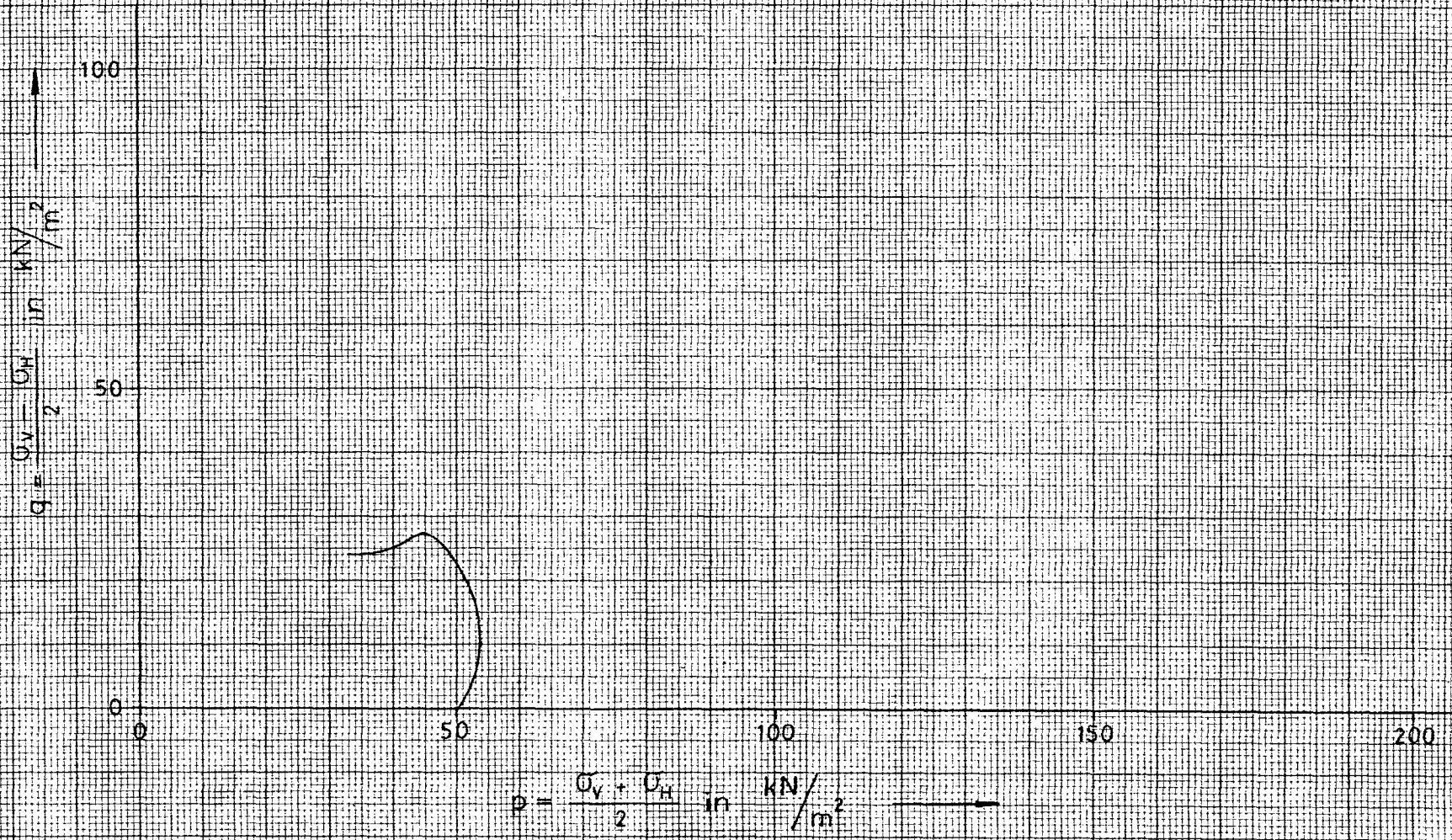
d.d.	get.
CO-230662	gec.
Bijl. 8	form.
A4	

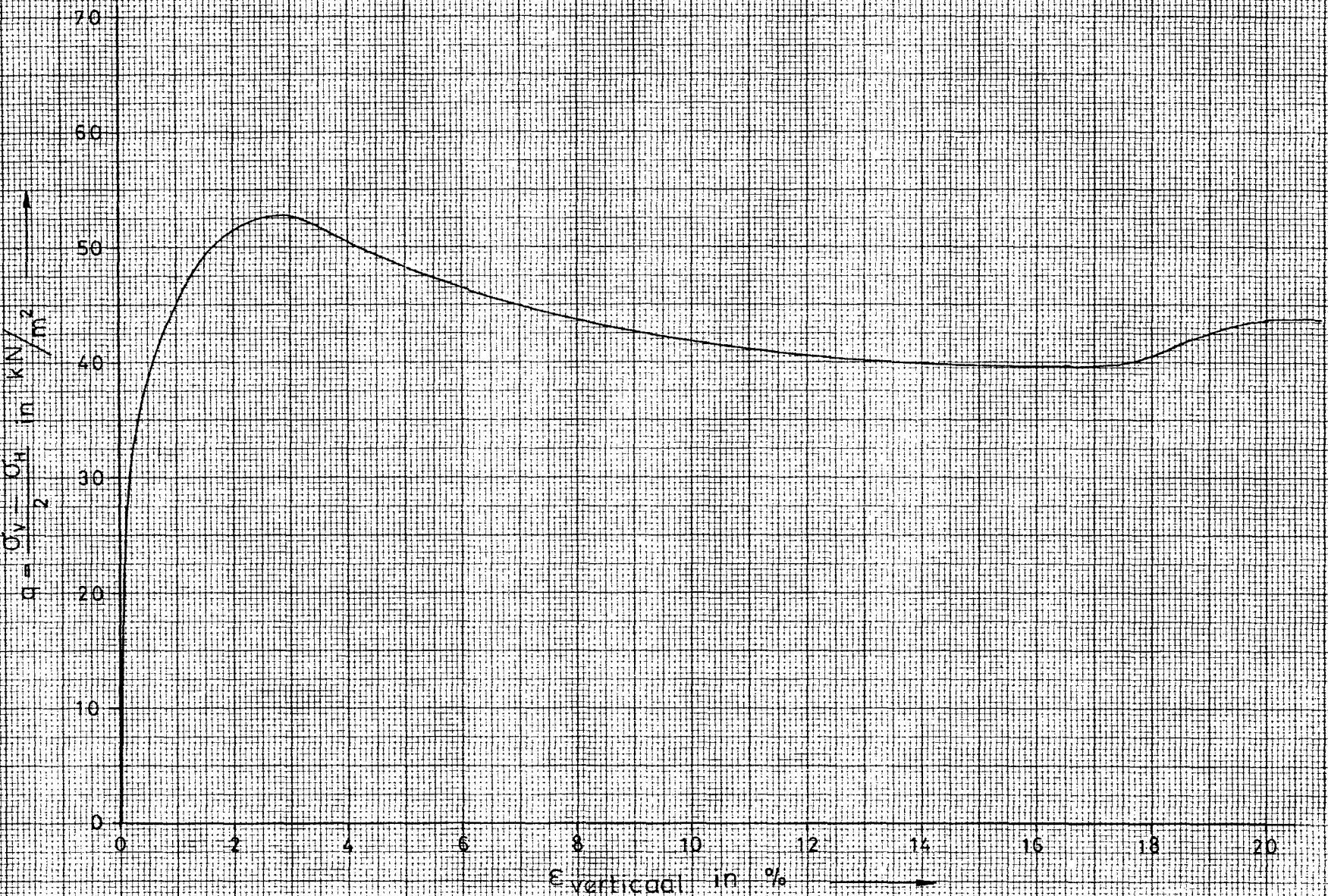


laboratorium voor grondmechanica delft
telefoon: (015) - 56 92 23
telefax: 333 26
solid nl

INVLOED MIDDELSTE HOOFDSPANNING
I.S.C. PROEF 5A
SPANNINGSPAD P-Q

CO-230662
BUL. 9
A₄





$$\frac{m^2}{Nk} \cdot \frac{m}{H_0} \cdot \frac{2}{\lambda_0} = b$$



laboratorium voor grondmechanica delft

telefoon: (015) - 56 92 23

telex: 33326 solab nl

d.d.

get.

