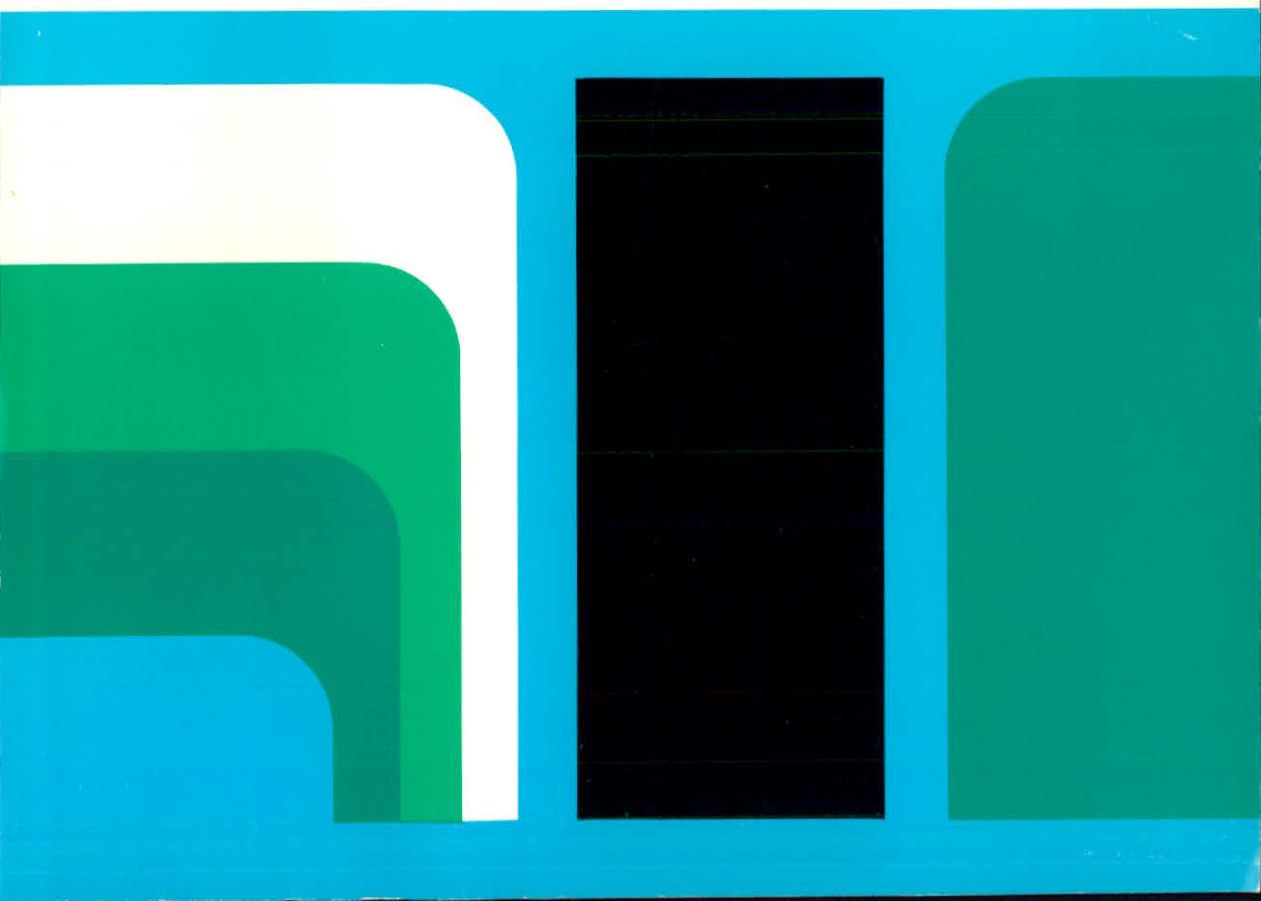


# leidraad cel- en triaxiaalproeven

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen



# leidraad cel- en triaxiaalproeven

Leidraad voor de bepaling van  
grondeigenschappen met cel- en  
triaxiaalproeven ten behoeve  
van de beoordeling van de  
stabiliteit van dijken

UITGEVERIJ WALTMAN, DELFT

TECHNISCHE ADVIESCOMMISSIE VOOR DE WATERKERINGEN

OKTOBER 1988



## VOORWOORD

In 1979 heeft werkgroep 3 van de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen het initiatief genomen voor het opstellen van een „leidraad voor cel- en triaxiaalproeven ten behoeve van de beoordeling van de stabiliteit van dijken”.

Dit initiatief komt voort uit de wens om meer eenheid te brengen in de wijze van aanpak en behandeling van routinematige voorkomende geotechnische problemen bij waterkeringen.

Bij het ontwerp van nieuwe of te versterken waterkeringen zijn een groot aantal disciplines betrokken. Om met diverse disciplines gezamenlijk tot een goed ontwerp te kunnen komen is inzicht in en begrip voor elkaars benaderingswijzen en argumenten noodzakelijk.

Deze leidraad heeft tot doel de sterktebepaling van grond te beschrijven. Deze sterktebepaling van grond is een specialistisch gebeuren, dat een grote invloed heeft bij de uitwerking van de plannen.

De werkgroep is van mening dat deze beschrijving zowel bijdraagt tot meer eenheid in behandeling als tot meer duidelijkheid voor de andere disciplines waar het gaat om de stabiliteit van taluds van waterkeringen.

Bij de opheffing van werkgroep 3 van de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen was de werkgroep als volgt samengesteld:

voorzitter: ir. H. Visser

secretaris: ing. J.A. MUIJS

leden : ir. W.J. HEIJNEN

ir. P.C. MAZURE

ir. D.C. VAN OOIJEN

ir. H.M.A. PACHEN

ing. R.J. TERMAAT

dr.ir. P.A. VERMEER

ir. A.W.C.M. VROUWENVELDER



# INHOUD

	VOORWOORD . . . . .	3
	INHOUDSOPGAVE . . . . .	5
	VERKLARING VAN TEKENS EN SYMBOLEN . . . . .	7
	BEGRIPPENLIJST . . . . .	9
Hoofdstuk 1	INLEIDING . . . . .	12
1.1	Representatieve doorsnede . . . . .	12
1.2	Schematisering profiel . . . . .	13
1.3	Glijvlakberekeningen . . . . .	13
1.4	Vereenvoudiging van de spanningstoestand . . . . .	14
1.5	Vereenvoudiging van het bezwijkmechanisme . . . . .	14
1.6	Berekeningsmethode . . . . .	14
1.7	Vereenvoudiging van het materiaalgedrag . . . . .	15
Hoofdstuk 2	TRIAXIAAL- EN CELPROEVEN . . . . .	16
2.1	Spanningstoestand in cel- en triaxiaalproeven . . . . .	16
2.2	Vervormingstoestand in cel- en triaxiaalproeven . . . . .	16
2.3	Weergave van de spanningstoestand, Mohr-diagram . . . . .	16
2.4	Spanningspadgrafiek of $p$ - $q$ -diagram . . . . .	17
2.5	De betekenis van cel- en triaxiaalproeven . . . . .	18
Hoofdstuk 3	BOREN EN HET NEMEN VAN MONSTERS . . . . .	20
3.1	Algemeen . . . . .	20
3.2	Kwaliteit van grondmonsters . . . . .	20
3.3	Monstername- en boortechiek . . . . .	21
Hoofdstuk 4	BEHANDELING EN AFMETINGEN VAN MONSTERS . . . . .	24
4.1	Vervoeren, bewaren en trimmen van monsters . . . . .	24
4.2	Afmetingen van monsters . . . . .	24
Hoofdstuk 5	DE TRIAXIAALPROEF . . . . .	26
5.1	Inleiding . . . . .	26
5.2	Keuze van het type triaxiaalproef . . . . .	26
5.3	Back pressure . . . . .	28
5.4	Enkel- of meertrapsproeven . . . . .	29

5.5	Gladde eindvlakken . . . . .	29
5.6	Bepaling van de dilatatiefactor (A-factor) . . . . .	31
5.7	Bepaling van de verzadigingsfactor (B-factor) . . . . .	31
5.8	<i>Consolidatie bij de triaxiaalproef</i> . . . . .	32
5.8.1	Keuze van de consolidatiespanningen . . . . .	32
5.8.2	Drainage . . . . .	33
5.8.3	Uitvoering en duur van de consolidatie . . . . .	34
5.8.4	Metingen tijdens de consolidatiefase . . . . .	36
5.9	<i>Bepaling van de vervormingssnelheid bij de triaxiaalproef</i> . . .	36
5.10	<i>Uitvoering van de geconsolideerde (on)gedraineerde triaxiaalproef</i> . . . . .	39
5.10.1	Metingen . . . . .	40
5.10.2	Correcties op de resultaten . . . . .	40
5.10.3	Keuze van het faalcriterium . . . . .	41
5.11	<i>Presentatie van waarnemingen bij triaxiaalproeven</i> . . . . .	42
Hoofdstuk 6	DE CELPROEF . . . . .	46
6.1	Inleiding . . . . .	46
6.2	Inrichting van de celproef . . . . .	47
6.3	Uitvoering van de celproef . . . . .	48
6.4	Metingen bij de celproef . . . . .	49
6.5	<i>Verwerking van de waarnemingen bij celproeven</i> . . . . .	50
6.6	Correcties . . . . .	50
6.6.1	Vaststelling van het oppervlak van de doorsnede van het monster . . . . .	51
6.6.2	Correctie ten gevolge van de celspanning in de plooi . . . . .	51
6.7	Keuze van het faalcriterium . . . . .	52
6.8	Presentatie van de waarnemingen bij de celproef . . . . .	52
Hoofdstuk 7	STATISTISCHE VERWERKING . . . . .	56
7.1	Inleiding . . . . .	56
7.2	Formules . . . . .	58
7.2.1	De gemiddelde regressielijn . . . . .	58
7.2.2	Veilige ondergrenswaarde . . . . .	59
7.2.3	Veilige waarde per spanningsniveau . . . . .	60
7.2.4	Afsnuiting m.b.v. twee veilige schuifspanningswaarden . . .	60
7.2.5	Monsters van meerdere lokaties . . . . .	60
Hoofdstuk 8	SLOTBESCHOUWING . . . . .	63
	LITERATUUR . . . . .	64

## VERKLARING VAN TEKENS EN SYMBOLEN

### *Tekens bij het symbool*

- de letter a wordt hierbij als voorbeeld genomen

- $a'$  een accent duidt aan dat het symbool betrekking heeft op korrelspanningen  
 $\bar{a}$  een streep boven het symbool duidt een gemiddelde waarde aan  
 $\delta a$  Het voorvoegsel  $\delta$  of  $\Delta$  duidt op een kleine verhoging of  
 $\Delta a$  verandering

### *Subscript bij het symbool ( $a_e, a_f, a_h$ , etc.)*

subscript: duidt op:

- c cel of consolidatie  
e einde proef  
f bezwijken (failure)  
h horizontaal  
i beginwaarde (initieel) of individuele realisatie (statistiek)  
n stap n (bij proeven met meerdere belastingstappen) of aantal n (statistiek)  
t tijdstip t  
u ongedraineerd (undrained)  
v vertikaal  
x plaats of afstand op ordinaat  
95,100,etc percentage  
0 tijdstip  $t = 0$ , beginsituatie  
1 grootste hoofdspanning of nummer 1  
2 middelste hoofdspanning of nummer 2  
3 kleinste hoofdspanning of nummer 3

### *Gebruikte tekens*

- voor eenheden: m, s, kg (S.I.-eenheden)  
kPa (kN/m) is aanbevolen; Pa, MPa is toegestaan.  
m is aanbevolen; mm,  $\mu\text{m}$  is toegestaan.



## Symbolen

### Symbool Eenheid Verklaring

$A$	$m^2$	oppervlakte
$\alpha$	-	hoek van lijn door toppen van cirkels in spanningspadgrafiek $\sin \phi = \operatorname{tg} \alpha$
$c$	kPa	cohesie
$c_v$		consolidatiecoëfficiënt
$E(a)$	n.v.t.	verwachtingswaarde van $a$ (statistiek)
$\varepsilon$	%	relatieve vervorming
$\varepsilon$	-	afwijking tussen meetpunt en regressielijn (statistiek)
$F$	kN	belasting op het monster
$\phi$		hoek van inwendige wrijving
$H$	m	hoogte van het monster
$h$	m	diameter van het monster
$K$	1	verhouding tussen horizontale en verticale korrelspanningen
$K_0$	1	verhouding tussen horizontale en verticale korrelspanningen in oneindig uitgestrekt horizontaal terrein
$m$	1	aantal lokaties waar monsters vandaan komen
$n$	1	aantal monsters per lokatie
$\eta$	-	factor afhankelijk van de drainageomstandigheden
$p$	kPa	de som van horizontale en verticale spanning op het monster gedeeld door twee
$q$	kPa	het verschil van horizontale en verticale spanning op het monster gedeeld door twee
$q$	1	correlatie tussen parameters
$t$	s	tijd
$t_{n-2}$	1	waarde uit de tabel van de student-verdeling (statistiek)
$t_{95}$	s	tijd waarin de consolidatiegraad 95% is
$\tau$	kPa	schuifspanning
$U$	1	consolidatiegraad
$u$	kPa	waterspanning
$V$	$m^3$	volume
$v$	$s^{-1}$	relatieve vervormingssnelheid
$x_i$		waarneming (meetwaarde)
$y_i$		waarneming (meetwaarde)
$\sigma$	kPa	normaalspanning
$\sigma(a)$	1	standaardafwijking van $a$ (statistiek)
$\sigma^2(a)$	1	variantie van $a$ (statistiek)

## BEGRIPPENLIJST

A-factor	waterspanningsfactor (i.v.m. belastingsgeschiedenis) (van Skempton) zie par. 5.6.
B-factor	waterspanningsfactor (i.v.m. verzadiging) (van Skempton) zie par. 5.7.
back pressure	zie par. 5.3.
belastingtrap	een periode waarbij in de celproefprocedure de verticale belasting gelijk blijft of in de triaxiaalproefprocedure de celspanning gelijk blijft.
bezwijken	het vertonen van een niet-afnemende vervorming in de tijd bij gelijk blijvende spanning.
bezwijkcriterium	faalcriterium dat door bezwijken wordt gerealiseerd.
boren	het maken van een gat in de bodem, meestal om dieper gelegen bodemlagen te bereiken.
celspanning	de spanning die heerst in de cel van een cel- of triaxiaalapparaat.
cirkel van Mohr	spanningscirkel in het diagram van Mohr waarvan het middelpunt is gegeven door $p = (\sigma_v + \sigma_h)/2$ en de straal door $q = (\sigma_v - \sigma_h)/2$ .
cohesie	schuifspanning die door grond verdragen kan worden als de horizontale steunspanning nul is en geen inwendige spanningen aanwezig zijn.
consolidatie	het afstromen van porie-water door het verhogen van de uitwendige spanning op een grondmassief.
consolidatiecoëfficiënt	een coëfficiënt die wordt bepaald door de doorlatendheid van het monster, de toegevoegde verticale spanning en de verticale deformatie.
consolidatiegraad	de bereikte hoeveelheid consolidatie ten opzichte van de te bereiken hoeveelheid consolidatie.
consolidatie	consolidatie onder alzijdig gelijke spanning.
consolidatie ( $K_0$ )	consolidatie onder spanningscondities zoals die in oneindig uitgestrekte horizontaal gelaagde grond voorkomen.
consolidatie (over-)	zie overconsolidatie.
consolidatiespanning	de spanning waaronder een grondmonster consolideert.
deformatie	vervorming.
deviatorspanning	verschil tussen de grootste en de kleinste hoofdspanning.
dilatantie	volumeverandering ten gevolge van schuifspanning.
dilatatiefactor	A-factor van Skempton (par. 5.6).
drainage	systeem waardoor porie-water af of toe kan stromen. (drainagestroken rond grondmonster).

draineren	af- of toestromen van porie-water mogelijk maken.
drukdoos	instrument waarmee kracht kan worden gemeten.
effectieve spanning	korrelspanning.
enkeltrapsproef	procedure waarbij één monster wordt gebruikt per belastings-trap.
faalcriterium	situatie waarbij een materiaal of constructie geacht wordt niet meer aan de eisen te voldoen.
falen	niet meer voldoen aan eisen.
grensspanning	de hoogste spanning waarbij een grond volledig is geconsolideerd.
gronddrukcoëfficiënt	verhouding tussen horizontale en verticale spanning in de grond.
- (actieve)	laagst mogelijke verhouding tussen horizontale en verticale spanning (b.v. direkt achter een wand die van het grondmassief af beweegt).
- (neutrale)	verhouding tussen horizontale en verticale spanning in een oneindig uitgestrekt, horizontaal gelaagd, normaal geconsolideerd grondmassief.
- (passieve)	hoogst mogelijke verhouding tussen horizontale en verticale spanning (b.v. direkt achter een wand die naar het grondmassief toe beweegt).
grondspanning	de totale spanning die door de grond (korrels, vloeistof en gas) wordt verdragen.
hoek van inwendige wrijving	de hoek die de grenslijn in het Mohr-diagram maakt met de x-as.
hoofdspanning	de spanning loodrecht op een vlak waarin geen schuifspanning werkt
in-situ-spanning	spanning die ter plaatse in de grond aanwezig is.
isotrope consolidatie	zie consolidatie.
$K_0$ -consolidatie	zie consolidatie.
korrelspanning	de spanning die uitsluitend door de korrels wordt verdragen.
kuip	vervorming bij gelijkblijvende belasting, waarbij het volume onveranderd blijft.
meertrapsproef (multi-stage test)	procedure waarbij één monster wordt gebruikt voor meerdere belastingstrappen.
membraan	dun vlies dat het monster van de vloeistof in de cel scheidt.
mobilisatiecurven	grenslijnen in het Mohr-diagram voor verschillende vervormingscriteria.
Mohr-diagram	grafiek waarin op de x-as $p(\sigma_v + \sigma_h)/2$ en op de y-as $q(\sigma_v - \sigma_h)/2$ wordt uitgezet voor de spanningssituaties die aan het faalcriterium voldoen.

mohren	het aftappen van water uit de celruimte van het celapparaat waardoor de celspanning afneemt.
multi-stage test	zie meertrapsproef.
overconsolidatie	het verschijnsel dat grond is geconsolideerd bij een hogere spanning dan in situ aanwezig is (grensspanning ligt hoger dan in-situ spanning).
spanningspad	het pad dat het punt met de coördinaten $p, q$ doorloopt tijdens de proef.
spanningspadgrafiek	grafiek waarin alle doorlopen spanningen tijdens de proef worden uitgezet d.m.v. de top van de bijbehorende cirkel van Mohr, zijnde het punt $(p, q)$ .
stabiliteiscoëfficiënt	coëfficiënt die de verhouding aangeeft tussen de maximaal toelaatbare schuifspanning en de berekende optredende schuifspanning bij een bepaalde bezwijkvorm.
trimmen	het op de juiste afmetingen brengen van een grondmonster.
vervormingscriterium	faalcriterium dat door vervormen wordt gerealiseerd.
vervormingssnelheid	snelheid waarmee boven en ondervlak van een monster naar elkaar toe bewegen.
verzadigingdgraad	de verhouding tussen de aanwezige hoeveelheid water in een monster t.o.v. de hoeveelheid water in dat monster bij volledige verzadiging.
verzadigingsfactor	$B$ -factor van Skempton zie par. 5.7
waterspanning	spanning die door het water verdragen wordt.

