

NN31545.1906

ICW Nota 1906
september 1988

A

**BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW**



nota

instituut voor cultuurtechniek en waterhuishouding, wageningen

DE INVLOED VAN DE ZUIGSPANNING EN HET VOCHTGEHALTE OP DE
STERKTEPARAMETERS EN DE DEFORMATIES IN ZANDGRONDEN

G. Bakema

Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatie-
middelen, dus geen officiële publikaties.
Hun inhoud varieert sterk en kan zowel betrekking hebben op een
eenvoudige weergave van cijferreeksen, als op een concluderende
discussie van onderzoeksresultaten. In de meeste gevallen zullen
de conclusies echter van voorlopige aard zijn omdat het onderzoek
nog niet is afgesloten.
Bepaalde nota's komen niet voor verspreiding buiten het Instituut
in aanmerking

17 NOV 1988



JSN 207979 *

WOORD VOORAF

Deze nota is geschreven in het kader van een afstudeervak cultuurtechniek aan de Landbouwniversiteit in Wageningen en ze geeft een verslag van onderzoek dat op het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding is verricht.

Het onderzoek vormt een facet van de bepaling van spannings-deformatie relaties in de bodem. Dit is een onderdeel van een langlopend onderzoek naar het oplossen en het voorkomen van het probleem van de bodemverdichting.

Hierbij wil ik iedereen bedanken die aan het tot stand komen van dit onderzoek heeft bijgedragen. In het bijzonder dank ik ir. Jan van den Akker voor zijn waardevolle adviezen.

Guido Bakema
Wageningen, september 1988.

INHOUD

	BLZ
SAMENVATTING	1
1 INLEIDING	2
1.1 Probleemstelling.	2
1.2 Doelstelling.	3
1.3 Methode van onderzoek.	3
2 SPANNINGEN EN DEFORMATIES IN DE BODEM	4
2.1 Inleiding.	4
2.2 Effectieve spanning.	5
2.2.1 Basis principes.	5
2.2.2 De bijdrage van de zuigspanning aan de effectieve spanning.	6
2.2.3 Practische toepassingen.	11
2.3 Critical State Soil Mechanics.	13
2.3.1 Algemene aannames.	13
2.3.2 Toestandsgrenzen.	14
2.3.3 Gedrag van de grond in de C.S.S.M.	16
2.3.4 Practische toepassingen.	19
3 OPZET EN UITVOERING VAN DE PROEVEN	22
3.1 De triaxiaalproef inleiding.	22
3.2 Het triaxiaalapparaat.	22
3.3 De monsters.	23
3.4 De triaxiaalproeven.	24
4 VERWERKING EN ANALYSE	28
4.1 De ruwe gegevens van de triaxiaalproef.	28
4.2 De cohesie en de hoek van inwendige wrijving.	29
4.3 Het vochtgehalte.	31
5 RESULTATEN EN ANALYSE	32
5.1 Zuigspannings-vochtgehalte relatie in de monsters.	32
5.2 Cohesie en hoek van inwendige wrijving.	33
5.3 Spanningen en deformaties.	40
6 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	49
6.1 Conclusies.	49
6.2 Aanbevelingen voor verder onderzoek.	50
7 LITERATUURLIJST	52
BIJLAGE 1 Lijst met gebruikte symbolen.	54
BIJLAGE 2 Spannings-deformatie relaties.	55

SAMENVATTING

Een voortschrijdende mechanisatie en een intensivering van de gewasrotatie zijn er de oorzaak van dat er steeds meer problemen komen die veroorzaakt worden door een te dichte bodem. Om het effect van veldwerkzaamheden op de dichtheid van de ondergrond bij verschillende materieel en bodemeigenschappen te bestuderen is het model SOCOMO (SOil COMpaction MOdel) ontwikkeld. Triaxiaalproeven kunnen dit model voorzien van een spannings-deformatie relatie, die nodig is om een berekende spanningsverdeling om te zetten in een dichtheidsverdeling. De voor dit onderzoek uitgevoerde triaxiaalproeven (op een zwaklemige zandgrond) zijn in eerste instantie gebruikt om de invloed van de zuigspanning in het porienwater op de sterkteparameters cohesie en inwendige wrijving te bestuderen.

De sterkteparameters zijn bepaald met behulp van de breukwet van Coulomb, waarin gesteld wordt dat voor het bezwijken van de grond een kleefkracht en een wrijvingskracht moeten worden overwonnen. De kleefkracht bestaat uit echte cohesie, die in zandgronden veelal gelijk aan nul wordt gesteld, en de schijnbare cohesie, die bestaat uit capillaire bindingen en zuigspanningen in het porienwater.

De met de triaxiaalproef bepaalde cohesie loopt van ca 28 kN/m² bij een zuigspanning van -500 cm H₂O tot ca 15 kN/m² bij een zuigspanning van -50 cm H₂O. De hoek van inwendige wrijving ligt rond de 27° over het gehele beproefde zuigspanningstraject. De met behulp van het werk van Towner en Childs (1972) uitgerekenen schijnbare cohesie kan slechts 10% van de gevonden cohesie verklaren. Een systeemfout is er de oorzaak van dat de cohesie 6 kN/m² te hoog wordt gemeten. Verklaringen voor het overgebleven cohesieverschil, die door nader onderzoek moeten worden gekwalificeerd, kunnen dilatatie en organische stof bindingen zijn.

De spannings-deformatie relatie kan beschreven worden met behulp van de "kritieke toestands grondmechanica", waarin de verandering van het specifiek volume onder invloed van spanningen in de bodem, kan worden voorgesteld door een driedimensionaal coördinatenstelsel. De belangrijkste scheiding in dit stelsel, die een indicatie is voor het mechanische gedrag van de grond, is die tussen het gebied waar de grond sub-kritiek verdicht en het super-kritieke gebied waar de grond uitzet.

De spanningen die op de grond worden uitgeoefend resulteren bij elk gebruikt vochtgehalte in een verkleining van het specifiek volume. Hierbij zorgt het aanbrengen van de celdruk voor de grootste verdichting. Zowel het aanbrengen als het aflatens van de verticale kracht zorgt voor het verdichten van de monsters. Bij een laag volume vochtgehalte (9%) en een lage celdruk (20 kN/m²) wordt de grond losser tijdens het aanbrengen van de verticale kracht. De invloed van het vochtgehalte op de deformaties wordt kleiner naarmate de steundruk hoger wordt. Zoals reeds eerder geconstateerd, kan deze zwaklemige zandgrond als verdichtingsgevoelig worden gekwalificeerd.

1 INLEIDING

1.1 PROBLEEMSTELLING

De bodemverdichting geniet vanuit zowel de agrarische als de onderzoek sector een groeiende belangstelling, omdat er steeds meer problemen komen die worden veroorzaakt door een te dichte bodem.

De oorzaak van de toename van de bodemverdichtingsproblemen moet gezocht worden in een tweetal ontwikkelingen, die zich de laatste twee decennia hebben voorgedaan:

1/ Een voortschrijdende mechanisatie met een grotere wiellast.

2/ Een intensivering van de gewasrotatie.

Veel granen worden vervangen door wortelgewassen en snijmais. Deze gewassen leveren per ha veel meer tonnen produkt, die ook vaak bij nattere omstandigheden moeten worden geoogst.

De wiellasten op de bodem nemen toe waardoor het bodemskelet blijvend wordt samengedrukt, waarbij de weerstand tegen vervorming toeneemt. Ook neemt daardoor het porienvolume af, waarbij vooral de grote poriën verdwijnen. De verdichting kan zo ernstig worden, dat de indringingsweerstand te hoog wordt en/of dat er aeratieproblemen optreden. Ook kan de verticale waterdoorlatendheid te klein worden om bij te natte omstandigheden water af te voeren. Door de grond te bewerken worden de ontstane problemen in de bouwvoor veelal snel opgeheven. Het herstel van de vaak nattere ondergrond is moeilijk en duur, waarbij meestal niet het gewenste resultaat wordt bereikt.

De mate waarin de grond tijdens veldwerkzaamheden verdicht hangt zowel af van het gebruikte materieel (wiellast, bandkarakteristiek) als van de toestand van de bodem (textuur, droog volumegewicht en vochttoestand). Het is niet haalbaar om alle mogelijke combinaties van deze factoren in het veld te bestuderen. Er is daarom naast het veldonderzoek behoefte aan een model, waarin de inputdata bestaan uit zowel materieel- als bodemeigenschappen. Een eerste aanzet tot een model is SoCoMo (Soil Compaction Model), waarin de verdichting van de ondergrond, als resultaat van een opgelegde horizontale en verticale kracht, wordt voorspeld (Van den Akker en Van Wijk 1987). Het eerste resultaat van dit model is de spanningsverdeling in de ondergrond, die met behulp van uit triaxiaalproeven verkregen spannings-deformatie relaties, omgezet kan worden in een dichtheidsverdeling.

1.2 DOELSTELLING

Het doel van dit onderzoek is het verder uitbouwen van de spannings-deformatie relatie. Er zal met name gekeken worden naar de rol van het porienwater op de sterkteparameters (schijnbare cohesie en hoek van inwendige wrijving) van de grond.

De doelstellingen van het langlopend onderzoek naar bodemverdichting op het I.C.W zijn:

- 1/ Het aangeven van werkbare perioden, waarin de ondergrond niet onaanvaardbaar sterk wordt verdicht.
- 2/ Het aandragen van oplossingen waarmee reeds verdichte gronden weer hersteld kunnen worden.
- 3/ Onderzoeken in hoeverre bodemverdichting kan worden voorkomen door bijvoorbeeld brede banden met een lage bandspanning toe te passen.

1.3 METHODE VAN ONDERZOEK

Het onderzoek is tweeledig; aan de ene kant het uitvoeren van een serie samendrukkingsproeven en aan de andere kant, ter ondersteuning van het praktische gedeelte, een studie van reeds bestaande theorieën omtrent spanningen en deformaties in de bodem.

De spannings-deformatie relatie van de grond wordt bepaald met behulp van de triaxiaalproef. Deze proef wordt uitgevoerd met een zandgrond bij verschillende vochtgehalten en steundrukken, waardoor diverse veldsituaties zowel ten aanzien van diepte als vochttoestand worden gesimuleerd. Uit de verkregen gegevens zal de cohesie en hoek van inwendige wrijving worden bepaald, en kan tevens een beeld worden gevormd van de deformaties in de grond tengevolge van de opgelegde spanningen.

In het theoretische gedeelte, genoemd "spanningen en deformaties in de bodem", wordt vooral aandacht geschonken aan de "Critical State Soil Mechanics". Getracht wordt, deze vooral voor verzadigde gronden ontwikkelde theorie, te beschrijven voor onverzadigde gronden. Verder in dit hoofdstuk aandacht voor de invloed die de zuigspanning in het porienwater heeft op de effectieve spanning.

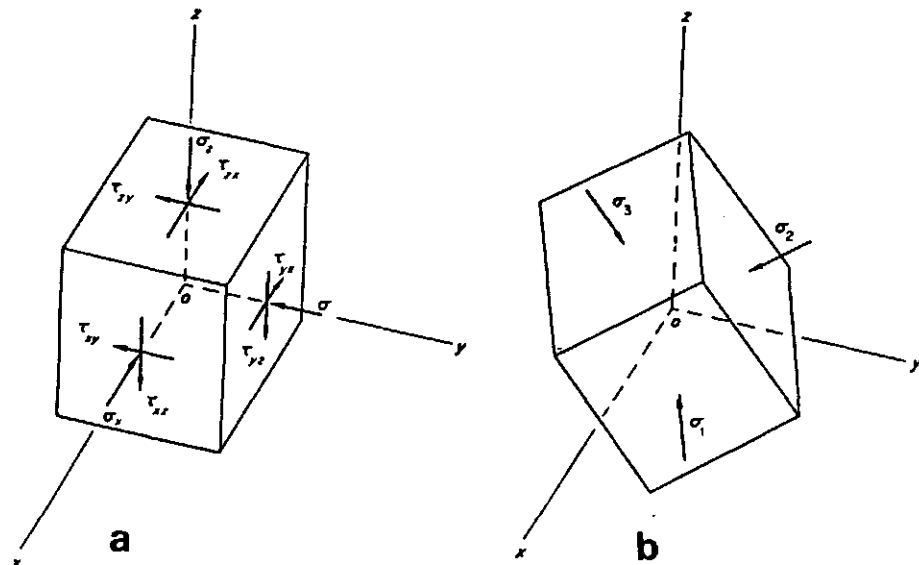
Tot slot worden de met de triaxiaalproef verkregen resultaten vergeleken met de theoretisch bepaalde waarden. Op grond hiervan worden conclusies getrokken en aanbevelingen gedaan voor verder onderzoek.

In bijlage 1 is ter verduidelijking een lijst met gebruikte symbolen te vinden.

2 SPANNINGEN EN DEFORMATIES IN DE BODEM.

2.1 INLEIDING

De spanningstoestand van een punt in de bodem wordt in de spanningsleer veelal beschreven met behulp van een kubus (Koolen en Kuipers 1983). Op deze denkbeeldige kubus staat op elk vlak een spanning, die ontbonden wordt in een component loodrecht op het vlak en twee tangentele componenten, zodanig dat elk evenwijdig aan een coördinaat-as is. Deze spanningen worden respectievelijk de normaalspanning en de schuifspanning genoemd (fig 2.1a). De kubus kan zodanig worden gedraaid, dat alle schuifspanningen nul worden en er alleen nog normaalspanningen op de kubus staan. Deze normaalspanningen worden hoofdspansingen genoemd, waarbij S_1 , S_2 en S_3 (of σ_1 , σ_2 en σ_3) respectievelijk de grootste, middelste en kleinste hoofdspansingen voorstellen (fig 2.1b).



Figuur 2.1 a) Spanningstoestand in een punt b) Hoofdspansingen in dat punt. Bron : Reeve (1970).

Tengevolge van de spanning op de kubus kan deze verdichten, vervormen en/of breken. Deze reactie's op een opgelegde spanning worden beschreven, op een wijze gelijk aan die van de spanningsleer, in de deformatieleer.

Het verband tussen de spanningstoestand en de deformatietoestand wordt beschreven met behulp van

gedragsvergelijkingen. Een methode om gedragsvergelijkingen te beschrijven is de in de jaren 50 door de Soil Mechanics Group Cambridge ontwikkelde kritieke toestands grondmechanica (Critical State Soil Mechanics). Deze theorie gaat uit van effectieve spanningen (korrelspanningen). Bij de bepaling hiervan speelt de porienspanning een belangrijke rol.

2.2 EFFECTIEVE SPANNING

2.2.1 Basis Principes

Het porienvolume in de bodem bestaat uit water en lucht, de spanningen die hierbij horen worden als volgt genoteerd U_w en U_a . De totale grondspanning die in een gegeven richting op elk punt in de bodem werkt, wordt geschreven als σ . Een probleem in de grondmechanica is het vaststellen op welke manier de spanningen in het bodemskelet, de effectieve spanning σ' , aan de drie genoemde spanningen U_w , U_a en σ is gerelateerd.

In geheel droge grond is de effectieve spanning (in het Nederlands ook wel korrelspanning genoemd) gelijk aan de totale grondspanning.

Voor verzadigde gronden stelde Terzaghi (1923) de volgende vergelijking op (de eerste hoofdwet van de grondmechanica) :

$$\sigma' = \sigma - U_w \quad (2.1)$$

Deze vergelijking blijft ook gelden wanneer de waterspanning negatief is, deze gaat hierdoor een positieve bijdrage leveren aan de effectieve spanning. Wanneer er echter lucht in de poriën komt, verandert Terzaghi's vergelijking volgens Bishop (1955) in :

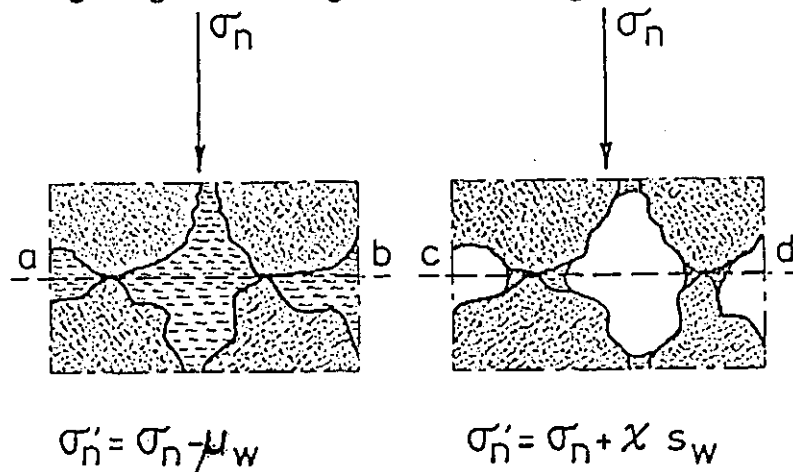
$$\sigma' = (\sigma - U_a) + \chi(U_a - U_w) \quad (2.2)$$

De parameter χ geeft het verschil aan tussen negatieve waterspanning en zuigspanning. De negatieve waterspanning is een spanning, die over het gehele oppervlak van de bodem werkt, terwijl de zuigspanning (s) slechts over een gedeelte actief is (Aitchison 1961). Als referentiespanning wordt vaak de atmosferische luchtdruk genomen. Als de lucht in de poriën in contact staat met de atmosfeer, dan wordt $U_a = 0$ en gaat vergelijking 2.2 over in :

$$\sigma' = \sigma + \chi * s \quad (2.3)$$

Het verband tussen de effectieve spanning en de totale normaal spanning voor verzadigde en onverzadigde gronden is grafische weergegeven in figuur 2.2. Hettiaratchi en O'Callaghan (1980) stelden, met behulp van de resultaten van Jennings (1961), dat de effectieve spanning voor een onverzadigde grond voor alle praktische doeleinden aan de zuigspanning kan worden gelijk gesteld, hierbij de

spanning ten gevolge van het gewicht van de grond verwaarloosend.



Figuur 2.2 Effectieve spanning voor verzadigde (links) en onverzadigde gronden (rechts). Bron: Koolen en Kuipers (1983).

2.2.2 De Bijdrage Van De Zuigspanning Aan De Effectieve Spanning.

De bijdrage van de zuigspanning aan de effectieve spanning wordt aan gegeven met σ'_w . Een eerste benadering is dat de zuigspanning alleen aangrijpt over σ'_w het bodemwater, zodat χ gelijk wordt aan de verzadigingsgraad (S):

$$\sigma'_w = S \left(- \frac{\theta_{\text{sat}}}{\theta_{\text{tot}}} \right) * s \quad (2.4)$$

θ_{tot} - het totale porienvolume, θ_{sat} - het porienvolume gevuld met water.

Voor verzadigde gronden is $S = 1$ zodat $\chi = 1$, waardoor deze hypothese aan de vergelijking van Terzaghi voldoet. Er wordt gesteld dat deze benadering alleen betrouwbaar is voor zandgronden met $S > 0.5$ en kleigronden met $S > 0.9$ (Koolen en Kuipers 1983).

Aitchison (1961) stelde dat de betrouwbaarheid van vergelijking 2.4 wordt verhoogd wanneer er een extra term wordt toegevoegd. Deze term beschrijft de bijdrage die de geleegde poriën aan de effectieve spanning leveren en bestaat uit een oppervlakte spanning tussen het water en de lucht en de zuigspanning, die door die oppervlaktespanning in het geïsoleerde water tussen de contactpunten wordt veroorzaakt.

Om de bijdrage aan de effectieve spanning van het water, dat rond de contactpunten van de korrels blijft zitten, nader te beschouwen, wordt uitgegaan van een geïdealiseerde "grond". Deze "grond" bestaat uit bolletjes met dezelfde diameter en een ideale pakking. Het poriënstelsel van deze "grond" is uniform en heeft een kenmerkende diameter. Bij ontwatering zal deze grond tot een bij die kenmerkende poriëndiameter behorende zuigspanning p_{sd} volledig verzadigd blijven. Wordt de (absolute) zuigspanning s hoger, dan zullen al de poriën tegelijk leeglopen en blijft alleen wat water in de contactpunten tussen de bolletjes over (zie figuur 2.3 a). Dit

resterende water kan alleen door verdamping en diffusie uit de grond verdwijnen.

In figuur 2.3 b is de bijdrage van de waterspanning in de effectieve spanning σ'_w gedeeld door de zuigspanning waarbij de poriën leegstromen p^s_d uitgezet tegen de zuigspanning s_d . Tot $s_d = p^s_d$ is de "grond" volledig verzadigd en $\sigma'_w = s$ ($\chi = 1$). De waarde van σ'_w / p^s_d neemt toe van 0 naar 1,0, totdat $s_d = \sigma'_w = p^s_d$. Hierna stromen de poriën leeg en σ'_w / p^s_d valt terug naar ca 0.3. Deze waarde is gebaseerd op theoretisch onderzoek van Haines (1927). Voor $s_d > p^s_d$ blijft σ'_w / p^s_d bijna constant; de afname van het vochtgehalte wordt ongeveer gecompenseerd door de toename van de zuigspanning.

De waarde van $\chi = \sigma'_w / s_d$ bij toenemende s_d is gegeven in figuur 2.3 c. Tot $s_d = p^s_d$ zijn de poriën volledig gevuld en is $\chi = 1$. Bij $s_d = p^s_d$ valt χ terug tot de door Haines (1927) gevonden waarde van 0.3. Voor $s_d > p^s_d$ neemt χ asymptotisch af naar 0, omdat σ'_w ongeveer constant blijft (zie figuur 2.3 b) bij toenemende s_d . Dit deel van figuur 2.3 c is echter niet relevant omdat χ immers een hulpgrootheid is om σ'_w te berekenen, en uit figuur 2.3 b blijkt dat deze nagenoeg constant is voor $s_d > p^s_d$, zodat kan worden gerekend met :

$$\sigma'_w = 0.3 * p^s_d \text{ voor } s_d > p^s_d .$$

Een echte grond heeft natuurlijk veel meer poriëngroottes en zuigspanningen p^s_d waarbij deze leeglopen. Stel dat bij een zuigspanning i^s_d een deel i van het poriënstelsel leegloopt, waardoor de verzadigingsgraad S terugloopt met ΔS_i . In dat deel i van de grond blijft de bijdrage aan σ'_w constant; $\sigma'_w = 0.3 * i^s_d * \Delta S_i$ analoog aan het gevondene in figuur 2.3 b. Bij toenemende s_d gebeurt hetzelfde met andere delen i van de grond. De effectieve spanning veroorzaakt door het water bij een bepaalde zuigspanning p^s_d en verzadigingsgraad S wordt dan :

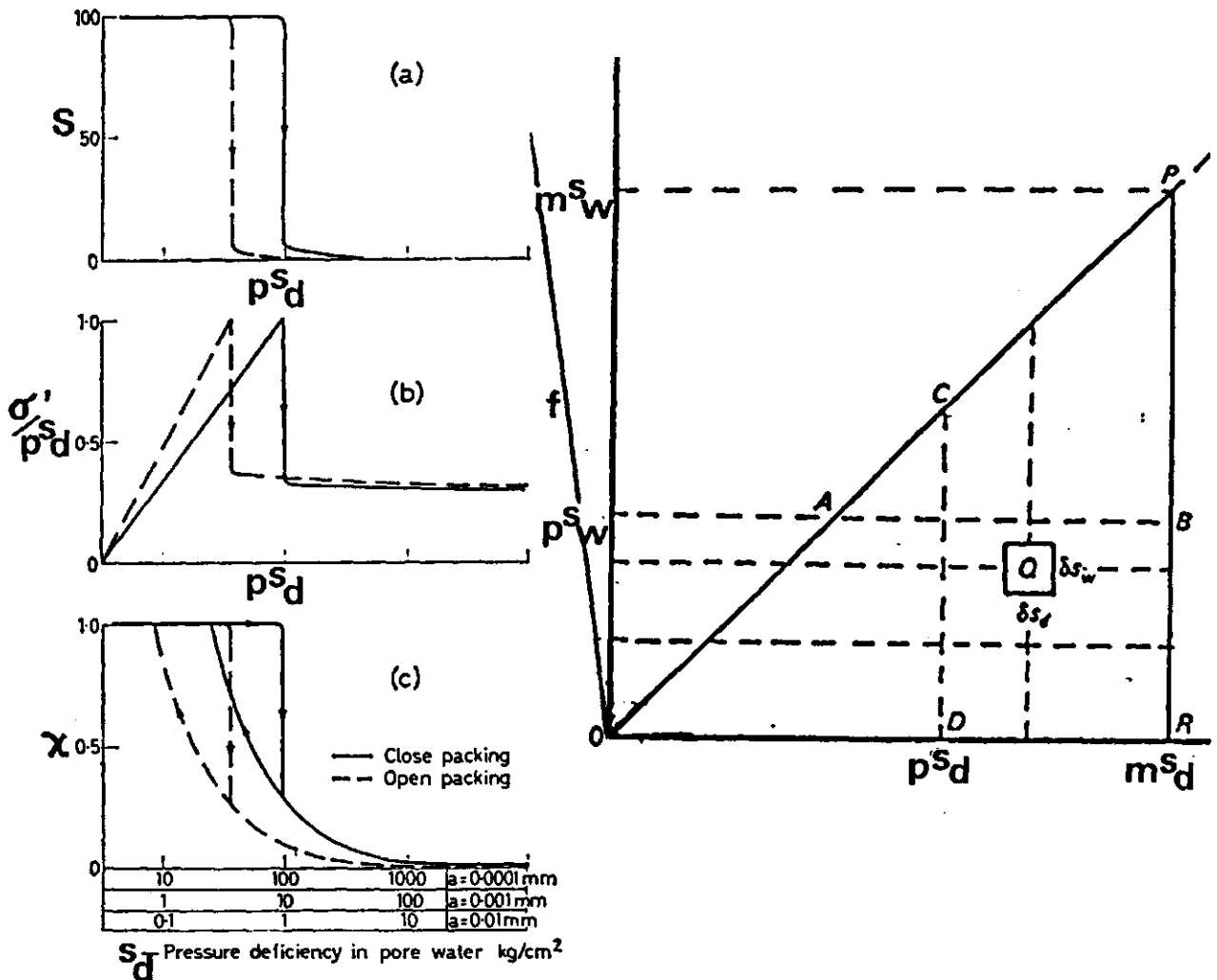
$$\sigma'_w = s * p^s_d + 0.3 \int_s^1 s_d dS. \quad (2.5)$$

Het eerste deel van de vergelijking geeft de bijdrage van de volle poriën waar het water met elkaar in verbinding staat en een zuigspanning p^s_d heeft. Het tweede deel geeft de bijdrage van die delen van de grond waar de poriën zijn leeggestroomd. In de S factor zit ook water dat in de contactpunten en in de geïsoleerde poriën zit. Als S niet te klein wordt is dit deel verwaarloosbaar. Vergelijking 2.5 is alleen geldig bij droging vanaf het verzadigingspunt.