INVLOED MIDDELSTE HOOFDSPANNING

CO - 230662

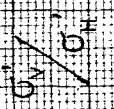
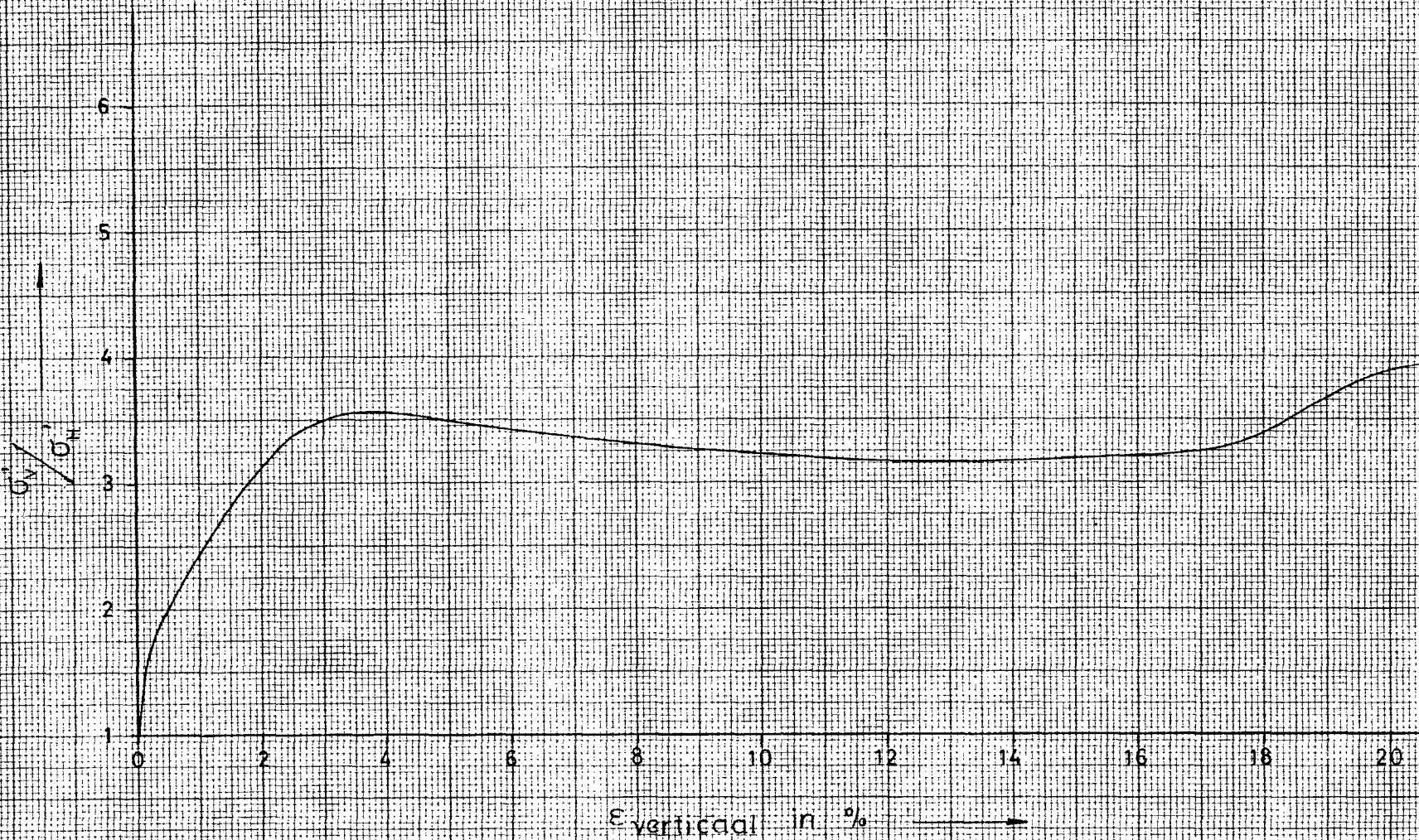
I.S.C. PROEF 5B

BIJL. 10

VERLOOP $q - \epsilon_v$ verticaal

form
A₄

get.



laboratorium voor grondmechanica delft
 telefoon: (015) - 56 92 23
 telex: 33326 solap nl

INVLOED MIDDELSTE HOOFDSPANNING
 I.S.C. PROEF 5B
 VERLOOP $\sigma'_v / \sigma'_h - \epsilon_{\text{vertical}}$

CO-230662	BUL.11	A ₄
get.	d.d.	gec.
		norm.