## HOOFDSTUK 1

### INLEIDING

In de huidige praktijk wordt de stabiliteit van taluds van waterkeringen „berekend”. De werkelijke situatie waarin de waterkering wordt aangetroffen is echter niet direct toegankelijk voor berekening.

De werkelijke situatie is namelijk een driedimensionale grondconstructie, veelal opgebouwd uit korrelmateriaal, waarvan de porieën gevuld zijn met water en/of lucht.

De grondconstructie volgt meestal een bochtig tracé, terwijl door natuurlijke of menselijke invloeden afwijkingen in geometrie en opbouw voorkomen. De natuurlijke grondslag onder de waterkering vertoont een afwisselende geologische opbouw.

Vrijwel alle stabiliteitsberekeningen zijn beperkt tot slechts één tweedimensionale doorsnede. Daarin zijn de geometrie van dijklichaam en grondopbouw geschematiseerd. Voor het gedrag van de grond zijn vereenvoudigde aannamen gedaan. De meest ingewikkelde berekeningen, b.v. met de eindige elementenmethode, gebruiken vaak een ingewikkelde schematisering van het gedrag van de grond en bepalen zelf hun faalmechanisme binnen de opgelegde randvoorwaarden. Deze berekeningen worden soms gebruikt in bijzondere situaties.

Gebruikelijk wordt volstaan met z.g. glijvlakberekeningen, waarin de resultaten van de proeven worden gebruikt, die in deze publicatie worden beschreven.

Glijvlakberekeningen voldoen in gevallen waarin met een eenvoudige schematisering van geometrie, laagopbouw en grondgedrag kan worden volstaan. Het faalmechanisme wordt bij glijvlakberekeningen vooraf opgelegd, dus niet door berekening bepaald. De berekening beperkt zich ertoe bij de opgelegde bezwijkvorm, die vrijwel altijd een cirkel is, de verhouding te bepalen tussen sterkte en belasting. Bij stabiele taluds is deze verhouding groter dan één, maar in verband met onzekerheden in de aannamen die gedaan zijn wordt voor de lange-duur-stabiliteit meestal een verhouding geëist die minimaal gelijk is aan 1,3 à 1,5.

Het voordeel van modellering is dat de werkelijkheid toegankelijk wordt voor berekening. Het nadeel is dat deze modellering niet de werkelijkheid is; er ontstaat door de modellering een verschil tussen het gedrag in werkelijkheid en het modelgedrag. In het volgende zullen enkele facetten van de modellering worden beschouwd.

#### 1.1 Representatieve doorsnede

Aangezien vrijwel alle rekenmethoden uitgaan van een tweedimensionale doorsnede dwars over de dijk dient een keuze gemaakt te worden welke doorsnede (profiel) wordt berekend van de talloze denkbare profielen.

Deze keuze geschiedt op basis van grondonderzoek, plaatselijke kennis en ervaring. Daarbij onderscheidt men een aantal dijkgedeelten die ieder in voldoende mate met één representatief profiel kunnen worden beschreven. Een representatief profiel voor de geselecteerde dijkstrekking is dan een redelijk ongunstige schematisering van de in de dijkstrekking voorkomende afmetingen en laagindelingen.

## 1.2 Schematisering profiel

De schematisering in grondlagen wordt o.a. verkregen uit boringen en sonderingen, vaak voorafgegaan door geo-elektrisch of elektro-magnetisch onderzoek.

De laatstgenoemde methoden geven een erg globale maar continue informatie over de ondergrond, die ter plaatse van boringen en sonderingen zeer concreet ingevuld kan worden.

Op deze wijze kan, indien voldoende grondonderzoek beschikbaar is, meestal een betrouwbaar beeld van de ondergrond worden verkregen. De betrouwbaarheid van de schematisering zal afhankelijk zijn van de intensiteit van het grondonderzoek.

In de schematisering worden scherpe overgangen tussen de grondlagen gedefinieerd die in werkelijkheid verlopend kunnen zijn, terwijl binnen een grondlaag overal dezelfde materiaaleigenschappen worden gedefinieerd (homogeen) waarbij tevens aangenomen wordt dat deze eigenschappen in alle richtingen gelijk zijn (isotroop) binnen een bepaalde grondlaag.

In werkelijkheid zullen de eigenschappen van punt tot punt variëren (gelukkig vaak met een geringe afwijking) terwijl isotropie in een aantal gevallen niet voor de hand ligt (denk b.v. aan veen).

## 1.3 Glijvlakberekeningen

Mede door hun eenvoud zijn glijvlakberekeningen de meest toegepaste soort berekeningen voor het berekenen van de stabiliteit van taluds van waterkeringen in Nederland.

Aangezien de werkelijkheid even gecompliceerd blijft, dienen bij glijvlakberekeningen dan ook de meest vergaande vereenvoudigingen en aannamen te worden gedaan.

Het idee van de glijvlakberekening is dat men een kinematisch mogelijk glijvlak aanneemt en daarvan bewijst dat het niet kan ontstaan (stabiel is).

De gevolgde procedure is dat men eerst van veel aangenomen glijvlakken aantoonst dat ze niet op kunnen treden en vervolgens aanneemt dat er geen enkel glijvlak op kan treden en dus het talud stabiel is.

Als men echter een kritisch glijvlak niet heeft opgegeven wordt ook niet aangetoond dat het optreedt, waardoor men onterecht gerustgesteld is.

Het is dan ook mogelijk dat potentieel kritische glijvlakken over het hoofd worden gezien. Een aantal redenen daarvoor zijn de volgende:

- in de berekeningen wordt vrijwel altijd een cirkelvormig glijvlak aangenomen.  
Wanneer er een kritisch niet-cirkelvormig glijvlak mogelijk is wordt dit over het hoofd gezien (b.v. een dunne slappe klei of veenlaag)

- het niet opgeven van glijvlakken in een kritisch gebied. Voor de berekening geeft men een raster van middelpunten en stralen van de cirkels op. Wanneer de kritische glijcirkels buiten dit raster liggen of andere stralen hebben worden die over het hoofd gezien.
- door het opgeven van een te grof raster kunnen lagere stabiliteitscoëfficiënten voorkomen tussen de berekende.

Ervaring met het werken met de methode kan de bezwaren grotendeels opheffen. Het voordeel van de methode is dat men snel een globaal inzicht in de stabiliteit heeft en dat de berekening goedkoop is. In twijfelgevallen kan men vervolgens overstappen naar minder gesimplificeerde methoden.

#### **1.4 Vereenvoudiging van de spanningstoestand**

In glijvlakberekeningen wordt aangenomen dat een starre grondmoot langs een meestal cirkelvormig aangenomen glijvlak afglijdt.

Deze aanname houdt in dat er uitsluitend schuifspanningen voorkomen in het glijvlak en dat bovendien die schuifspanning langs het gehele glijvlak tegelijkertijd een maximale waarde bereikt.

Deze aanname doet dan ook geen recht aan het ingewikkelde samenspel van spanningen en vervormingen zoals zich dat in het gehele grondmassief voordoet voorafgaande en tijdens het bezwijken van het talud. Door bovenstaande aannamen is het mogelijk dat de weerstand biedende krachten in de berekening worden overschat, waardoor onterecht op een te hoge veiligheid wordt gerekend.

#### **1.5 Vereenvoudiging van het bezwijkmechanisme**

In vrijwel alle glijvlakberekeningen wordt een cirkelvormig glijvlak aangenomen. Deze vorm wordt globaal bevestigd in praktijkwaarnemingen en door berekeningen met ingewikkelder grondmodellen. In een aantal gevallen zal echter een ander bezwijkmechanisme kritischer kunnen zijn. Dit kan zich voordoen in de vorm van een laag die van het talud afschuift, of een deel dat afglijdt over een dunne slappe laag. Men dient er dus op attent te zijn of een cirkelvormig glijvlak de werkelijkheid goed beschrijft.

#### **1.6 Berekeningsmethode**

Eén van de eerste glijvlakberekeningen die ontwikkeld werd is de methode Fellenius. De methode vergelijkt de schuifkracht langs het glijvlak met de schuifsterkte.

Voor eenvoudige taluds met b.v. slechts één grondsoort geeft de methode vaak goede resultaten. Daarna zijn methoden ontwikkeld die de schuifspanning in het glijvlak berekenen afhankelijk van de grondspanning of de korrelspanning.

Omdat de grondspanning niet op alle plaatsen langs de glijcirkel hetzelfde is, dient een verdeling aangebracht te worden.

Daarvoor wordt de afschuivende grondmoot ingedeeld in verticale lamellen.

De lamelscheidingen worden daar aangebracht waar de cirkel een laagscheiding snijdt en bij brede lamellen ook nog daartussen. De krachten tussen de lamellen zijn onbekend in grootte, plaats en richting. Veel verschillen tussen ontwikkelde methoden zijn terug te voeren op verschillende aannamen hiervoor. Er zijn methoden van Bishop, Spencer, Morgenstern en Price, Janbu en anderen.

Bij de veel gebruikte methode Bishop kan, door de gebruikte formules, de schuifweerstand in de passieve zone ongeloofwaardig hoog oplopen. De versie waarbij de passieve weerstand begrensd is tot een bepaalde waarde wordt de methode Bishop „afgesnoten” genoemd. Deze verdient aanbeveling boven de gewone methode Bishop, vooral bij steil uittredende glijvlakken. Bij taluds in één homogene grondsoort zijn de resultaten van de verschillende berekeningen vrijwel gelijk; bij ingewikkelder opbouw van het talud geven verschillende methoden verschillende uitkomsten.

### 1.7 Vereenvoudiging van het materiaalgedrag

De grondparameters die in de stabiliteitsberekeningen worden gebruikt blijven beperkt tot twee grootheden, namelijk de cohesie  $c'$  en de hoek van inwendige wrijving  $\phi'$ . Deze twee grootheden, die zijn betrokken op de korrelspanningen, bepalen een rechte lijn in het spanningsdiagram die als bezwijkgrens voor de grond wordt gehanteerd. Dit model houdt in dat zolang de maximale schuifspanning niet wordt overschreden er géén vervormingen optreden en dat bij het bereiken van de maximale schuifspanning het materiaal vol-plastisch vervormt.

Het werkelijke gedrag van grond vertoont echter reeds vervormingen bij veel lagere spanningsniveaus dan die waarbij de grond door doorgaande vervorming of afschuiving bezwijkt. Ook kruip kan daarbij een rol spelen.



## HOOFDSTUK 2

### TRIAXIAAL- EN CELPROEVEN

#### 2.1 Spanningstoestand in cel- en triaxiaalproef

In een cel- of triaxiaalapparaat wordt een cilindervormig grondmonster beproefd dat is opgesloten tussen een stijve onder- en bovenplaat en omhuld is door een rubber vlies. Dit geheel is in een cel geplaatst die is gevuld met vloeistof.

Door de vloeistof onder druk te brengen wordt een horizontale kracht op het rubbervlies uitgeoefend die gelijk is aan de celspanning  $\sigma_{\text{cel}}$ . Voor het monster is deze horizontale spanning  $\sigma_h$  tevens hoofdspansing.

Ook vertikaal in het monster wordt een spanning  $\sigma_v$  aangebracht of opgewekt die ook hoofdspansing is. Deze spanningen zijn hoofdspansingen omdat ze loodrecht op elkaar staan en er in het vlak loodrecht op de spanning geen schuifspanningen werken.

#### 2.2 Vervormingstoestand in cel- en triaxiaalproef

Zowel bij cel- als triaxiaalproeven kan uitsluitend de vertikale vervorming van het monster direkt worden gemeten. Door speciale voorzieningen is ook de horizontale vervorming te meten. Meestal wordt de horizontale vervorming afgeleid met aanname van volumebestendige vervorming (ongedraineerd) of door meting van het volume uitgeperst water (gedraineerd). Bij een celproef wordt geïnterpoleerd tussen de vervorming aan begin en einde van de proef.

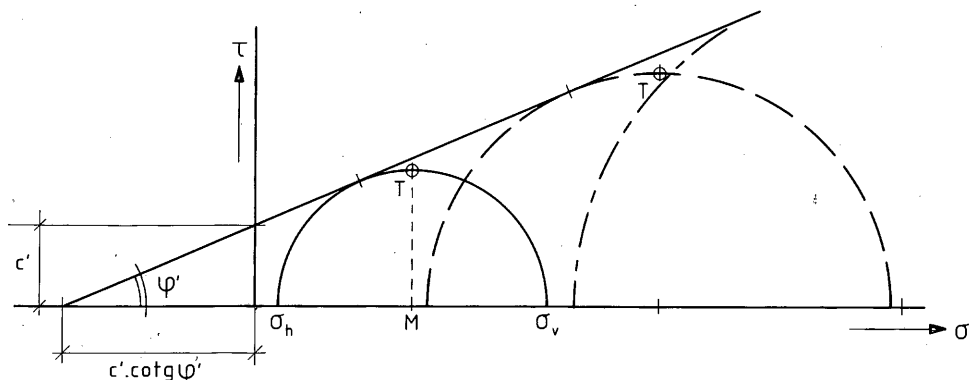
#### 2.3 Weergave van de spanningstoestand, Mohr-diagram

De spanningstoestand in cel- en triaxiaalproef kan in een Mohr-diagram worden weergegeven door een cirkel. Zie figuur 1.

Horizontaal in het diagram staan de hoofdspansingen uit ( $\sigma$ -as) en vertikaal de schuifspanning. De snijpunten van de cirkel met de  $\sigma$ -as komen overeen met de horizontale en vertikale hoofdspansingen. De twee horizontale hoofdspansingen zijn in de proef even groot en vallen in het diagram dus samen. Het middelpunt van de cirkel ligt op de  $\sigma$ -as midden tussen de waarden van de horizontale en de vertikale hoofdspansing.

Door één cirkel wordt slechts één spanningstoestand gekarakteriseerd; omdat het weergeven van veel cirkels onoverzichtelijk is, wordt meestal volstaan met het weergeven van die cirkels die een kritische spanningstoestand voorstellen.

Wanneer bij verschillende spanningsniveaus de kritische spanningstoestand is bepaald kan men rakend aan de kritische spanningscirkels vaak een rechte lijn trekken die de kritische spanningstoestand voor tussenliggende spanningsniveaus aangeeft. Deze grenslijn wordt de omhullende van Mohr-Coulomb genoemd.



Figuur 1: Mohr-diagram.

Het is ook deze lijn die, gekarakteriseerd door  $c'$  en  $\phi'$ , in de glijvlakberekening wordt gehanteerd als de grens tussen toelaatbare en ontoelaatbare spanningstoestanden. De vergelijking van de lijn in het  $\sigma$ ,  $\tau$ -diagram is:

$$\tau = c' + \sigma' \operatorname{tg} \phi'$$

Dit betekent dat de lijn in het Mohr-diagram de verticale  $\tau$ -as snijdt op een afstand  $c'$  van de oorsprong en dat de lijn een hoek  $\phi'$  maakt met de horizontale  $\sigma$ -as.

#### 2.4 Spanningspad-grafiek of $p$ - $q$ -diagram

Wanneer een spanningscirkel éénduidig wordt weergegeven door een punt, is het mogelijk alle doorlopen spanningspunten als een lijn weer te geven. De top van de cirkel is zo'n punt dat éénduidig de cirkel weergeeft.

De coördinaten van de top worden  $p$  en  $q$  genoemd, zodanig dat

$$p = \frac{1}{2} (\sigma_v + \sigma_h) \text{ en } q = \frac{1}{2} (\sigma_v - \sigma_h).$$

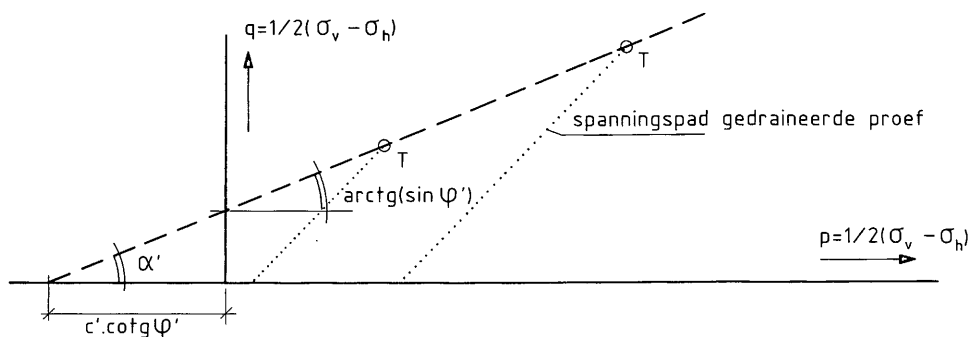
De weg die de top van de cirkel doorloopt tijdens een beproeving wordt het spanningspad genoemd.

De resultaten van triaxiaalproeven worden vaak in de vorm van een spanningspad-grafiek gepresenteerd. Zie figuur 2.

Wanneer door de toppen van de kritische cirkels een lijn getrokken wordt die een stuk „ $a$ ” afsnijdt van de  $q$ -as en een hoek  $\alpha$  maakt met de  $p$ -as dan is de relatie met  $c'$  en  $\phi'$  als volgt:

$$c' = a / \cos \phi'; \quad \sin \phi' = \operatorname{tg} \alpha'.$$

Het verdient aanbeveling om de uitdrukkingen voor  $p = \frac{1}{2} (\sigma_v + \sigma_h)$  en  $q = \frac{1}{2} (\sigma_v - \sigma_h)$  voluit te vermelden omdat in angelsaksische landen  $p$  vaak gebruikt wordt voor het gemiddelde van de drie hoofdspanningen  $\sigma_i = \frac{1}{3} (\sigma_v + 2\sigma_h)$ .



Figuur 2.: spanningspad-grafiek of  $p$ - $q$ -diagram

## 2.5 De betekenis van cel- en triaxiaalproeven

Door verschillen tussen het cel- en het triaxiaalapparaat en door verschillen in uitvoering van de respectievelijke proeven zijn de uitkomsten van cel- en triaxiaalproeven niet gelijk en hebben zij ook niet dezelfde betekenis.