Wanneer de grond opnieuw bevochtigd wordt werkt het hiervoor beschreven proces in omgekeerde richting, waarbij de poriëngeometrie er de oorzaak van is dat er bij eenzelfde zuigspanning een andere verzadigingsgraad ontstaat. Dit proces wordt hysteresis genoemd en wordt kwantitatief beschreven met behulp van de "onafhankelijke domeinen" theorie. Deze theorie levert een beeld op omtrent de wijze van hervullen van de gelegeerde poriën.

In de "onafhankelijke domeinen" theorie gaat Poulouvasilis (1961) er van uit dat de poriën worden opgedeeld in kleine elementen (domeinen). Deze worden gekarakteriseerd door het zuigspanningstraject ds_w waarbij het water het element binnendringt en een zuigspanningstraject ds_d waarbij het water verdwijnt. Zo kan

het gehele porienvolume beschreven worden in een domein diagram (figuur 2.4).



Figuur 2.3 a) relatie zuigspanning-verzadigingsgraad, b) relatie zuigspanning-effectieve spanning gedeeld door de zuigspanning p^s_d waarbij de porien leeglopen, c) relatie zuigspanning- χ , voor een "grond" met een ideale pakking en een uniforme deeltjes grootte (diameter a). Bron: Aitchison (1961).

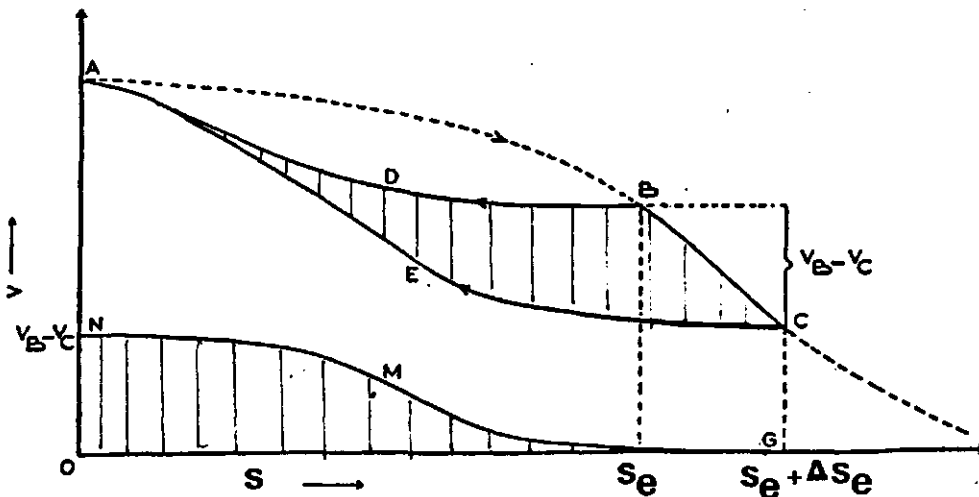
Figuur 2.4 Domein diagram die het proces van droging en bevochtiging weergeeft. d = draineren, w = bevochtigen, Q is een schematische weergave van een domein. F is een functie die de verdeling weergeeft van het porienvolume over de verschillende zuigspanningstrajecten (derde dimensie). Bron: Towner en Childs (1972).

Daar de zuigspanning tijdens bevochtigen nooit groter kan zijn dan de zuigspanning tijdens drogen is het gebied beperkt tot het oppervlak POR. Punt P hoort bij een zuigspanning m^s_d waarbij met normale middelen (geen hoge druk en verdamping) geen vochtverlies meer optreedt. De verdeling van het porienvolume wordt beschreven met een distributiefunctie (f), die de bijdrage bepaalt van een domein

(ds_w, ds_d) tot de verandering van de verzadigingsgraad (vergelijking 2.6). De drogingscycles wordt gekarakteriseerd door een daling van s_d . Bij een bepaalde waarde, stel p^s_d , zijn alle domeinen links van de lijn CD in figuur 2.4, parallel aan de s_w -as en door p^s_d op de s_d -as, leeg en alle domeinen aan de rechter kant zijn nog gevuld. Hetzelfde geldt voor bevochtigen, waarbij de lijn AB de hervulde domeinen bij een zuigspanning p^s_w (boven de lijn AB) scheidt van de domeinen, die nog hervuld zullen worden bij lagere zuigspanningen (onder de lijn AB).

$$dS = f * ds_w * ds_d \quad (2.6)$$

Deze distributiefunctie kan bepaald worden met behulp van scanningscurves. Ze geven het verloop van de vochtspanning bij veranderend watergehalte. Deze curves bewegen zich in het hysteresis oppervlak, dat begrensd wordt door de primaire desorptiecurve (gestreepte lijn in figuur 2.5) en de primaire adsorptiecurve. In figuur 2.5 zijn twee van deze scanningscurves getekend. Curve BDA laat een adsorptiecurve zien waarbij eerst is gedraineerd tot een zuispanning s_e . Curve CEA geeft het zelfde weer alleen nu bij een zuigspanningsverhoging tot $s_e + \Delta s_e$. Hieruit blijkt dat een zuigspanningsverhoging van Δs_e een volume VB-VC draineert. Een zuigspanningsverlaging van Δs_e zorgt er echter niet voor dat dit volume weer geadsorbeerd wordt. Figuur GMN laat zien over welke zuigspanningstrajecten dit volume wel wordt geadsorbeerd. Op deze wijze kan het gehele zuigspanningstraject opgedeeld worden in intervallen.



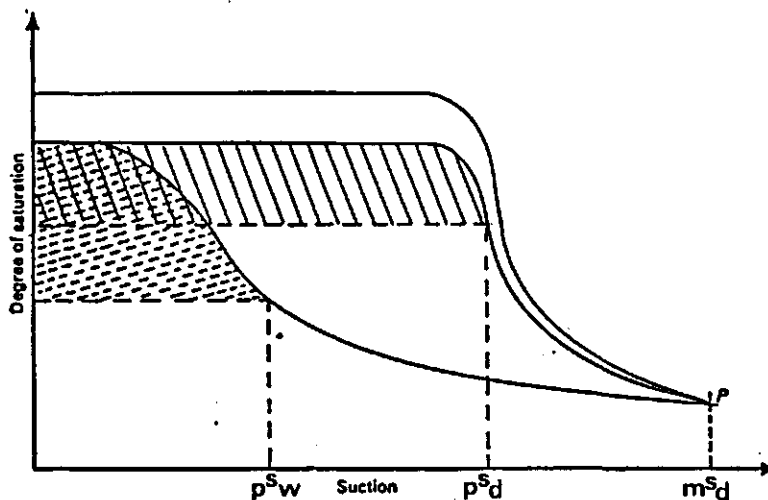
Figuur 2.5 Hypothetische curves, die illustreren op welke manier de verdeling van het water over het porienvolume wordt bereikt door een analyse van de scanningscurves. Bron: Poulouvasilis (1961).

Vergelijking 2.5 kan met deze domeintheorie worden opgelost. Bij een zuigspanning p^s_d corresponderend met de lijn CD in figuur 2.4, wordt de eerste term van vergelijking 2.5 voorgesteld door de domeinen in PCDR. De bijdrage van de geleegde poriën zijn de domeinen in DOC :

$$\int_{s_d}^1 s_d * ds - \int_0^{p^s_d} \int_0^{p^s_w} s_d * f * ds_d * ds_w \quad (2.7)$$

Met behulp van de primaire desorptiecurve (fig 2.6) kan vergelijking 2.5, zonder gebruik te maken van de domeintheorie, direct afgelezen worden. De eerste term wordt gevonden door bij p^s_d de verzadigingsgraad af te lezen, de tweede term is het oppervlak tussen de desorptiecurve en de lijn door het verzadigingspunt (schuingearceerd oppervlak figuur 2.6).

Tot zover was de kennis over de domeintheorie niet noodzakelijk, hiervan wordt echter bij de bevochtigingscyclus wel gebruik gemaakt.



Figuur 2.6 Primaire desorptie en adsorptiecurves die de integralen weergeven die nodig zijn voor het berekenen van de effectieve spanning uit zulke curves. Bron: Towner en Childs (1972)

Tijdens de bevochtiging ligt de grens tussen lege en hervulde domeinen bij een zuigspanning p^s_w op de lijn AB (figuur 2.4) De bijdrage van de hervulde domeinen is het oppervlak ABP:

$$S = \int_{p^s_d}^{m^s_d} \int_{p^s_w}^{m^s_w} f * ds_d * ds_w \quad (2.8)$$

Deze waarde voor S kan echter ook weer direct verkregen worden uit de primaire adsorptiecurve (figuur 2.6). De bijdrage van de lege poriën aan σ'_w wordt bepaald door de domeinen in het gebied BAOR.

$$\sigma'_w = 0.3 * \int_0^{m_d} \int_0^{p_w} s_d * f * ds_d * ds_w \quad (2.9)$$

De zuigspanning van deze domeinen is gerelateerd aan de zuigspanning waarbij ze gelegeerd zijn, hierdoor is deze waarde niet uit de primaire adsorptiecurve te bepalen. Omdat het bepalen van een nauwkeurige distributiefunctie veelal moeilijk is, wordt als benadering wel gebruik van deze curve gemaakt (gebroken arcering figuur 2.6); hierbij worden echter de juiste domeinen gekoppeld aan (lagere) zuigspanningen waarbij ze verzadigd worden. Wanneer de vergelijkingen 2.8 en 2.9 gecombineerd worden ontstaat de σ'_w bij de drogingscycles.

2.2.3 Practische Toepassingen.

Towner en Childs bepaalden de effectieve spanning met behulp van de domeintheorie voor verschillende zuigspanningen voor zowel de primaire adsorptie als de desorptiecurves (figuur 2.7). Bij een lage zuigspanning is de σ'_w nog gelijk aan de zuigspanning waardoor er een lineair verband ontstaat. De rol van de gelegeerde poriën is bij een lage zuigspanning nog gering. Wanneer de zuigspanning wordt verhoogd, vermindert het oppervlak waarover de zuigspanning werkt snel, maar de rol van de gelegeerde poriën wordt echter steeds belangrijker. Het verloop van deze beide termen zorgt ervoor dat er een vochtgehalte is waarbij de sterkte van de bodem het grootst is. De bevochtigingscycles geeft een vergelijkbaar maar minder extreem beeld.

Koolen en Kuipers (1983) gebruikten de χ om de schijnbare cohesie (zie 2.3.) te bepalen. De cohesie vormt een onderdeel van de weerstand van de grond tegen bezwijken (zie 2.3.). De breukwet van Coulomb wordt voor verzadigde gronden geschreven als:

$$\tau = c' + (\sigma - U_w) * \tan \phi' \quad (2.10)$$

Voor onverzadigde gronden wordt deze formule (zie ook vergelijking 2.3):

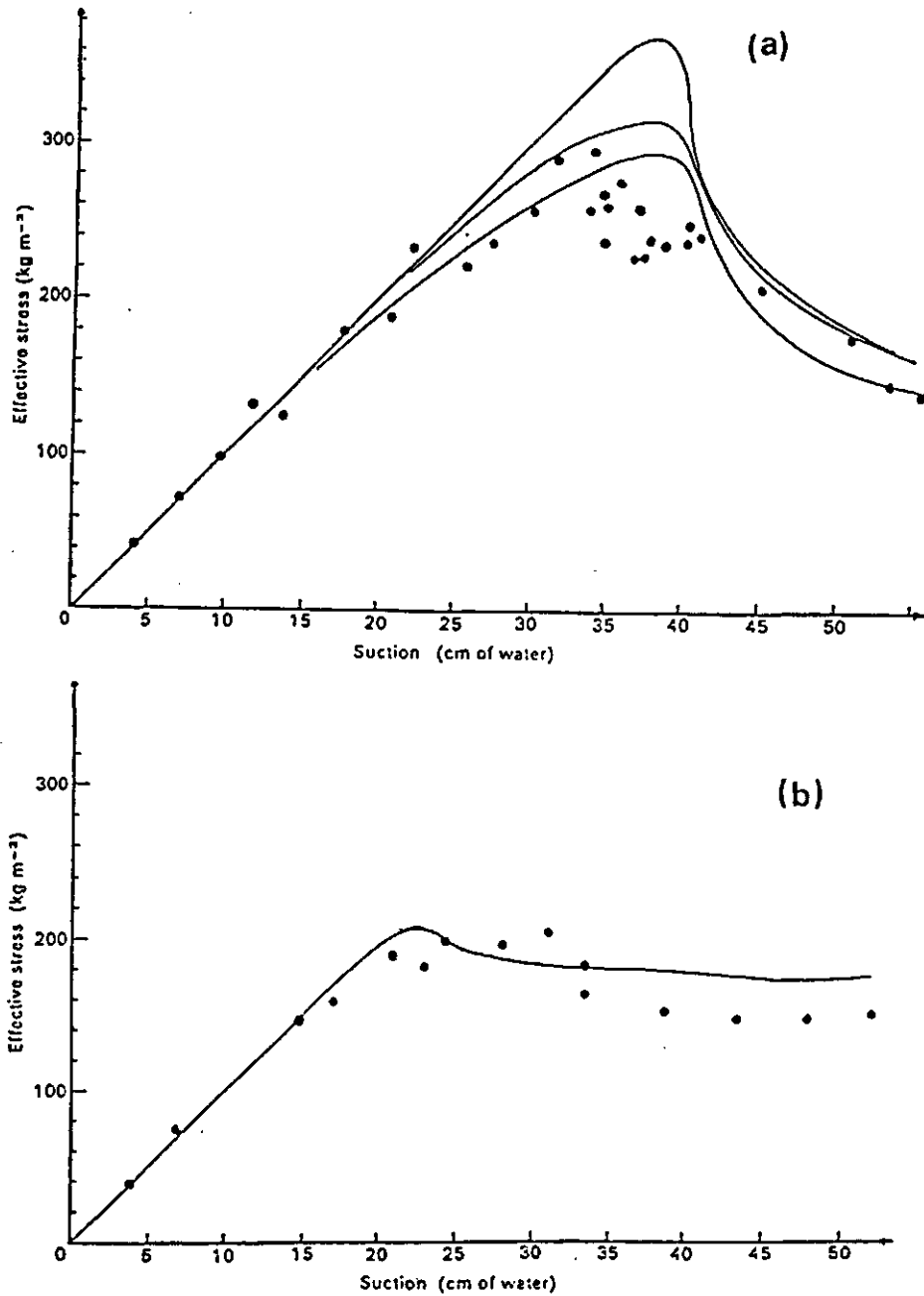
$$\tau = c' + (\sigma + \chi * s) * \tan \phi' \quad (2.11)$$

- c' = werkelijke cohesie.
- ϕ' = werkelijke hoek van inwendige wrijving.
- c = schijnbare cohesie.
- ϕ = schijnbare hoek van inwendige wrijving.

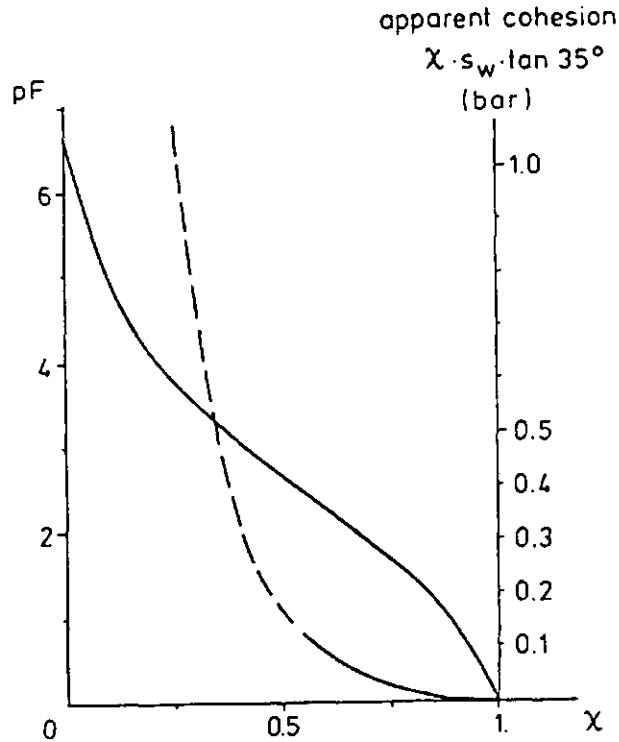
In onverzadigde gronden worden gewoonlijk de schijnbare parameters gebruikt. Vandaar:

$$\begin{aligned} \tau &= c + \sigma \tan \phi & (2.12) \\ \text{--->} \quad \tau &= c' + \chi * s * \tan \phi' + \sigma * \tan \phi \\ \text{--->} \quad c &= c' + \chi * s * \tan \phi \text{ en} \end{aligned}$$

In verzadigd en totaal droog zand kan de werkelijke cohesie aan nul worden gelijk gesteld. Figuur 2.8 geeft de schijnbare cohesie op basis van de PF-curve. Wanneer de ϕ constant verondersteld wordt, kan de schijnbare cohesie geheel bepaald worden als functie van X en s .



Figuur 2.7 Effectieve spanning bij verschillende zuigspanningen theoretisch bepaald (getrokken lijn) en met proeven verkregen (stippen) voor a) drogingscurve en b) bevochtigingscurve. Bron: Towner en Childs (1972).



Figuur 2.8 Berekening van de schijnbare cohesie uit de verzadigingsgraad (S) en de zuigspanning (s). Bron: Koolen en Kuipers (1983).

2.3 CRITICAL STATE SOIL MECHANICS (CSSM)

2.3.1 Algemene Aannames

De oorsprong van dit model is de plasticiteits theorie. De hoofdgedachte van deze theorie, met betrekking tot de bodem, is het feit dat de deformaties een elastische en een plastische component hebben (fig 2.9). Plasticiteit is het verschijnsel waarbij de door spanningen veroorzaakte deformaties na verwijdering van deze spanningen niet verdwijnen.

Een viertal aannames liggen ten grondslag aan de C.S.S.M :

- 1/ De bodem is homogeen en isotroop.
- 2/ Het mechanische gedrag van de bodem is alleen afhankelijk van de effectieve spanning (zie 2.2).
- 3/ De grond wordt bekeken op macroscopische niveau.
- 4/ Het mechanische gedrag is tijdsonafhankelijk.

Gezien de complexiteit van de spannings-deformatie relatie worden er vereenvoudigingen toegepast.

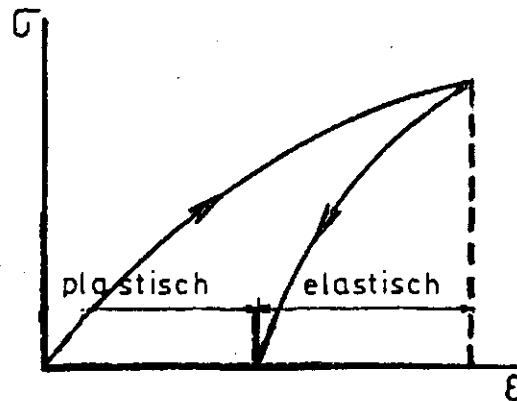
- 1/ Van de deformatietoestand wordt alleen de volumeveranderingen genomen, die worden uitgedrukt in het specifiek volume (reciproke van het droog volumegewicht).
- 2/ De spanningstoestand wordt beschreven met behulp van twee variabelen, die afgeleid zijn van de hoofdspanningen; de gemiddelde hoofdspanning p en de deviator spanning q . Het spannings-ervormingsgedrag van grond wordt vastgesteld met triaxiaalproeven, waarbij $S_2 = S_3$.

$$p = 1/3(S_1 + S_2 + S_3) = 1/3 (S_1 + 2 * S_3) \quad (2.13)$$

$$q = S_1 - S_3 \quad (2.14)$$

- 3/ Hierdoor ontstaat de relatie:

$$v = f (p, q) \quad (2.15)$$



Figuur 2.9 Spannings-tek diagram met schematische de plastische en elastische vervormingen ten gevolge van een opgelegde spanning. Bron : van Smaalen (1980)

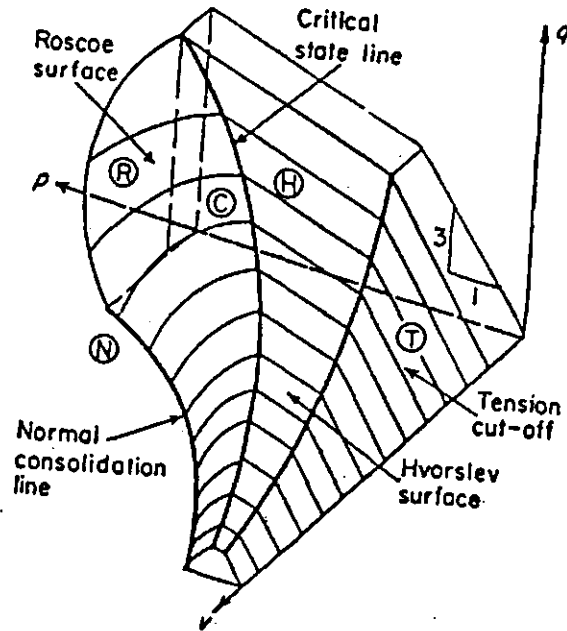
De verandering van het specifiek volume onder invloed van de spanningen in de bodem kan voorgesteld worden met behulp van een driedimensionaal coördinatenstelsel met de assen v , p en q (zie figuur 2.10) . In de praktijk zijn niet alle combinaties v , p , q mogelijk vandaar dat er toestandsgrenzen geformuleerd moeten worden.

2.3.2 Toestandsgrenzen

De kritieke-toestandstheorie stelt dat wanneer grond deformeert onder invloed van een opgelegde spanning, er uiteindelijk een punt bereikt wordt waar, onder continue vormverandering, geen veranderingen in p , q en v meer optreden. De verzameling van deze punten wordt de kritieke-toestandslijn genoemd. Een andere toestandsgrens is de normale consolidatielijn. Deze ligt op het $q=0$ vlak en wordt beschouwd als de variatie van de grootst mogelijke waarde van v bij een bepaalde p tijdens isotrope verdichting van de grond (Hettiaratchi en O'Callaghan 1980). Het oppervlak tussen deze twee lijnen is het Roscoe-surface ; ook wel het verdichtingsoppervlak genoemd (Koolen en Kuipers 1983).

De grond kan geen trekspanningen opvangen vandaar dat de hoofdspanning S_3 niet kleiner dan nul kan zijn. Wordt $S_3 = 0$ ingevuld in vergelijkingen 2.13 en 2.14 dan volgt hieruit dat $q=3p$. Deze

functie beschrijft een toestandsgrensvlak T (tension cut-off surface) lopend vanaf de v-as met een helling van 3:1 (Hettiaratchi 1987). Het oppervlak tussen het Roscoe-oppervlak en het T-oppervlak is het Hvorslev-oppervlak. Dit oppervlak beschrijft de toestand waarbij de bodem juist breekt ; vandaar ook wel het breukoppervlak genoemd (Koolen en Kuipers 1983). Figuur 2.10 geeft een overzicht van de verschillende grensoppervlakken.