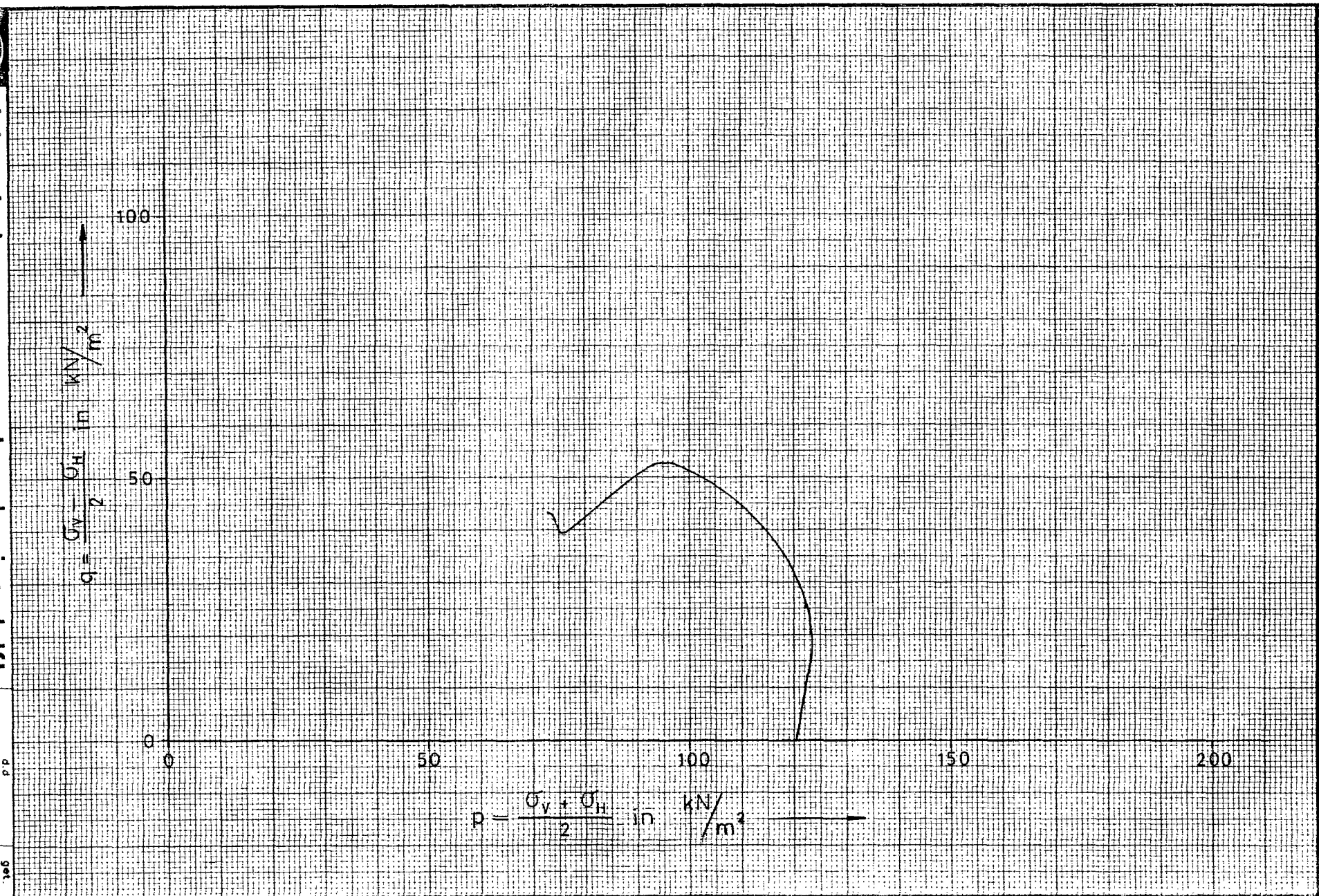
laboratorium voor grondmechanica delft
telefoon: (015) - 56 92 23
telefax: 33326 solab nl