Het verschil tussen de gebruikelijke proeven is dat bij de celproef de belasting en bij de triaxiaalproef de vervormingssnelheid wordt opgelegd.

Aangezien de gemeten parameters  $c'$  en  $\sigma'$  geen constanten zijn, maar in geringe mate afhankelijk zijn van de vervorming en de vervormingssnelheid is het gewenst dat men zich de overeenkomsten en verschillen tussen de proef en de werkelijkheid realiseert. Bij de bepaling in het celapparaat wordt de horizontale steunspanning verlaagd waarna het monster vervormt en daarbij weer horizontale steunspanning opbouwt waardoor de vervormingssnelheid afneemt. De spanningen bij een vervormingssnelheid van 0,01 mm per uur (9 cm/jaar) wordt als kritische spanningstoestand aangehouden.

Het „faalcriterium” in de celproef is dus een bepaalde vervormingssnelheid. Daarbij dient opgemerkt te worden dat de vervormingssnelheid wordt bepaald in een stabiliserende toestand (afnemende snelheid).

De resultaten zijn echter wél afhankelijk van de stijfheid van de cel en de (kwik)manometer. Dit is ook de reden dat ieder celproefapparaat geijkt moet worden en dat de aflezingen dienen te worden gecorrigeerd m.b.v. de ijkgrafiek.

Vervorming door consolidatie treedt niet op door de nagenoeg constante gemiddelde hoofdspanning terwijl vervorming door kruip in de proef wordt meegenomen.

Wanneer het mechanisme in de proef en de werkelijkheid goed op elkaar aansluiten kan men concluderen dat de parameters uit de celproef geschikt zijn om aannemelijk te maken of de vervormingen in de praktijk binnen bepaalde grenzen blijven („grenstoestand vervormingen”).

Het is echter onbekend hoeveel reserve er nog aanwezig is ten opzichte van de „uiterste grenstoestand”.

Bij de triaxiaalproef neemt de verticale vervorming constant toe, terwijl de horizontale steunspanning constant wordt gehouden.

Terwijl het monster met een constante verticale snelheid vervormd wordt, meet men de verticale spanning in het monster.

Als kritische spanningstoestand wordt die spanningstoestand aangehouden waarbij de verhouding of het verschil van de verticale en horizontale hoofdspanning maximaal is.

De situatie die het eerst optreedt is maatgevend.

Die situatie bepaalt een „uiterste grenstoestand”.

De ontwikkeling van de schuifspanning tijdens de proef wordt gebruikelijk ook tegen de vervorming uitgezet.

Met behulp van deze grafiek kan de in de berekening in te voeren schuifspanning gereduceerd worden tot waarden die bij een te verwachten vervorming behoren.

Wanneer dat het mechanisme in de proef en de werkelijkheid goed op elkaar aansluiten kan men concluderen dat de parameters uit de triaxiaalproef geschikt zijn om aan nemelijk te maken dat de weerstand van een talud tegen grote vervormingen voldoende is (uiterste grenstoestand).

Het is echter onbekend welke reserve aanwezig is ten opzichte van de „grenstoestand vervormingen”.

Wanneer de in de proef gebezigde snelheden in de praktijk optreden zal dit zeker als onacceptabel worden ervaren.

Vanwege het verschil in karakter van de beide proeven dient bij de resulterende  $c'$ - en  $\phi'$ -waarden met een index te worden vermeld of het de parameters met een celproef (index  $c$ ) of met een triaxiaalproef zijn bepaald.

Voor parameters die met de triaxiaalproef zijn bepaald kan ook volstaan worden met het aangeven van de uitvoeringsomstandigheden. Hierbij wordt, gebruikelijk met de Engelse afkorting, aangegeven of de proef al dan niet geconsolideerd en al dan niet gedraineerd is uitgevoerd. (U.U., C.U., C.D.).

De verschillen tussen de proeven worden aangegeven in 5.2.

### BOREN EN HET NEMEN VAN MONSTERS

#### 3.1 Algemeen

Het doel van de beproeving in een cel- of triaxiaalapparaat is het bepalen van de sterkte- en eventueel vervormingseigenschappen ten behoeve van het berekenen van een ontwerp van een constructie.

Wanneer we aannemen dat de rekenprocedure een getrouwe afspiegeling is van de werkelijkheid kan het doel van de beproeving in een cel- of triaxiaalapparaat worden omschreven als het bepalen van de sterkte- en eventueel vervormingseigenschappen zoals die zich in de grond voordoen bij realisering van het ontwerp.

Het is dus zaak om de zogenoemde „ongestoorde monsters” zoveel mogelijk onder omstandigheden te laten die in-situ aanwezig zijn. Omdat echter in-situ bepalingen van grondparameters nog niet voldoende betrouwbaar of mogelijk zijn, moeten de monsters wél aan het grondmassief onttrokken worden, naar het laboratorium worden gebracht en daar voorbereid en in het beproevingsapparaat geplaatst worden.

Bij al deze handelingen kunnen veranderingen optreden ten opzichte van de omstandigheden die in-situ aanwezig zijn, waardoor waarden voor de grondparameters onbetrouwbaar kunnen zijn.

#### 3.2 Kwaliteit van grondmonsters

In de „international manual for the sampling of soft cohesive soils” (literatuur 2), die monsternamen voor meer doeleinden dan het bepalen van sterkteparameters behandelt, worden de volgende oorzaken van verstoring van monsters gegeven:

- a. wijzigingen in de samenstellende materialen
  - 1. wijziging in watergehalte
  - 2. verplaatsing van ingesloten gas
- b. chemische wijzigingen in monsters
- c. fysische factoren
  - 1. verandering in temperatuur
  - 2. afname van in-situ spanningen
  - 3. mechanische verstoringen
  - 4. vervorming door afname van de in-situ spanningen.

De mechanische verstoringen tijdens monsternamen bestaan uit:

- 1. samendrukking, schuifspanningen, trillingen, stoten en waterspanningsvariaties door het boren.

2. samendrukking en schuifspanningen tijdens het inbrengen van het monsternamename-apparaat.
3. water-onderspanning, trekspanning en/of torsiespanning tijdens het terugtrekken van het monsterapparaat.
4. stoten en trillingen tijdens het afdichten, het transport en de opslag van het monster.
5. Samendrukking en schuifspanningen tengevolge van het uitdrukken en het trimmen van de monsters in het laboratorium.

In genoemde handleiding en ook bij de in DIN 4021 genoemde kwaliteitseisen aan monsters wordt ervan uitgegaan dat verandering in de in-situ spanningen en daardoor vervorming door afname van die spanningen onvermijdelijk is. Het beste monster (klasse 1) is dan ook gedeeltelijk of geheel ontspannen maar heeft een minimum aan andere genoemde verstoringen ondergaan. Dit monster (klasse 1) wordt als enige geschikt geacht om schuifweerstandspanparameters aan te bepalen.

Onder een aantal voorwaarden, zie hoofdstuk 3.3, wordt verondersteld dat het nemen van „klasse 1”-grondmonsters mogelijk is voor grondsoorten die samenhang vertonen maar niet verkit zijn. Bij zanden is het vrijwel niet mogelijk om een ongestoord monster te nemen. Bij beproeving van zand in een cel- of triaxiaalapparaat wordt het proefstuk dan ook in het apparaat opgebouwd door gedroogd zand in een vorm-mal te strooien. Aan het zand-monster wordt dan ook geen hogere eis gesteld dan dat het niet ontmengd is. Aangezien de hoek van inwendige wrijving verandert bij wijziging van het poriëngehalte dient ook hieraan aandacht te worden besteed door óf bij het juiste poriëngehalte te beproeven óf meerdere proeven te doen bij verschillende poriëngehalten.

Een eventueel in het terrein aanwezige spanningshistorie gaat bij het gestrooid opbouwen van monsters volkomen verloren (overconsolidatie, e.d.), terwijl ook een eventueel aanwezige structuur wellicht niet reproduceerbaar is.

### 3.3 Monsternamename- en boortechniek

Voor het verkrijgen van ongeroerde monsters bij gebruikelijk grondonderzoek in Nederland is onderscheid te maken tussen monsternametechnieken die per keer enkele meters tot ca. 20 meter diepte bemonsteren (continu-steekapparaten, lange monsters) en technieken waarbij vele malen een kort monster wordt genomen; daarbij wordt tussen twee monsternames het gat met een boortechniek opgeschoond of op een grotere diepte gebracht.

Bij de continu-steekapparaten is het verlagen van de wandwrijving tussen monster en buis het belangrijkste probleem. Dit kan worden bereikt door een vloeistof met lage schuifweerstandseigenschappen en een aangepaste soortelijke massa (in verband met de steunspanning) tussen monster en buis toe te passen. Tevens is de verhouding tussen de diameter van de snijrand en de inwendige diameter van de buis van belang.

Met het Begemann-monstersteekapparaat kunnen met behulp van een ervaren „boor”-ploeg, onder gunstige omstandigheden, circa twintig meter lange monsters van hoge kwaliteit worden gestoken (minimale mechanische verstoring). De diameter is 66 mm.

Tijdens het steken wordt het monster omhuld door een waterdichte nylon kous en steunvloeistof in een plastic binnenbuis gevoerd. De plastic binnenbuis is opgebouwd uit aansluitende stukken van 1 m lengte. Bij het terughalen van de steekbuis worden de monsters op de lengte van de plastic binnenbuis afgesneden (steeds 1 m) en aan de eindén luchtdicht afgesloten. De monsters worden in een verend rek, rechtop staand, naar het laboratorium vervoerd waar ze op een temperatuur van 10 °C verder kunnen worden bewaard.

Bij monsternametechnieken waarbij ook boortechnieken worden toegepast om een gat tot de gewenste bemonsteringsdiepte te maken kan het (toekomstige) monster zowel door het boren als door het monsternemen worden verstoord. De verstoringen door het monsternemen kunnen o.a. veroorzaakt worden door het niet recht inslaan van de monsterbus (of -buis), wrijving tussen monster en bus, vuil of roest of restanten grond in de bus en vervorming van de bus of de snijrand. Door het dieper in de grond slaan dan de lengte van de monsterbus wordt het monster in elkaar gedrukt waardoor verstoring optreedt. Bij het terugtrekken van de monsterbus ontstaat vacuum in en onder het monster waardoor verstoring van zowel het monster als de grond direkt daaronder kan optreden.

De verstoring onder het monster kan afhankelijk van de grondsoort en bij gebruikelijke diameter van de bus tot ca. 0,5 m oplopen.

Terwijl men in het buitenland veel werkt met een monsternametoestel waarbij de voorkant van de steekbus is afgesloten tot de diepte wordt bereikt waarop een monster wordt gestoken, is het in Nederland gebruikelijk om met een open steekbus te werken. Hierdoor loopt men minder risico de te bemonsteren grond in elkaar te drukken, maar er zal op het monster vaak een laag(je) verstoord en gesedimenteerd materiaal aanwezig zijn.

Steekbussen bestaan in diverse afmetingen tot ca. 110 mm, waarbij de grootste diameters kwalitatief de beste monsters opleveren.

Voordat in de bodem van het boorgat een monster genomen kan worden moet eerst het boorgat zelf zijn gemaakt. Ten behoeve van het nemen van ongeroerde monsters heeft men daarbij de keuze uit een aantal boortechnieken.

In de eerder aangehaalde „international manual for the sampling of soft cohesive soils” wordt de rotatieboring met bentonietspoeling „aanbevolen”, terwijl de avegaar-boring „niet sterk aanbevolen” wordt en de puls-boring en de spoel- of spuitboring „niet aanbevolen” worden ten behoeve van het verkrijgen van ongeroerde monsters. Bij deze boormethoden dient binnen een boorbuis te worden geboord, zeker als water wordt gebruikt als boorspoeling.

In de Nederlandse boorpraktijk wordt regelmatig de puls-boring toegepast, waarvan de versturende invloed op een te nemen monster dan ook nader zal worden beschreven. De belangrijkste fout die bij puls-boringen gemaakt wordt is dat het waterniveau in de boorbuis lager komt dan de waterspanning in de te doorboren grondlaag. Hierdoor zal onderaan het boorgat een opwaarts gerichte grondwaterstroming ontstaan die het te nemen monster kan deformeren en ontmengen en zelfs tot welvorming kan leiden.

Doordat telkens met de puls ook water wordt onttrokken aan het boorgat zal het water-niveau tijdens het maken van het gat dalen.

Regelmatig controleren en verhogen van het waterpeil is dan ook noodzakelijk.

Verstoring door wateronderdruk nabij de bodem van het boorgat kan ook ontstaan door onderdruk bij het optreden van een puls die te weinig speling heeft in de boorbuis. De diameter van de puls moet dan ook kleiner dan 70% van de diameter van de boorbuis zijn.

Ook dan dient men, vooral bij het opschonen van het boorgat vóór het monstersteken, zeer voorzichtig te pulsen, terwijl men aan de einden van het monster zo mogelijk een lengte gelijk aan de diameter van de monsterbus niet voor proefnemingen gebruikt. Vaak sedimenteert tussen het opschonen en het monstersteken een laagje materiaal uit het boorgat op de bodem van het boorgat. Men moet dit niet abusievelijk als een in-situ aanwezige laag aanmerken.



## HOOFDSTUK 4

### BEHANDELING EN AFMETINGEN VAN MONSTERS

#### 4.1 Vervoeren, bewaren en trimmen van monsters

Wanneer monsters aan het grondmassief zijn onttrokken dienen ze zo snel mogelijk aan onder- en bovenzijde lucht- en waterdicht te worden afgesloten.

Daarbij dient er op gelet te worden dat zeker aan de onderzijde van de monsterbus geen holle ruimten overblijven, omdat dit tijdens vervoer en opslag verstoring van het monster tot gevolg heeft. Deze holle ruimten dienen te worden opgevuld.

Een goede afdichting is noodzakelijk om ervoor te zorgen dat het watergehalte van het monster niet verandert.

De monsters mogen niet onderhevig zijn aan ernstige schokken of trillingen. Toch is het gevaar daarop groot o.a. tijdens het losdraaien van de schroef waarmee de bus in het monsternameapparaat vastzit en bij het uitnemen van de bus uit het apparaat en tijdens het afsluiten van de bus.

Ook tijdens het vervoer en het uitladen van de monsters dient men bedacht te zijn op schokken en trillingen. Tijdens het vervoer kunnen de monsters in schokdempend materiaal worden verpakt.

De monsters mogen niet worden blootgesteld aan vorst of hoge temperaturen.

Tot de verdere behandeling worden de monsters bewaard bij de in-situ heersende temperatuur. In Nederland is het gebruikelijk de monsters bij ca. + 10 °C en hoge relatieve vochtigheid te bewaren.

Het uit de bus nemen van de monsters dient zeer zorgvuldig te gebeuren. Bij het gebruik van steekbussen dient men het monster met een pers uit de bus te drukken in dezelfde bewegingsrichting als bij het steken van het monster.

Voor het trimmen van de monsters op de gewenste lengte en diameter gebruikt men meestal trimmallen en een draadzaag of een mes. Ook hierbij dient zodanig gehandeld te worden dat de verstoring van het monster minimaal is.

#### 4.2 Afmetingen van de monsters

De diameter van de monsters voor celproeven zijn 66 mm. De afmetingen van monsters voor triaxiaalproeven zijn van origine omschreven in inches. De afmetingen van triaxiaalmonsters dienen minimaal 35 mm (ca.  $1\frac{1}{2}$  inch) te bedragen. Daardoor is het onder gunstige omstandigheden mogelijk drie monsters uit één laag van een 100 mm. steekbus te verkrijgen. Monsters met een grotere diameter dan 70 mm worden vrijwel niet toegepast.

De hoogte/diameter verhouding dient minimaal 1,85 te zijn om de verstorende invloed van niet-gladde boven- en onderplaten te ondervangen.

Monsters hoger dan 2,5 maal de diameter zijn niet nodig en veroorzaken wellicht afwijkingen, reden waarom ze niet aanbevolen worden.

De hoogte en de diameter van de monsters dienen elk op minimaal drie plaatsen regelmatig verdeeld over de omtrek respectievelijk de hoogte te worden gemeten.

De gemiddelden van de gemeten waarden vormen de rekenwaarden voor de proef.

## HOOFDSTUK 5

### DE TRIAXIAALPROEF

#### 5.1 Inleiding

Een triaxiaalproef is een stuik- of rekproef waarmee de eigenschappen van een grondmonster kunnen worden bepaald onder opgelegde spannings- of vervormingssituaties. De proef wordt gewoonlijk uitgevoerd als drukproef op een cilindervormig grondmonster, waarbij een axiaal-symmetrische spanningstoestand wordt opgelegd. Met toepassing van hulpapparatuur is het mogelijk met een blokvormig monster om een vlakke-vervormingstoestand (plane-strain-situation) te creëren. Deze mogelijkheid, waarbij o.a. parameters voor berekeningen met de „eindige-elementen-methode” kunnen worden bepaald, zal hier niet verder worden beschreven.

Bij de proef wordt het cilindervormige grondmonster aan onder- en bovenzijde voorzien van een stempel en omhuld door een rubbermembraan in de drukcel van het triaxiaalapparaat geplaatst.

De stempels zijn meestal voorzien van een poreuze steen die in contact staat met het grondmonster, waardoor porie-water kan afstromen of de spanning van het porie-water kan worden gemeten.

Ten behoeve van het inbouwen van het grondmonster in de cel is het bovendeel van de cel demontabel.

De cel is gevuld met water tot minimaal het niveau van de bovenzijde van het monster. Door de spanning in de cel te verhogen ontstaat een spanning op het grondmonster (zowel tegen de zijkant als op de bovenzijde van het monster).

Doordat deze spanning in alle richtingen op het monster even groot is wordt het een alzijdig gelijke spanning genoemd. Consolidatie vindt in de proef meestal plaats onder een alzijdig gelijke spanningstoestand.

Door het bovendeel van de cel steekt axiaal een plunjer in de cel waarmee een verticale belasting of vervorming kan worden opgelegd aan het monster. Door toepassing van een speciale koppeling kan aan de bovenstempel op het monster getrokken worden waardoor de celspanning op het bovenvlak van het monster wordt gereduceerd of opgeheven, waardoor rek-proeven kunnen worden uitgevoerd. De uitkomsten van dit soort proeven, die in de passieve zone in grondmechanische berekeningen kunnen worden toegepast, worden hier niet verder beschreven.

#### 5.2 Keuze van het type triaxiaalproef

Afhankelijk van de verwachte belastingscondities kan een keuze worden gemaakt uit drie verschillende uitvoeringswijzen van „de triaxiaalproef”.