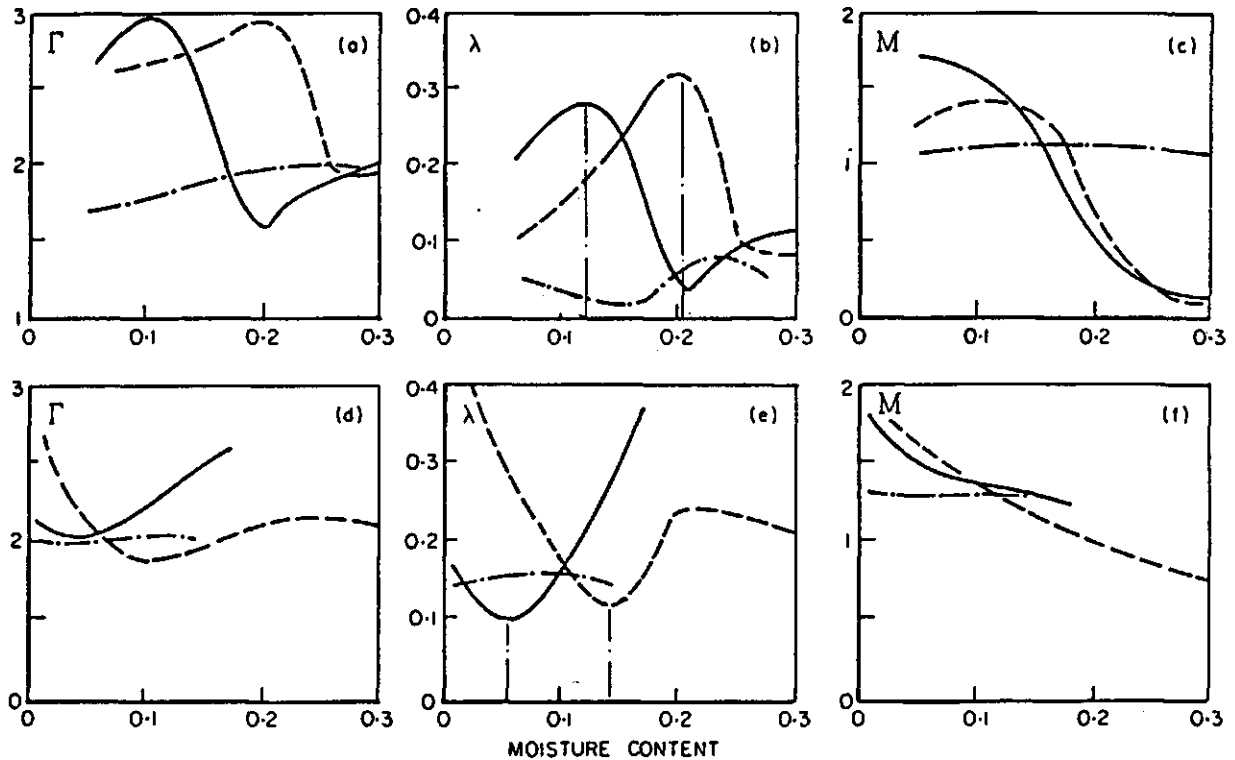
Figuur 2.10 Grensoppervlakken in de v-p-q ruimte en de toestandsgrenzen; Critical state line en Normal consolidation line. Bron: Hettiaratchi en O'Callaghan (1980).

De kritieke toestanslijnen kunnen ook mathematische beschreven worden; geprojecteerd op het $q=0$ vlak en het $v=0$ vlak levert dit respectievelijk :

$$v = \Gamma - \lambda * \ln(p) \quad (2.16)$$

$$q = M * p \quad (2.17)$$

Met behulp van deze drie parameters Γ , λ en M kan worden beschreven hoe de grenstoestandsoppervlakken wijzigen bij verschillende vochtgehaltenes, microstructuren en bodemtypes (figuur 2.11)

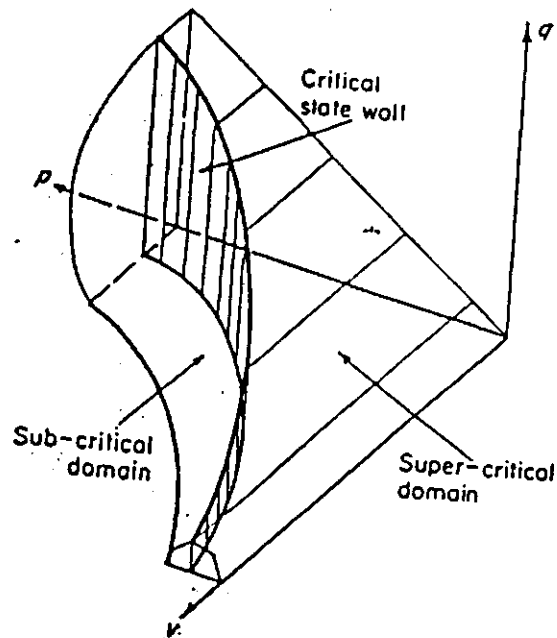


Figuur 2.11 Het verloop van de drie kritieke toestandsparameters onder invloed van het gewichtsvochtgehalte weergegeven voor twee structuurtoestanden (a,b,c: cemented en d,e,f:remoulded) van drie grondsoorten (klei: onderbroken lijn, silt: getrokken lijn en zand: ketting lijn). Bron: Hettiaratchi (1987).

2.3.3 Gedrag Van De Grond In De C.S.S.M.

De wijze waarop de p , q en v veranderen tijdens de spannings toe- en afname wordt beschreven door toestandspaden (state paths). De toestandspaden die lopen in de ruimte, die wordt omsloten door de drie grensooppervlakken, worden gekarakteriseerd door elastische deformaties. Wanneer deze paden de grensooppervlakken raken of doorkruisen worden de deformaties plastische en onherstelbaar. Vooral deze laatste categorie is van belang bij de studie naar verdichting van agrarische gronden (Hettiaratchi en O'Callaghan 1980). De toestandruimte voor een bepaalde grond kan worden verdeeld in twee deelgebieden; het sub-kritieke en het super-kritieke gedeelte, welke worden gescheiden door een verticale "muur" (critical state wall figuur 2.12).

Het sub-kritieke gedeelte (ook wel het "natte" gedeelte genoemd) geldt voor losse gronden (normaal geconsolideerd) bij een relatief hoge $S3/S1$ verhouding voor het belasten van de grond, terwijl het super-kritieke gedeelte (ook wel het "droge" gedeelte genoemd) het gedrag van voorverdichte gronden (over-geconsolideerd) met een relatief lage $S3/S1$ verhouding beschrijft. Figuur 2.13 laat zien dat gronden, wanneer ze belast worden, in het sub-kritieke gedeelte verdichten en in het super-kritieke gedeelte losser worden.



Figuur 2.12 De verdeling van de toestandruimte in het sub-kritieke en het super-kritieke gedeelte met als scheiding de Critical State Wall. Bron: Hettiaratchi en O'Callaghan (1980).

Gronden kunnen het super-kritieke gedeelte alleen bereiken wanneer ze voor-verdicht worden. Dit kan b.v. door (figuur 2.13) de spanning alzijdig te verhogen van a naar 1 , daarna de spanning te verwijderen, waarna de grond terug veert over de lijn lm (swellingsline) in het super-kritieke gedeelte. De lijnen in figuur 2.13 c geven de spannings-rek relatie van de diverse toestandspaden in figuur 2.13 a. Wat opvalt is, dat de lijnen in het super-kritieke gedeelte een piekwaarde hebben waar die bij het sub-kritieke ontbreekt.

De spannings-rek relaties in het sub-kritieke gedeelte kunnen mathematische beschreven worden met de p - q relatie (vgl 2.17) (figuur 2.14). Het moment waarop het verdichtingsoppervlak bereikt wordt, wordt voorgesteld door de curve door P_u en P_v (de elastische muur fig 2.12). Binnen deze curve zijn alle deformaties lineair elastische, daarbuiten zijn ze plastische ("work-hardening" Reeve en Kurtay 1970). Wanneer de kritieke toestand wordt bereikt, worden de deformaties perfect plastisch; dit betekent dat zonder spanningswijziging de deformaties doorgaan.

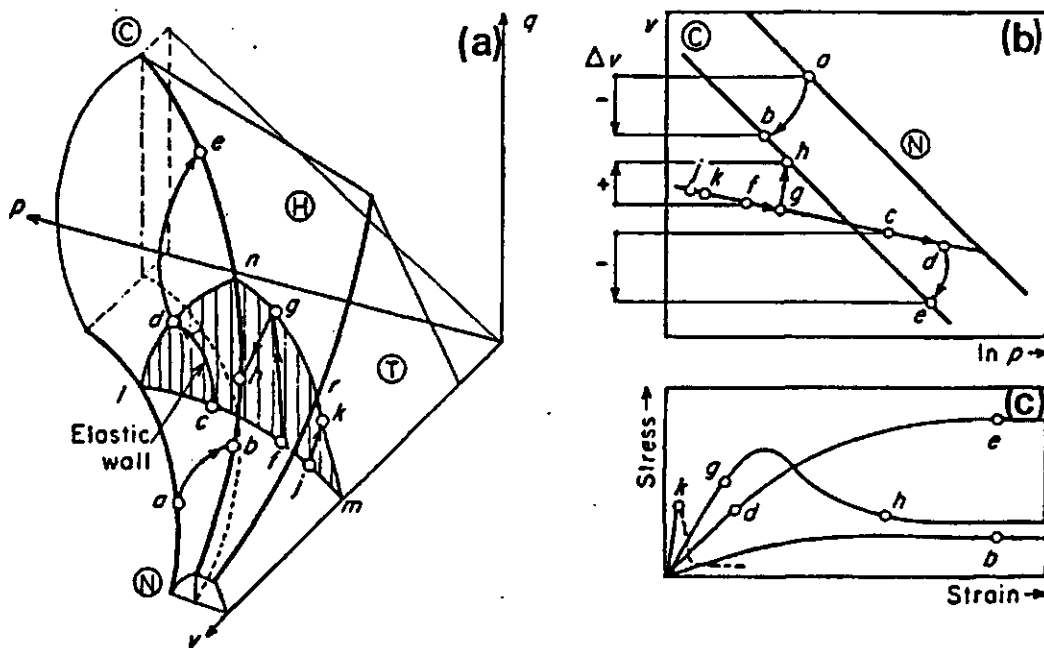
In het super-kritieke gedeelte is een mathematische beschrijving van de spannings-rek relatie niet mogelijk omdat de vervormingen niet gelijkmatig door de bodem plaatsvinden maar geconcentreerd zijn rond de bezwijkoppervlakken. Berekeningen kunnen wel gemaakt worden op het punt waarbij de opgelegde spanning het grootst is. Deze spanningstoestand werd reeds in 1776 door Coulomb beschreven in zijn breukwet (Koolen en Kuipers 1983). Hierin wordt gesteld dat voor breukvorming een schuifkracht nodig is, en wel om de kleefkracht die tussen de deeltjes langs het breukvlak bestaat te overwinnen, alsmede voor het overwinnen van de wrijvingskracht tussen de beide oppervlakken (zie 2.2.3).

De kleefkracht bestaat uit echte cohesie, schijnbare cohesie en haakweerstand. De echte cohesie wordt bepaald door bindingen tussen (Koolen en Kuipers 1983):

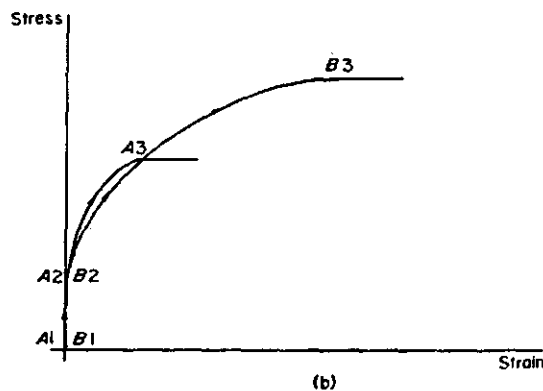
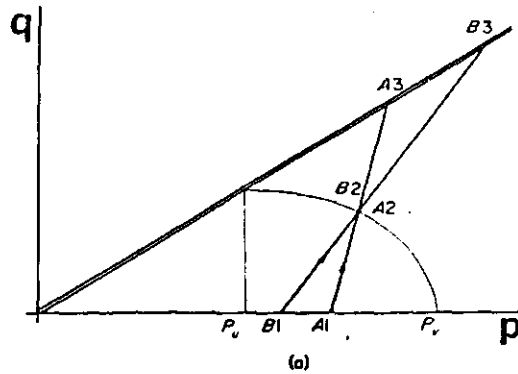
- 1/ de minerale delen
- 2/ de minerale delen en organische stof
- 3/ minerale delen en oxides/hydroxides

De schijnbare cohesie, zo genoemd omdat deze onder water verdwijnt, is een gevolg van capillaire krachten en zuigspanning waardoor extra wrijvingskracht tussen de korrels ontstaat. De haakweerstand ontstaat doordat de korrels als het ware in elkaar grijpen (interlocking).

Na het bereiken van de maximum spanning, daalt de spanning tot een waarde die op de kritieke toestandslijn ligt en zodoende te berekenen is met vergelijking 2.16.



Figuur 2.13 a) Ontwikkeling van verschillende toestandspaden. $-\Delta V$ = verdichting, $+\Delta V$ = uitzetting. b) projectie op het $q=0$ vlak. c) Spannings-tek relaties die geassocieerd zijn met de verschillende toestandspaden. AB: punt a bevindt zich al op het verdichtingsoppervlak en zal tijdens het belasten verdichten totdat punt b op de kritieke toestandslijn wordt bereikt. CDE: van c naar d elastische vervormingen, na het bereiken van het verdichtingsoppervlak bij d worden de deformaties plastische en wordt de grond verdicht. FGH: van f naar g elastische vervormingen, na het bereiken van het breukoppervlak bij g worden de deformaties plastische en wordt de grond losser. Bron: Hettiaratchi en O'Callaghan (1980).

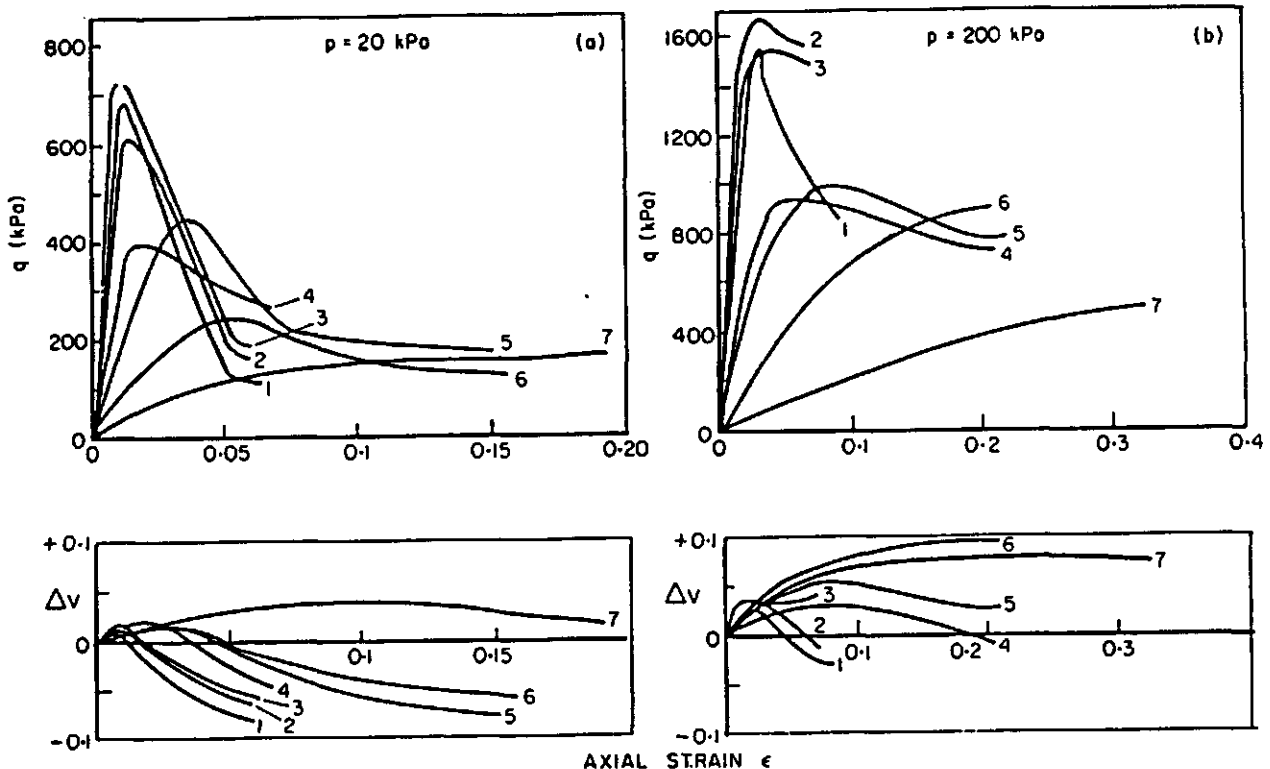


Figuur 2.14 a) Twee toestandspaden in het sub-kritieke gedeelte beginnend bij verschillende waarden voor p , brekend bij dezelfde p, q combinatie en eindigend op de critical state lijn bij verschillende spanningen. b) corresponderende spannings-rek diagrammen. Bron : Reece (1970).

2.3.4 Praktische Toepassingen

Veel onderzoek naar de praktische toepassingen van de C.S.S.M is gedaan op geheel verzadigde of geheel droge grond. De agrarische gronden zijn veelal onverzadigd waardoor het bepalen van de basisparameters wordt bemoeilijkt.

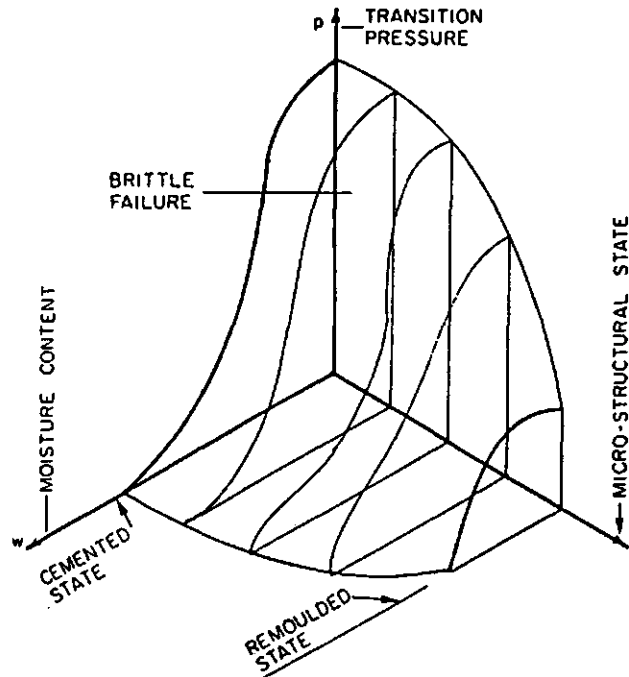
Het is van praktisch belang om de factoren te bepalen, die bijdragen in de verandering van sub-kritiek naar super-kritiek gedrag. Hettiaratchi (1987) voerde triaxiaalproeven uit op series van zeven monsters met elk een ander vochtgehalte (w) waarbij na elke serie de celdruk werd verhoogd. Figuur 2.15 geeft de spannings-rek diagrammen bij celdrukken van respectievelijk 20 kN/m² en 200 kN/m². Bij de lage celdruk verdicht het natste monster (7) sub-kritiek, terwijl de andere monsters uitzetten in het super-kritieke gedeelte. Een verhoging van de celdruk en de gemiddelde hoofdspanning leidt er toe dat de monsters 5 en 6 ook worden verdicht. Hieruit blijkt dat de ondergrond (hoge p) sneller verdicht dan de bovengrond bij eenzelfde vochtgehalte.



Figuur 2.15 Spanning-rek relaties op zavelgronden bij celdruk (a) 20 kN/m² en (b) 200 kN/m². Gewichtsvochtgehaltes (1)=0, (2)=0.03, (3)=0.044, (4)=0.086, (5)=0.1, (6)=0.12, (7)=0.142. Volumeverandering: $+\Delta v$ = verdichting, $-\Delta v$ = uitzetting. Bron: Hettiaratchi (1987).

Het blijkt dat er combinaties van de gemiddelde hoofdspanning p en het watergehalte w bestaan waar het super-kritieke gedrag juist verandert in sub-kritiek gedrag. In figuur 2.16 zijn voor twee micro-structurele toestanden (en enkele hypothetische structuur toestanden) alle mogelijke combinaties p, w getekend, waarbij deze verandering optreedt.

Het gebied ingesloten door het oppervlak in figuur 2.16 beschrijft het gebied waar de grond zich super-kritiek gedraagt. Dit kan een leidraad zijn om gronden te classificeren naar hun mechanische gedrag. Hoe groter dit oppervlak hoe gemakkelijker de grond te bewerken is. Het diagram kan ook een hulpmiddel worden bij de beslissing bij welk vochtgehalte bepaalde werkzaamheden kunnen worden uitgevoerd (Hettiaratchi 1987).



Figuur 2.16 Schematische diagram van alle combinaties p, w bij twee structuurtoestanden (cemented en remoulded) waarbij super-kritiek gedrag gaat optreden. De micro-structuur-as is arbitrair gekozen om de tussen liggende toestanden te kunnen aangeven. Bron: Hettiaratchi (1987).

3 OPZET EN UIVOERING VAN DE PROEVEN.

3.1 DE TRIAXIAALPROEF INLEIDING.

De triaxiaalproef is een in de civiele techniek veel gebruikte methode om vervormingen en afschuifsterkte van veelal verzadigde gronden te bepalen. Meestal wordt een maximale sterkte, een bezwijksterkte gezocht en geen gedragsbeschrijving onder invloed van belastingen (Boels 1974).

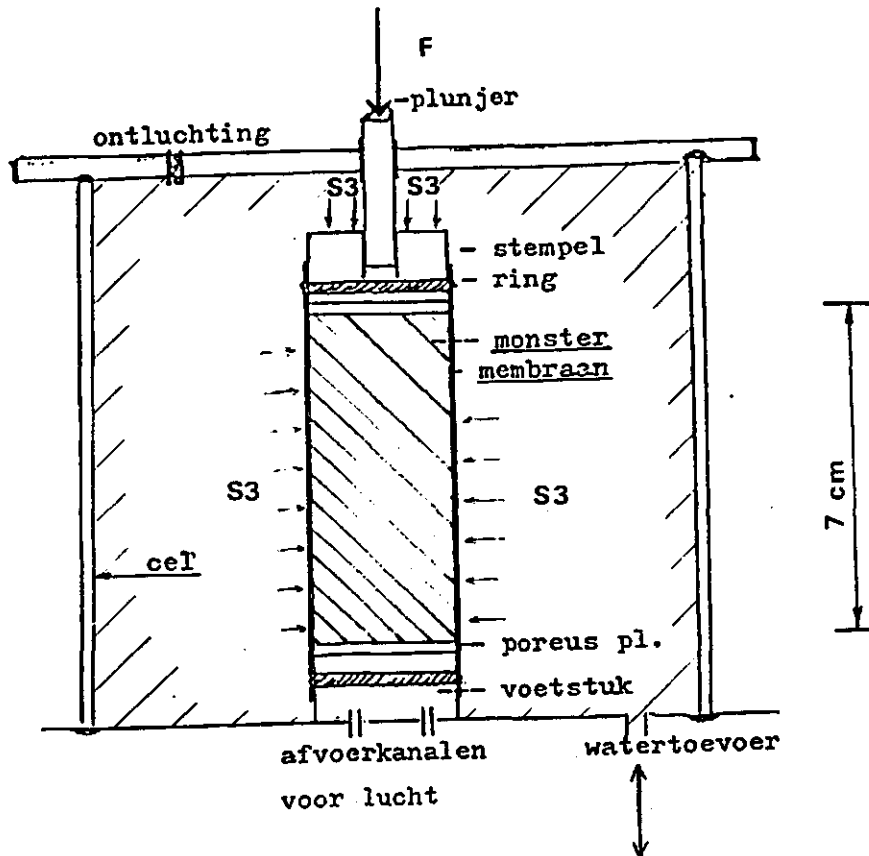
In de landbouw is men ook geïnteresseerd in de sterkte omdat bij overschrijving van die sterkte plastische vervormingen kunnen optreden die zo groot zijn dat door versmering en/of verdichting de gewasproductie nadelig wordt beïnvloed. Ook voor het bepalen van de vervormingsparameters kan de triaxiaalproef gebruikt worden.

3.2 HET TRIAXIAALAPPARAAT.

Het triaxiaalapparaat kan omschreven worden als een cilindrisch, volledig afsluitbaar en veelal doorzichtig vat (figuur 3.1). In dit vat kan een grondmonster, dat omsloten is door een ondoorlatend rubber membraam en twee poreuse plaatje worden geplaatst.