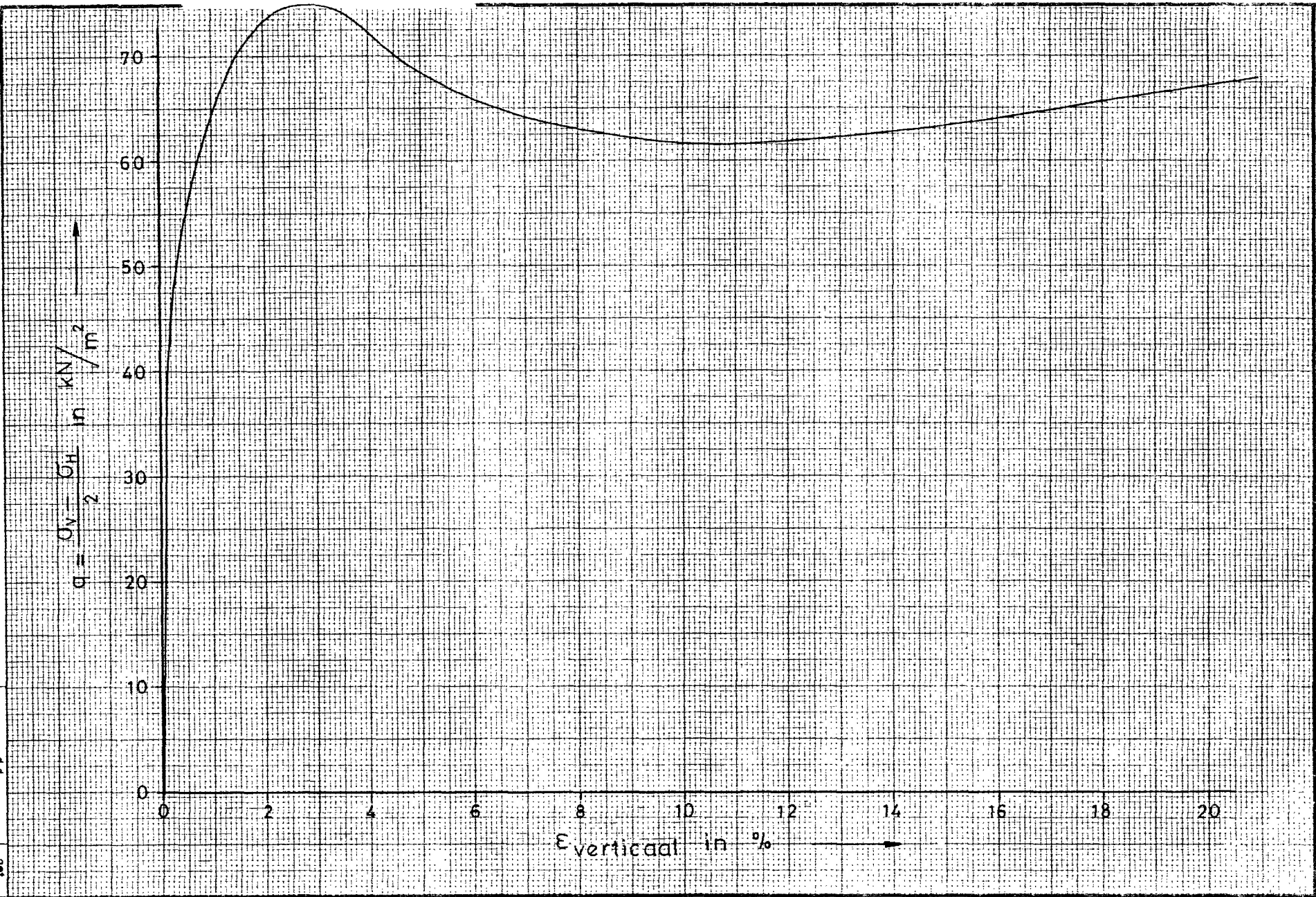
INVLOED MIDDELSTE HOOFDSPANNING
I.S.C. PROEF 5B
SPANNINGSPAD P-Q

CO-230662
BIL. 12

A₄

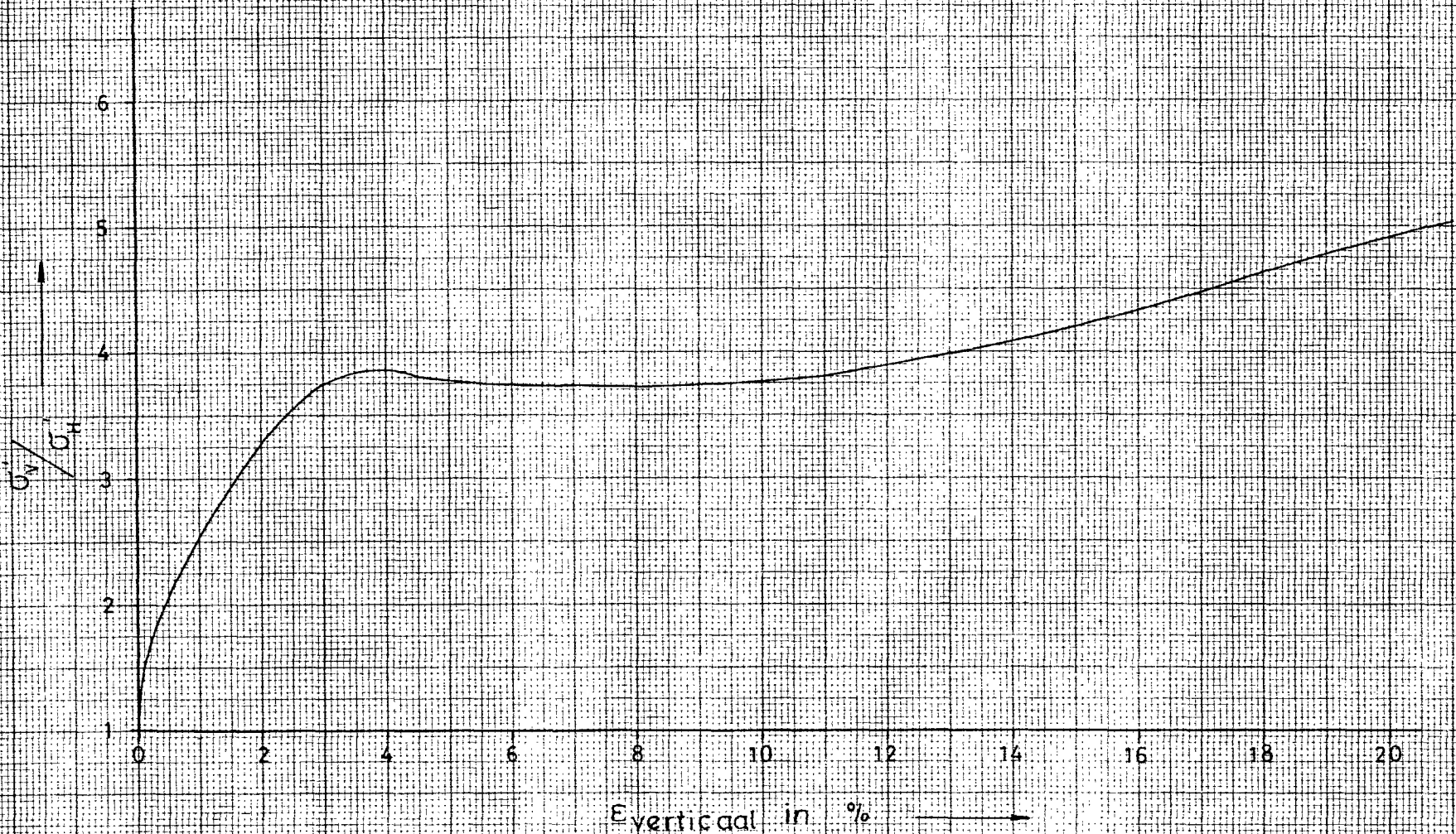
g.c.





laboratorium voor grondmechanica delft
telefoon: (015) - 56 92 23
telefax: 33326 301ab nl

INVLOED MIDDELSTE HOOFDSPANNING		d.d.	get.
I.S.C. PROEF 5C			
VERLOOP $q - \epsilon_{verticaal}$		CO-230662	gec.
		BUL.13	form.
		A4	



σ'_H / σ'_H0

$E_{\text{verticaal}}$ in %



laboratorium voor grondmechanica delft
 telefoon: (015) - 56 92 23
 telex: 33326 sodab nl

INVLOED MIDDELSTE HOOFDSPANNING
 I.S.C. PROEF 5C
 VERLOOP $\sigma'_V / \sigma'_H - \epsilon$ verticaal

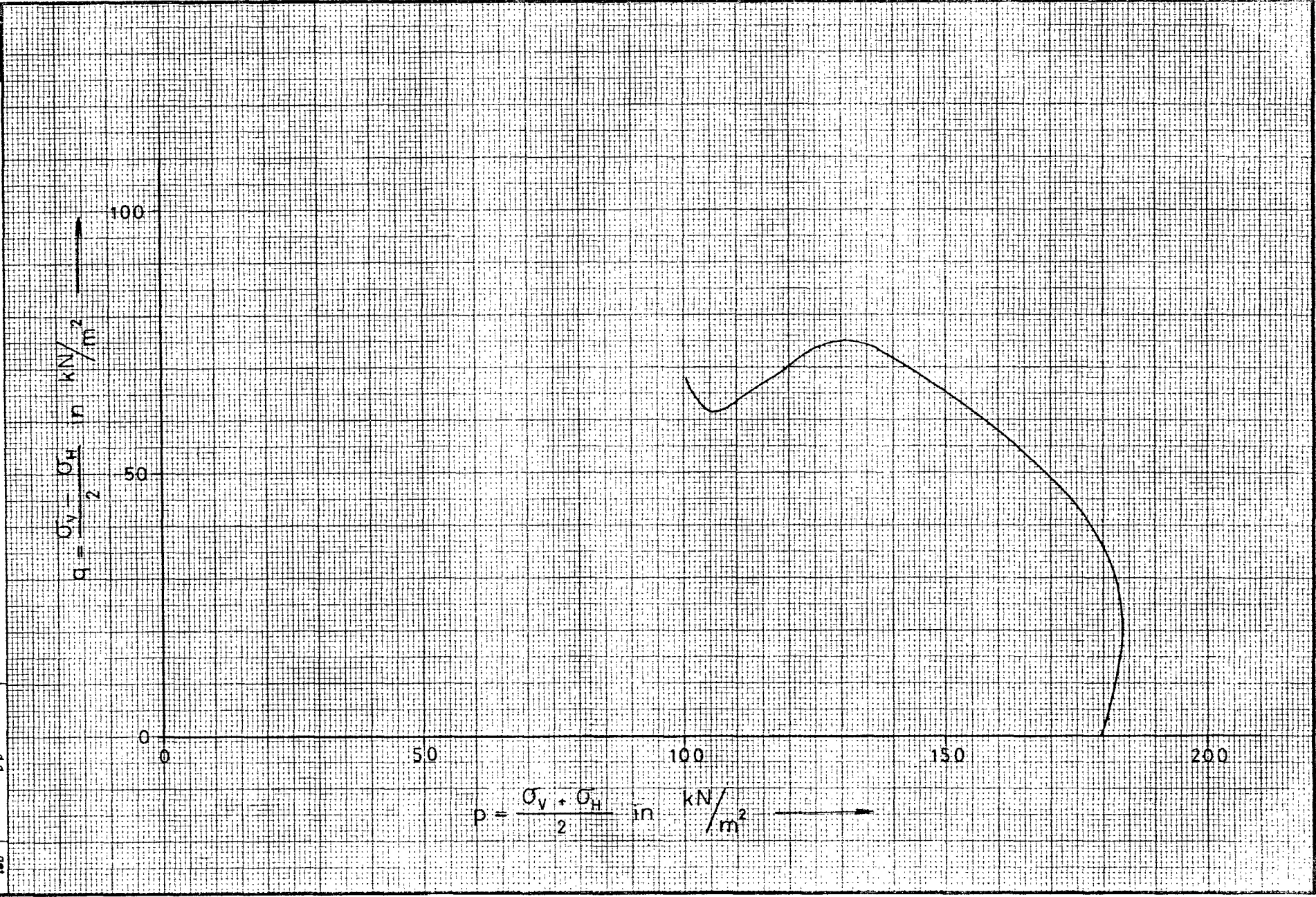
d.d.	get.
CO - 230662	g.c.
BIJL. 14	form.
	A ₄