Deze drie typen zijn:

1. de ongeconsolideerde, ongedraineerde proef, ook U.U.-proef genoemd (unconsolidated, undrained).
2. de geconsolideerde, ongedraineerde proef, ook C.U.-proef genoemd.
3. de geconsolideerde, gedraineerde proef, ook C.D.-proef genoemd.

De toepassingsgebieden voor ieder van de genoemde typen worden hieronder nader uitgewerkt.

*ad.1 de ongeconsolideerde, ongedraineerde proef (U.U.).*

Bij de U.U.-proef wordt het monster onder een alzijdig gelijke spanning gebracht, terwijl geen afstroming van water uit het monster wordt toegestaan.

Direkt na het opbrengen van deze alzijdig gelijke spanning wordt het monster vertikaal vervormd tot het bezwijken is, zonder afstroming van water uit het monster toe te staan. De celspanning blijft constant en de verticale kracht op het monster wordt geregistreerd. Het resultaat van de proef is de ongedraineerde schuifsterkte van het monster ( $s_u$ ).

Bij deze proef worden geen waterspanningen gemeten, terwijl slechts één monster beproefd wordt.

Het resultaat is uitsluitend overdraagbaar naar grond van dezelfde samenstelling en dezelfde terreinspanning en spanningshistorie.

Eventuele monsterverstoring komt ten volle in het resultaat tot uiting.

Invloed van spanningswijzigingen op de grond kan niet worden voorspeld aangezien het resultaat op basis van totaalspanningen (water- en korrelspanningen te zamen) is gegeven. De proef is geschikt om de schuifweerstand te bepalen in lagen waar tijdens belasting vrijwel geen afstroming van water plaats vindt.

Vanwege het gebrek aan voorspellende waarde wordt de proef hier niet verder behandeld.

*ad.2 de geconsolideerde, ongedraineerde proef (C.U.).*

Bij de C.U.-proef wordt het monster onder een alzijdig gelijke spanning gebracht, waarbij afstroming van water uit het monster wordt toegestaan (zie hoofdstuk consolidatie). Nadat de consolidatie praktisch beëindigd is wordt het monster vertikaal vervormd tot het bezwijken is zonder dat afstroming van water uit het monster wordt toegestaan. De celspanning blijft daarbij constant en de verticale kracht op het monster en de waterspanning aan de einden van het monster worden gemeten.

Het resultaat van één dergelijk experiment geeft een punt in het spanningsdiagram van Mohr.

Meestal bestaat één proef uit drie van dergelijke experimenten, echter bij drie verschillende spanningsniveaus, waardoor drie punten ontstaan in het spanningsdiagram van

Mohr, waaruit een cohesie en een hoek van inwendige wrijving kan worden bepaald. Door onafhankelijke meting van de waterspanning kunnen de resultaten niet slechts op basis van totaalspanningen, maar ook op basis van korrelspanningen worden berekend. Het resultaat is overdraagbaar naar grond met dezelfde samenstelling en spannings-historie. De invloed van eventuele monsterverstoring wordt verminderd door voorafgaande consolidatie van het monster. De invloed van spanningswijzigingen op de sterkte van de grond kan worden voorspeld aangezien het resultaat op basis van korrelspanningen is berekend.

De proef is geschikt om de schuifweerstand in diverse stadia van ontwerp en uitvoering te voorspellen.

De proef wordt in het algemeen toegepast op cohesieve monsters, maar uiteraard kan de proef ook op niet-cohesieve monsters worden toegepast.

### *ad.3 de geconsolideerde, gedraineerde proef (C.D.)*

Bij de C.D.-proef wordt het monster onder een alzijdig gelijke spanning gebracht waarbij afstroming van water uit het monster wordt toegestaan. Nadat de consolidatie praktisch beëindigd is wordt het monster vertikaal vervormd tot het bezwiken is, waarbij ook afstroming van water uit het monster wordt toegestaan, en waarbij zo langzaam wordt vervormd dat de wateroverspanning in het monster verwaarloosbaar klein wordt gehouden.

De celspanning blijft daarbij constant en de verticale kracht op het monster wordt geregistreerd, terwijl de wateroverspanning gelijk aan nul wordt gesteld.

Net zoals bij de C.U.-proef worden per proef meestal drie experimenten gedaan.

Het resultaat geeft de cohesie en de hoek van inwendige wrijving op basis van de korrelspanning.

De proef is geschikt om de schuifweerstand in diverse stadia van ontwerp en uitvoering te voorspellen.

De proef wordt toegepast op zowel cohesieve als niet-cohesieve monsters.

### **5.3 Back pressure**

Om in de C.U.-proef betrouwbaar waterspanningen en in de C.D.-proef betrouwbaar het volume uitgeperst water te kunnen meten is het belangrijk dat het monster volledig verzadigd is en dat geen lucht is ingesloten in het meetsysteem. Een hulpmiddel dat hierbij kan worden gebruikt, is het toepassen van een hogere waterspanning zowel in het monster en meetsysteem als in de cel; de effectieve spanning op het monster blijft daarbij gelijk omdat zowel in als buiten het monster de spanning gelijkelijk wordt verhoogd.

Het resultaat van deze spanningsverhoging is dat de ingesloten lucht oplost in het water. Overigens lukt dit niet onbepaald, terwijl door deze spanningsverhoging meetproblemen kunnen ontstaan tijdens de consolidatieperiode.

Deze extra spanning wordt „back pressure” genoemd en dient, om effect te sorteren, minimaal 200 à 300 kN/m<sup>2</sup> te zijn. Het gebruikte water dient uiteraard ontlucht te zijn. Tevens kunnen goed doorlatende monsters, alvorens te worden verzadigd met water, worden doorstroomd met CO<sub>2</sub>-gas, dat later als het monster wordt verzadigd met water, daarin goed oplost en zo tot een betere verzadiging leidt.

Bij monsters waarbij een schuifspanning een volumevergroting teweeg brengt (dilatatatie) kunnen door toepassing van een back pressure grote negatieve waterspanningen in het monster voorkomen worden. Behalve in zand kan dit ook in overgeconsolideerde kleien voorkomen.

#### 5.4 Enkel- of meertrapsproeven

Zowel bij de C.U.-als bij de C.D-proef worden meer dan twee (meestal drie) experimenten uitgevoerd op verschillende spanningsniveaus om zodoende meer dan twee punten te krijgen in het spanningsdiagram van Mohr waardoor een rechte lijn wordt getrokken. Voor ieder van deze drie experimenten gebruikt men gewoonlijk een apart monster, die echter qua eigenschappen wel identiek moeten zijn. Men spreekt in dit geval van ééntrapstechniek omdat slechts één consolidatiespanning per monster wordt toegepast. Men kan bij deze wijze van beproeven bij elk spanningsniveau het gehele spanningsvervormingsgedrag tot b.v. 15% verticale vervorming bepalen. Hierdoor kan men in de berekeningen de vervormingsafhankelijkheid van de parameters in de beschouwing betrekken.

Als alternatief op de ééntrapstechniek is de drie- (of meer-)trapstechniek ontwikkeld, ook wel multi-stage test genoemd.

Daarbij wordt slechts één monster gebruikt voor de drie verschillende spanningsniveaus. Het probleem dat de drie monsters identiek moeten zijn is daarmee opgelost, maar een nieuw probleem doet zich voor; namelijk dat een vervormd monster van het eerste en tweede experiment na consolidatie op een hoger spanningsniveau weer als „nieuw” monster wordt gebruikt.

Dit probleem lijkt niet groot wanneer per belastingstrap slechts een geringe vervorming wordt opgelegd, maar tevens wordt dan geen bezwijkcriterium maar een vervormingscriterium bepaald, die dan ook zeer laag wordt gesteld (ca. 2,5%). Overgeconsolideerde gronden vertonen vaak een bros gedrag (scheurvorming en desintegratie bij zeer kleine vervormingen) waardoor in dat geval de meertrapstechniek niet toegepast kan worden.

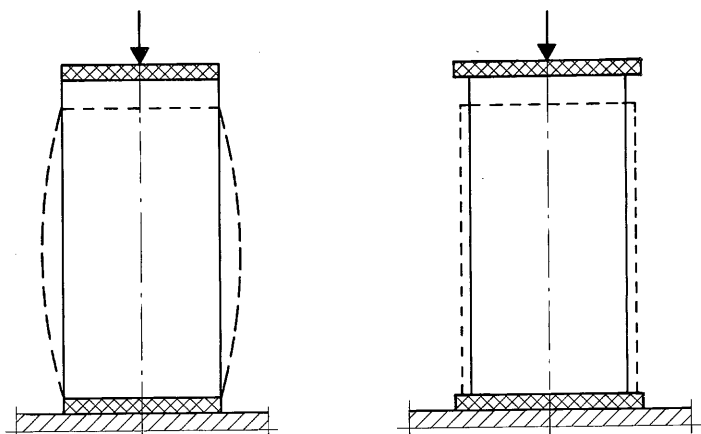
#### 5.5 Gladde eindvlakken

Gewone eindvlakken bij de triaxiaalproef bestaan uit een poreuze steen.

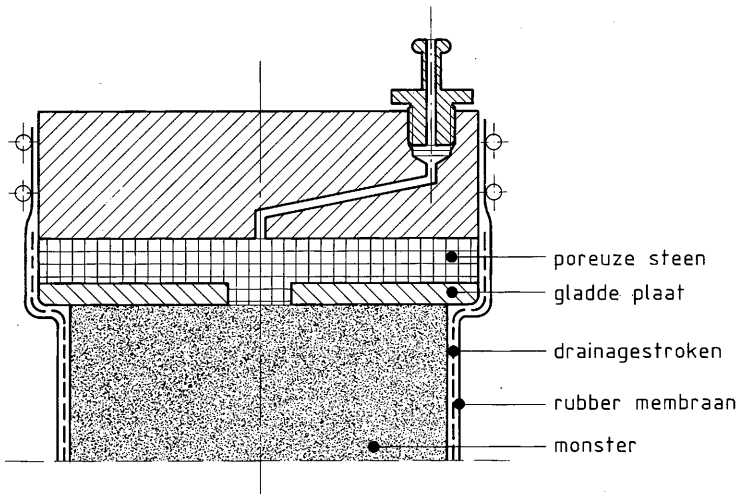
Een dergelijke steen is echter zodanig ruw dat deze de uitdijning van het monster tegenhoudt; door deze beperking in de vervorming zal de waterspanning dicht bij de steen zich anders ontwikkelen dan op halve hoogte in het monster.

Door toepassing van gladde eindvlakken (b.v. teflon, gepolijst staal) of smeermiddelen

wordt de wrijving op het grensvlak van monster en drukplaat zo gering mogelijk gemaakt. Dit betekent dat het monster op het scheidingsvlak dezelfde horizontale rek ondergaat als halverwege de hoogte van het monster, waardoor de aan de uiteinden gemeten waterspanning representatiever zal zijn. Een en ander is in figuur 3 verduidelijkt.



Figuur 3: Vervorming bij gewone en gladde eindvlakken.



Figuur 4: Aansluiting drainagestroken bij gladde eindplaten.

Bij toepassing van gladde eindvlakken mag de hoogte van het monster worden gereduceerd (ASTM D 2580-70 geeft een hoogtediameter-verhouding van 1,2) maar het voor-

deel van snellere consolidatie door het kwadratische hoogte-effect wordt vaak teniet gedaan door de sterk beperkte drainagemogelijkheden in de eindvlakken.

Het grote voordeel van gladde eindvlakken doet zich voor bij ongedraineerde triaxiaalproeven met zijdrainage.

Door de uniforme waterspanningsverdeling kan de proef sneller uitgevoerd worden dan een proef met niet-gladde eindvlakken. Hoeveel sneller is o.a. afhankelijk van de snelheid van reageren van het meetsysteem.

Een goede verbinding tussen de zijdrainage en de poreuze steen in de drukplaten is van groot belang.

In figuur 4 is aangegeven hoe deze verbinding tot stand kan worden gebracht.

### 5.6 Bepaling van de dilatatiefactor (A-factor)

De A-factor van Skempton is de verhouding tussen de verandering van de waterspanning en de deviatorspanning in het monster bij volledige verzadiging (B-factor = 1) en constante celspanning.

In formule:  $A = \Delta u / \Delta \sigma_v$

De A-factor geeft een aanwijzing over de belastingsgeschiedenis van de grond, dus of de grond normaal of overgeconsolideerd is.

De A-factor kan op ieder moment tijdens de belastingsfase worden bepaald uit de metingen, maar wordt meestal niet gepresenteerd.

### 5.7 Bepaling van de verzadigingsfactor (B-factor)

De B-factor van Skempton is de verhouding tussen de in het monster opgewekte waterspanning en de verandering van de celspanning in ongedraineerde toestand.

In formule:  $B = \Delta u / \Delta \sigma_c$

De factor kan op diverse momenten vóór de proef worden bepaald door, in ongedraineerde toestand, de celspanning te verhogen en de verhoging van de waterspanning in het monster te meten.

Met de B-factor wordt de verzadiging van het monster en de met het monster verbonden ruimten gecontroleerd (drainageleiding e.d.).

Een B-factor van 0,95 of meer duidt op voldoende verzadiging. Is de verzadiging niet voldoende dan kan back pressure toegepast worden, waardoor ingesloten lucht in het water wordt opgelost.

Overigens dient men bij de interpretatie van de B-factor de nodige voorzichtigheid te betrachten; dat een verhoging van de celspanning vrijwel geheel wordt opgenomen door de waterspanning in het monster is alleen juist als de samendrukbaarheid van water veel geringer is dan de samendrukbaarheid van het korrelskelet. Dit is meestal juist. Bij sterk overgeconsolideerde gronden en dichtgepakt zand gaat dit echter niet meer op.



## 5.8 Consolidatie bij de triaxiaalproef

De consolidatiefase die aan de eigenlijke geconsolideerde ongedraineerde (C.U.) en aan de geconsolideerde gedraineerde (C.D.)proef vooraf gaat dient feitelijk om de korrelspanningstoestand in het grondmonster op het niveau te brengen van de werkelijke korrelspanning in de betreffende bodemlaag.

Omdat de schuifweerstandsparementers slechts kunnen worden bepaald wanneer proeven op meerdere spanningsniveaus ter beschikking staan, is het noodzakelijk ook bij spanningen onder en/of boven de verwachte werkelijke spanningstoestand in het terrein te consolideren en te beproeven.

In de regel gebeurt dit op afzonderlijke representatieve grondmonsters uit dezelfde grondlaag, die bij voorkeur ook uit dezelfde boring afkomstig zijn.

Hierna worden een aantal aspecten van de consolidatieprocedure behandeld.

### 5.8.1 Keuze van de consolidatiespanningen

De spanningen in het monster dienen zoals gezegd zo goed mogelijk overeen te komen met de, eventueel toekomstig, te verdragen spanning in het terrein.

De vertikale korrelspanning  $\sigma'_v$  wordt gevonden uit het gewicht van de boven het beschouwde punt gelegen grondlagen, verminderd met de daar heersende water-spanning.

De grootte van de heersende horizontale korrelspanning  $\sigma'_h$  is meestal niet bekend. Over het algemeen wordt deze geschat, waarbij rekening wordt gehouden met de voorgeschiedenis en de situatie van het beschouwde grondelement ten opzichte van bijvoorbeeld de aan te leggen of reeds bestaande dijk.

Meestal geldt dat:

$$\sigma'_h < \sigma'_v$$

of uitgedrukt in de verhouding  $K$ :

$$K = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} < 1$$

In het geval van een uitgestrekt horizontaal terrein dat normaal geconsolideerd is, wordt de verhouding tussen de horizontale en vertikale korrelspanning aangeduid als de neutrale korrelspanningsverhouding  $K_0$  (neutrale grondrukcoëfficiënt).

Uit onderzoek is gebleken dat met goede benadering geldt:

$$K_0 = (1 - \sin \phi') \quad (\text{formule van Jaky})$$

In de nabijheid van ophogingen geldt de verhouding  $K_0$  niet meer.

Bij standaardproeven wordt de spanning waaronder het monster wordt geconsolideerd in alle richtingen gelijk genomen.

De spanning in de cel wordt daartoe verhoogd, zodat horizontaal en vertikaal dezelfde spanning op het monster werkt.

Dit wordt consolidatie onder alzijdig gelijke (isotrope) spanning genoemd. In dit geval is de resulterende spanning gelijk aan de spanning in de cel verminderd met de eventueel verhoogde waterspanning in het monster, de back pressure.

Voor de keuze van de resulterende celspanning wordt uitgegaan van de geschatte gemiddelde korrelspanning in het terrein op de beschouwde diepte:

$$\sigma'_c = \frac{\sigma'_v + 2\sigma'_h}{3}$$

Soms wordt z.g.  $K_0$ -consolidatie toegepast, waarbij met celspanning en belasting op de plunjer zodanig wordt gemanipuleerd dat de verticale en de horizontale spanning in de verhouding worden aangebracht die in natuurlijk horizontaal terrein geldt. Dit valt echter buiten de hier beschreven procedure van triaxiaalproeven en zal dan ook niet worden behandeld.

### 5.8.2 Drainage

Normaal wordt het monster gedraineerd via poreuze stenen aan de boven- en onderzijde van het monster, die verbonden zijn met de drainageafvoerleiding in de triaxiaalcel.

Bij proeven op met water verzadigde kleimonsters worden, in verband met de geringe doorlatendheid – meestal geringer dan  $10^{-8}$  m/s – vaak extra drainagevoorzieningen getroffen om de consolidatietijd te verkorten. Op de omtrek van het monster worden daartoe stroken filtermateriaal aangebracht, die met de poreuze stenen aan boven- en onderzijde zijn verbonden.

Hierdoor kan behalve in verticale richting ook drainage van het poriënwater in horizontale richting plaatsvinden.

Er wordt aangenomen dat de drainagestroken een zeer grote doorlatendheid hebben. De breedte van de drainagestroken wordt gekozen in overeenstemming met de monsterafmeting:

ca. 6 mm voor monsters met een diameter van 38 mm en

ca. 10 mm voor monsters met een diameter van 66 mm

De afstand tussen de stroken dient ongeveer gelijk te zijn aan de breedte van de drainagestroken. Er dient op te worden gelet dat de drainagestroken de vervorming van het monster tijdens de triaxiaalproef niet noemenswaard kunnen beïnvloeden.

Wordt de consolidatiefase vóór de triaxiaalproef gebruikt om de consolidatiecoëfficiënt  $c_v$  van de klei te bepalen dan verdient het aanbeveling de tussenruimte tussen de drainagestroken klein te houden. Dit geldt zeer speciaal voor klei met een relatief hoge doorlatendheid.

Als praktisch einde van de consolidatie wordt gewoonlijk het moment aangehouden waarop 95% van de totale volumeverandering is gerealiseerd die zou optreden als het monster gelegenheid zou krijgen zich volledig aan te passen aan de opgebrachte alzijdige consolidatiespanning.