Door het vat te vullen met ontlucht water kan er een alzijdige druk op het monster worden uitgeoefend. Met behulp van een pomp kan deze druk tot elk gewenst niveau worden verhoogd. De drukverandering in de cel wordt gemeten met een drukopnemer. De grond kan vertikaal belast worden door een hydraulisch aangedreven plunjer, die via een stempel op het monster valt. De kracht wordt gemeten met behulp van rekstrookjes op een stalen meetring. De verticale kracht veroorzaakt een verandering van het volume van het monster die bepaald kan worden door de hoeveelheid in- of uitstromend water te meten. Deze hoeveelheid wordt geregistreerd met behulp van een verplaatsingsopnemer op een vlottertje op een, met het water in verbinding staand, kwikniveau. De verkorting van het monster tijdens de samendrukking wordt bepaald door met een verplaatsingsopnemer de verplaatsing van de plunjer te meten.

Om te voorkomen dat het water en/of de lucht in het monster tijdens het samendrukken spanningen gaan opvangen, worden deze via het poreuse onderplaatje in verbinding gebracht met de buitenlucht.



Figuur 3.1 Principe van het triaxiaalapparaat.

3.3 DE MONSTERS.

De monsters worden gemaakt van zwaklemig, fijnzandig zwarte enkeerdgrond (StiBoKa-eenheid zEZ21g) uit Westerhoven (N-B) (Giesbers 1985). De textuursamenstelling van deze grond is: 2.65 % lutum (0-2 μm), 15.15 % silt (2-50 μm), 46.87 % fijn zand (50-150 μm), 34.83 % grof zand (150-2000 μm) en 0.5 % grind (>2000 μm). Vanwege zijn verdichtingsgevoeligheid is deze grond reeds als basis gebruikt voor diverse verdichtingsproeven.

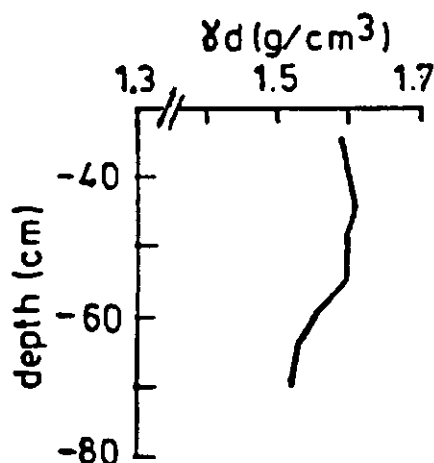
De monsters worden voorverdicht tot een droog volumegewicht van 1.5 g/cm³. Deze waarde (zie fig 3.2) is gebaseerd op dichtheden zoals die in de ondergrond voorkomen en waarbij nog beworteling mogelijk is (Van den Akker 1988). De hoeveelheid grond die nodig is om deze dichtheid te bereiken, kan berekend worden met behulp van het gewichtsvochtgehalte (w) en het volume van het te verdichten monster (vergelijking 3.1). Het te verdichten monster, dat omsloten wordt door een dun stevig plastic folie, krijgt een volume van 72270 mm³ (71 mm hoog en een straal van 18 mm).

$$\text{Hoeveelheid grond} = (1.5 + 1.5 * w) * 72.27 \quad (\text{gram}) \quad (3.1)$$

Het monster wordt in vijf lagen opgebouwd, zodat er een evenwichtige dichtheidsverdeling ontstaat. De grond wordt daarbij met een stempel aangedrukt. Om een scherpe scheiding tussen de lagen te voorkomen wordt de bovenste millimeter van het verdichte laagje weer los gemaakt.

De verdichte monsters worden verzadigd waarna ze op een PF-bak

met een onderdruk van 50 cm worden gezet. Een deel van de monsters wordt, nadat ze in evenwicht zijn, uitgedroogd door een onderdruk van 100 of 500 cm. Een aantal van deze monsters wordt daarna onderworpen aan een hernieuwde bevochtiging door ze te plaatsen op een PF-bak met een onderdruk van 100 of 50 cm. De invloed van hysteresis op de bodemsterkte parameters kan op deze manier worden bestudeerd (zie 2.2.2.)



Figuur 3.2 Droge volumegewicht als functie van de diepte (in het veld gemeten). Bron: Van den Akker en Van Wijk (1987).

3.4 DE TRIAXIAALPROEVEN.

De triaxiaalproeven kunnen op verschillende wijze worden uitgevoerd, waarbij veelal de volgende parameters worden gevarieerd.

- 1/ Gedraineerd of ongedraineerd.
- 2/ De dichtheid van het monster.
- 3/ De snelheid van verdichten.
- 4/ Voorgeschiedenis betreffende de zuigspanning van het monster.
- 5/ De steundruk.
- 6/ De wijze van belasten.

Het water en de lucht kunnen via het poreuse onderplaatje ontsnappen waardoor deze geen spanningen kunnen opvangen, m.a.w. het monster wordt gedraineerd.

De monsters hebben een droog volumegewicht van 1.5 g/cm³. De snelheid van samendrukken is ca 2.4 mm/min. Om het samendrukingsproces goed te kunnen volgen is gekozen voor een lagere verdichtingssnelheid dan die welke in de praktijk voor komt.

Er is getracht zuigspanningen te simuleren welke ook in het veld in het voor- en najaar worden gemeten (ca pF=2). De monsters worden in vijf zuigspanningsklassen ingedeeld, waarbij de voorgeschiedenis een belangrijke rol speelt:

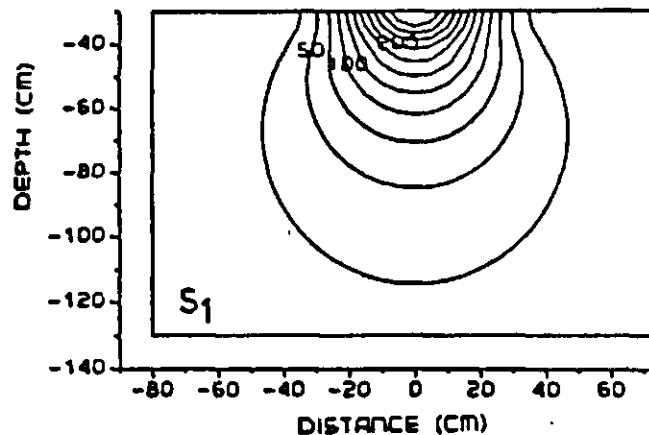
- 1/ Oorspronkelijk vochtgehalte -->verzadigd --> 50 cm onderdruk.
- 2/ Oorspronkelijk vochtgehalte -->verzadigd --> 100 cm onderdruk.
- 3/ Oorspronkelijk vochtgehalte -->verzadigd --> 500 cm onderdruk.
- 4/ Oorspronkelijk vochtgehalte -->verzadigd --> 500 cm --> 100 cm onderdruk.
- 5/ Oorspronkelijk vochtgehalte -->verzadigd --> 500 cm --> 50 cm onderdruk.

De steundruk, die in de praktijk nodig is om bezwijken te voorkomen kan worden bepaald met behulp van de Mohr-Coulomb vergelijking :

$$S_3 = k * S_1 - 2 * c * \sqrt{k} \quad (\text{kN/m}^2) \quad (3.2)$$

$k = \tan^2 (45 - \phi/2)$.
 $c = \text{cohesie}$
 $\phi = \text{hoek van inwendige wrijving}$

Uit berijdingsproeven is gebleken dat recht onder een band (40 cm breed) op 30 cm diepte bij een wiellast van 32 kN de S_1 een waarde van 250 kN/m² heeft. Op 70 cm onder de band heeft de S_1 een waarde van 100 kN/m². De met het model SoCoMo berekende hoofdspansing S_1 geeft vergelijkbare waarden (Van den Akker en Van Wijk 1987 figuur 3.3)



Figuur 3.3 Hoofdspansingen S_1 loodrecht op de rijrichting berekend met behulp van het model SoCoMo. Bron Van den Akker en Van Wijk (1987).

Deze berekende hoofdspansingen ingevuld in vergelijking 3.2 levert, samen met de reeds bij eerdere proeven bepaalde $c = 6 \text{ kN/m}^2$ en $\phi = 31^\circ$ de volgende waarden voor S_3 ; $S_1 = 250 \text{ kN/m}^2 \rightarrow S_3 = 73.2 \text{ kN/m}^2$ en $S_1 = 100 \text{ kN/m}^2 \rightarrow S_3 = 25.2 \text{ kN/m}^2$. Bij de uitvoering van de proeven is met het oog op deze drukken gekozen voor drie verschillende steundrukken resp 20, 50 en 100 kN/m².

De monster worden volgens drie belastingsschema's samengedrukt (figuren 3.4). Bij alle drie wordt er eerst een celdruk, die ook verdichting veroorzaakt, aangelegd. Het eerste schema (fig 3.4a) voorziet in verhoging van de verticale spanning totdat het monster 2.8 mm is verkort. De waarde van 2.8 mm is gebaseerd op eerder uitgevoerde berijdingsproeven waaruit blijkt dat de relatieve vervorming op 70 cm diepte 4% bedraagt (v.d Akker 1988). Veelal wordt de grond onderworpen aan een herhaalde belasting (b.v meerdere

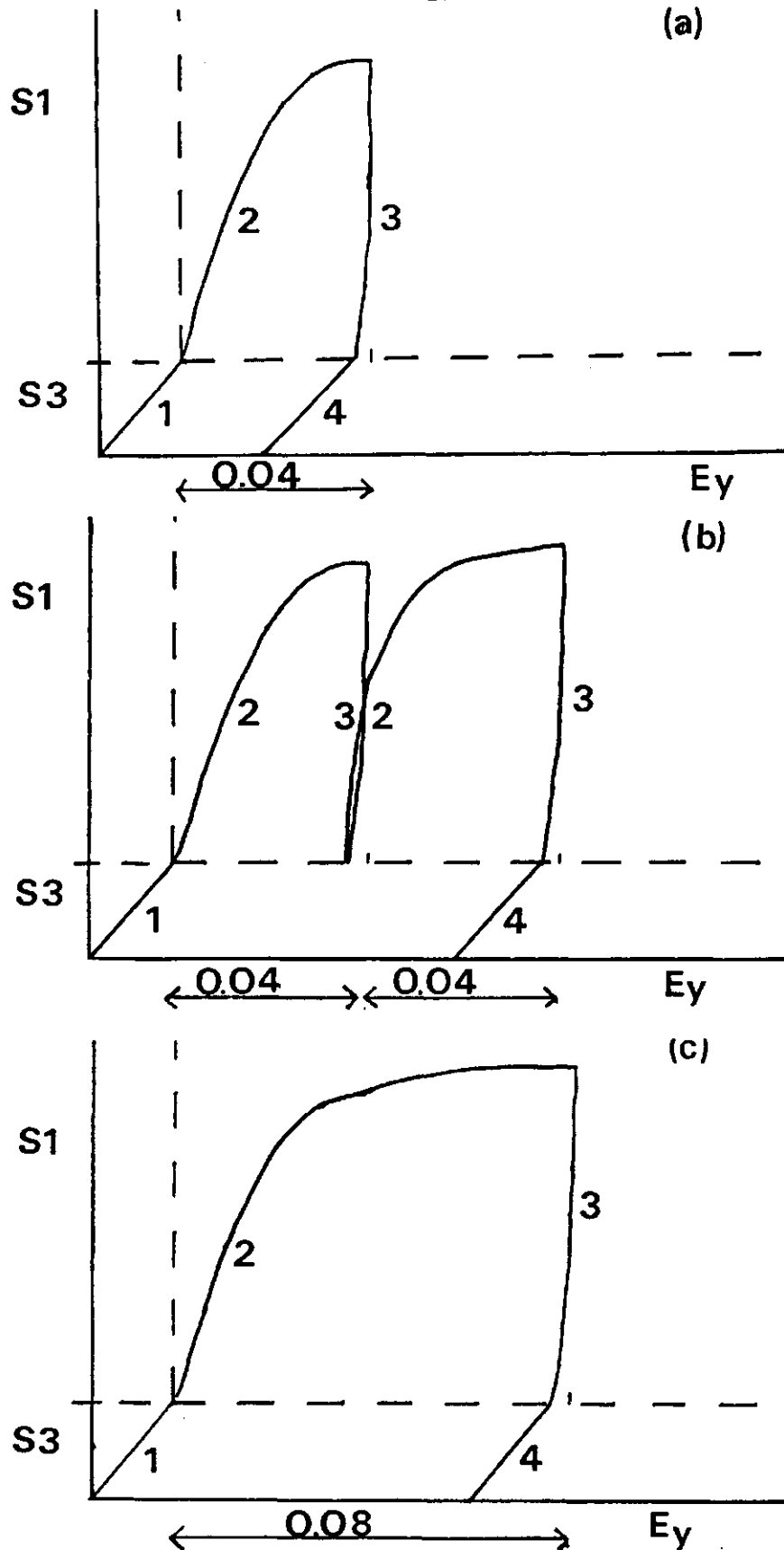
banden). Dit wordt gesimuleerd door het tweede belastingschema (fig 3.4b) ; hierin wordt de verticale druk opnieuw verhoogd totdat er weer een verplaatsing van 2.8 mm is opgetreden.

In het verdere verloop van het onderzoek naar ondergrondverdichting zullen proeven worden gedaan volgens schema drie (fig 3.4c) waarbij de verticale spanning wordt verhoogd totdat het monster 5.6 mm is verkort. Het laatste onderdeel van de proef bestaat bij alle drie de schema's uit het aflaten van de celdruk. Het proevenschema ziet er samengevat als volgt uit (tabel 3.1).

Tabel 3.1 Schema uitvoering triaxiaalproef

celdruk kN/m ²	zuigspanning cm H ₂ O				
	-50	-100	-500	-100*	-50*
20	-50	-100	-500	-100*	-50*
50	-50	-100	-500	-100*	-50*
100	-50	-100	-500	-100*	-50*

* Deze monsters zijn bevochtigd vanaf -500 cm onderdruk.
Alle proeven worden uitgevoerd met belastingschema 1 en 2.



Figuur 3.4 Schematische weergave van de drie te gebruiken belastingsmethoden. 1- aanbrengen celdruk 2- aanbrengen verticale kracht 3- wegnemen verticale kracht 4- aflaten celdruk.

4 VERWERKING GEGEVENS.

4.1 DE RUWE GEGEVENS VAN DE TRIAXIAALPROEF.

De grootheden verticale kracht, celdruk, volumeverandering en de verticale verplaatsing worden gemeten als spanningsverschillen. Door voor elke grootte een ijklijn te bepalen kan een verband gevonden worden tussen de gemeten volts en de werkelijke eenheden van de grootheden.

De vergelijkingen van de diverse ijklijnen zijn bepaald op:

1/ De verticale kracht.

Door het niet-lineaire verloop van de kracht bij lage voltages wordt de ijklijn gesplitst.
< 16.92 V

$$F = -0.0248014 X^2 + 5.6387 X + 0.27 \quad (N) \quad (4.1)$$

> 16.92 V

$$F = 4.8864 X + 5.93 \quad (N) \quad (4.2)$$

2/ De celdruk.

$$S_3 = 14.36 X \quad (kN/m^3) \quad (4.3)$$

3/ De volumeverandering.

$$V = 0.141123 X^3 + 0.3501 X^2 + 213.96 X - 5565.81 \quad (mm^3) \quad (4.4)$$

4/ De verticale verplaatsing.

$$Y = 0.4595 X \quad (mm) \quad (4.5)$$

Ten gevolge van de waterverplaatsing van de in de cel binnendringende plunjer, moet de volumeverandering worden gecorrigeerd:

$$\begin{aligned} \text{Werkelijke } V &= \text{gemeten } V - Y * O && (mm^3) \quad (4.6) \\ O &= \text{plunjer oppervlak } (71.93 \text{ mm}^2). \end{aligned}$$

Een andere correctie die op de volumeverandering moet worden toegepast is nodig omdat tijdens het oppompen de cel gaat uitzetten waardoor er extra water naar de cel toestroomt:

$$\text{Werkelijke } V = \text{gemeten } V - (-0.1214 X^2 + 46.01 X + 93.36) \text{ (mm}^3\text{)} \quad (4.7)$$

X = celdruk (kN/m²)

De gemeten verticale kracht moet worden omgerekend naar de grootste hoofdspanning S_1 . Het monsteroppervlak waarover de kracht werkt verandert tijdens het samendrukken volgens vergelijking 4.8.

$$A = (V_o + V(I)) / (H_o - Y(I)) \quad (\text{mm}^2) \quad (4.8)$$

A = monsteroppervlak

V_o = volume monster na verhoging van de celdruk

$V(I)$ = volumeverandering over de tijdstap I

H_o = beginhoogte

$Y(I)$ = verticale verplaatsing over de tijdstap I

De grootste hoofdspanning krijgt, nadat ook de bijdrage van de celdruk is bepaald, de volgende vorm:

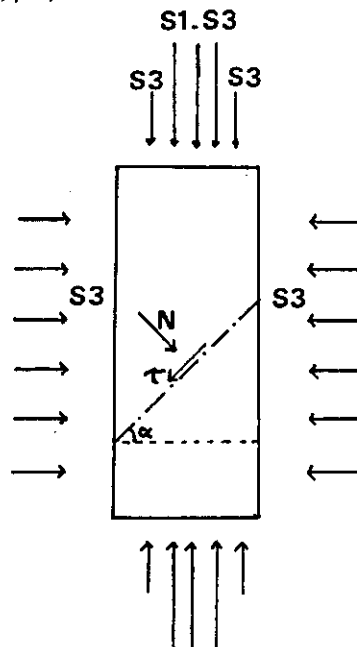
$$S_1 = (S_3 * (A - 71.93) + 1000 * F) / A \quad (\text{kN/m}^2) \quad (4.9)$$

4.2 DE COHESIE EN DE HOEK VAN INWENDIGE WRIJVING.

De cohesie en hoek van inwendige wrijving worden bepaald met behulp van de breukwet van Coulomb (zie vgl 2.17). De schuifspanning (τ) en de normaalspanning (N) worden gevormd door de resultante van alle spanningen die op het monster werken (figuur 4.1). In formule vorm:

$$N = (S_1 + S_3)/2 + ((S_1 - S_3)/2) * \cos^2 \alpha \quad (\text{kN/m}^2) \quad (4.10)$$

$$\tau = ((S_1 - S_3)/2) * \sin \alpha \quad (\text{kN/m}^2) \quad (4.11)$$

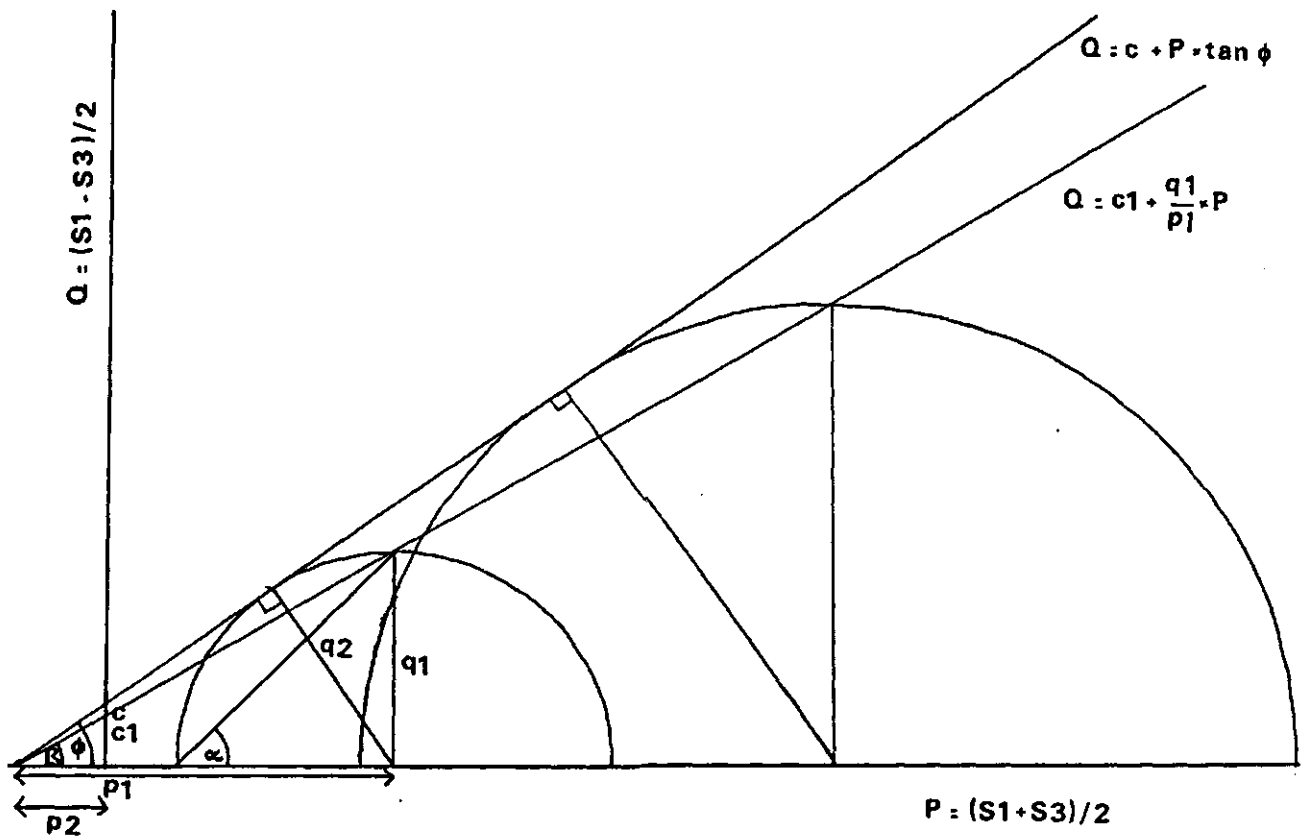


Figuur 4.1 Schematische voorstelling van de spanningen die werken op het monster tijdens de samendrukkingsproef. Het breukvlak wordt voorgesteld door de stippellijn.

Deze formules vormen de vergelijking van een cirkel met straal $(S_1 - S_3)/2$ en een middelpunt op de P-as op een afstand $(S_1 + S_3)/2$ van de oorsprong (cirkel van Mohr). De richtingscoëfficiënt van de raaklijn aan de cirkels levert de hoek van inwendige wrijving, terwijl de cohesie wordt voorgesteld door het deel van de lijn dat de raaklijn van de Q-as afsnijdt. Deze grafische methode is niet erg nauwkeurig, vandaar dat er een analytische methode is gebruikt, waarbij de cirkels van Mohr als basis dienden.

Met behulp van lineaire regressie wordt door alle punten $P = (S_1 + S_3)/2$; $Q = (S_1 - S_3)/2$ een lijn getrokken. Deze vergelijking (4.12) moet, om een cohesie en een hoek van inwendige wrijving te bepalen, worden getransformeerd tot een raaklijn aan de cirkels (fig 4.2).

$$Q = c_1 + (q_1/p_1) * P \quad (4.12)$$



Figuur 4.2 Grafisch-analytisch bepaling van de cohesie en hoek van inwendige wrijving met behulp van de cirkels van Mohr.
 $\beta = \arctan(q_1/p_1)$, $q_1 - q_2 \rightarrow \phi = \arcsin(q_1/p_1)$.
 $p_2 = c_1 / (q_1/p_1)$, $\tan \phi = c/p_2 \rightarrow c = p_2 * \tan \phi$.

4.3 HET VOCHTGEHALTE.

Van elk monster wordt het volume vochtgehalte voor en na de proef bepaald. Na de triaxiaalproef kan het monster of een deel ervan worden gedroogd, zodat het volume vochtgehalte op de standaard manier kan worden bepaald. Het resultaat wordt het gravimetrische volume vochtgehalte genoemd.

$$\theta = \frac{G(\text{nat}) - G(\text{droog})}{G(\text{droog})} * \frac{\rho_d}{\rho_w} \quad (4.13)$$

Voor de proef kan het volume vochtgehalte ook worden bepaald uit het gewicht van het (natte) monster omdat het volume ($V = 72.27 \text{ cm}^3$) en het droog volumegewicht (1.5 g/cm^3) bekend zijn.

$$\theta = \frac{\frac{G(\text{nat})}{V} - \rho_d}{\rho_w} \quad (4.14)$$

Het resultaat is het volumetrische volume vochtgehalte.

5 RESULTATEN EN ANALYSE.

5.1 DE ZUIGSPANNINGS-VOCHTGEHALTE RELATIE IN DE MONSTERS.

In tabel 5.1 staan de volume vochtgehaltenes, die behoren bij de opgelegde zuigspanningen, uitgerekend volgens de gravimetrische en de volumetrische methode. De gebruikte monsters zijn 7.1 cm hoog, vandaar dat de gemiddelde zuigspanning 3.5 cm groter wordt verondersteld dan de zuigspanning op de pF-bak.