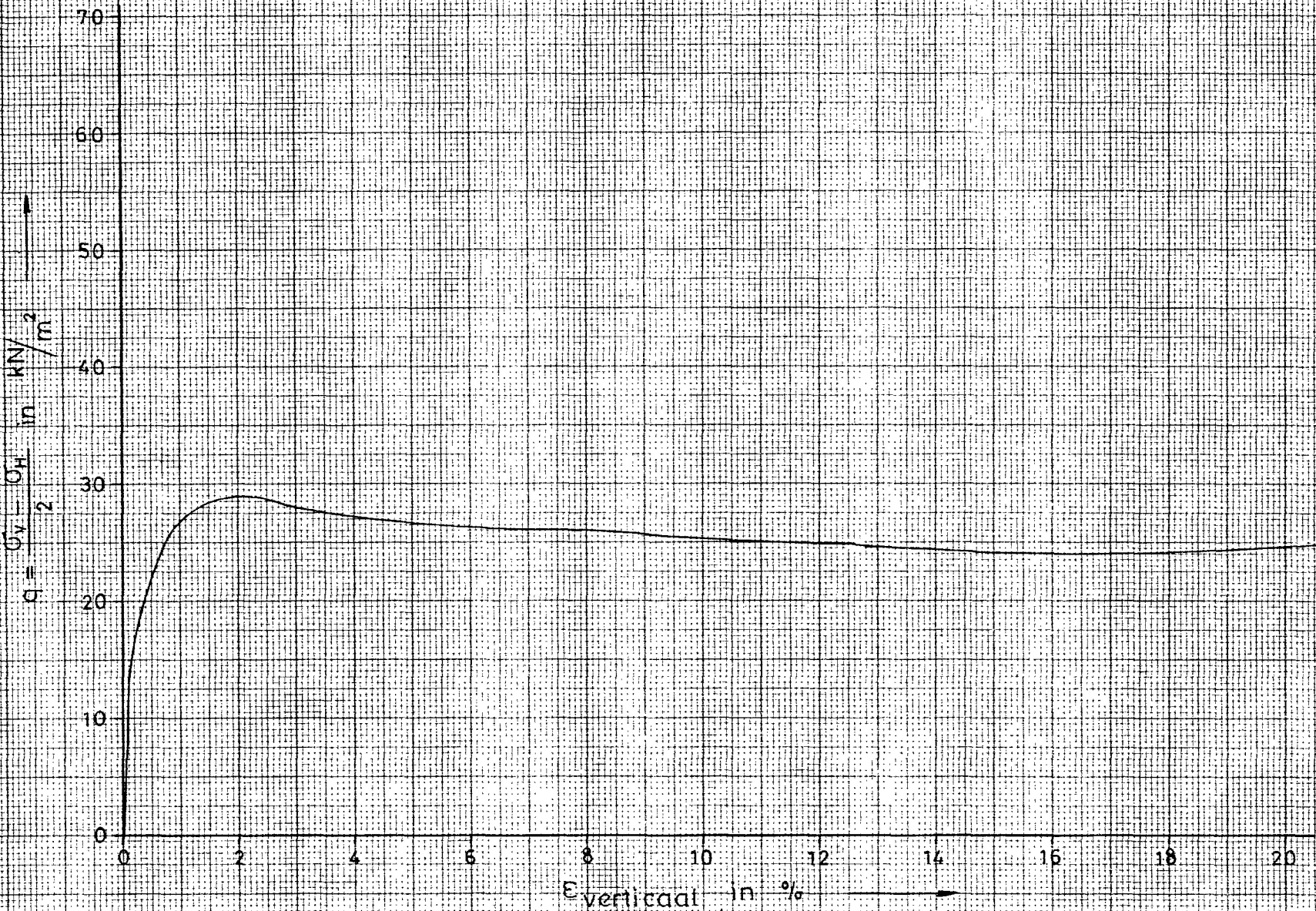


laboratorium voor grondmechanica delft
telefoon: (015) - 56 92 23
telefax: 33326 solab nl