De tijd die hiervoor nodig is, bedraagt wanneer slechts drainage naar de beide kop-einden plaats vindt:

$$t_{95} = 0,28 \frac{H^2}{c_v}$$

en wanneer tevens drainage aan de omtrek wordt toegepast

$$t_{95} = 0,021 \frac{H^2}{c_v}$$

waarbij  $H = 2h$  is de hoogte van het monster

$h$  is de diameter van het monster

$c_v$  is de consolidatiecoëfficiënt

Deze laatste formule geldt voor de volgende uitgangspunten:

- oneindig grote doorlatendheid van de poreuze stenen en de drainagestroken
- volledige omhulling van het monster met drainagestroken
- gelijke verticale en horizontale doorlatendheid van het monster
- de monsterhoogte is tweemaal de diameter van het monster.

### 5.8.3 Uitvoering en duur van de consolidatie

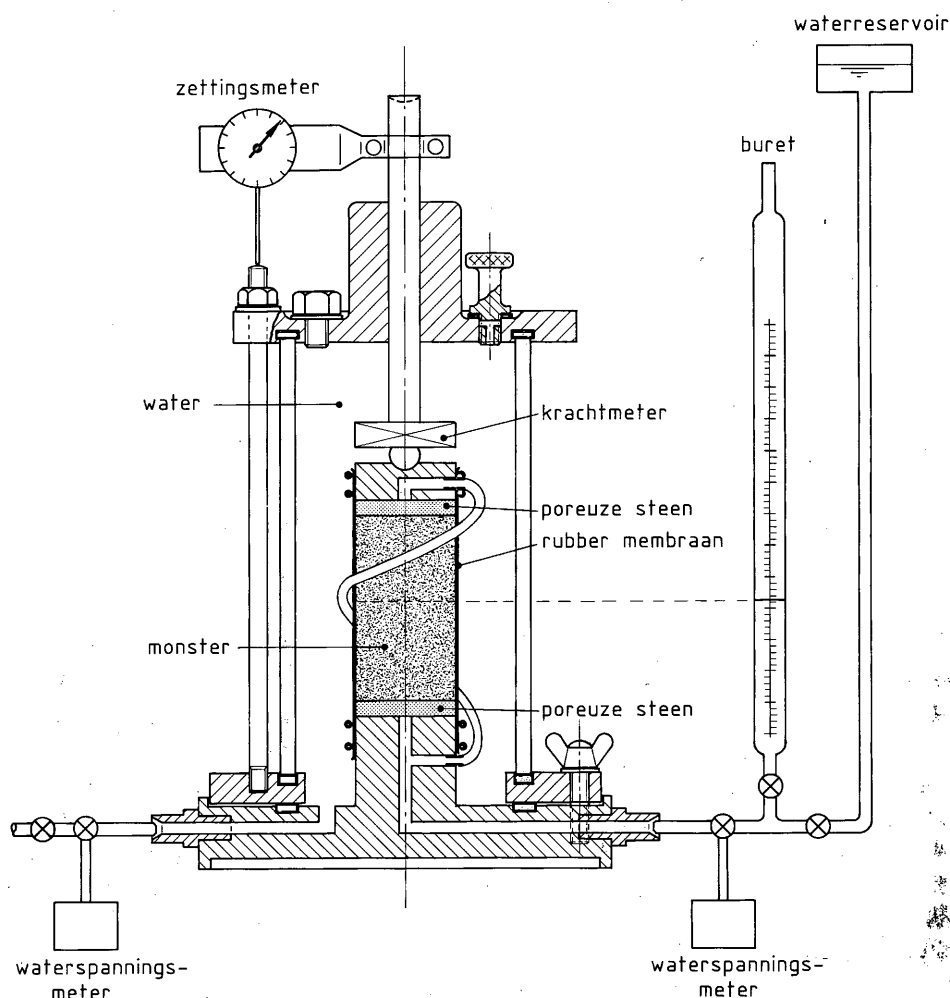
In figuur 5 is schematisch een opstelling voor de triaxiaalproef gegeven. Bij consolidatie onder alzijdig gelijke spanning wordt geen belasting aangebracht via de belastingsstempel. Tijdens de consolidatiefase staat deze dan ook los van het monster.

Indien de triaxiaalproef met back pressure wordt uitgevoerd kan deze in principe zowel vóór als na de consolidatiefase worden ingesteld. Hier wordt ervan uitgegaan dat de back pressure wordt ingesteld vóór de consolidatiefase. De back pressure dient in de cel en het monster tegelijk te worden opgevoerd waarbij de celspanning iets hoger moet zijn dan de waterspanning in het monster omdat anders het membraan wordt afgedrukt. Op deze wijze ontstaan geen ongewenste resulterende spanningen op het monster. Als de waarde voor de back pressure bereikt is wordt de celspanning verder opgevoerd tot de gewenste waarde ten behoeve van de consolidatie.

De spanning in de buret wordt gelijk gemaakt aan de back pressure en de buret wordt op een zodanige hoogte ingesteld dat het waterniveau halverwege de hoogte van het monster staat.

Daarna wordt de buret in verbinding met het monster gebracht, waardoor de waterspanning in het monster de waarde van de back pressure gaat aannemen. Dit is het eigenlijke consolidatieproces. Het water dat uit het monster wordt geperst stroomt in de buret, die regelmatig opnieuw ingesteld dient te worden zodat het waterniveau halverwege de hoogte van het monster blijft.

Het is belangrijk dat de ingestelde spanningen in de cel en de buret gedurende de gehele consolidatiefase gelijk blijven. Temperatuurvariaties en lekkage geven hierbij de meeste verstoring.



Figuur 5: Opstelling triaxiaalproef.

Het einde van de consolidatieperiode is bereikt als in de buret geen niveauverandering meer optreedt.

Dit kan worden gecontroleerd door de drainageafvoer te sluiten en enige tijd de waterspanning in het monster te meten. Deze moet dan gelijk blijven aan de back pressure. Hoewel de consolidatieperiode vaak slechts enkele uren bedraagt verdient het aanbeveling de consolidatiespanning tenminste een dag te handhaven.

De back pressure en de celspanning dienen bij voorkeur ononderbroken gehandhaafd te worden totdat de proef is afgelopen.

#### 5.8.4 Metingen tijdens de consolidatiefase

Vanaf het moment dat de consolidatie begint, dus vanaf het moment dat het monster in verbinding wordt gebracht met de buret, dient regelmatig de hoeveelheid uitgeperst water in de buret te worden afgelezen, waarbij tevens de tijd wordt genoteerd.

Wanneer het monster verzadigd is, is de hoeveelheid uitgeperst water gelijk aan de volumeverandering van het monster, zodat in een grafiek de volumeverandering tegen de tijd uitgezet kan worden. Met behulp van deze grafiek bepaalt men de consolidatiecoëfficiënt.

Hoewel gebruikelijk de  $\sqrt{t}$ -methode wordt gehanteerd voor het bepalen van de consolidatiecoëfficiënt zijn de tijden waarop afgelezen wordt nog gebaseerd op de log  $t$ -methode.

Men neemt deze tijden steeds 2 x zo groot; b.v. 1, 2, 4, 8, 15, 30 minuten, 1, 2, 4 uur na het begin van de consolidatie.

Men kan de afleestijden aanpassen aan de  $\sqrt{t}$ -methode; de tijdreeks wordt dan: 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49, .....enz. (seconde).

#### 5.9 Bepaling van de vervormingssnelheid bij de triaxiaalproef

Het is noodzakelijk eisen te stellen aan de vervormingssnelheid bij de triaxiaalproef. De reden daarvoor is dat vervorming van een monster waterspanning veroorzaakt in dat monster en wel temeer naarmate de vervormingssnelheid groter is.

Bij gedraineerde proeven wordt aangenomen dat de waterspanning verwaarloosbaar klein is en bij ongedraineerde proeven dat de waterspanning gelijkmatig verdeeld is over de hoogte van het monster. Deze aannamen zijn juist wanneer de vervormingssnelheid acceptabel langzaam wordt gekozen.

De snelheid van afbouw of uitmiddeling van opgewekte waterspanningen is ondermeer afhankelijk van de materiaaleigenschappen (doorlatendheid) en de afmetingen van het monster en de drainageomstandigheden.

De benodigde materiaaleigenschappen zijn vast te stellen uit de gegevens van een samendrukkingsproef die op hetzelfde belastingsniveau wordt uitgevoerd als de uit te voeren triaxiaalproef of uit gegevens van de consolidatiefase van de triaxiaalproef zelf. De materiaaleigenschappen ten aanzien van consolidatie worden daarbij uitgedrukt in de consolidatiecoëfficiënt  $c_v$ .

##### *Gedraineerde proeven*

Met behulp van onderstaande formules, waarbij de afmetingen en de drainageomstandigheden in rekening worden gebracht, kan voor een monster een waarde worden gevonden voor de tijd  $t_{100}$ .

De waarde van  $t_{100}$  geeft het einde aan van de primaire consolidatie van het monster en wordt gebruikt bij de bepaling van de vervormingssnelheid.

drainage aan één eind

$$t_{100} = \pi H^2 / 4c_v$$

drainage aan beide eind

$$t_{100} = \pi H^2 / 16c_v$$

drainage alleen aan omtrek

$$t_{100} = \pi H^2 / 256c_v$$

drainage aan beide eind en de omtrek

$$t_{100} = \pi H^2 / 400c_v$$

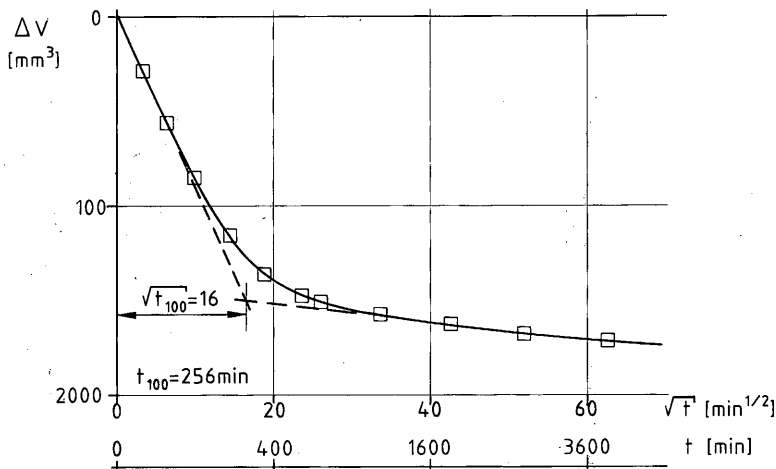
waarbij - de hoogte ( $H$ ) van het monster gelijk is aan twee maal de diameter  $h$ .

- de horizontale en verticale doorlatendheid van het monster gelijk zijn.

- de drainage oneindig doorlatend is.

De waarde van  $t_{100}$  kan ook direkt worden bepaald uit de meetgegevens van de consolidatiefase. De gemeten volumeverandering van het monster wordt uitgezet in een diagram tegen de tweede-machts wortel van de tijd  $t$ .

Men verkrijgt dan een soortgelijke figuur als is weergegeven in figuur 6.



Figuur 6: Bepaling  $t_{100}$ .

De kromme door de uitgezette punten heeft tijdens het begin van de consolidatie een vrijwel recht traject, waaraan een raaklijn wordt getrokken. Wanneer de consolidatieperiode praktisch voorbij is, ontstaat een nagenoeg horizontaal recht traject, waaraan ook een raaklijn wordt getrokken.

De laatste raaklijn representeert de lijn voor 100% consolidatie. Het snijpunt van beide raaklijnen geeft de wortel uit tijd die theoretisch benodigd is om 100% consolidatie te bereiken. Kwadrateren levert de waarde voor  $t_{100}$ .

Deze waarde voor  $t_{100}$  is een eigenschap van het monster en kan direkt worden gebruikt voor het bepalen van de vervormingssnelheid tijdens de proef. Tevens kan, met inachtnaam van de afmetingen en de drainage-omstandigheden met voorgaande formules hieruit de materiaaleigenschap  $c_v$  worden bepaald.

Met behulp van de consolidatie-theorie is gevonden dat de gemiddelde consolidatiegraad bij bezwijken,  $\bar{U}_f$  kan worden uitgedrukt als:

$$\bar{U}_f = 1 - (H^2/4 \cdot \eta \cdot c_v \cdot t_f)$$

waarin  $H$  = hoogte van het monster

$\eta$  = factor afhankelijk van drainage-omstandigheden

$c_v$  = consolidatiecoëfficiënt

$t_f$  = tijd tot bezwijken

Verder is bij gedraineerde proeven gebleken dat de sterkte betrouwbaar kan worden gemeten als de gemiddelde theoretische consolidatiegraad 95% of meer is.

Uit bovenstaande uitdrukking volgt dan dat:

$$t_f = 5 H^2 / \eta \cdot c_v$$

De factoren  $\eta$  zijn als volgt:

drainage aan één einde	$\eta = 0,75$
drainage aan beide einden	$\eta = 3,0$
drainage aan omtrek	$\eta = 32,0$
drainage aan omtrek en beide einden	$\eta = 40,4$

(ook hier: hoogte is twee maal diameter).

Om de vereiste vervormingssnelheid te kunnen vaststellen dient men tevens te schatten hoeveel vervorming het monster tot bezwijken zal ondergaan ( $\varepsilon_f$ ).

Voor normaal geconsolideerde Nederlandse kleien wordt vaak 15% aangenomen; overgeconsolideerde kleien vervormen aanzienlijk minder. Sommige kleien vervormen tot 25% alvorens te bezwijken.

De relatieve vervormingssnelheid wordt nu bepaald door de vervorming tot bezwijken te delen door de tijd tot bezwijken.

Voor de diverse drainagemogelijkheden geeft dat de volgende snelheden  $v$ :

drainage aan één einde of aan beide einden	$v/H = \varepsilon_f / 8,49 t_{100} \quad \%/min$
drainage aan omtrek	$v/H = \varepsilon_f / 12,73 t_{100} \quad \%/min$
drainage aan omtrek en beide einden	$v/H = \varepsilon_f / 15,76 t_{100} \quad \%/min$

Door de getallen wordt wellicht de suggestie gewekt dat bij betere drainageomstandigheden kleinere snelheden aangehouden moeten worden, maar door de betere drainageomstandigheden neemt de  $t_{100}$  zeer snel af, waardoor toch aanzienlijk hogere vervormingssnelheden kunnen worden toegepast.

De afgeleide formules leiden soms tot pessimistische voorspellingen over de duur van de proef.

Een geaccepteerde veilige ondergrens is in dit geval 0,01 % van de monsterhoogte per minuut.

### *Ongedraineerde proeven*

Voor ongedraineerde triaxiaalproeven met waterspanningsmeting is het van belang om de juiste waterspanning te meten, omdat met behulp van de celspanning en de waterspanning in het monster de horizontale korrelspanning wordt berekend.

Het is daarom van belang de waterspanning in de deformatiezone te meten; meestal wordt de waterspanning echter gemeten aan een kopeinde van het monster achter de poreuze steen. Het is van belang dat de vervormingssnelheid voor de proef zo langzaam wordt gekozen dat geen ongelijkmatige waterspanning in het monster kan ontstaan. Volgens Blight (literatuur 7) dient daarvoor een vervormingssnelheid te worden gekozen van maximaal

$$v/H = \varepsilon_f / 2,23 \cdot t_{100}$$

Dit geldt voor monsters die aan de omtrek en aan beide einden voorzien zijn van drainage om het gelijkmatig worden van de waterspanningen te bevorderen.

### **5.10 Uitvoering van de geconsolideerde (on)gedraineerde triaxiaalproef**

Na selectie van het monster wordt dit getrimd op de gewenste afmetingen. Na ontluchting van de drainagekanalen wordt een ontluchte en verzadigde poreuze steen op de voetplaat gelegd, waarna het monster erop wordt geplaatst. Vervolgens wordt de bovenste ontluchte verzadigde poreuze steen en de drukstempel aangebracht en wordt de natte drainage aan de omtrek van het monster aangebracht. Daarbij dient erop gelet te worden dat de drainage in goed contact staat met de poreuze stenen. Daarna wordt het membraan met behulp van de membraan-houder om het monster gedaan en met de rubber ringen aan de drukstempel en de voetplaat vastgeklemd.

Teneinde een betrouwbare meting van de waterspanning tijdens de proef mogelijk te maken dient voor een goede ontluchting te worden zorggedragen.

Zo wordt de onder het membraan ingesloten lucht voorzichtig tot voorbij de rubber ringen gestreken en worden het waterspanningskanaal en de drainagekanalen goed ontlucht.

Hierna kan de back-pressure en de consolidatiespanning worden ingesteld, waarbij tevens een *B*-factor bepaling kan worden gedaan.

Uit de metingen tijdens de consolidatiefase wordt de vervormingssnelheid voor de beproevingsfase berekend. Nadat de consolidatie praktisch is beëindigd wordt de vervormingssnelheid ingesteld en kan de beproevingsfase beginnen.

Tijdens deze fase kan een *A*-factor bepaling plaatsvinden.

Het monster wordt in de beproevingsfase met een constante snelheid in elkaar gedrukt tot de gewenste vervorming is bereikt.

Nadat de proef is beëindigd dient het monster zo snel mogelijk te worden uitgebouwd. Hierbij dient te worden voorkomen dat water uit de poreuze stenen wordt opgezogen, zodat het juiste natte gewicht van het monster na beproeving kan worden bepaald. Na droging dient het droog gewicht bepaald te worden.



Met behulp van de droge en natte gewichten kunnen de volumegewichten in de diverse fasen worden berekend. Tevens kan ter controle het nat volumegewicht, bepaald voor en na uitvoering van de proef, worden vergeleken met de hoeveelheid uitgeperst c.q. opgenomen water.

#### 5.10.1 *Metingen*

Vóór het inbouwen van het monster bepaalt men de rekenwaarden voor de hoogte en diameter door minimaal drie metingen op regelmatig verdeelde plaatsen aan het monster. Tevens wordt het gewicht van het monster (nat gewicht) bepaald door weging. Tijdens de consolidatiefase bepaalt men regelmatig dan wel continu:

- de celspanning (dient constant te blijven)
- de waterspanningsverandering
- de volumeverandering
- de verticale vervorming

Tijdens de belastingsfase van de proef bepaalt men regelmatig dan wel continu:

- de celspanning (dient constant te blijven)
- de back pressure (dient constant te blijven)
- de vertikaal uitgeoefende kracht op het monster
- de waterspanningsverandering in het monster (ongedraineerd) c.q. de volumeverandering (gedraineerd)
- de verticale vervorming

Na de proef bepaalt men het nat en droog gewicht van het monster.