Tabel 5.1 Vochtgehaltebepaling monsters

		gravimetrisch		volumetrische		verschil	
s	pF	θ	standd	θ	standd	in gram	
(cm H ₂ O)			afwijk		afwijk	water	
- 3.5	(1)	0.5441	0.3536	-	-	-	-
- 3.5 *	(1)	0.5441	0.3292	-	-	-	-
- 53.5	(2)	1.7284	0.1984	0.0013	0.2029	0.0039	0.0045
- 53.5 *	(2)	1.7284	0.1482	0.0034	0.1483	0.0049	0.0001
- 103.5	(2)	2.0149	0.1378	0.0009	0.1408	0.0029	0.0030
- 103.5*	(2)	2.0149	0.1186	0.0024	0.1234	0.0045	0.0048
- 503.5	(2)	2.7020	0.0977	0.0010	0.0992	0.0030	0.0015

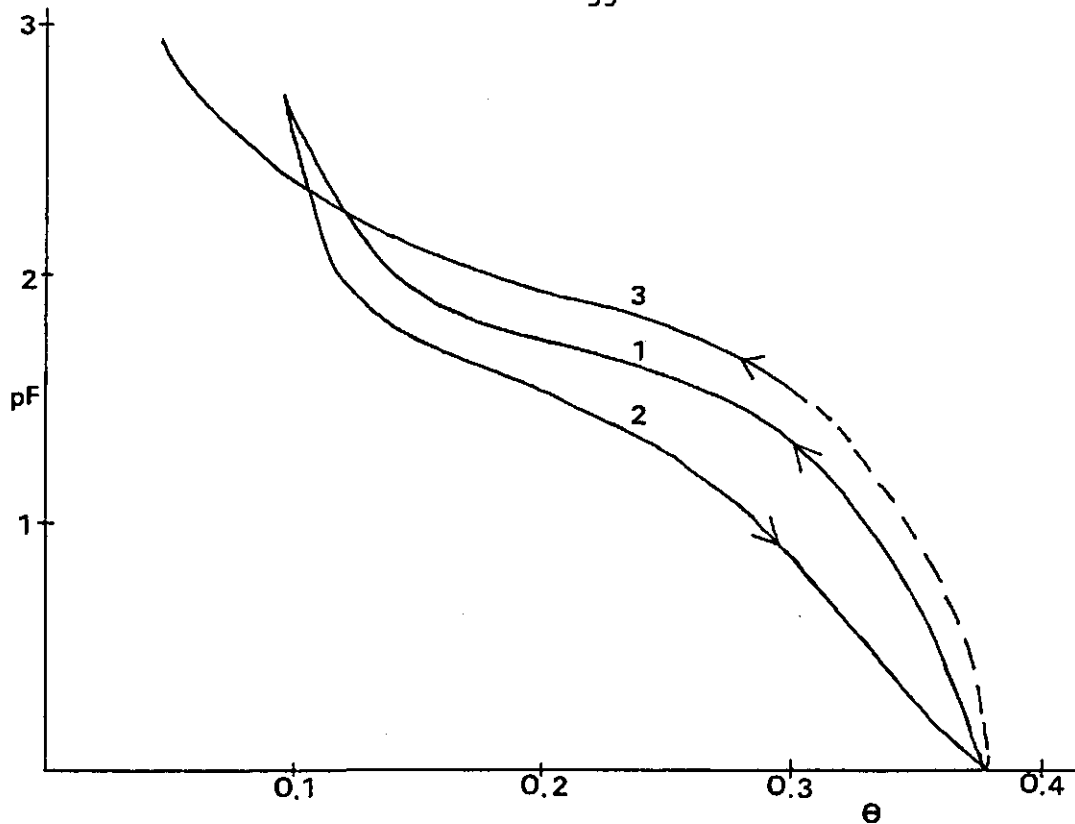
1) Gebaseerd op een waarneming (deze monsters werden niet voor de triaxiaalproef gebruikt).

2) Gebaseerd op zes waarnemingen.

* Adsorptiecurve.

Het lagere vochtgehalte bij de gravimetrische methode wordt veroorzaakt doordat er tijdens de triaxiaalproef water uit het monster draineert. Bij enkele monsters met een zuigspanning van 53.5 * werden, om nog onbekende redenen, hogere waarden met de gravimetrische methode gevonden. Vandaar dat het waterverlies in de monsters met een zuigspanning van -53.5 * gering lijkt, hoewel deze in werkelijkheid groter is (na de proef bleek het poreuze onderplaatje nat te zijn). Bij de verder uit te voeren berekeningen worden de met de volumetrische methode berekende gemiddelde vochtgehaltenes gebruikt.

Zowel de desorptie- als de adsorptietak van de pF-curve zijn getekend in figuur 5.1. Tevens is een pF-curve (desorptietak), die gemeten is met behulp van de verdampingsmethode, ter vergelijking toegevoegd.



Figuur 5.1 pF-curves Westerhoven zand. 1/ Desorptietak 2/ Adsorptietak 3/ pF-curve (de gebroken lijn is niet gebaseerd op waarnemingen) bepaald op Westerhoven zand van 50 cm diepte met een droog volumegewicht van 1.51 g/cm³ met behulp van de verdampingsmethode (De verdampingsproef is een op het I.C.W. ontwikkelde methode om k-h relaties te bepalen).

Gezien het feit dat de adsorptiecurve lager ligt dan de desorptiecurve, treedt het hysteresis verschijnsel ook in deze monsters op. De desorptiecurve, die gemeten is met de verdampingsmethode, geeft tot pF 2.2 hogere vochtgehaltenes dan de desorptiecurve van de monsters bij een gelijke zuigspanning.

5.2 DE COHESIE EN HOEK VAN INWENDIGE WRIJVING.

De maximale waarden voor S_1 , die bereikt worden binnen de relatieve verkortingstrajecten 0-0.04 en 0-0.08, zijn weergegeven in tabel 5.2. Tijdens de proeven bezwijkt het monster niet volgens een scherp breukvlak maar wordt tonvormig. Hierbij neemt de dichtheid en daardoor ook de sterkte van de grond iets toe. De spanning S_1 waarbij de grond bij een bepaalde steundruk S_3 bezwijkt kan veelal worden bepaald als de spanning waarbij de richting van de bezwijkcurve sterk verandert. Bij relatief natte monsters en/of hoge celdrukken is dit punt soms moeilijk te bepalen.

Tabel 5.2 Maximale S1 waarden.

s	S3	S1	S3	S1	
(cm H ₂ O)	Belastingsschema 1		Belastingsschema 2		
	(kN/m ²)	E _y =0.04 (kN/m ²)	(kN/m ²)	E _y =0.04 (kN/m ²)	E _y =0.08 (kN/m ²)
- 53.5	19.85	104.37	19.95	102.84	106.67
- 53.5	49.90	181.19	50.00	183.46	195.67
- 53.5	100.05	304.62	99.80	299.18	332.67
- 53.5 *	20.00	108.40	20.10	109.23	111.34
- 53.5 *	49.90	189.71	50.30	184.93	193.08
- 53.5 *	99.80	309.03	100.50	312.07	340.13
- 103.5	20.00	114.36	20.00	119.62	120.46 +
- 103.5	49.70	191.61	50.00	185.46	194.66
- 103.5	99.90	315.37	100.20	301.57	332.25
- 103.5 *	20.00	118.42	20.10	132.98 +	132.98 +
- 103.5 *	49.95	201.14	50.00	195.99	201.10
- 103.5 *	99.95	329.39	99.90	304.67	334.70
- 503.5	20.00	146.09 +	19.90	146.39 +	146.39 +
- 503.5	50.60	231.03	50.00	218.85	220.40 +
- 503.5	102.70	353.48	99.90	341.19	354.72

+ Maximum is bereikt voordat het monster 0.04 resp 0.08 is verkort.

Na een relatieve verkorting van 0.04 hebben slechts enkele droge monsters bij een lage celdruk het bezwijkpunt bereikt. Van de overige monsters wordt verondersteld dat ze na een relatieve verkorting van 0.08 het bezwijkpunt hebben bereikt. Hierbij bezwijkt de grond niet maar wordt deze geleidelijk verdicht tot een maximum sterkte. Of dit uiteindelijke bezwijkpunt na een relatieve verkorting van 0.08 daadwerkelijk wordt bereikt, is vooral bij hoge celdrukken (100 kN/m²) niet zeker (zie figuur 5.11b).

Het hiervoor geschetste beeld komt tot uitdrukking in de berekende cohesie en hoek van inwendige wrijving (tabel 5.3). Bij een relatieve verkorting van 0.04 is de hoek van inwendige wrijving minder stijl en de cohesie groter dan bij een relatieve verkorting van 0.08 (vergelijk A met C en B met D tabel 5.3). Bij een relatieve verkorting van 0.08 kan worden geconstateerd dat de hoek van inwendige wrijving stijler en de cohesie kleiner wordt, wanneer de proeven die uitgevoerd zijn bij een celdruk van 100 kN/m² worden meegenomen in de berekening (vergelijk C met D tabel 5.3). Dit zou erop duiden dat ook bij een celdruk van 100 kN/m² de monsters de maximale sterkte bereikt hebben.

Volgens de voorwaarden van de breukwet van Coulomb bevatten de sterkte parameters bij een relatieve verkorting van 0.08 de meest juiste informatie omdat bij deze proeven de maximale sterkte wordt bereikt. Enige voorzichtigheid is bij het gebruik van deze waarden voor de sterkte parameters wel noodzakelijk, gezien het feit dat ze slechts op een enkele serie waarnemingen berusten.

Uit figuur 5.2 blijkt dat de cohesie van de adsorptiecurve (2) kleiner is dan die bij de desorptiecurve (1) bij hetzelfde

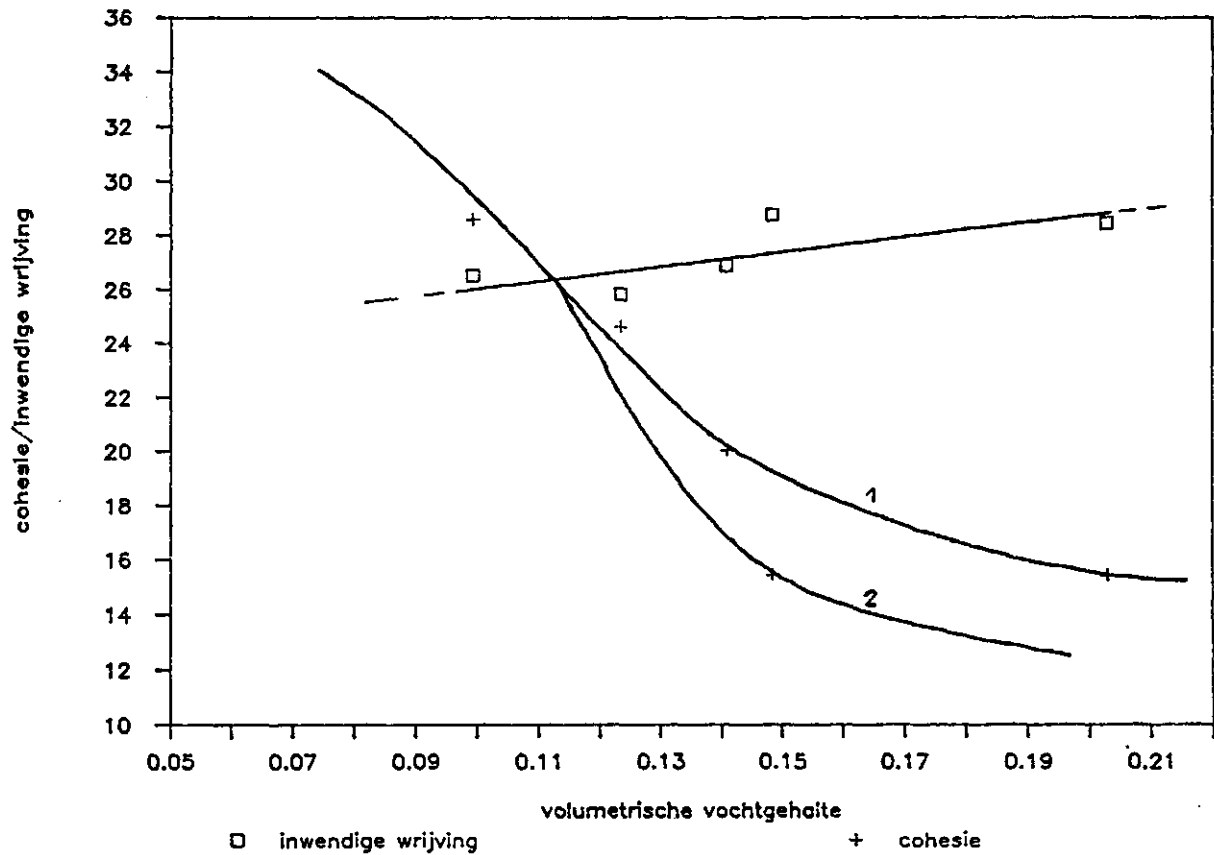
vochtgehalte (dit volgt ook uit de theorie vergelijk vgl 2.5 en 2.9). Vooral bij lage zuigspanningen (tot 100 cm) verschillen de adsorptie en desorptiecurves duidelijk terwijl bij hogere zuigspanningen dit verschil steeds kleiner wordt, waarbij echter bedacht moet worden dat de grond tot maximaal -500 cm H₂O is ontwaterd. Enige voorzichtigheid is bij deze uitspraken wel geboden gezien het feit dat de curves slechts op drie (desorptie) en op twee waarden (adsorptie) zijn gebaseerd.

De trend die in figuur 5.2 te zien is, is dat wanneer het vochtgehalte daalt dan stijgt de cohesie tot een bepaald maximum. Hoewel dit maximum in de figuren niet tot uitdrukking komt, moet deze echter wel ontstaan omdat de cohesie bij geheel droog zand nul is. De hoek van inwendige wrijving wordt in de literatuur veelal over het gehele vochtgehalte-traject constant verondersteld. Er wordt echter bij de berekende hoek van inwendige wrijving een lichte daling geconstateerd wanneer het vochtgehalte lager wordt. Of deze lichte daling fysische oorzaken heeft of dat deze variatie wordt veroorzaakt door onnauwkeurigheden in de genomen proeven, is niet met zekerheid te zeggen.

Tabel 5.3 De cohesie en hoek van inwendige wrijving berekend voor vier verschillende combinaties van maximale S1 waarden.

A								B							
S3 = 20 en 50 kN/m ²								S3=20, 50 en 100 kN/m ²							
Ey = 0.04 (4 waarden)								Ey = 0.04 (6 waarden)							
s (cm H ₂ O)	θ	φ graden	c kN/m ²	Qr	φ graden	c kN/m ²	Qr	s (cm H ₂ O)	θ	φ graden	c kN/m ²	Qr	φ graden	c kN/m ²	Qr
- 53.5	0.2029	26.59	15.89	0.9998	25.07	17.86	0.9995	- 53.5	0.2029	26.59	15.89	0.9998	25.07	17.86	0.9995
- 53.5 *	0.1483	26.55	17.40	0.9989	25.52	18.77	0.9997	- 53.5 *	0.1483	26.55	17.40	0.9989	25.52	18.77	0.9997
- 103.5	0.1408	24.40	22.12	0.9963	24.49	22.24	0.9981	- 103.5	0.1408	24.40	22.12	0.9963	24.49	22.24	0.9981
- 103.5 *	0.1234	25.05	24.11	0.9900	24.45	24.83	0.9944	- 103.5 *	0.1234	25.05	24.11	0.9900	24.45	24.83	0.9944
- 503.5	0.0992	26.52	29.01	0.9996	25.06	31.26	0.9998	- 503.5	0.0992	26.52	29.01	0.9996	25.06	31.26	0.9998
C								D							
S3 = 20 en 50 kN/m ²								S3=20, 50 en 100 kN/m ²							
Ey = 0.08 (2 waarden)								Ey = 0.08 (3 waarden)							
s (cm H ₂ O)	θ	φ graden	c kN/m ²	Qr	φ graden	c kN/m ²	Qr	s (cm H ₂ O)	θ	φ graden	c kN/m ²	Qr	φ graden	c kN/m ²	Qr
- 53.5	0.2029	29.61	13.90	1.0000	28.47	15.44	0.9998	- 53.5	0.2029	29.61	13.90	1.0000	28.47	15.44	0.9998
- 53.5 *	0.1483	27.41	17.30	1.0000	28.76	15.45	0.9999	- 53.5 *	0.1483	27.41	17.30	1.0000	28.76	15.45	0.9999
- 103.5	0.1408	25.10	22.57	1.0000	26.90	20.05	0.9997	- 103.5	0.1408	25.10	22.57	1.0000	26.90	20.05	0.9997
- 103.5 *	0.1234	22.95	28.88	1.0000	25.85	24.64	0.9993	- 103.5 *	0.1234	22.95	28.88	1.0000	25.85	24.64	0.9993
- 503.5	0.0992	24.95	31.08	1.0000	26.53	28.62	0.9997	- 503.5	0.0992	24.95	31.08	1.0000	26.53	28.62	0.9997

Qr) Correlatiecoëfficiënt; geeft aan in hoeverre de punten, die de maximale sterktes weergeven, verbonden worden door een rechte lijn (zie figuur 4.2).



Figuur 5.2 $c - \theta$ en $\phi - \theta$ relaties bij een relatieve verkorting van 0.08 gebaseerd op de maximale S_1 waarden bij celdrukken van 20, 50 en 100 kN/m² (1 desorptie, 2 adsorptie).

De invloed van het vochtgehalte op de grootte van de cohesie, de schijnbare cohesie, kan zoals aangegeven in paragraaf 2.2.3 worden bepaald, waarbij de effectieve spanning berekend wordt op een wijze gelijk aan die van Towner en Childs (1972) (zie vgl 2.5 en 2.12). In formule vorm:

$$c = (s * S + 0.3 * \int_S^1 s dS) \tan \phi \quad (5.1)$$

De verzadigingsgraad wordt berekend met formule 5.2

$$S = \theta / n$$

$$n = 1 - \rho_d * \left(\frac{\psi}{1.47} + \frac{1 - \psi}{2.65} \right) \quad (5.2)$$

ρ_d = droog volumegewicht
 ψ = organische-stof gehalte

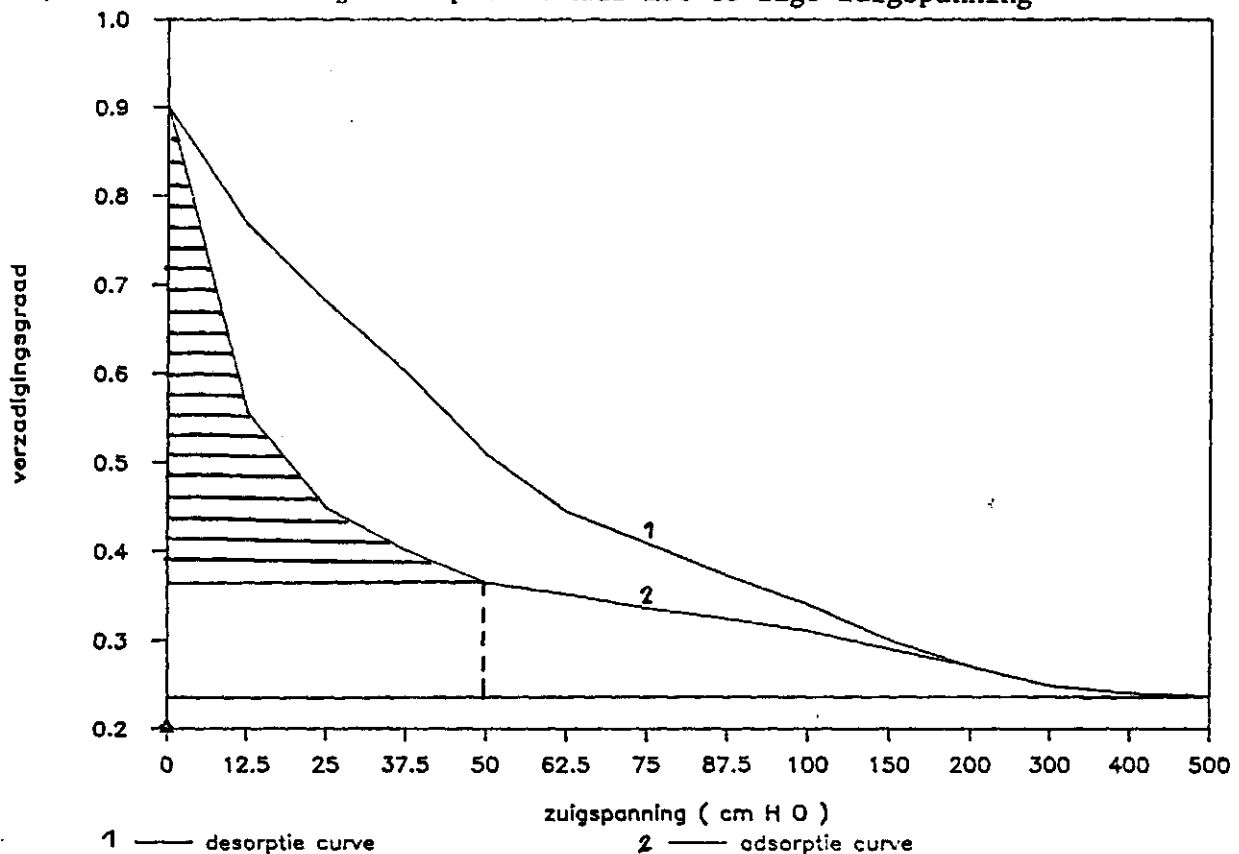
Het organische-stof gehalte is 1.62 % (Van den Akker 1988) en het droog volumegewicht is 1.5 g/cm³ waardoor n de waarde 0.4188 krijgt. Ten gevolge van ingesloten lucht wordt de maximale verzadigingsgraad van 1 niet bereikt maar wordt het maximum op 0.9 gesteld. De bijdrage

van de geleegde poriën aan de schijnbare cohesie wordt bepaald door in de S-s relatie van figuur 5.4 de oppervlaktes onder de curves te bepalen (zie ook figuur 2.6). In tabel 5.4 wordt de schijnbare cohesie uitgerekend voor een hoek van inwendige wrijving, die vergelijkbaar is met hetgeen met behulp van de triaxiaalproef is gevonden.

Tabel 5.4 Berekening schijnbare cohesie.

s (cm H ₂ O)	θ	S	bijdrage van de schijnbare cohesie			
			gepulveerde poriën	geleegde poriën	voor φ = 27	% van c tabel 5.3
- 3.5	0.3536	0.8443	2.9551	0.0375	0.1496	-
- 3.5 *	0.3292	0.7861	2.7514	0.0675 [^]	0.1409	-
- 53.5	0.2029	0.4845	25.9208	2.9955	1.4454	9.36
- 53.5 *	0.1483	0.3541	18.9444	2.2425 [^]	1.0591	6.85
- 103.5	0.1408	0.3362	34.7967	6.3345	2.0559	10.25
- 103.5 *	0.1234	0.2947	30.5014	3.1455 [^]	1.6818	6.83
- 503.5	0.0992	0.2369	119.2792	11.6790	6.5459	22.87

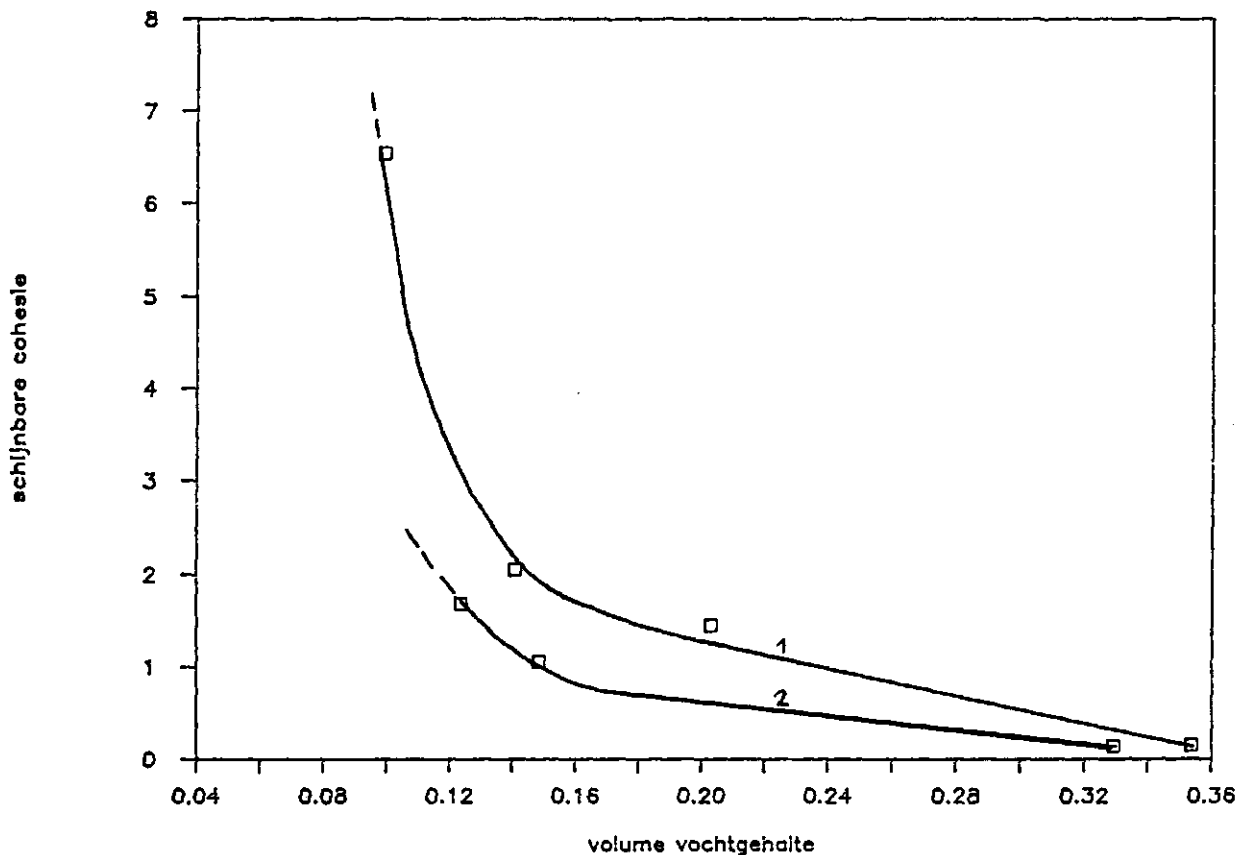
[^]/ Berekend met de juiste poriën maar met te lage zuigspanning



Figuur 5.3 Verzadigingsgraad-zuigspanning relatie. Het gearceerde gedeelte geeft de bijdrage van de geleegde poriën aan de schijnbare cohesie bij een zuigspanning van -50 cm H₂O bij adsorptie.