INVLOED MIDDELSTE HOOFDSPANNING
I.S.C. PROEF 5C
SPANNINGSPAD P-Q

CO-230662
BIL.15
A₄





$$\frac{m^2}{kN} = \frac{H_0 - H_1}{2} = b$$



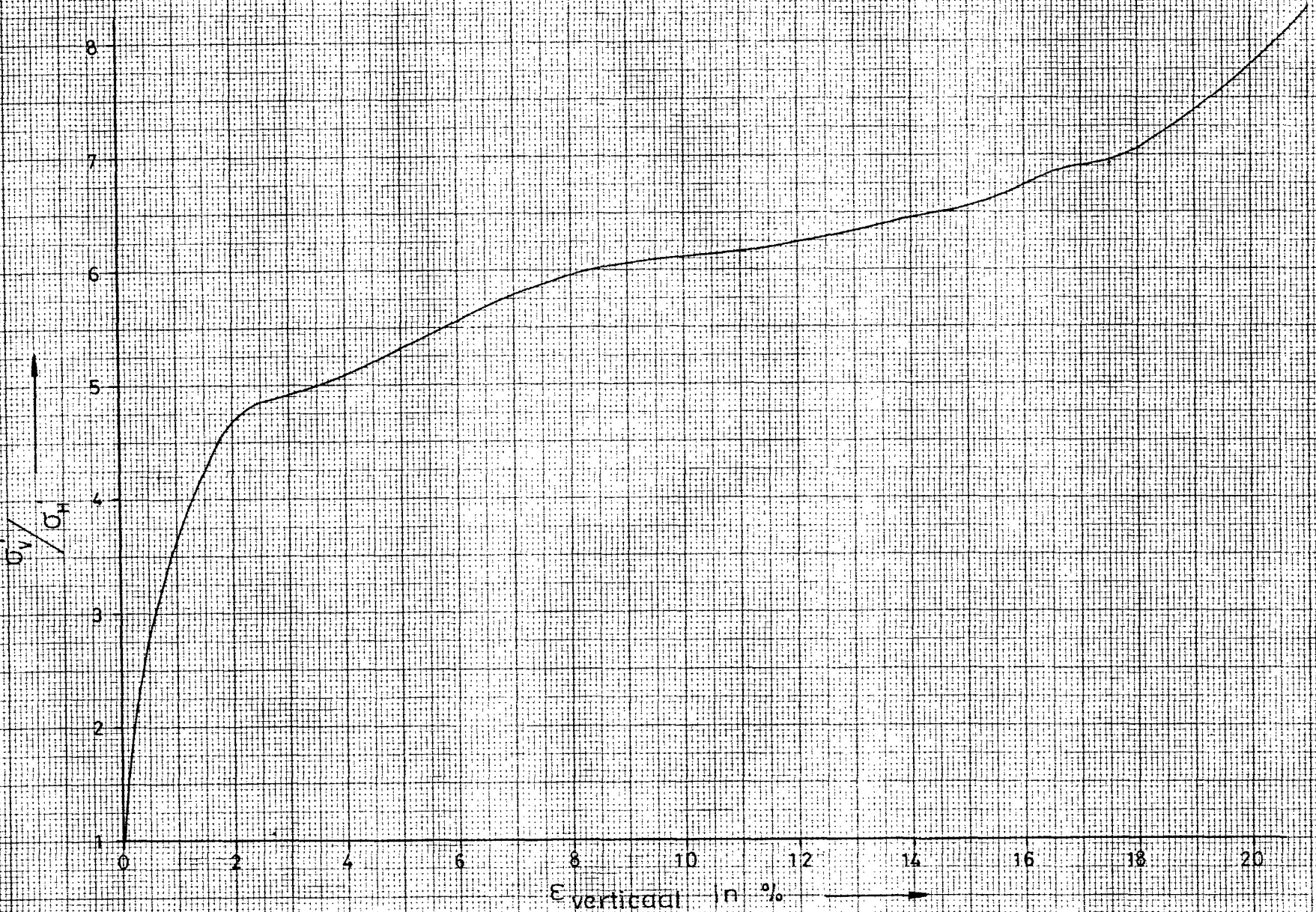
laboratorium voor grondmechanica delft

telefoon: (015) - 56 92 23

telefax: 33326 solab nl

INVLOED MIDDELSTE HOOFDSPANNING
I.S.C. PROEF 5A herhaling
VERLOOP q - ε verticaal

d.d.	get.
CO-230662	get.
BIL. 16	form.
A ₄	



laboratorium voor grondmechanica delft

telefoon (015) - 56 92 23

telefax 33326 solab nl

INVLOED MIDDELSTE HOOFDSPANNING
I.S.C. PROEF 5A herhaling
VERLOOP $\sigma'_v / \sigma'_{vh} - \epsilon_{\text{verticaal}}$

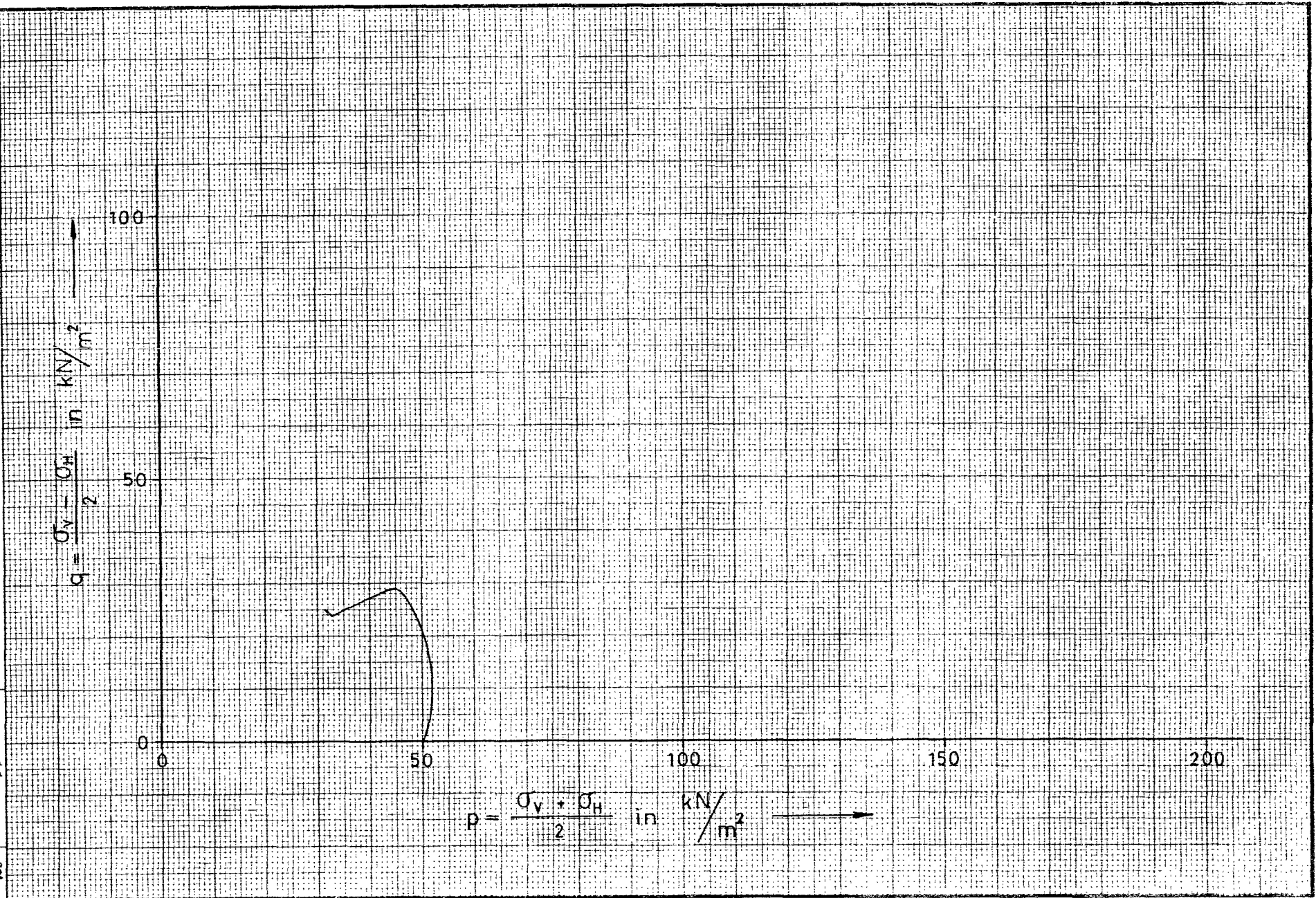
CO - 230662	BUL.17	A ₄	get.
			gec.