#### 5.10.2 *Correcties op de resultaten*

Ten aanzien van de hieronder opgesomde punten kunnen de volgende correcties zinvol of noodzakelijk zijn:

- a. verandering van het doorsnede-oppervlak van het monster
- b. volumeverandering van het monster tijdens de proef
- c. membraan-indringing
- d. sterkte van het membraan
- e. sterkte van de drainagestroken
- f. wrijving van de plunjer.

ad a.: *verandering van het doorsnede-oppervlak van het monster*

Tijdens de ongedraineerde proef neemt men aan dat het volume  $V$  constant is en het oppervlak op tijdstip  $t$  ( $A_t$ ) berekend kan worden volgens

$$A_t = V / (H_0 - \Delta H_t)$$

als  $H_0$  de hoogte van het monster is bij het begin van de beproevingsfase en  $\Delta H_t$  de verticale vervorming is op tijdstip  $t$ .

ad b.: *volumeverandering van het monster tijdens de proef*

In de gedraineerde proef dient tevens rekening te worden gehouden met de optredende volumeverandering  $\Delta V_t$ .

Het oppervlak kan in dit geval worden berekend volgens:

$$A_t = (V_0 - \Delta V_t) / (H_0 - \Delta H_t)$$

ad c.: *membraan-indringing*

Doordat het membraan tussen de korrels dringt verandert het volume (C.D.) of de waterspanning (C.U.).

Correctie hiervoor is eerst nodig bij korrelgrootten van 2 mm en meer.

ad d.: *sterkte van het membraan*

ad e.: *sterkte van de drainagestroken*

Er wordt aangenomen dat de gebruikelijke drainagestroken en het gebruikelijke dunne latex membraan een verwaarloosbare invloed hebben op de bepaling van de sterkteparameters van het monster.

ad f.: *wrijving van de plunjer*

De plunjerwrijving is gebruikelijk in de orde van 1 à 2% van de belasting, afhankelijk van de vervorming. Er wordt meestal niet op gecorrigeerd. Tegenwoordig wordt de verticale belasting veelal gemeten met een drukdoos die in de cel is geplaatst. Eventuele plunjerwrijving is dan volkomen onbelangrijk omdat de verticale belasting op het monster direct wordt gemeten.

### 5:10.3 *Keuze van het faalcriterium*

Om een éénduidige interpretatie van de proefresultaten mogelijk te maken, dient een keuze voor het faalcriterium gemaakt te worden.

In het algemeen kunnen twee faalcriteria worden gehanteerd:

1. het spanningsverschil ( $\sigma_1'/\sigma_3'$ ) is maximaal
2. de verhouding van de effectieve hoofdspanningen ( $\sigma_1'/\sigma_3'$ ) is maximaal.

Bij normaal geconsolideerde gronden treedt criterium 1 meestal eerder op dan criterium 2.

Bij overgeconsolideerde gronden treedt criterium 2 meestal eerder op dan criterium 1. De optredende vervorming is bij criterium 2 vaak aanzienlijk lager dan bij criterium 1. Dit verschil in gedrag wordt vooral bepaald door de waterspanningsontwikkeling in het monster.

Er wordt aanbevolen het criterium dat het eerste optreedt te hanteren en dat ook voor de verdere proevenserie te gebruiken.

Als faalcriterium kan ook een bepaalde vervorming worden aangehouden, onafhankelijk van 1 en 2.

### 5.11 Presentatie van waarnemingen bij triaxiaalproeven

De bepalingen en metingen die tijdens de proef worden gedaan dienen te worden vastgelegd op overzichtelijke werkformulieren welke door of vanwege de opdrachtgever opgevraagd kunnen worden. Een voorbeeld hiervan is fig. 7.

Hierop dienen alle benodigde proefgegevens te zijn vastgelegd.

De presentatie van de proefresultaten dient gebruikelijk in een Mohr-diagram of in een spanningspad-grafiek te worden weergegeven. Zie fig. 8.

In het Mohr-diagram kan direkt de omhullende aan de kritieke cirkels worden getrokken, waaruit de cohesie  $c'$  en de hoek van inwendige wrijving  $\phi'$  bepaald kunnen worden.

De in de spanningspad-grafiek gevonden hoek  $\alpha'$  heeft de volgende relatie met de hoek van inwendige wrijving:

$$\phi' = \arcsin (\operatorname{tg} \alpha')$$

Voorts verdient het aanbeveling om aan te geven hoe de schuifweerstandseigenschappen zich ontwikkelen afhankelijk van de vervorming.

Dit kan door numerieke presentatie van de schuifweerstandsparementers bij diverse vervormingspercentages of door presentatie van mobilisatiecurven.

Hierbij worden in een grafiek de schuifweerstandsparementers bij verschillende rekken aangegeven.

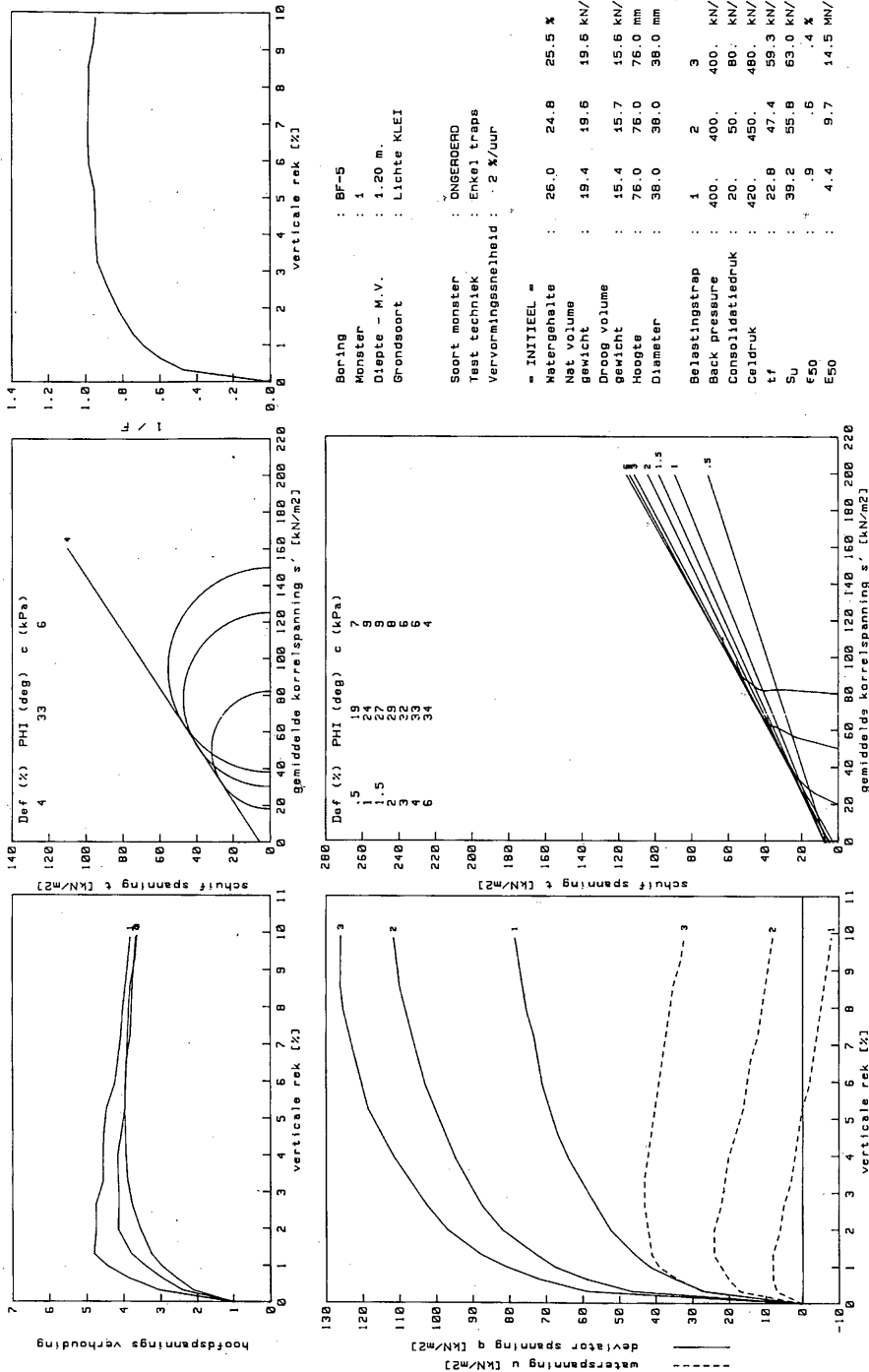
Door het gebruik van deze gegevens wordt het vervormingsaspect meegenomen in de sterkteberekening.



WAARNEMINGSSTAAT TRIAXIAAL											
Opdracht no. <u>F0606/02</u>				Triaxiaal col no. <u>3</u>							
Boring no. <u>B83.13.</u>				Belastingstrap no. <u>1</u>							
Monster no. <u>7</u>				Snelheid <u>0.03</u> mm/min							
Datum <u>8/02/87</u>				Druk							
Volume monster: <u>82.2</u> ml				Hoogte monster: <u>74.3</u> mm				Steundruk $\sigma_3$ : <u>60</u> kN/m <sup>2</sup>			
Doformatie		Opp mm <sup>2</sup>	Druk		$\sigma_1 - \sigma_3$ kN/m <sup>2</sup>	Poriënspanning in kN/m <sup>2</sup>		$(\sigma_1 - \sigma_3) \cdot \sigma_3$ $\sigma_1$	$\sigma_1 - u$ $\sigma_1'$	$\sigma_3 - u$ $\sigma_3'$	$\frac{\sigma_1'}{\sigma_3'}$
mm	%		Afl.	N		bottom $\phi$	sides				
0.				0		0					
.25				23		10					
.50				35		18					
.75				43		23					
1.				47		27					
.25											
.50				53		32					
.75											
2.				60		36					
.25											
.50				65		38					
.75											
3.				69		40					
.25											
.50				72		42					
.75											
4.				75		44					
.25											
.50				78		46					
.75											
5.				80		46					
.25											
.50				83		47					
.75											
6.				85		48					
.25											
.50				87		49					
.75											
7.				88		49					
.25											
.50				89		50.					
.75											
8.											
.25											
.50											
.75											
9.											
.25											
.50											
.75											
10.											
.25											
.50											
.75											
11.											
.25											
.50											
.75											

14-1078

Figuur 7B: Achterzijde.



ISOTROOP GECONSOLIDEERDE ONGEDRINEERDE TRIAXIAAL PROEF  
VOORHAVEN AMSTERDAM-RIJNSKAAL TE TIEL

Figuur 8: Presentatie resultaten triaxiaalproef.

## HOOFDSTUK 6

### DE CELPROEF

#### 6.1 Inleiding

De celproef is een stuikproef waarmee de eigenschappen van een grondmonster worden bepaald onder opgelegde spanningssituaties.

Het monster is aan boven- en onderzijde voorzien van een poreuze steen en zijdelings omhuld door een dik, ruim passend, rubber vlies.

De horizontale spanning op het monster wordt geleverd door de celspanning. De verticale spanning op het monster wordt, in tegenstelling tot de triaxiaalproef, vrijwel niet beïnvloed door de celspanning.

De celspanning kan niet op een vaste waarde worden ingesteld, maar door het aftappen van water uit de celruimte kan de celspanning wel worden verlaagd.

De celproef kan uitsluitend als gedraineerde proef worden uitgevoerd, aangezien de poreuze stenen aan beide einden in open verbinding met de atmosferische druk staan. Het is niet mogelijk de hoeveelheid water te meten die na een belastingverhoging uit het monster wordt geperst.

De verticale deformatie van de bovenkant van het monster wordt gemeten d.m.v. een verplaatsingsmeter.

Welk deel van de gemeten verticale deformatie wordt veroorzaakt door consolidatie en welk deel wordt omgezet in zijdelingse uitdijng van het monster is niet bekend, omdat het ruim geplooid rubber vlies niet reproduceerbaar vervormt bij een verandering van de celspanning, waardoor het volume van het monster niet uit metingen kan worden bepaald.

Het is dan ook niet mogelijk een consolidatie-coëfficiënt te bepalen.

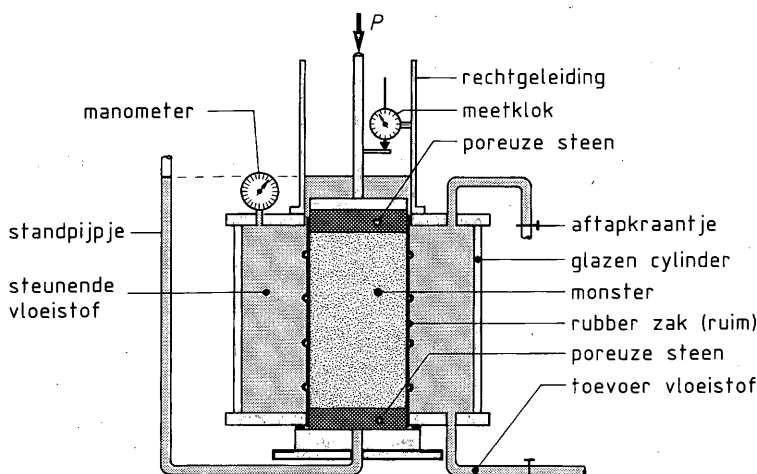
De proef zelf duurt wél zodanig lang en de vervormingen na het verlagen van de celspanning zijn zodanig klein dat aangenomen moet worden dat geen wateroverspanning aanwezig is in het monster tijdens de meting. Bij het verlagen van de celspanning treedt ontlasting van het monster op hetgeen betekent dat door het daarbij optredende stijve gedrag het monster zich snel aanpast aan de nieuwe belasting.

Bij de celproef wordt gewoonlijk slechts één monster gebruikt om de vier belastings-trappen op uit te voeren.

Uit recente proefnemingen zou gebleken zijn dat de eigenschappen van het monster niet veranderen wanneer de vervormingssnelheid voldoende laag is en de vervormingen niet te groot zijn.

## 6.2 Inrichting van de celproef

De schematische opstelling van een celproef is weergegeven in figuur 9.



Figuur 9: schematische opstelling van de celproef.

De inrichting van de celproef bestaat uit de volgende onderdelen:

- de cel, bestaande uit een glazen cilinder, die is ingeklemd tussen boven en onderplaat. Het rubber vlies dat dient om de zijdelingse druk vanuit de celruimte op het monster over te brengen is waterdicht bevestigd aan de boven- en onderplaat. Door een onderdruk in de celruimte aan te brengen wordt het rubber vlies tegen de glazen wand getrokken, waardoor ruimte wordt gecreëerd om het monster binnen het rubber vlies te plaatsen. Onderin deze ruimte bevindt zich een poreuze steen die via een leiding in de voetplaat in verbinding staat met het standpijpje. Hierdoor staat het monster aan de onderzijde in verbinding met de atmosferische druk. Op het monster wordt eveneens een poreuze steen geplaatst waarop de verticale belasting wordt aangebracht. Door deze steen staat het monster aan de bovenzijde in verbinding met de atmosferische druk. In de bovenplaat van de cel is een kraantje aangebracht, waardoor water uit de celruimte kan worden afgetapt. Dit aftappen van water noemt men „mohren”.
- De kwikmanometer, die via een met water gevulde buis, via een opening in de bovenplaat met de celruimte is verbonden. De druk in de celruimte halverwege de hoogte van het monster kan direct op deze manometer worden afgelezen.
- De inrichting voor het aanbrengen van de verticale belasting, die in principe bestaat uit een uitgebalanceerde schaal voor de plaatsing van de gewichten en een geleidingsconstructie, die op de bovenplaat van de cel is gemonteerd. Tussen deze geleidingsconstructie en de daarin gecentreerde belastingsstempel is de verplaatsingsmeter



geplaatst voor het aflezen van de zakking van het monster gedurende de uitvoering van de proef.

Nadat het te beproeven grondmonster in de cel is geplaatst en de poreuze steen op de bovenzijde van het monster is aangebracht, wordt de onderdruk in de celruimte opgeheven en vervangen door een zeer lage overdruk. Bij deze handeling wordt ervoor gezorgd dat de celruimte geheel met ontlucht water wordt gevuld.

Tevens wordt ook het standpijpje gevuld met water.

Hierna wordt de cel met grondmonster in de opstelling geplaatst en wordt de celruimte verbonden met de manometer.

De geleidings- en belastingsconstructie wordt op de bovenplaat van de cel bevestigd. De celruimte wordt tevens verbonden met een leidingsysteem waarin zich ontlucht water bevindt. Hiermee kan de celruimte zonodig worden ontlucht en kan de druk in deze ruimte op de gewenste initiële waarde worden ingesteld. Door middel van een kraan wordt de celruimte afgesloten van deze waterleiding. De inrichting van de proef is nu gereed voor de uitvoering van de eigenlijke celproef.

### 6.3 Uitvoering van de celproef

De verticale vervorming in het celapparaat is gelimiteerd tot ca. 20 mm;

Wenst men vier belastingstrappen, dan mag de vervorming tot ca. 5 mm per trap bedragen.

Vóór het belasten wordt de nul-stand van de zettingsmeter genoteerd.

Vervolgens wordt de eerste verticale belasting aangebracht door het plaatsen van gewichten op de belastingsschaal. Er wordt gewoonlijk zodanig belast dat in de eerste belastingsfase de directe vervorming beperkt blijft tot ca. 4 mm. Doordat het monster daarbij in de cel gedrukt wordt en zijdelings wil uitdijen loopt de spanning in de afgesloten celruimte op, waardoor een hogere zijdelingse spanning wordt verkregen. Hierdoor ontstaat een evenwichtssituatie.

De daarbij behorende celdruk wordt afgelezen op de kwikmanometer en samen met de aangebrachte verticale belasting en de stand van de zettingsmeter op het waarnemingsformulier genoteerd.

Hiermee begint de consolidatiefase bij de eerste belastingstrap.

Tijdens deze fase treedt er zakking van het monster op die op regelmatige tijden wordt afgelezen en genoteerd. De celspanning daalt tijdens de consolidatie. Met het afnemen van de consolidatie krijgt de vervorming door kruip weer de overhand, waardoor de celspanning zeer langzaam en in geringe mate weer kan stijgen. De drukveranderingen worden per tijdseenheid steeds kleiner.

Deze consolidatiefase verschilt van de triaxiaalproef daarin, dat bij de celproef de proefbelasting en daarmee de deviatorspanning reeds aanwezig is tijdens consolidatie; Het monster in de celproef wordt niet isotroop geconsolideerd.

Er wordt na belasten gewacht tot de verticale vervorming van het monster kleiner is dan 0,01 mm per uur. Dit komt overeen met  $\frac{1}{4}$  mm per dag of minder dan 10 cm per jaar. Dit criterium is in de loop der tijd ontstaan omdat deze deformatie niet als bezwijken wordt ervaren.