De bijdrage van de gevulde poriën aan de schijnbare cohesie neemt naarmate de verzadigingsgraad lager wordt, exponentieel toe. Door Koolen (1983) wordt gesteld dat bij zandgronden voor $S > 0.5$ de waarde van X uit formule 2.3 gelijk aan S kan worden gesteld. De geldigheid van deze uitspraak wordt aangetoond in tabel 5.4. Hoewel de door hem gestelde grens bij deze grond niet aan te geven is, is het duidelijk dat deze lager ligt. Bij het beproefde fijne zand is de rol van het verzadigde deel in de grootte van de schijnbare cohesie veel groter dan bij het door Towner en Childs (1972) gebruikte grove zand. Dit wordt veroorzaakt door het verschil in de S - s relatie. Bij een zuigspanning van 55 cm is bij het grove zand de verzadigingsgraad S tot 20 % gedaald. Terwijl bij het fijne zand dit pas het geval is wanneer de zuigspanning tien maal zo hoog is.

In figuur 5.4 is de schijnbare cohesie uitgezet tegen het vochtgehalte en komt de eerder gestelde aanname, dat de cohesie bij de adsorptiecurve kleiner is dan bij de desorptiecurve bij eenzelfde vochtgehalte, ook tot uitdrukking. Een maximale waarde voor de cohesie komt in deze figuur niet, zoals dat het geval is in figuur 2.7, naar voren. Towner en Childs werkten met een grond met een uniforme deeltjes grootte waardoor veel poriën bij dezelfde zuigspanning (40-45 cm) draineren (zie figuur 2.7). Zodoende kan er bij een lage zuigspanning (35 cm) duidelijk een maximale sterkte ontstaan (vergelijkbaar met de ideale "grond" van Aitchison (1961)).



Figuur 5.4 Schijnbare cohesie - vochtgehalte relatie bij -270
1/ desorptie 2/ adsorptie.

Een vergelijking tussen de berekende schijnbare cohesie en de cohesie, die met de triaxiaalproef werd verkregen, laat zien dat de trends in beide gevallen hetzelfde zijn, maar dat de absolute waarden sterk

uiteenlopen. Slechts 7-23% (afhankelijk van vochtgehalte en zuigspanning) van de geconstateerde cohesie kan door de berekende schijnbare cohesie worden verklaart, zodat de conclusie getrokken moeten worden, dat de verwachte rol van het poriënwater op de grootte van de sterkteparameters in werkelijkheid vrij gering is. Echter uit de triaxiaalproef met een relatieve verkorting van 0.08 blijkt, dat een verandering in het vochtgehalte van ca 0.10 een verschil in cohesie van ca 13 kN/m² kan opwekken. De vraag blijft waardoor cohesie wordt veroorzaakt, gezien het feit dat de werkelijke cohesie in zandgronden veelal gelijk aan nul wordt gesteld. Een aantal oorzaken van het verschil in de theoretisch berekende en de met de triaxiaalproef verkregen cohesie zijn :

1/ Een oorzaak van de hoge cohesie bleek een hoge wrijving te zijn, die de plunjer ondervindt wanneer deze de cel binnen dringt. Deze wrijving is veel hoger dan bij vroegere proeven en is wellicht toe te schrijven aan een beschadiging van de glijbus of de plunjerstang. Bij proeven, zonder een grondmonster in de cel, moest er, bij een opgelegde celdruk van 20 kN/m², 2.4 kg op de plunjer worden gelegd voordat deze in beweging kwam. Bij een celdruk van 50 en 100 kN/m² bedroeg deze waarde respectievelijk 3.0 en 3.7 kg. Een deel van deze weerstand wordt reeds gecompenseerd in formule 4.9 door de term ($S_3 * 71.93$) maar de rest moet van de berekende S_1 waarden worden afgetrokken. Dit betekent dat bij een celdrukken van 20, 50 en 100 kN/m² de S_1 met respectievelijk 22.11, 25.83 en 29.10 kN/m² moet worden verminderd. In tabel 5.5 is te zien dat, door het compenseren van deze weerstand, de cohesie met gemiddeld 6.0 kN/m² daalt en dat de rol van de schijnbare cohesie wordt verhoogd met ca 4%. Hoe deze weerstand zich tijdens de verdere indringing van de plunjer in de cel zal gedragen, en welke invloed dit op de maximale sterkte heeft, zal uit nader onderzoek moeten blijken.

Tabel 5.5 Cohesie en hoek van inwendige wrijving na correctie bij een relatieve verkorting van 0.08 (3 waarden).

s (cm H ₂ O)	θ	ongecorrigeerd		gecorrigeerd		c uit tabel 5.4	
		c (kN/m ²)	ϕ (grad)	c (kN/m ²)	ϕ (grad)	c (kN/m ²)	% tot c
- 53.5	0.2029	15.44	28.47	9.76	27.71	1.445	14.81
- 53.5 *	0.1483	15.45	28.76	9.89	28.00	1.059	10.71
- 103.5	0.1408	20.05	26.90	14.30	26.08	2.056	14.38
- 103.5 *	0.1234	24.64	25.85	18.69	25.05	1.682	9.0
- 503.5	0.0992	28.62	26.53	22.56	25.84	6.546	29.02

2/ Een fysische oorzaak van het verschil tussen de theoretisch bepaalde en de met de samendrukkingsproef bepaalde cohesie is de verandering van de zuigspanning tijdens de proef. Bij een relatief dichte grond zet in het breukvlak het monster uit (dilatatie) en wordt het poriënvolume plaatselijk veel groter. Hierdoor wordt water en lucht aangezogen en neemt de zuigspanning toe (Van den Akker 1988). Dit veroorzaakt een vergroting van de schijnbare cohesie, die echter moeilijk te kwantificeren is. Dit verschijnsel zal bij Towner en Childs (1972) slechts in geringe mate kunnen optreden door de grote doorlatendheid van de door hen gebruikte grond (grofkorrelig duinzand)

en de door hen gebruikte zeer lage belastingssnelheid. Hierdoor kan het water snel genoeg naar het breukvlak toestromen en blijft de zuigspanning op hetzelfde niveau.

3/ Bij eerder uitgevoerde triaxiaalproeven werden bij een relatieve verkorting van 0.1 en een droog volumegewicht van 1.5 g/cm³ de volgende waarden voor de sterkte parameters gevonden (Giesbers 1985):

$$\begin{array}{lll} \theta = 0.165 & c = 6.2 \text{ kN/m}^2 & \phi = 31^\circ \\ \theta = 0.120 & c = 8.0 \text{ kN/m}^2 & \phi = 31^\circ \end{array}$$

Het verschil tussen de proeven uit 1985 en de proeven van nu is het feit dat de monsters uit 1985 direct nadat ze gemaakt waren, werden samengedrukt, terwijl de monsters van nu, na eerst te zijn verzadigd, gemiddeld twee maanden op een pF-bak hebben gestaan. De zuigspanningen bij de proeven van Giesbers zijn onbekend. Het water en de zuigspanningen zullen door het maken van het monster chaotisch door het monster zijn verdeeld. In de twee maanden dat de nu beproefde monsters op de pF-bak hebben gestaan, kunnen bindingen zijn ontstaan, die de cohesie hebben vergroot. Gezien het feit dat een vochtgehalteverschil een groot cohesieverschil kan veroorzaken, is het aannemenlijk dat de extra bindingen verband houden met het water. Dit moeten dan bindingen zijn tussen de organische stof (1.6 %) en de minerale delen, die worden versterkt door het aanwezige water. Proeven uitgevoerd met monsters zonder organische stof moeten de bijdrage van deze bindingen aan de cohesie kwantificeren.

5.3 SPANNINGEN EN DEFORMATIES.

Tabel 5.7 laat zien dat de grootste relatieve volumeveranderingen optreden tijdens het aanbrengen van de celdruk. Een deel van deze volumeveranderingen worden veroorzaakt door de onregelmatige structuur aan de randen van de monsters door het meenemen van grond tijdens het verwijderen van het plastic omhulsel. De variatie die in deze relatieve vervorming wordt gevonden, kan worden verklaard door het feit dat de hoeveelheid grond die aan het plastic omhulsel blijft zitten, sterk varieert. Wel is waarneembaar dat naarmate de monsters natter worden er tijdens het aanbrengen van de celdruk grotere relatieve vervormingen optreden. In vergelijking met de verdichting tijdens het aanbrengen van de celdruk is de uitzetting ten gevolge van het aflaten van deze celdruk gering. Dit duidt erop dat het grootste deel van de vervormingen blijvend zijn, hierbij moet echter de weerstand van de plunjer worden genoemd, die er de oorzaak van is dat het monster in verticale richting een tegenkracht ondervindt bij het uitzetten in verticale richting.

Tijdens het verwijderen van de verticale kracht ondergaan de monsters een extra verdichting. Deze wordt veroorzaakt doordat er een herrangschikking van de bodemdeeltjes in het breukvlak plaats vindt. Deze herrangschikking is gezien tabel 5.7 niet afhankelijk van het vochtgehalte. Deze blijkt wel afhankelijk te zijn van het droog volumegewicht, gezien de hogere verdichtingen tijdens ontlasten die gevonden werden bij eerder uitgevoerde proeven met een droog volumegewicht van 1.6 g/cm³ (Van den Akker 1988).

Alle monsters hebben na het doorlopen van de gehele belastings- en ontlastingscyclus een netto verdichting ondergaan. Deze verdichting heeft bij het droogste monster (0.0992) en een lage

celdruk (20 kN/m²) de kleinste waarde. Deze verdichting loopt bij toenemend vochtgehalte en celdruk op tot ca 3.5 % relatieve volumeverandering. Bij beschouwing van de totale relatieve volumeverandering moet worden bedacht dat in werkelijkheid de steundruk nooit geheel nul wordt. Tabel 5.8 laat zien dat de verschillen tussen de vergelijkbare totale relatieve vervormingen na een relatieve verkorting van 0.04 (Ev 9) aanzienlijk zijn. Dit wordt vooral verklaart door de variatie in de volumeverandering, die door de celdruk wordt veroorzaakt (Ev 8).

De figuren 5.6b tot en met 5.11b geven een beeld van het verloop van de deviator spanning tijdens de verkorting van het monster. In de a-figuren is de relatieve volumeverandering uitgezet tegen de relatieve verkorting. De curves zijn slechts gebaseerd op een waarneming, waarbij wel vergelijking mogelijk is tussen de proeven die bij dezelfde celdruk zijn uitgevoerd (5.6-5.7, 5.8-5.9 en 5.10-5.11). Voor de duidelijkheid zijn de lijnen, die het verwijderen van de verticale kracht weergeven, weggelaten waardoor echter wel de suggestie wordt gewekt, dat deze curves het derde belastingschema voorstellen. In bijlage 2 zijn de deviator spanning - relatieve verkortings curves en de relatieve volumeverandering - relatieve verkorting curves in zijn geheel, dus met de lijnen van de verwijdering van de verticale kracht, weergegeven voor een vochtgehalte van 0.0992 bij de drie gebruikte celdrukken. Tevens is in deze figuren een curve toegevoegd die de deviator spanning - relatieve volumeveranderings relatie weergeeft. In alle (S1-S3)-Ey curves is te zien dat het monster pas korter wordt nadat eerst een bepaalde kracht is overwonnen. Deze kracht is nodig om de weerstand te overwinnen die de plunjer ondervindt tijdens het binnendringen van de cel (zie 5.2). Verder valt op dat de figuren schoksgewijze verlopen, ondanks het feit dat er elke seconde is gemeten (gedurende 300 sec bij Ey = 0.04). Dit verloop wordt veroorzaakt door de continue herrangschikking van de bodemdeeltjes waardoor de grond het ene moment de spanningsvergroting sneller kan opvangen dan het andere moment.

Tabel 5.7 Relatieve vervormingen bij het aanbrengen resp. aflaten van celdruk en verticale kracht bij verschillende celdrukken en vochtgehaltes.

S3 (@ kN/m ²)	θ	Ev (1)	Ev (2)	Ev (3)	Ev (4)	Ev (5)	Ev (6)	Ev (7)
		S3 aan	S1 aan	S1 af	S1 aan	S1 af	S3 af	totaal
		Ey			Ey			
		0.00 - 0.04			0.04 - 0.08			
20.0	0.2029	-0.0093	-0.0072	-0.0010			+0.0039	-0.0136
20.0	0.2029	-0.0133	-0.0082	-0.0010	-0.0045	-0.0020	+0.0087	-0.0203
20.0	0.1483	-0.0069	-0.0020	-0.0013			+0.0017	-0.0085
20.0	0.1483	-0.0120	-0.0065	-0.0013	-0.0025	-0.0014	+0.0061	-0.0176
20.0	0.1408	-0.0091	-0.0030	-0.0010			+0.0048	-0.0083
20.0	0.1408	-0.0081	-0.0044	-0.0010	-0.0008	-0.0010	+0.0057	-0.0096
20.0	0.1234	-0.0062	-0.0017	-0.0009			+0.0044	-0.0044
20.0	0.1234	-0.0068	-0.0004	-0.0007	+0.0010	-0.0012	+0.0047	-0.0034
20.0	0.0992	-0.0073	+0.0027	-0.0007			+0.0045	-0.0008
20.0	0.0992	-0.0061	+0.0044	-0.0029	+0.0017	-0.0028	+0.0044	-0.0013
50.0	0.2029	-0.0183	-0.0101	-0.0013			+0.0047	-0.0250
50.0	0.2029	-0.0221	-0.0111	-0.0012	-0.0066	-0.0020	+0.0059	-0.0371
50.0	0.1483	-0.0131	-0.0076	-0.0015			+0.0011	-0.0211
50.0	0.1483	-0.0213	-0.0115	-0.0032	-0.0081	-0.0039	+0.0039	-0.0441
50.0	0.1408	-0.0162	-0.0090	-0.0012			+0.0060	-0.0204
50.0	0.1408	-0.0181	-0.0086	-0.0013	-0.0051	-0.0016	+0.0058	-0.0289
50.0	0.1234	-0.0163	-0.0093	-0.0014			+0.0063	-0.0207
50.0	0.1234	-0.0087	-0.0072	-0.0020	-0.0031	-0.0024	+0.0032	-0.0202
50.0	0.0992	-0.0102	-0.0061	-0.0018			+0.0040	-0.0141
50.0	0.0992	-0.0067	-0.0048	-0.0011	-0.0012	-0.0023	+0.0056	-0.0105
100.0	0.2029	-0.0327	-0.0154	-0.0020			+0.0150	-0.0351
100.0	0.2029	-0.0309	-0.0122	-0.0022	-0.0084	-0.0026	+0.0128	-0.0435
100.0	0.1483	-0.0196	-0.0112	-0.0018			+0.0039	-0.0287
100.0	0.1483	-0.0220	-0.0141	-0.0023	-0.0077	-0.0024	+0.0095	-0.0390
100.0	0.1408	-0.0313	-0.0143	-0.0020			+0.0091	-0.0385
100.0	0.1408	-0.0239	-0.0120	-0.0015	-0.0092	-0.0021	+0.0101	-0.0386
100.0	0.1234	-0.0244	-0.0127	-0.0026			+0.0075	-0.0322
100.0	0.1234	-0.0194	-0.0129	-0.0024	-0.0079	-0.0023	+0.0060	-0.0389
100.0	0.0992	-0.0227	-0.0107	-0.0047			+0.0047	-0.0334
100.0	0.0992	-0.0119	-0.0093	-0.0021	-0.0042	-0.0015	+0.0064	-0.0226

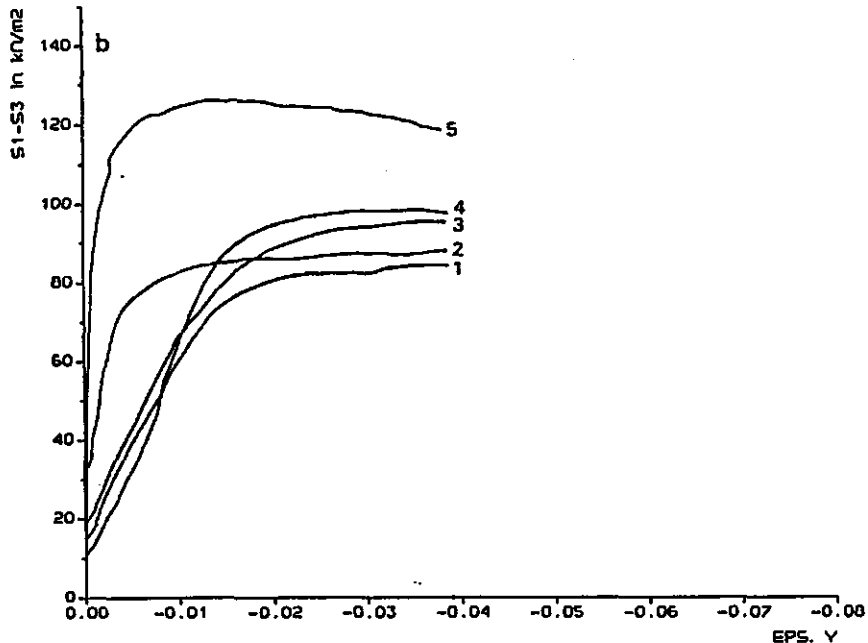
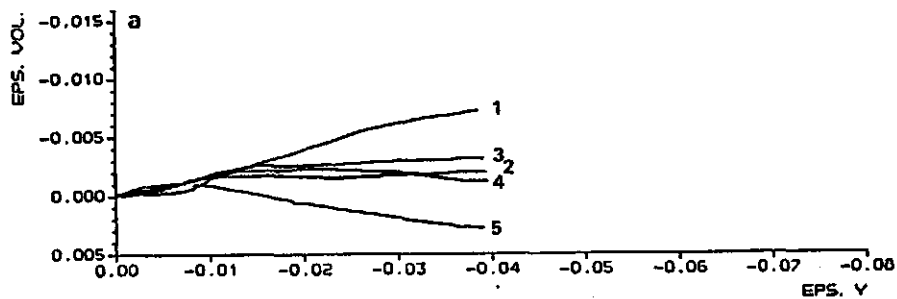
@/ Ter vereenvoudiging zijn hier de celdrukken 20, 50 en 100 kN/m² genoteerd in plaats van de werkelijk gemeten waarden uit tabel 5.2. In de verdere analyse worden deze afgeronde waarden gebruikt, omdat er niet voldoende herhalingsproeven zijn uitgevoerd die de invloed van een klein verschil in celdruk op de S1 kunnen kwantificeren.
-Ev = verdichting, +Ev = uitzetting.

Tabel 5.8 Afgeleide relatieve vervormingen bij verschillende celdrukken en vochtgehaltes na een relatieve verkorting van 0.04.

			Ev (8)	Ev (9)	Ev (10)	Ev (11)
			S3- Ev1-Ev6	totaal- Ev7 - (Ev4+Ev5)	S1- Ev9 - Ev8	gem tot- Ev10/2
S3 kN/m ²	θ	s cm H ₂ O				
20.0	0.2029	50	-0.0054	-0.0136	-0.0082	
20.0	0.2029	50	-0.0046	-0.0138	-0.0092	-0.0087
20.0	0.1483	50 *	-0.0052	-0.0085	-0.0033	
20.0	0.1483	50 *	-0.0059	-0.0137	-0.0078	-0.0056
20.0	0.1408	100	-0.0043	-0.0083	-0.0040	
20.0	0.1408	100	-0.0024	-0.0079	-0.0055	-0.0048
20.0	0.1234	100 *	-0.0018	-0.0044	-0.0026	
20.0	0.1234	100 *	-0.0021	-0.0032	-0.0011	-0.0019
20.0	0.0992	500	-0.0028	-0.0008	+0.0020	
20.0	0.0992	500	-0.0017	-0.0002	+0.0015	+0.0018
50.0	0.2029	50	-0.0136	-0.0250	-0.0114	
50.0	0.2029	50	-0.0162	-0.0285	-0.0123	-0.0119
50.0	0.1483	50 *	-0.0120	-0.0211	-0.0091	
50.0	0.1483	50 *	-0.0174	-0.0321	-0.0147	-0.0119
50.0	0.1408	100	-0.0102	-0.0204	-0.0102	
50.0	0.1408	100	-0.0123	-0.0222	-0.0099	-0.0101
50.0	0.1234	100 *	-0.0100	-0.0207	-0.0107	
50.0	0.1234	100 *	-0.0055	-0.0147	-0.0092	-0.0100
50.0	0.0992	500	-0.0062	-0.0141	-0.0079	
50.0	0.0992	500	-0.0011	-0.0070	-0.0059	-0.0069
100.0	0.2029	50	-0.0177	-0.0351	-0.0174	
100.0	0.2029	50	-0.0181	-0.0325	-0.0144	-0.0159
100.0	0.1483	50 *	-0.0157	-0.0287	-0.0130	
100.0	0.1483	50 *	-0.0125	-0.0289	-0.0164	-0.0147
100.0	0.1408	100	-0.0222	-0.0385	-0.0163	
100.0	0.1408	100	-0.0138	-0.0273	-0.0135	-0.0149
100.0	0.1234	100 *	-0.0169	-0.0322	-0.0153	
100.0	0.1234	100 *	-0.0134	-0.0287	-0.0153	-0.0153
100.0	0.0992	500	-0.0180	-0.0334	-0.0154	
100.0	0.0992	500	-0.0055	-0.0169	-0.0114	-0.0134

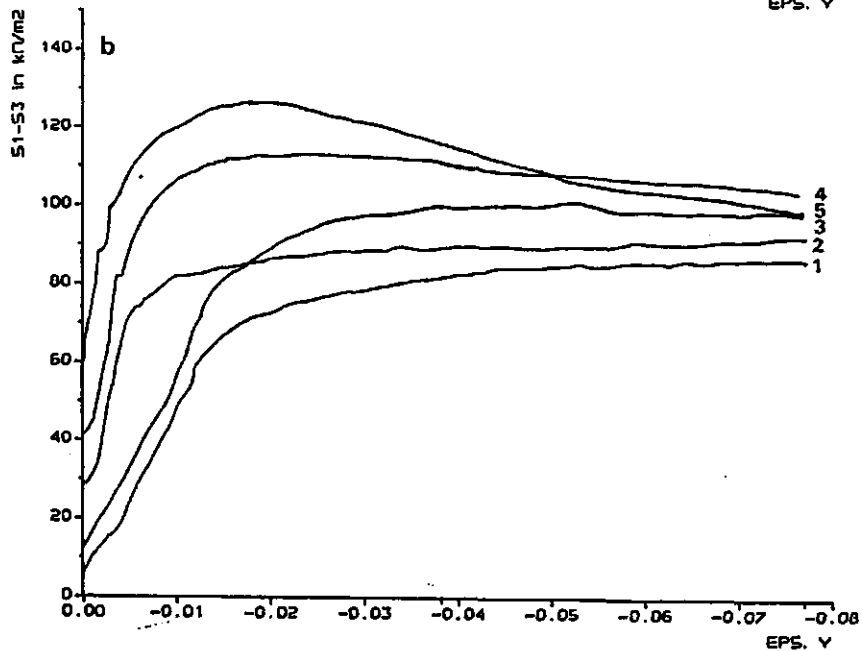
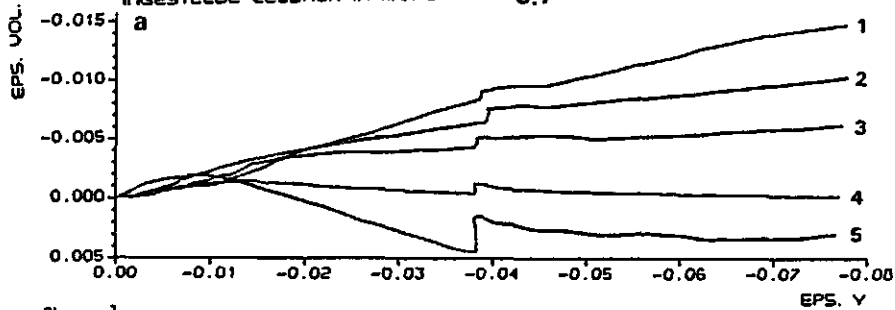
INGESTELDE CELDRUK IN kN/m² : 20