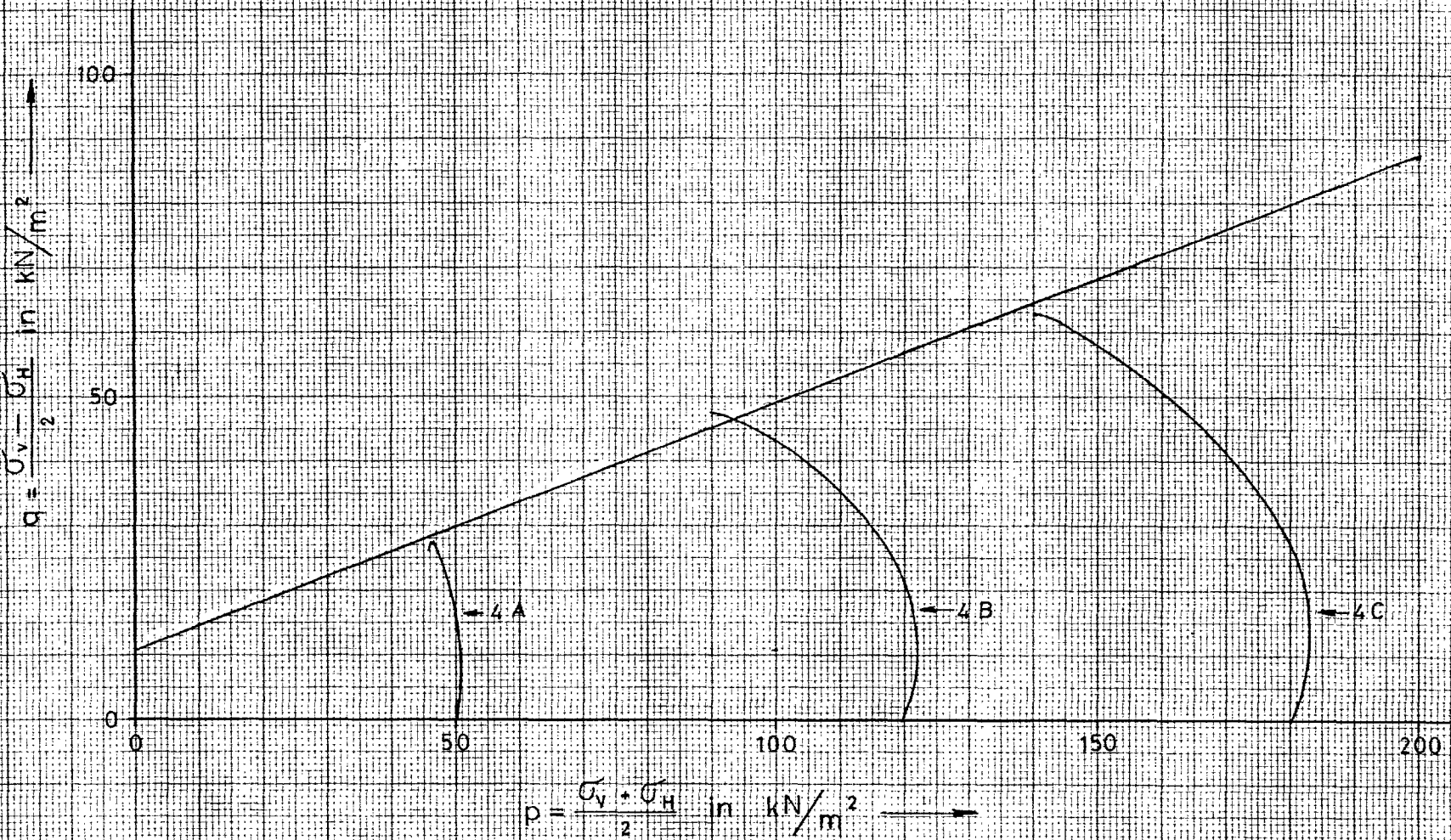


laboratorium voor grondmechanica delft
telefoon: (015) - 56 92 23
telefax: 33326 solab nl

INVLOED MIDDELSTE HOOFDSPANNING
I.S.C. PROEF 5A herhaling
SPANNINGSPAD P-Q

d.d.	get.
CO-230662	gec.
BIL.18	form.
A4	





laboratorium voor grondmechanica delft

telefoon: (015) - 56 92 23

telefax: 33326

soilab nl

d.d.

get.

INVLOED MIDDELSTE HOOFDSPANNING

CO-230662

SPANNINGSPADEN TRIAXIAALPROEVEN

$\beta = 0^\circ$

BIJL. 19

form. A₄

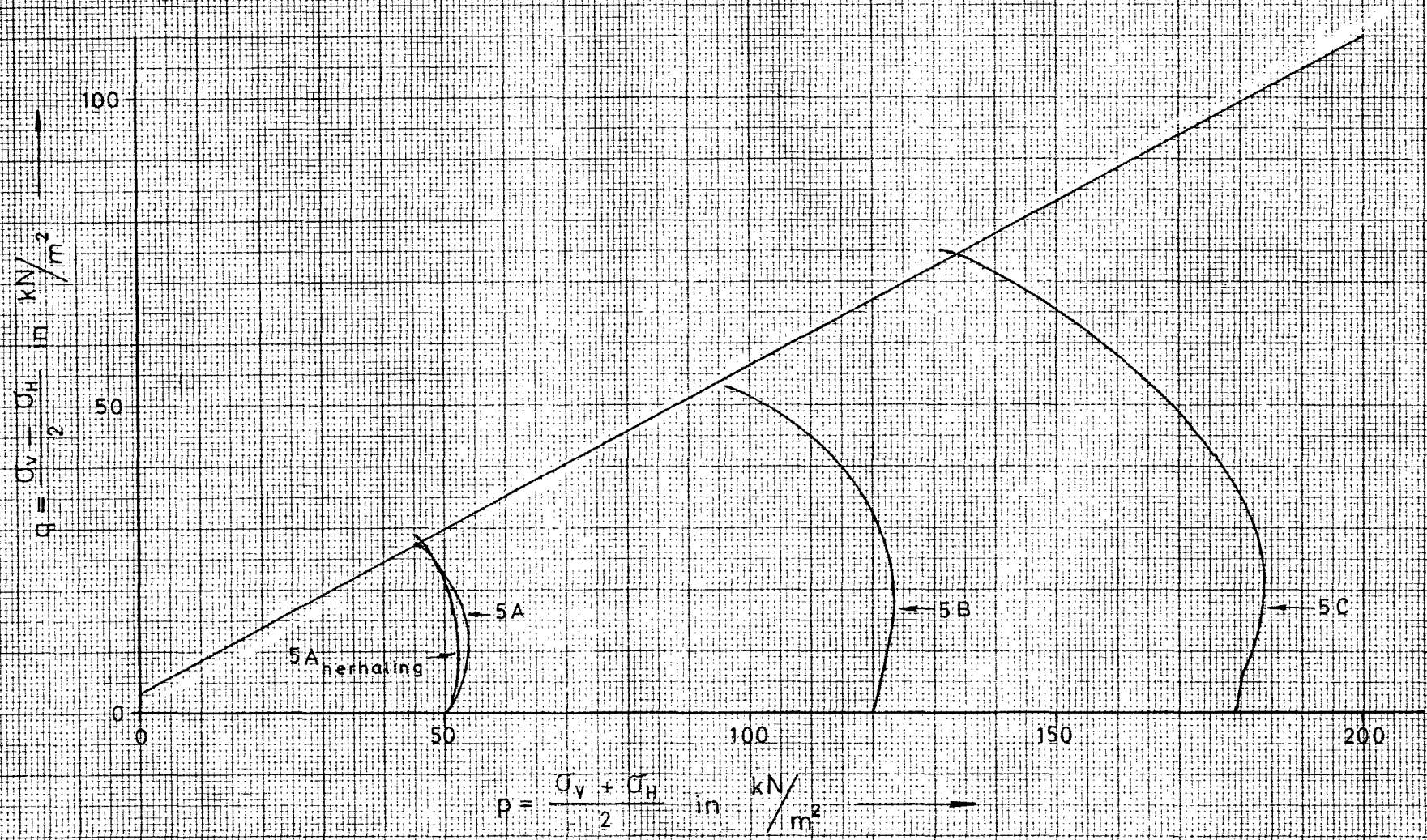
gec.



laboratorium voor grondmechanica delft
telefoon : (015) - 56 92 23
telefax : 33326 solab nl

INVLOED MIDDELSTE HOOFDSPANNING
SPANNINGSPADEN PLANE-STRAIN PROEVEN

CO-230662	BIL. 20	get. form. A ₄
-----------	---------	---------------------------------