De consolidatiefase gaat gepaard met het uitdrijven van poriënwater uit het grondmonster. Dit verschijnsel kan worden waargenomen door het overlopen van het standpijpje. In ieder geval dient er voor te worden gezorgd, dat het standpijpje steeds gevuld blijft met water.

Wanneer aan het criterium van de vervormingssnelheid wordt voldaan wordt druppelsgewijs water afgetapt uit de celruimte zodat de steunspanning wordt verlaagd; Daarbij wordt in principe zoveel water afgetapt dat de manometer de neiging heeft niet verder te dalen als er nog een kleine hoeveelheid water uit de cel wordt afgetapt; dit betekent dat het monster vrijwel net zo snel vervormt als er water uit de cel wordt afgetapt. De celspanningsverlaging bij dit „mohren” wordt standaard  $3 \text{ kN/m}^2$  genomen; is de celspanning na enige uren nog niet opgelopen en de zetting toegenomen dan wordt de celspanning nogmaals met  $3 \text{ kN/m}^2$  verlaagd.

Men ziet na de verlaging van de celspanning dat deze weer oploopt terwijl de zetting iets blijft toenemen.

Na het verlagen van de celspanning wacht men minimaal een dag tot de vervormingssnelheid van het monster weer gelijk of minder is dan de eerder genoemde 0,01 mm per uur. Dit kan soms enkele dagen duren, reden waarom een celproef met 4 belastingsfasen ca. 3 weken (zandig materiaal) tot ca. 5 weken (veen) kan duren.

Uit de waarnemingen die gedaan worden bij een vervormingssnelheid van 0,01 mm per uur of minder volgt een „kritische spanningstoestand” van het monster die door middel van een spanningscirkel in het diagram van Mohr kan worden weergegeven.

De proef wordt voortgezet met het aanbrengen van de tweede belastingstrap, waarbij dezelfde procedure als hiervoor beschreven wordt toegepast.

Over het algemeen bestaat een volledige celproef uit vier belastingstrappen die voor hetzelfde grondmonster vier „kritische spanningscombinaties” opleveren voor de bepaling van de cohesie en hoek van inwendige wrijving uit de celproef.

#### 6.4 Metingen bij de celproef

Vóór plaatsing van het monster in het celapparaat wordt gemeten:

- het gewicht (nat) van het monster
- hoogte en omtrek op drie plaatsen regelmatig verdeeld over de omtrek resp. hoogte van het monster
- tevens bepaling van het watergehalte van twee schijfjes grond die het monster aan onder c.q. bovenzijde hebben begrensd.

Voor de proef worden de nulstanden van de kwikmanometer en de verplaatsingsmeter opgenomen.

Tijdens de uitvoering van de proef worden de kwikmanometer, de verplaatsingsmeter en de tijd opgenomen op de volgende momenten:

- tijdens belasten met bekende gewichten na iedere plaatsing van een gewicht;
- tijdens de consolidatiefase tenminste twee maal per dag;
- na het verlagen van de celspanning (mohren) frequent tot tenminste twee maal per dag;
- bij opvolgende belastingsfasen op overeenkomstige momenten als bovengenoemd.

Na het zorgvuldig uitbouwen van het monster uit het celapparaat worden opnieuw de volgende metingen verricht:

- weging van het monster;
- hoogte en omtrek op drie plaatsen regelmatig verdeeld over de omtrek resp. hoogte van het monster;
- bepaling van het watergehalte door droging en weging van enkele stukjes grond van het beproefde grondmonster.

Een groot deel van de genoemde waarnemingen is nodig om de gang van zaken in de proef te bepalen, zoals het bepalen van het tijdstip waarop de celspanning verlaagd kan worden en het moment waarop de „kritische waarde” voor de celspanning is bereikt na het verlagen van de celspanning.

## 6.5 Verwerking van de waarnemingen bij celproeven

Voor de afleiding van de schuifweerstandparameters uit de waarnemingen van de celproef zijn de waarnemingen van belang bij de zogenaamde „kritische waarde” van de horizontale steundruk (de celspanning). Het gaat daarbij om de werkelijke verticale en horizontale hoofdspanningen in het monster. Om deze te berekenen uit de waarnemingen zijn enige correcties nodig.

## 6.6 Correcties

De op de manometer afgelezen waarden van de spanning in de celruimte kunnen zonder omrekening en zonder correctie direct worden gebruikt voor de horizontale spanning  $\sigma_h$  (of  $\sigma_3$ ) in het monster.

Voor de berekening van de verticale spanning  $\sigma_v$  (of  $\sigma_1$ ) in het monster zijn er een aantal invloeden waarop dient te worden gecorrigeerd.

In de eerste plaats moet de verticale belasting worden omgerekend tot een verticale spanning in het monster. Voor de aanvang van de proef worden de afmetingen nauwkeurig bepaald. De diameter wordt meestal afgeleid uit de meting van de omtrek op een aantal plaatsen van het monster.

Tijdens de proef treden echter zijdelingse vervormingen van het monster op, waardoor het oppervlak van de doorsnede groter wordt.

Deze vergroting kan bij de celproef niet uit de metingen worden bepaald omdat:

- de druk in de cel gedurende de proef verandert en daarmee het volume van de cel;
- de ruime plooien van de rubberzak rond het monster door de drukverhoging in de cel niet reproduceerbaar worden samengedrukt;
- er bij het verlagen van de celspanning een onbekende hoeveelheid water uit de cel wordt afgetap.

Dit laatste bezwaar kan worden ondervangen door meting van het volume van het afgetapte water. Dit heeft echter geen zin indien de andere invloeden onbekend blijven. Voor de bepaling van de in het monster heersende verticale spanning  $\nu$  (of  $\nu_v$ ) moet dus uit de opmetingen van het monster vóór en na de proef een zo goed mogelijke schatting worden gemaakt van het oppervlak van de doorsnede van het monster.

In de tweede plaats dient de verticale belasting  $F$  nog te worden gecorrigeerd met het effect van de druk (= celspanning) op de plooï van het rubbervlies waar dat aan de bovenplaat is bevestigd.

#### 6.6.1 Vaststelling van het oppervlak van de doorsnede van het monster

De waarnemingen, die beschikbaar zijn voor het maken van een goede schatting van het oppervlak van de gemiddelde doorsnede van het monster, zijn:

- de diameter vóór het begin van de celproef ( $d_i$ )
- de diameter na het beëindigen van de proef ( $d_e$ )
- de samendrukking  $w$  van het monster tijdens de gehele beproeving.

Bij een ééntraps-celproef kan voor de bepaling van het oppervlak van de middendoorsnede direct gebruik worden gemaakt van  $d_e$  waarde de aan het einde van de proef. Bij de gebruikelijke meertraps-proeven wordt voor de verschillende belastingstrappen het tussen begin en einde van de proef gemeten diameterverschil naar rato van de opgetreden zakking verdeeld.

Stel de zakking bij het einde van de proef is  $w_e$  en de zakking aan het einde van belastingstrap  $n$  is  $w_n$ , dan volgt voor de diameter  $d_n$  aan het einde van belastingstrap  $n$ :

$$d_n + i = (w_n/w_e) \cdot (d_{ei})$$

#### 6.6.2 Correctie ten gevolge van celspanning in de plooï

In figuur 10 is een detail gegeven van de plooï in de rubber zak bij de bovenplaat van het celapparaat.

In de plooï die het rubbervlies maakt tussen de bovenplaat van de cel en het monster of de poreuze steen werkt van binnen naar buiten de celspanning.

De correctie is theoretisch vastgesteld op de helft van waarde van het product van de celspanning en de oppervlakte van de spleet tussen bovenplaat van de cel en het monster of de poreuze steen. De oppervlakte van de spleet is ca. 900 mm, zodat

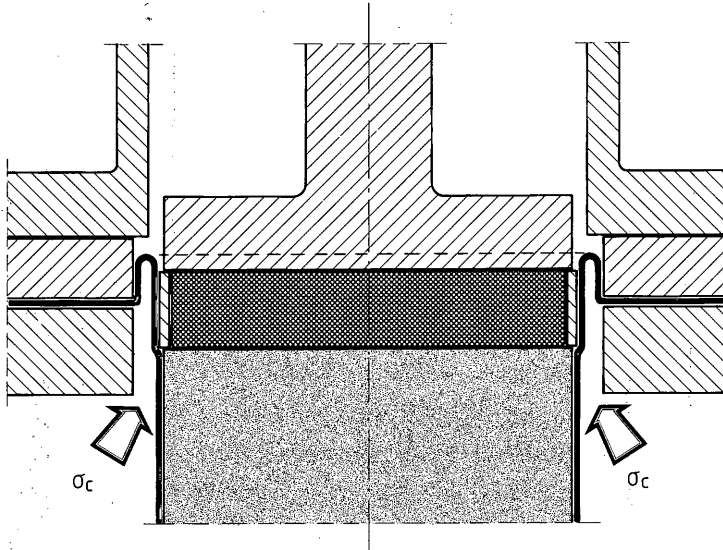
$$\sigma_v = (F - 4,5 \cdot 10^{-4} \sigma_c) / (\frac{1}{4} \pi d_n^2) \quad \text{kN/m}^2$$

Hierin is:

$F$  = belasting op de schaal in kN

$\sigma_c$  = de celspanning aan het einde van belastingstrap  $n$  in kN/m

$d_n$  = de gemiddelde diameter van het monster aan het einde van belastingstrap  $n$ .



Figuur 10: Detail van de plooi in de rubber zak aan bovenzijde van het celapparaat.

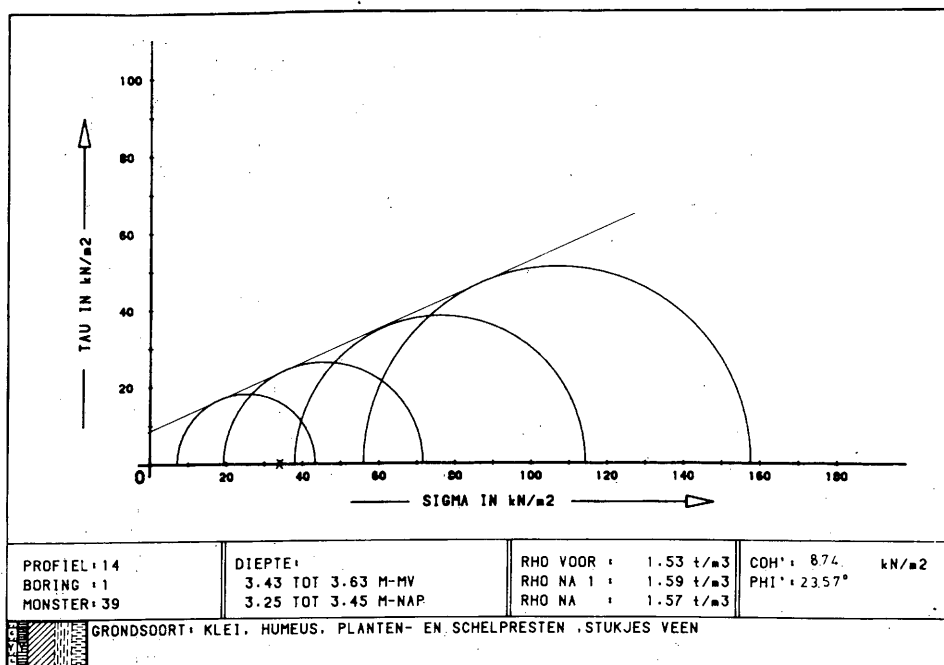
### 6.7 Keuze van het faalcriterium

Bij de celproef wordt als faalcriterium een vervormingssnelheid van minder dan 0,01 mm per uur aangehouden, terwijl de vervorming beperkt wordt gehouden. Bovendien wordt deze kritische spanningstoestand bereikt door ontlasten van het monster.

### 6.8 Presentatie van de waarnemingen bij de celproef

De bepalingen en metingen die tijdens de proef worden gedaan dienen te worden vastgelegd op overzichtelijke werkformulieren welke door of vanwege de opdrachtgever opgevraagd kunnen worden.

Omdat de deformaties ten gevolge van consolidatie, kruip of bezwijken van het monster niet afzonderlijk onderscheiden kunnen worden kunnen geen spannings-vervormings-relaties worden afgeleid zoals bij de triaxiaalproef.



Figuur 11:  $\tau$ - $\sigma$ -diagram van een celproef.

Het resultaat van de celproef wordt gepresenteerd in de vorm van een  $\tau$ - $\sigma$ -diagram, waarin de kritische spanningscirkels zijn aangegeven die behoren bij een vervormings-snelheid van 0,01 mm per uur. Een voorbeeld van een dergelijk diagram is gegeven in figuur 11.

De totale waarnemingsstaat kan inzicht verschaffen in de totale vervorming die het monster heeft ondergaan bij bepaalde kritische spanningscirkels. De in het  $\tau$ - $\sigma$ -diagram gepresenteerde cirkels zijn in de waarnemingsstaat angekruist. De overige waarnemingen zijn gedaan om de gang van zaken in de proef te sturen. Een voorbeeld van een waarnemingsstaat is gegeven in figuur 12.

				opdr. nr. : CO-257291-39	
begin : 83-05-09		<b>CELPROEF</b>		proj. ing. : BTA	
eind : 83-06-06				laborant : HB/BK	
apparaat nr.: 38				blad 1 van 1 bladen	

CO-nr./p.l.	CO-257291 X BTA X										handtorvane 67 x 65 kN/m²									
titelopdracht	KADE ONDERZOEK										POLDER LANGE WEIDE EN WEIJP									
vervolg	OORTSCHE POLDER																			

profiel	14					
boringnr./monsternr.	14-1 / 39					
dieptemonster	3.43 tot 3.63 m- MV					
grondsoort	3.25 tot 3.45 m- NAP					
	KLEI, humeus, plant, schelp- en veenresten					
plotschaal	standaard					
massa per volume van poriënwater in t/m³	1.					
aantal gekonsolideerde belastingen	4		proc. C2			
beginstand horloge in mm	30					
horlogestand Z <sub>24</sub> in mm	0.					

		voor de proef		na de proef		
hoogte	1.	150.1	137.6			mm
	2.	149.9	137.6			mm
	3.	150.0	137.5			mm
	4.	150.2	137.6			mm
omtrek	boven	205.0	206.0			mm
	midden	205.0	205.0			mm
	onder	205.0	207.0			mm
massa monster (net)		769.0	731.3			g

datum	tijd	versponning aankruisen	massa op schaal in kg	manometer aflezing in kN/m²	horloge aflezing in mm	temp. in °C
83.05.09	13.20		0	1.1 - w	30.000	18.7
			1	1.1	29.900	
			2	1.3	29.775	
			3	1.6	29.650	
			4	1.7	29.530	
			5	1.8	29.404	
			6	2.0	29.286	
			7	2.1	29.177	
			8	2.6	29.055	
			9	2.7	28.903	
			10	3.1	28.782	
			15	6.0	28.080	
	16.00			7.1	27.098	18.6
83.05.10	8.30			7.5	26.770	18.1
	16.00			7.7	26.678	
83.05.11	8.30			8.0	26.581	
	8.50			8.0	26.568	
			M	4.9	26.547	
	16.00			6.9	26.482	
83.05.12	9.00	X	15	7.0	26.400	18.1
83.05.13	8.30			7.2	26.312	
	16.00			7.4	26.278	
83.05.14	9.00			7.7	26.215	
83.05.16	8.30			8.1	26.050	18.2
	10.00		B	8.1	26.014	
			20	11.9	25.861	
			25	17.3	25.610	
	16.00			18.0	24.332	

Figuur 12A: Waarnemingsstaat celproef.



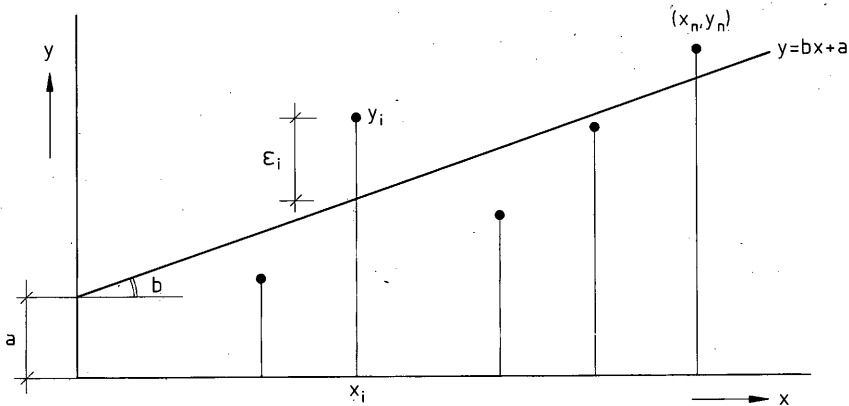


## STATISTISCHE VERWERKING

## 7.1 Inleiding

Behalve de methode waarbij op het oog de grenslijn uit drie of vier experimenten wordt getekend bestaan er ook statistische verwerkingsmethoden. Deze methoden verdienen uiteraard de voorkeur, vooral omdat daardoor standaardisatie mogelijk is.

De statistische methode waarvan bij cel- en triaxiaalproeven gebruik gemaakt kan worden is de lineaire regressie-analyse. Het standaard lineaire regressieprobleem is weer gegeven in figuur 13. Gegeven een aantal waarnemingen  $(x_i, y_i)$  wordt een rechte lijn  $y = bx + a$  geconstrueerd zodanig dat de som van de kwadraten van de fouten in  $y$ -richting minimaal is. Men spreekt derhalve van een kleinste kwadraten methode.



Figuur 13: Standaard regressie-analyse met de kleinste kwadraten methode in de  $y$ -richting. De coëfficiënten  $a$  en  $b$  zodanig bepaald dat

$$\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - y)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)^2$$

minimaal wordt. Het resultaat is

$$a = \bar{y} - b \bar{x}$$

$$b = \frac{\sum x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sum x_i^2 - n \bar{x}^2}$$

met  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i$  en  $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum y_i$

Een probleem bij de toepassing van de standaard regressie-analyse bij de verwerking van cel- en triaxiaalproeven is de vraag welke grootte als  $x$ - en welke als  $y$ -variabele moet worden gekozen. We gaan er daarbij in het hiernavolgende vanuit dat de meetresultaten niet op een rechte lijn liggen als gevolg van meetfouten en andere onvolkomenheden bij de uitvoering van de proef. Variaties als gevolg van ruimtelijke spreiding van de monsters zoals bij meerdere eentrapsproeven blijft buiten beschouwing.

In een dergelijke situatie dient de regressie-analyse zodanig te worden uitgevoerd dat de  $x$ -variabele geen fout bevat en de  $y$ -variabele alle fouten en onnauwkeurigheden. Bij een nadere analyse van de cel- en triaxiaalproeven blijkt het echter niet goed mogelijk een foutvrije variabele aan te wijzen.