5.6



INGESTELDE CELDRUK IN kN/m² : 20

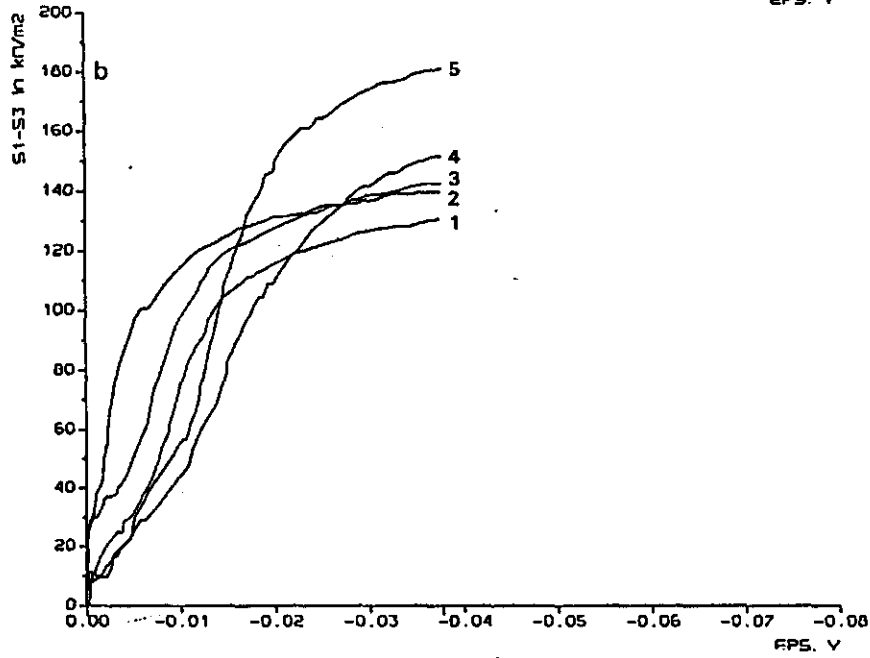
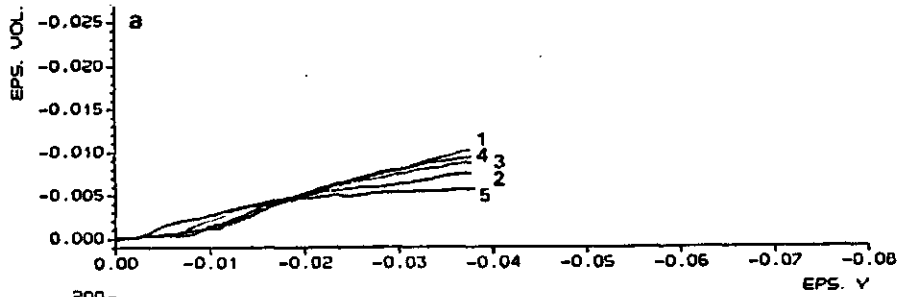
5.7



Figuren 5.6-5.7 a) Deviator spanning - relatieve verkorting curves b) relatieve vervorming - relatieve verkorting curves. S3=20 kN/m², E_y=0.04 en 0.08. Vochtgehalten: 1=0.2029, 2=0.1483, 3=0.1408, 4=0.1234, 5=0.0992.

INGESTELDE CELDRUK IN kN/m² : 50

5.8



INGESTELDE CELDRUK IN kN/m² : 50

5.9

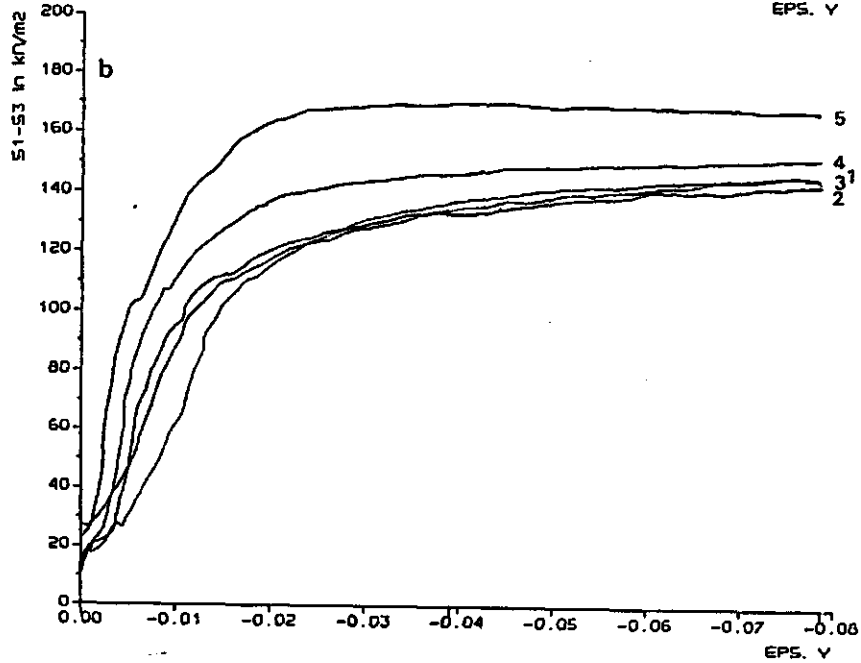
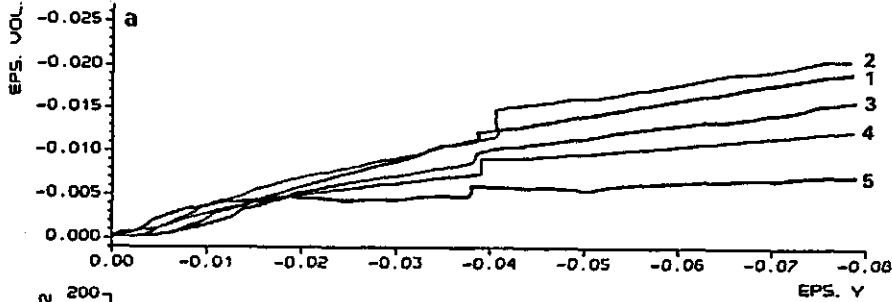
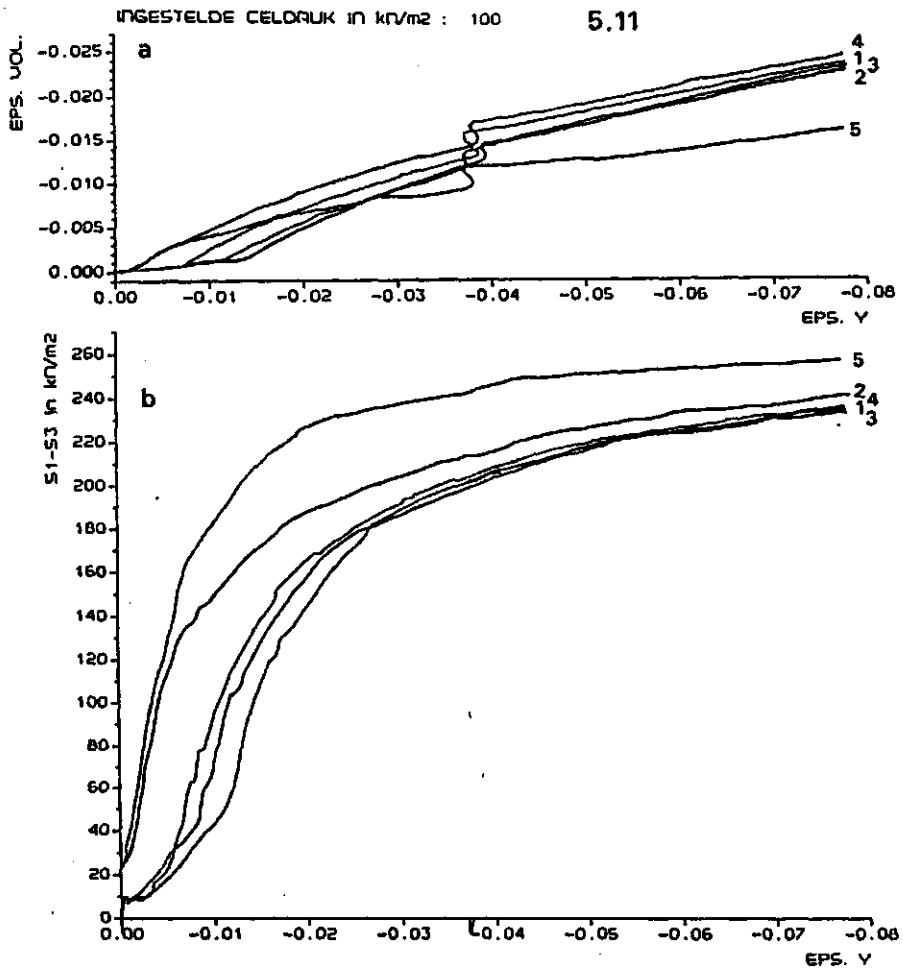
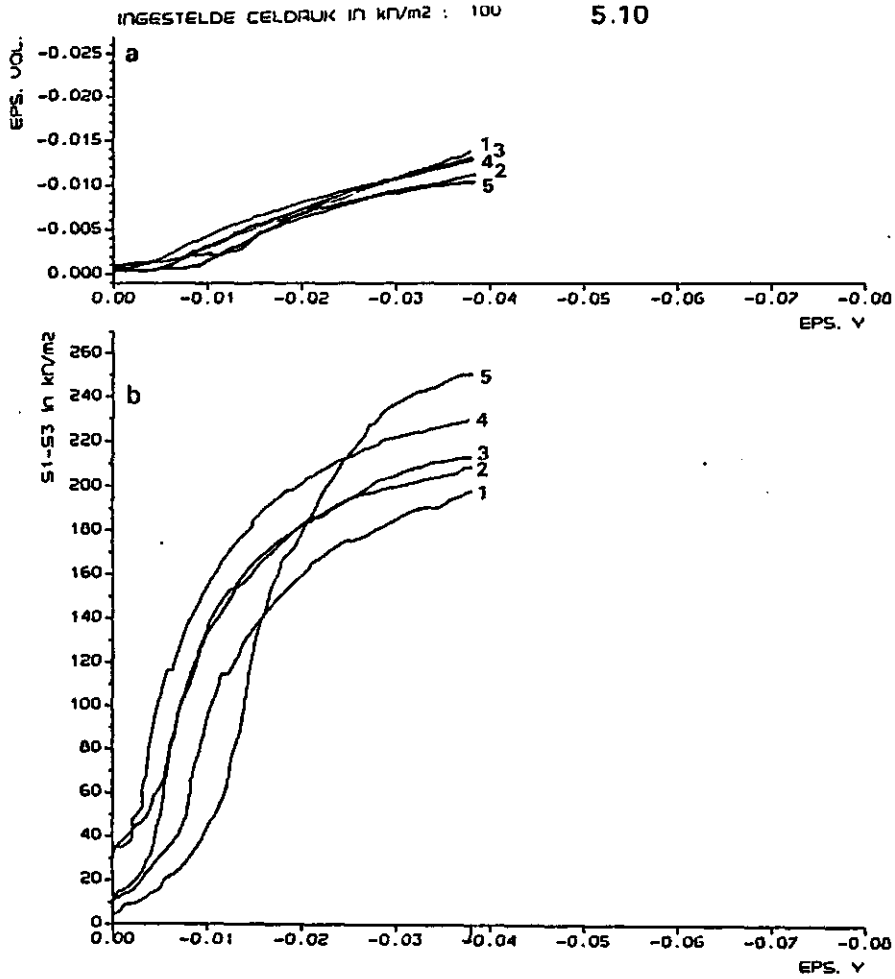


Figure 5.8-5.9 a) Deviator spanning - relative verkorting curves b) relative vervorming - relative verkorting curves. S3=50 kN/m², E_y=0.04 en 0.08. Vochtgehalten: 1=0.2029, 2=0.1483, 3=0.1408, 4=0.1234, 5=0.0992.



Figuren 5.10-5.11 a) Deviator spanning - relatieve verkorting curves
b) relatieve vervorming - relatieve verkorting curves
S3-100 kN/m², E_y=0.04 en 0.08. Vochtgehaltes:
1=0.2029, 2=0.1483, 3=0.1408, 4=0.1234, 5=0.0992.

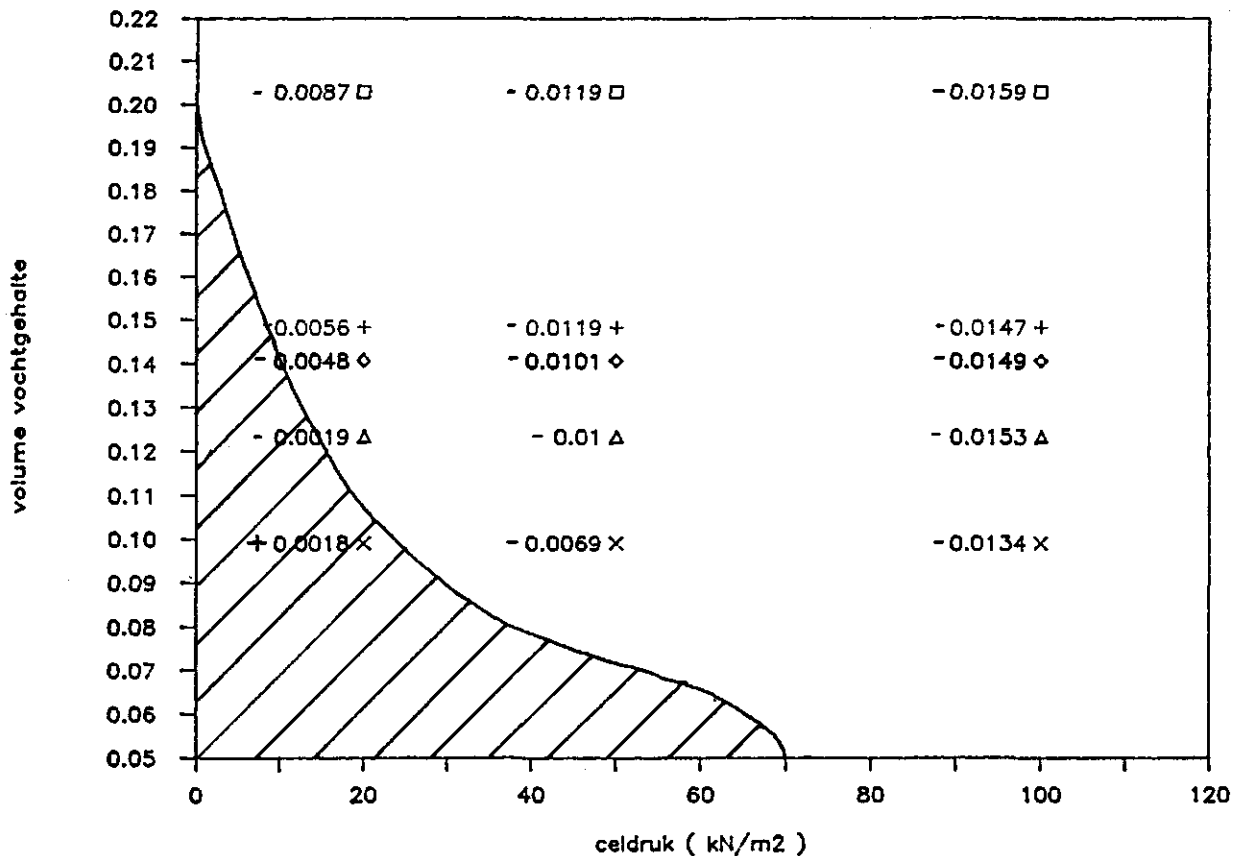
Bij een celdruk van 20 kN/m² zetten de monsters met een vochtgehalte van 0.0992 en 0.1234, uit tijdens de verticale belasting nadat ze in het eerste deel van de proef zijn verdicht. Door de verdichting door het verwijderen van de verticale kracht heeft het monster met een vochtgehalte van 0.1234 echter netto een verdichting ondergaan. De overige monsters worden onder invloed van de opgelegde spanningen verdicht, waarbij de vervormingen het grootst zijn onder de natste omstandigheden.

De monsters die samengedrukt zijn bij een celdruk van 50 kN/m² verdichten bij alle voor de proef gebruikte vochtgehaltenes. Hoewel de deviatorspanning bij het monster met een vochtgehalte van 0.0992 nog een lichte daling vertoont, heeft dit geen uitzetting tot gevolg. De verdichtingen zijn in vergelijking met de waarden bij een celdruk van 20 kN/m² groter waarbij de onderlinge verschillen tussen de vochtgehaltenes kleiner zijn.

De proeven uitgevoerd bij een celdruk van 100 kN/m² resulteren ook bij elk gebruikt vochtgehalte in een verdichting van het monster. Uit een vergelijking van de curves die gebaseerd zijn op proeven met verschillende celdrukken blijkt dat de invloed van het vochtgehalte op de vervormingen kleiner wordt bij hogere celdrukken (zie ook Ev 11 tabel 5.8). Bij alle proeven die een herhaalde belasting hebben ondergaan, geldt dat de tweede belasting minder vervormingen veroorzaakt dan de eerste belasting. Dit omdat de grond is samengedrukt en de weerstand tegen vervorming is toegenomen.

Uit de Critical State Soil Mechanics theorie blijkt, dat bij twee combinaties van celdruk en vochtgehalte de grondmonsters een volumevergroting hebben ondergaan, in het super-kritieke gebied en dat de overige monsters verdichten in het sub-kritieke gebied. In figuur 5.12 zijn de vochtgehaltenes-celdruk combinaties uitgezet en is met behulp van de bij deze punten optredende vervormingen (tabel 5.8 Ev 11) een lijn geschetst die de overgang aangeeft tussen het sub-kritieke en het super-kritieke gebied. Hierbij is van de gedachte uitgegaan, dat bij een begindichtheid van 1.5 g/cm³, boven een bepaalde celdruk (ca 70 kN/m²) bij geen enkel vochtgehalte breukvorming kan optreden en dat dit verschijnsel ook niet optreedt boven een bepaald volumetrische vochtgehalte (ca 0.2)(zie figuur 2.16). Hieruit blijkt, dat het gebied waar de grond super-kritiek uitzet, beperkt is in vergelijking met sub-kritieke verdichtingsgebied waardoor de reeds veronderstelde verdichtingsgevoeligheid van deze grond wordt bevestigd. Bij belasting zal de grond tenderen naar een hogere dichtheid dan 1.5 g/cm³.

Als er tijdens het belasten geen verandering van de deviator spanning en het volume meer kan worden geconstateerd, heeft de grond de kritieke toestand bereikt en worden er alleen nog vormveranderingen geconstateerd. Deze situatie is bij een celdruk van 20 kN/m² na een relatieve verkorting van 0.08 aanwezig. Alleen het natste monster ondergaat nog enige volumeverandering. Bij een celdruk van 50 kN/m² is de deviator spanning constant maar vertoont de volumeverandering nog een lichte gradient. Toch wordt dit veelal ook als kritieke toestand gezien. Deze toestand is na een relatieve verkorting van 0.08 bij een celdruk van 100 kN/m² nog niet opgetreden want de maximale deviator spanning is waarschijnlijk nog niet bereikt.



Figuur 5.12. Scheiding van de celddruk-vochtgehalte ruimte in een sub-kritieke zone en een super-kritieke zone (gearceerd).

In de praktijk wordt gesteld dat de ondergrond niet verdicht als de banduitrusting zodanig wordt gekozen dat de verticale spanning op de ondergrond niet hoger is dan 1 bar (=100 kN/m²) (zie 3.3). De vraag is in hoeverre deze stelregel bij deze onderzochte grond opgaat.

Stel dat ten gevolge van een opgelegde kracht in de ondergrond een S_1 van 100 kN/m² (zie 3.3) optreedt. Bij een steundruk van 20 kN/m² betekent dit dat de natste monsters (1,2 en 3) plastisch vervormen maar de droge monsters nog niet. Er treden ook geen plastische vervormingen op bij een steundruk van 50 kN/m² en 100 kN/m². Met andere woorden, wil de ondergrond geen plastische vervormingen ondergaan, dan moet er door de bodem een steundruk van tenminste 20 kN/m² kunnen worden geleverd, waarbij de grond ook niet boven een volumetrische vochtgehalte van 14 % mag komen. Bij een hogere steundruk mag de grond een hoger vochtgehalte hebben voordat plastische deformaties optreden. Een andere situatie ontstaat wanneer de $S_1=250$ kN/m² (zie 3.3) wordt. Deze kracht wordt door de grond met een celddruk van 20 en 50 kN/m² niet weerstaan en de grond moet vervormen totdat de steundruk voldoende groot is. Een steundruk van 100 kN/m² kan onder geringe plastische deformaties (ca 0.5 %) de kracht wel opvangen.

6 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Uit de resultaten van het onderzoek kunnen een aantal conclusies worden getrokken. Deze zijn:

- De cohesie is sterk vochtafhankelijk en stijgt ca 13 kN/m² wanneer het volumetrische vochtgehalte van 0.2 tot 0.1 wordt verlaagd. Bij volumetrische vochtgehaltenes lager dan 0.1 wordt de stijging van de cohesie minder groot verondersteld, en moet er verder in het vochtgehaltetraject 0.1-0.0 een maximale cohesie ontstaan. De hoek van inwendige wrijving is bijna constant en vertoont een lichte daling bij een kleiner wordend vochtgehalte.

- Zowel in de literatuur als uit de proeven blijkt, dat de cohesie bij desorptie (voorjaar) groter is dan bij adsorptie (najaar) bij eenzelfde vochtgehalte.

- De met behulp van de formule van Towner en Childs uitgerekende schijnbare cohesies, liggen lager dan de met de triaxiaalproef berekende cohesie. Oorzaken hiervoor die door nader onderzoek gekwantificeerd moeten worden, kunnen bindingen tussen de organische stof en de minerale delen, en dilatatie in het breukvlak zijn. Deze oorzaken moeten afhankelijk van het vochtgehalte en de zuigspanning 70-90% van de gemeten cohesie verklaren omdat slechts 10-30% verklaart kan worden met behulp van de theoretische formule van Towner en Childs.

- Omdat zij proeven uitvoerden met grofkorrelige uniforme grond, konden Towner en Childs reeds een maximale cohesie constateren bij een zuigspanning van 35 cm. Bij fijnzandige gronden ligt dit maximum bij een zuigspanning boven de 500 cm.

- De grootste relatieve volumeveranderingen treden op bij het aanbrengen van de celdruk en deze hebben bij de natste monsters de hoogste waarden.

- Door de dilatatie in het breukvlak tijdens de belasting, wordt de grond in het breukvlak lossier (N.B. in de rest van het monster kan wel verdichting ontstaan !). Door het afdrukken van de verticale spanning verdwijnt in het afschuifvlak het dynamische losmakende mechanisme en vindt in het afschuifvlak verdichting plaats.

- Tijdens het samendrukken van de monsters met een vochtgehalte van 0.0992 en 0.1234, wordt het volume bij een celdruk van 20 kN/m²

vergroot. De overige monsters bij een celdruk van 20 kN/m² verdichten tijdens de samendrukking. Bij celdrukken van 50 kN/m² en 100 kN/m² treedt verdichting op bij elk gebruikt vochtgehalte.

- Het blijkt dat bij lage steundrukken het vochtgehalte een grote invloed heeft op de volumeveranderingen tijdens het be- en ontlasten met de verticale spanning S₁. Naarmate de steundruk groter wordt heeft het vochtgehalte minder invloed op de volumeveranderingen.

- De verdichtingsgevoeligheid van de gebruikte grond wordt bevestigd, doordat het super-kritieke uitzettingsgebied beperkt is in vergelijking met het sub-kritieke verdichtingsgebied.