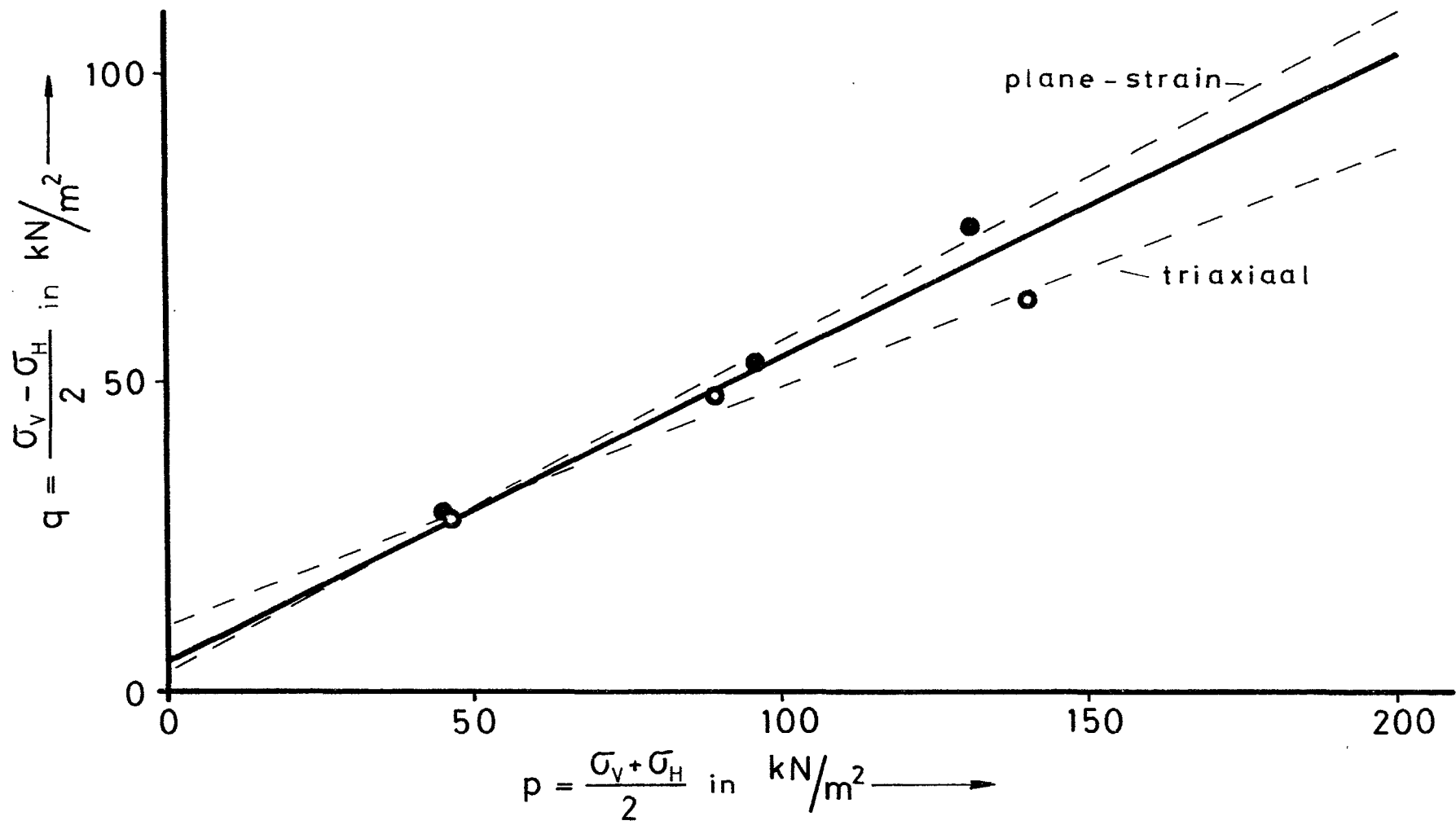




laboratorium voor grondmechanica delft
telefoon: (015) - 56 92 23
telefax: 33 326 solab nl

INVLOED MIDDELSTE HOOFDSPANNING

get.	d.d.	CO-230662	BJL. 21
gec.			
form.			A ₄





laboratorium voor grondmechanica delft

telefoon: (015) - 56 92 23

telex: 33326 SOLAB NL

d.d.

get.

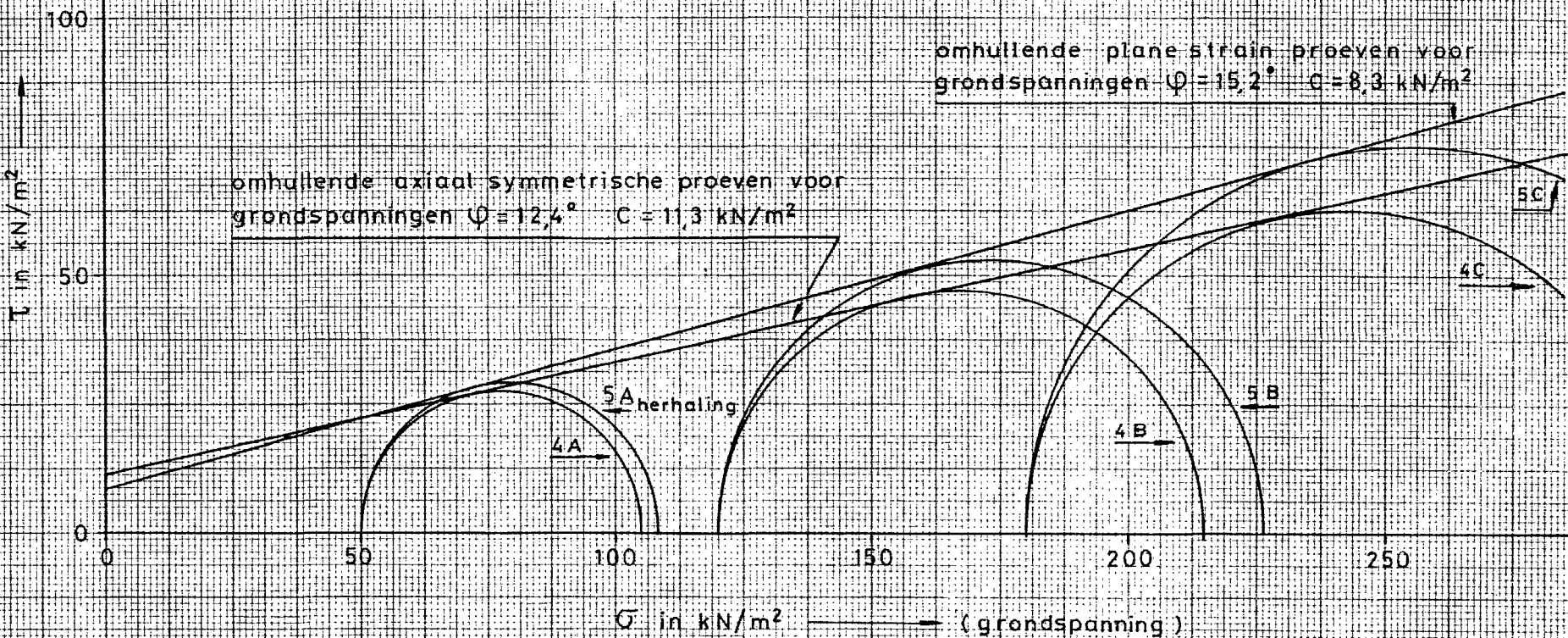
CO-230662

get.

BUL. 22

A₄

INVLOED MIDDELSTE HOOFDSPANNING
TOTAAL SPANNINGSBENADERING



DIJKZIJDE