We beschouwen eerst de celproef

$$\sigma'_v = F/A - u \quad (7.1)$$

$$\sigma'_h = \sigma_{\text{cel}} - u \quad (7.2)$$

De bovenbelasting  $F$  ligt bij de celproef afgezien van de correctie ten gevolge van de celspanning in de plooi, goed vast, maar voor de bepaling van  $\sigma_v$  moet ook het oppervlak  $A$  in vervormde toestand worden bepaald, hetgeen enkele onzekerheden met zich meebrengt.

Het monster staat in open verbinding met de atmosferische druk, reden waarom de waterspanning niet gemeten wordt.

Eventuele wateroverspanning die laag zal zijn vanwege de langzame vervormingssnelheid, kan echter ook niet geconstateerd worden. De celspanning  $\sigma_{\text{cel}}$  en daarmee  $\sigma_h$  is wel direct en goed meetbaar. Het probleem is echter dat moeilijk interpreteerbaar is welke waarde van  $\sigma_c$  tijdens de proef precies met bezwijken in verband gebracht moet worden.

Beschouw vervolgens de triaxiaalproef:

$$\sigma'_v = \sigma_{\text{cel}} - u + F/A$$

$$\sigma'_h = \sigma_{\text{cel}} - u$$

Bij de triaxiaalproef ligt in principe de celspanning goed vast en kan goed gemeten worden. Een bron van onnauwkeurigheden is de meting van de waterspanning  $u$ . In principe kan deze worden opgevangen door te transformeren naar het  $p$ - $q$ -systeem:

$$p = (\sigma'_v + \sigma'_h)/2 = \sigma_{\text{cel}} - u + F/2A \quad (7.3)$$

$$q = (\sigma'_v - \sigma'_h)/2 = F/2A \quad (7.4)$$

Alle zekerheid afkomstig van  $u$  is nu in  $p$  ondergebracht. Wat echter blijft in  $q$  is de onzekerheid afkomstig van  $A$  (net als bij de celproef) en de vraag welke waarde van  $F$  met bezwijken in verband gebracht moet worden.

De conclusie uit bovenstaande is dat fouten in beide richtingen voorkomen en dat geen transformatie denkbaar is waarbij een foutvrije variabele ontstaat. Het standaardgeval is dus in principe niet van toepassing en formeel dient gezocht te worden naar een andere oplosmethode. Andere methoden, alhoewel voorhanden, zijn echter buitengewoon onaantrekkelijk en de praktische importantie van het probleem is niet erg groot: in veel gevallen leidt een andere keuze van de regressie-richting tot slechts geringe verschillen in de resulterende  $\phi$  en  $c$ -waarden. Om die reden lijkt het verstandig om toch gebruik te blijven maken van de standaardregressie-analyse, met daarbij een zodanige keuze van de regressie-richting, dat de gemaakte fout zo klein mogelijk is. Op het eerste gezicht lijkt de regressie-richting zodoende te moeten corresponderen met de variabele waarin de onnauwkeurigheid maximaal is.

Dit is echter niet juist omdat de richting van de gezochte regressielijn mede van invloed is: een fout in de richting van de regressielijn heeft minder invloed dan een fout loodrecht op die lijn. Vanuit die gedachte kan men pleiten voor een regressie loodrecht op de omhullende. Men heeft dan echter geen standaardgeval omdat die richting zelf nog een onbekende is. Een aantal formules wordt daardoor ingewikkelder. De eenvoudigste oplossing is daarom om, in ieder geval voorlopig, de keuze te laten vallen op de  $q$ -richting als regressierichting voor zowel de cel- als de triaxiaalproef.

Deze richting maakt, met name voor de wat minder goed geconditioneerde proeven op klei, een redelijk grote hoek met de regressie-richting. Bovendien sluit dit goed aan bij een belangrijk deel van de nu gegroeide praktijk.

## 7.2 Formules

### 7.2.1 De gemiddelde regressielijn

Aangenomen wordt dat voor een bepaalde lokatie m.b.v. een meertrapsproef op één monster of meerdere ééntrapsproeven op enkele zeer dicht bij elkaar gelegen monsters m.b.v. cel- of triaxiaalproeven  $p$ - $q$ -waarden zijn gevonden. Een standaard regressie-analyse met een kleinste kwadraten-methode in  $q$ -richting leidt tot de volgende schatting (Expectation) voor de parameters  $a$  en  $b$ :

$$E(a) = \bar{q} - E(b) \cdot \bar{q} \quad (7.5)$$

$$E(b) = (\sum p_i q_i - n \bar{p} \bar{q}) / (\sum p_i^2 - n (\bar{p})^2) \quad (7.6)$$

Hierin is  $n$  het aantal waarnemingen en zijn  $\bar{p}$  en  $\bar{q}$  gemiddelde waarden.

De cohesie  $c$  en de hoek van inwendige wrijving  $\phi$  zijn aan  $a$  en  $b$  gerelateerd via de vergelijking  $c = a\sqrt{1 - b^2}$  en  $\text{tg } \phi = b/\sqrt{1 - b^2}$ . Voor de schattingen van  $c$  en  $\text{tg } \phi$  kan derhalve worden uitgegaan van

$$E(c) = (E(a)) / \sqrt{1 - E^2(b)} \quad (7.6A)$$

$$E(\text{tg } \phi) = (E(b)) / \sqrt{1 - E^2(b)} \quad (7.6B)$$

Bij kleine waarden van  $\phi$  (b.v.  $\phi < 15^\circ$ ) geldt verder bij benadering dat

$$E(c) = E(a) \text{ en } E(\text{tg } \phi) = E(b).$$

De gemiddelde regressielijn wordt gegeven door:

$$E(\tau) = E(c) + \sigma n \cdot E(\text{tg } \phi) \quad (7.6C)$$

Zie voor overzicht ook figuur 14.

### 7.2.2 Veilige ondergrenswaarde

Het gevolg van de aanwezigheid van meetfouten is dat de schattingen voor  $a$  en  $b$  (en daarmee voor  $c$  en  $\text{tg } \phi$ ) hoger of lager kunnen uitvallen dan de werkelijke waarden. Voor de parameters  $a$  en  $b$  geldt dat de spreiding, voor zover afkomstig van toevallige fluctuaties, gegeven wordt door:

$$\sigma(a) = \sigma(\varepsilon) \frac{\left( \frac{1}{n} \sum (p_i - \bar{p})^2 + \bar{p}^2 \right)^{1/2}}{\left( \sum (p_i - \bar{p})^2 \right)^{1/2}}$$

$$\sigma(b) = \sigma(\varepsilon) \left( \frac{1}{\sum (p_i - \bar{p})^2} \right)^{1/2}$$

Hierin is  $\sigma(\varepsilon)$  de standaardafwijking van de toevallige meetfout in  $q$ -richting die geschat kan worden via:

$$\sigma^2(\varepsilon) = \frac{1}{n-2} \sum \varepsilon_i^2 = \frac{1}{n-2} \sum \{q_i - E(a) - p_i E(b)\}^2 \quad (7.7)$$

De onderlinge afhankelijkheid tussen  $a$  en  $b$  wordt vastgelegd door:

$$\rho(a, b) = - \frac{\bar{p}}{\left\{ \frac{1}{n} \sum (p_i)^2 + \bar{p}^2 \right\}^{1/2}} \quad (7.8)$$

De parameters  $a$  en  $b$  zijn dus negatief gecorreleerd hetgeen wil zeggen dat een te grote schatting voor  $a$  meestal gepaard gaat met een te lage schatting voor  $b$  en omgekeerd. De spreidingen in  $c$  en  $\text{tg } \phi$  volgen, bij goede benadering, uit die voor  $a$  en  $b$  middels:

$$\sigma(c) = \sigma(a) / \sqrt{(1 - E^2(b))} \quad (7.9)$$

$$\sigma(\text{tg } \phi) = \sigma(b) / \sqrt{(1 - E^2(b))} \quad (7.10)$$

$$\rho(c, \text{tg } \phi) = \rho(a, b) \quad (7.11)$$

Een veilige schatting voor  $c$  en  $\text{tg } \phi$ , waarbij rekening gehouden wordt met een mogelijk optimistisch uitgevallen meetresultaat, wordt tenslotte gegeven door:

$$c_{\text{veilig}} = E(c) - t_{n-2} \cdot \sigma(c) \quad (7.12)$$

$$\text{tg } \phi_{\text{veilig}} = E(\text{tg } \phi) - t_{n-2} \cdot \sigma(\text{tg } \phi) \quad (7.13)$$

Hieruit volgt:

$$\tau_{\text{veilig}} = c_{\text{veilig}} + \sigma_n \cdot \text{tg } \phi_{\text{veilig}} \quad (7.13A)$$

De grootheid  $t_{n-2}$  volgt uit de tabel voor de student-verdeling. Voor verschillende betrouwbaarheidsniveaus en waarden van  $n$  is  $t_{n-2}$  weergegeven in tabel I. (blz. 62)

Aanbevolen wordt uit te gaan van de 5%-onderschrijdingskans.

Zie voor overzicht ook figuur 14.

### 7.2.3 Veilige waarde per spanningsniveau

De rekenwaarden die m.b.v. de bovenstaande methode tevoorschijn komen zijn nogal aan de conservatieve kant. De oorzaak daarvan is dat geen rekening wordt gehouden met de eerder genoemde negatieve correlatie tussen  $a$  en  $b$  (of  $c$  en  $\text{tg } \phi$ ). Een methode om daar wel rekening mee te houden is om bij iedere waarde van de normaalspanning  $\sigma_n$  de bijbehorende veilige waarde van de schuifspanning  $\tau$  te bepalen. De formules daartoe zijn:

$$\tau_{\text{veilig}} = E(\tau) - t_{n-2} \cdot \sigma(\tau) \quad (7.14)$$

$$E(\tau) = E(c) + \sigma_n \cdot E(\text{tg } \phi) \quad (7.15)$$

$$\sigma^2(\tau) = \sigma^2(c) + \sigma_n^2 \cdot \sigma^2(\text{tg } \phi) + 2 \cdot \sigma_n \cdot \sigma(c) \cdot \sigma(\text{tg } \phi) \quad (7.16)$$

In figuur 14 is deze betrouwbaarheidslijn grafisch weergegeven. Duidelijk zal zijn dat men deze methode alleen moet toepassen indien die echt nodig is.

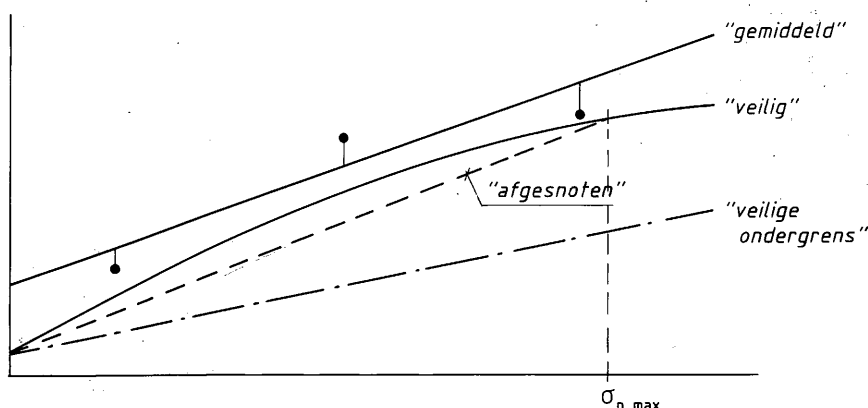
### 7.2.4 Afsluiting m.b.v. twee veilige schuifspanningswaarden

Een tussenoplossing is om de maximaal optredende normaalspanning te bepalen en een veilige benadering te kiezen via lineaire interpolatie met het punt  $(0, c_{\text{veilig}})$ . Dit heeft het voordeel dat men per grondsoort weer van één  $c$ - en één  $\phi$ -waarde uit kan gaan. Deze procedure heeft daarom de voorkeur.

Zie voor overzicht ook figuur 14.

### 7.2.5 Monsters van meerdere lokaties

Indien men uit bepaalde geologische formatie over monsters beschikt van meerdere lokaties, maar wel zodanig dat per lokatie een  $c$ - en  $\phi$ -waarde bepaald kan worden, dan



Figuur 14: De gemiddelde regressielijn komt overeen met formule (7.6C).

De veilige ondergrenslijn wordt gegeven door formule (7.13A).

De lijn die de veilige waarde per spanningsniveau aangeeft, wordt bepaald met behulp van (7.14), (7.15) en (7.16).

De afsnuiting geeft een praktische benadering aan, waarbij  $\sigma_n$  de maximale normaalspanning in een berekening voorstelt.

zal men in het algemeen verschillende schattingen vinden voor  $c$  en  $\phi$ . De oorzaak hiervan is onder meer dat de grondeigenschappen, ook in een als homogeen beschouwde geologische laag, ruimtelijke fluctuaties vertonen. De wijze waarop men deze ruimtelijke fluctuaties in rekening moet brengen zal in deze leidraad niet aan de orde komen. Wel heeft nog zin te wijzen op het volgende: verondersteld mag worden dat de meetfout  $\varepsilon$  voor de beschouwde formatie in alle lokaties dezelfde onzekerheden bevat en in ongeveer gelijke mate. Het voordeel is dat  $\sigma(\varepsilon)$  geschat kan worden op grond van alle lokaties te zamen. Indien  $c$  en  $\phi$  op  $m$  plaatsen bepaald zijn volgt daarmee  $\sigma^2(\varepsilon)$  uit:

$$\sigma(\varepsilon) = \frac{1}{m(n-2)} \sum_{i=1}^{mn} \varepsilon_i^2 \quad (7.17)$$

Overeenkomstig kan in alle formules  $t_{n-2}$  vervangen worden door  $t_{m(n-2)}$ .

Bij te grote spreiding in de  $\sigma(\varepsilon)$ -waarden van de individuele lokaties kan de geldigheid van deze pooling-procedure nog eventueel getest worden met een statistische toets, de zogeheten  $F$ - of  $\chi^2$ -test. (zie lit. 11.Hfdst. 15.4)

Tabel I.: Waarden van de student-verdeling voor verschillende onderschrijdingskansen  $P$ .

aantal waarnemingen	$P = 0,10$	$P = 0,05$	$P = 0,025$
1	3,08	6,31	12,71
2	1,89	2,92	4,30
3	1,64	2,35	3,18
4	1,53	2,13	2,78
5	1,47	2,02	2,57
6	1,44	1,94	2,45
7	1,42	1,90	2,36
8	1,40	1,86	2,31
9	1,38	1,83	2,56
10	1,37	1,81	2,23
15	1,34	1,75	2,13
20	1,32	1,72	2,09
25	1,32	1,71	2,06
30	1,31	1,70	2,04
oneindig	1,28	1,64	1,96

## HOOFDSTUK 8

### SLOTBESCHOUWING

In voorgaande hoofdstukken zijn de uitvoeringsprocedures van zowel de triaxiaal- als celproef uitvoerig beschreven.

De uitvoeringsprocedures geven de huidige praktijk weer bij het onderzoek van waterkeringen. De procedures zijn toepasbaar op klei en kleihoudende gronden. Voor zand zijn eenvoudiger procedures denkbaar, terwijl veen extra complicaties met zich brengt. Alhoewel de cel- en de triaxiaalproef in uitvoeringswijze verschillen, respectievelijk kracht- en vervormings-gestuurd, kan met beide type proeven een  $c'$ - en  $\phi'$ -waarde worden bepaald.

De schuifweerstandsparementers uit triaxiaalproeven zijn in het algemeen op andere vervormingscriteria gebaseerd dan die uit celproeven. Bij toepassing van deze parementers in stabiliteitsberekeningen dient dan ook duidelijk te worden aangegeven welke beproevingsmethode toegepast is. Dit houdt verband met de in de berekening toe te passen partiële materiaalfactoren.

Overigens dient men ook de schuifweerstandsparementers uit verschillende soorten triaxiaalproeven niet zonder meer door elkaar te gebruiken.

Voor situaties waarbij het vervormingsgedrag van de grond bepalend is voor de veiligheid komen de in de celproef gevonden parementers overeen met de gewenste veilige situatie in de werkelijkheid. Vooral in situaties met korter durende extreme belastings-toestanden is het vervormingsgedrag van minder betekenis en is de sterkte van het materiaal bepalend. In die gevallen sluiten triaxiaalproeven goed aan op de problematiek.

Bij gebruik van een triaxiaalproef kan door het invoeren van een vervormingscriterium de vervorming in de berekening worden meegenomen. Dit geldt niet voor de vervormingssnelheid. Bovendien is het met glijvlakberekeningen niet mogelijk de vervorming te berekenen.

Ontwikkelingen op het gebied van de studie van het spannings- en vervormingsgedrag van grond kunnen mogelijk in de toekomst tot aanpassingen in de proefprocedures van beide proeven leiden.



## LITERATUUR

1. BISHOP en HENKEL (1962). The measurement of soil properties in the triaxial-test.  
Uitg. Edward Arnold, Londen.
2. ISSMFE (1981) International Manual for the sampling of soft cohesive soils.  
Sub-committee on soil sampling, Tokyo 1981.
3. HVORSLEV, M.J. (1949) Subsurface exploration and sampling of soils for civil  
engineering purpose.  
U.S. Army Corps of Engineers, Waterways experiment station,  
Vicksburg, Mississippi, USA.
4. KEVERLING BUISMAN, ir. A.S. (1941)  
Grondmechanica;  
Bandoengsche Technische Hogeschoolfonds.
5. DE BEER, E. (1973) Grondmechanica deel IV.  
Standaard Wetenschappelijke Uitgeverij 1973.
6. DIN-norm 18173, Baugrund.  
Untersuchung von Bodenproben.  
Bestimmung der Scherfestigkeit  
Begriffe und grundsatzliche  
Versuchsbedingungen.
7. American Society for Testing and Materials (ASTM) (1964).  
Laboratory shear testing of soils.  
Special Technical Publication 361  
USA, Philadelphia.
8. ASTM (1951) Triaxial testing of soils and bituminous mixtures  
Special Technical Publication 106.
9. LAMBE T.W. (1951) Soil testing for engineers.  
New York, John Wiley and Sons.
10. BENJAMIN J.R., Cornell C.A. (1969)  
Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers  
Mc. Graw Hill. Co., New York.
11. HALD A.  
Statistical Theory with Engineering Application  
John Wiley and Sons, Inc., New York.

De Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen werd door de Minister van Verkeer en Waterstaat ingesteld.

De commissie adviseert de minister omtrent alle technisch-wetenschappelijke aspecten die van belang kunnen zijn voor een doelmatige constructie en het onderhoud van waterkeringen, dan wel voor de veiligheid van door waterkeringen beschermde gebieden.