- Bij een opgelegde S₁ van 100 kN/m² moet de bodem (droog volumegewicht 1.5 g/cm³) een steundruk van tenminste 20 kN/m² leveren om geen plastische deformaties te ondergaan. Hierbij moet als voorwaarde worden gesteld dat het vochtgehalte niet boven de 14 % komt, gebeurt dit wel dan moet er door de bodem een grotere steundruk worden geleverd. Bij een S₁ van 250 kN/m² is alleen een steundruk van 100 kN/m² sterk genoeg om te voorkomen dat er ernstige plastische deformaties (>0.5 %) ontstaan

6.1 AANBEVELINGEN VOOR VERDER ONDERZOEK

Voor het verdere onderzoek naar spannings-deformatie relaties met behulp van de triaxiaalproef, worden de volgende aanbevelingen gedaan.

- Getracht is met de uitgevoerde proeven de sterkte parameters van de grond te bepalen en een beeld te krijgen van de spannings-deformatie relatie in de bodem. Deze twee doelstelling conflictueren enigszins omdat bij de bepaling van de sterkte parameters naar een maximale sterkte wordt gezocht, waardoor in een aantal gevallen vrij grote vervormingen noodzakelijk zijn. Bij de spanningen en deformaties is het juist interessant om te kijken naar die sterkte waarbij nog geen grote vervormingen in de grond optreden die de gewasproductie nadelig beïnvloeden. Om de cohesie en hoek van inwendige wrijving te bepalen is het nauwkeuriger om ook proeven bij lagere celdrukken (0-50 kN/m²) uit te voeren. Voor nadere bestudering van het super-kritische gedrag zijn ook proeven met een lagere celdruk (0-20 kN/m²) interessant.

- Om uitspraken te kunnen doen over de bijdrage van de zuigspanning aan de effectieve spanning moet er in eerste instantie een op meer punten gebaseerde zuigspannings-vochtgehalte relatie (zowel desorptiecurve als adsorptiecurve) van de monsters worden vastgesteld.

- De werkelijke cohesie in zandgronden wordt veelal op nul gesteld. Toch bestaat de indruk dat de werkelijke cohesie in de gebruikte zandgrond een hogere waarde heeft. Deze cohesie bestaat waarschijnlijk uit bindingen tussen de korrels en is afhankelijk van het vochtgehalte. Om dit beter aan te kunnen tonen zijn nieuwe proeven noodzakelijk (meer en betere replica's).

- Om een eventuele bijdrage van bindingen met organische stof op de cohesie aan te tonen, moeten proeven worden uitgevoerd met grond waarbij deze organische stof is verwijderd.

- De uitgevoerde proeven hebben nog geen maximale waarde voor de cohesie kunnen aantonen. Proeven uitgevoerd met een zuigspanning van 800 cm kunnen hierover meer duidelijkheid verschaffen. Verder kunnen proeven uitgevoerd met 200 cm zuigspanning (desorptie en adsorptie) de $c - \theta$ relatie in het lage zuigspanningstraject (tot 500) toetsen.

- Er moet een methode gevonden worden om de dilatatie en de invloed daarvan op de schijnbare cohesie te kunnen kwantificeren. Een deel van de dilatatie kan worden gemeten tijdens het verwijderen van de verticale kracht. Door een vergelijking te maken tussen de optredende schijnbare cohesie en de dilatatie bij verschillende dichtheden en vochtgehaltes, kan een eerste beeld verkregen worden van de invloed van de dilatatie op de schijnbare cohesie.

- Tijdens het aanbrengen van de celdruk moet het membraam zich eerst naar het onregelmatige zijoppervlak van het monster vormen. De volumeverandering die hierbij wordt gemeten is per monster anders en vormt een sterke storing bij het meten van de werkelijke volumeverandering van het monster. Er moet een methode worden gevonden om deze storing zoveel mogelijk te elimineren.

- Vooral bij lage steundrukken gaat de wrijving van de plunjerstang een grote rol spelen bij het aanbrengen van de verticale spanning S_1 . Door de opgelegde kracht in de cel te meten kan dit worden vermeden.

7 LITERATUURLIJST.

AITCHISON, G.D., 1961. Relationships of moisture stress and effective stress functions in unsaturated soils. Pore Pressure and Suction in Soils. Londen :Butterworths, 47-51.

AKKER, J.J.H. van den, 1988. Mondelinge mededelingen.

AKKER, J.J.H. van den en WIJK, A.L.M. van, 1987. A model to predict subsoil compaction due to field traffic. In: G.Monier en M.J. Goss (eds.). Soil Compaction and Regeneration. Proc. Workshop on Soil Compaction: Consequences and Structural Regeneration Processes, Avignon, 17-18 September 1985. A.A. Balkema Rotterdam/Boston, 69-84.

BOELS, D., 1974. Enkele opmerkingen over de bepaling en enkele waarden van c en ϕ . Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen.

BOELS, D. en HAVINGA, L., 1982. Bodemverdichting op een verbeterde veldpodzolgrond, een proef met verschillende wiellasten. Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding nota 1388, Wageningen.

BISHOP, A.W. en HENKEL, D.J., 1962. The measurement of soil properties in the triaxial test. Edward Arnold, London.

GIESBERS, J.G.M., 1985. Verdichting in grond. Stageverslag Hogere Landbouwschool s'Hertogenbosch. Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen.

HAINES, W.P., 1927. A further contribution to the theory of capillary phenomena in soils. J. Agric. Sc, 17, 264-290.

HETTIARATCHI, D.R.P. en O'CALLAGHAN, J.R., 1980. Mechanical behaviour of agricultural soils. Journal of Agricultural Engineering Research 25, 239-259.

HETTIARATCHI, D.R.P., 1987. A critical state soil mechanics model for agricultural soils. Soil Use and Water Management 3, 94-105.

HUIZINGA, T.K., 1969. Grondmechanica. Agon Elsevier, Amsterdam.

JENNINGS, J.E., 1961. A revised effective stress law for use in the prediction of the behaviour of unsaturated soils. Pore Pressure and Suction in Soils. Londen :Butterworths, 26-30.

KOOLEN, A.J. en KUIPERS, H., 1983. Agricultural Soil Mechanics. Springer Verlag, Berlin Heidelberg.

POULOVASSILIS, A., 1962. Hysteresis of pore water, an application of the concept of independent domains. Soil Science 93, 405-412.

REEVE, A.R. en KURTAY, T., 1970. Plasticity theorie and critical state soil mechanics. Journal of Terramechanics 7, 23-56.

SMAALEN, H. van, 1984. Inleiding grondmechanica. Syllabus vakgroep Weg en Waterbouw en Irrigatie, Landbouw Universiteit Wageningen.

TOWNER, G.D. en CHILDS E.C., 1972. The mechanical strength of unsaturated porous granular material. Journal of Soil Science 23, 481-498.

TOWNER, C.D., 1983. Effective stresses in unsaturated soils and their applicability in the theory of critical state soil mechanics. Journal of Soil Science 34, 429-435.

BIJLAGE 1

LIJST VAN GEBRUIKTE SYMBOLEN.

c	Schijnbare cohesie	kN/m ²
c'	Werkelijke cohesie	kN/m ²
Ev,	Relatieve volumeverandering	
Ey,	Relatieve verplaatsing	
f	Distibutiefunctie, die de verdeling van het porienwater over de verschillende zuigspanningstrajecten weergeeft	
ρ_w	Volumegewicht van het water	g/cm ³
ρ_d	Droog volumegewicht van de grond	g/cm ³
Γ	Specifiek volume bij de kritieke toestand met p=1 kN/m ² ln(p)=0	cm ³ /g
M	Helling van de kritieke toestandslijn bij v=0 porienvolume gevuld met water	
ϕ	Schijnbare hoek van inwendige wrijving	graden
ϕ'	Werkelijke hoek van inwendige wrijving	graden
p	Gemiddelde hoofdspanning	kN/m ²
q	Deviator spanning	kN/m ²
$\sigma_{1,2,3}$	Hoofdspanningen	kN/m ²
σ	Totale grondspanning	kN/m ²
σ'	Effectieve spanning	kN/m ²
σ'_w	De bijdrage van de zuigspanning aan de effectieve spanning.	kN/m ²
s	Zuigspanning	cm H ₂ O
s_d	Zuigspanning tijdens de drogingscycles	cm H ₂ O
s_w	Zuigspanning tijdens de bevochtigingscycles	cm H ₂ O
s_p	Zuigspanning die heerst in de continue fractie van het porienwater	cm H ₂ O
s_m	Zuigspanning waarbij verder waterverlies verwaarloosbaar is (arbitrair)	cm H ₂ O
S	Verzadigingsgraad	
S1, S2, S3	Hoofdspanningen	kN/m ²
τ	Schuifspanning	kN/m ²
U_w	Waterdruk	kN/m ²
U_a	Luchtdruk	kN/m ²
v	Reciproke van het droog volumegewicht	cm ³ /g
X	Het deel van het oppervlak van de bodem waarover de zuigspanning werkt	
λ	Helling van de critieke toestandslijn en de normale consolidatielijn bij q=0	

BIJLAGE 2

1/ Spannings-deformatie relaties bij een celdruk van 20 kN/m² en een volume vochtgehalte van 0.0992

2/ Spannings-deformatie relaties bij een celdruk van 50 kN/m² en een volume vochtgehalte van 0.0992

3/ Spannings-deformatie relaties bij een celdruk van 100 kN/m² en een volume vochtgehalte van 0.0992

a/ relatieve volumeverandering - relatieve verkorting

b/ deviator spanning - relatieve verkorting

c/ deviator spanning - relatieve volumeverandering

PROEF: MONSTER 30

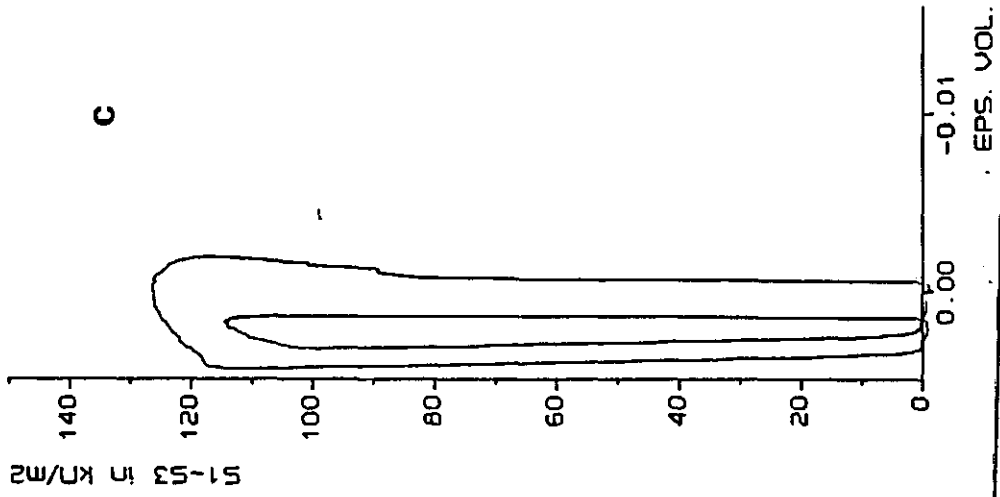
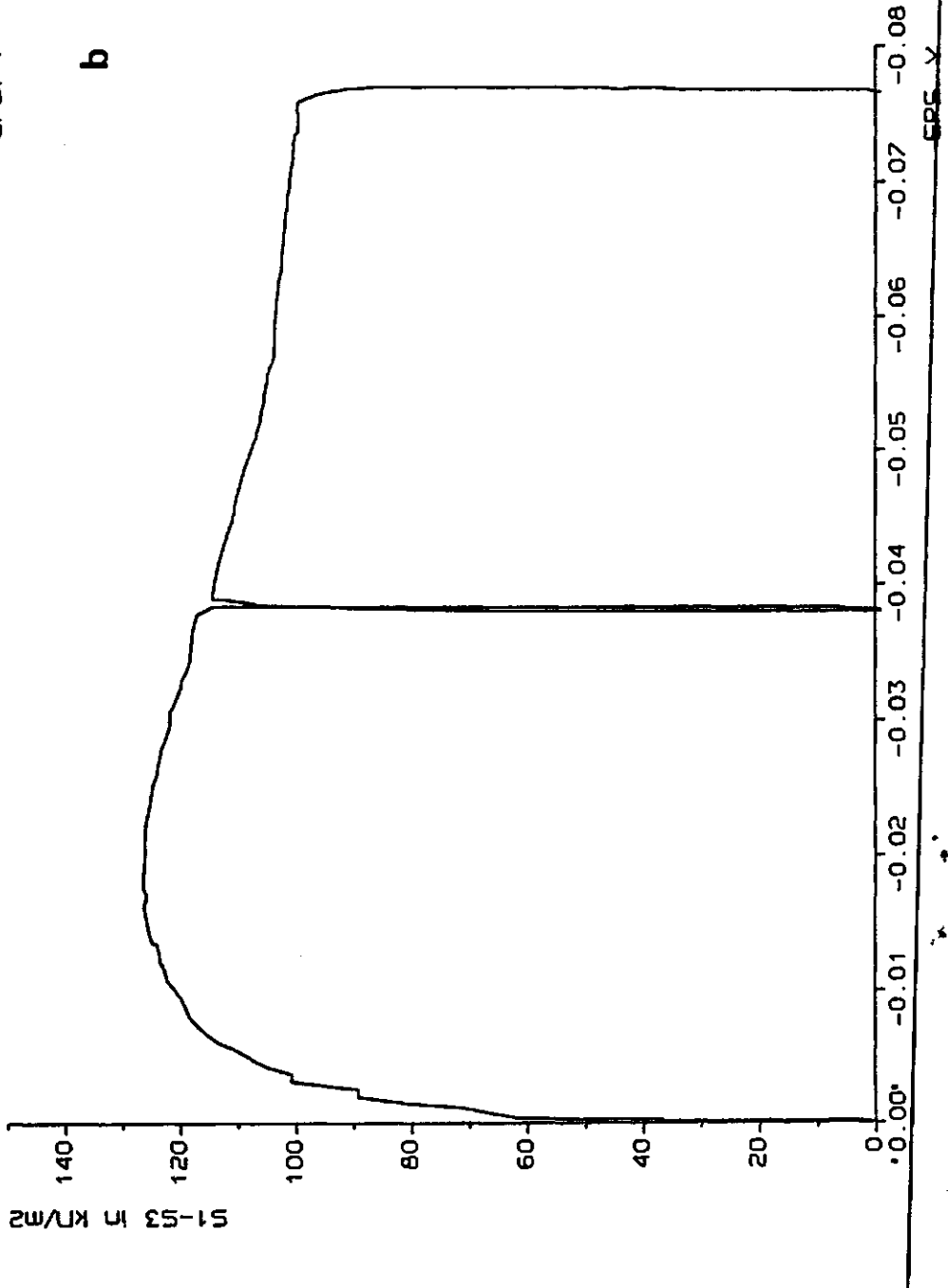
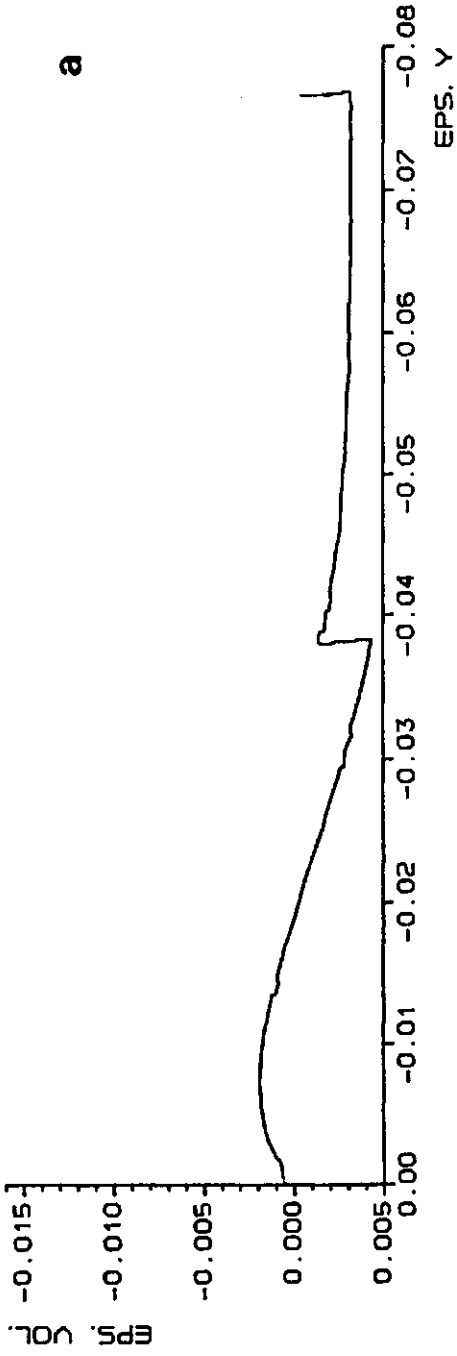
DATUM EN TIJD: 12-FEB-88

GRONDSOORT: WEST

INITIELE DICHTHEID IN KN/M³: 1.5

VOCHTGEHALTE IN GEW. %: 0.065

INGESTELDE CELDRUK IN KN/M²: 20.0



1

56

PROEF: MONSTER 36

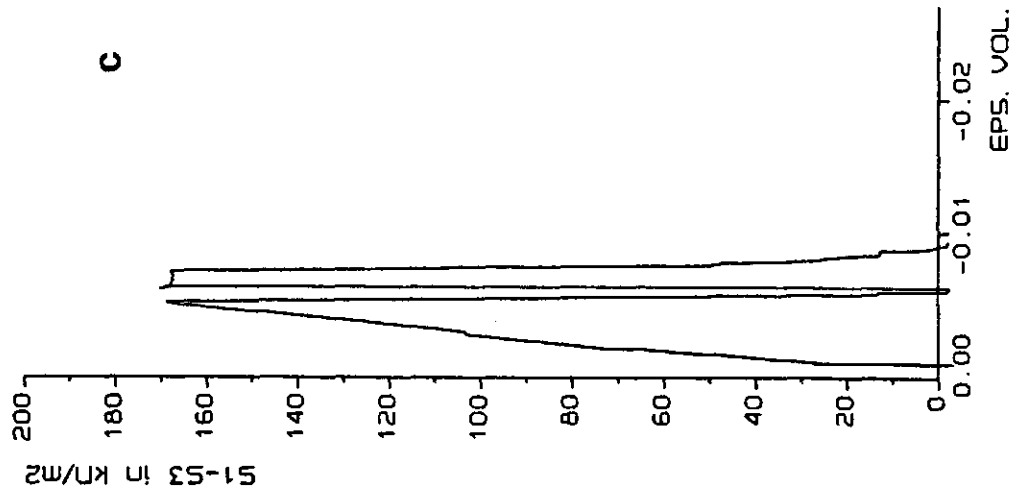
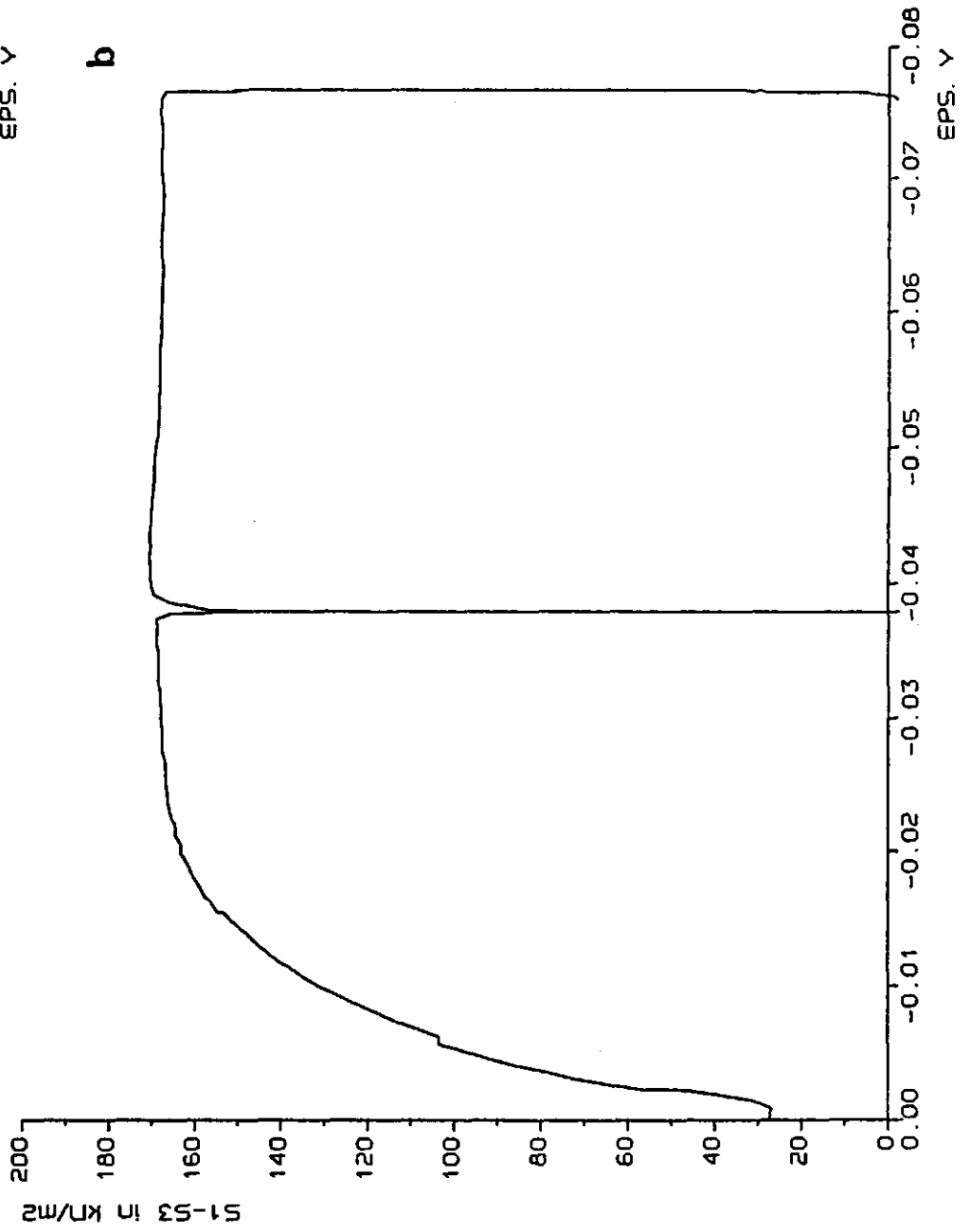
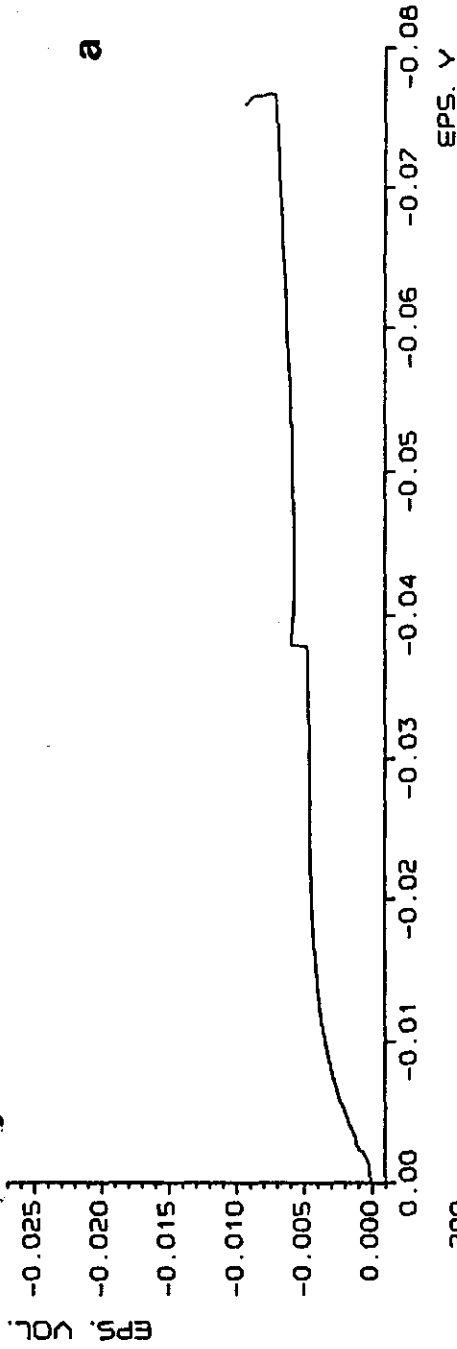
DATUM EN TIJD: 16-FEB-88

GRONDSOORT: WEST

INITIELE DICHTHEID IN KN/M3 : 1.5

VOCHTGEHALTE IN GEW. % : 0.064

INGESTELDE CELDRAUK IN KN/M2 : 50



2 57

PROEF: MONSTER 38

DATUM EN TIJD: 16-FEB-88

GRONDSOORT: WEST

INITIELE DICHTHEID IN KN/M³: 1.5

VOCHTGEHALTE IN GEW. %: 0.065

INGESTELDE CELDRUK IN KN/M²: 100

