

**Eindrapportage
Experimenteel onderzoek van het gedrag
van organische klei**

**CO 710203/28
November 2001**

Eindrapportage
Experimenteel onderzoek van het gedrag van
organische klei

Definitief

CO-710203/28
November 2001

Opgesteld in opdracht van:
Dienst Weg- en waterbouwkunde
Van der Burghweg 1
2600 GA Delft

AFDELING Verkenning
Projectleider : ir. J.Tigchelaar
Projectbegeleider: dr.ir. E.J. den Haan

GRONDMECHANICA DELFT
Stieltjesweg 2, 2628 CK DELFT
Postbus 69, 2600 AB DELFT

Telefoon (015) 269 35 00
Telefax (015) 261 08 21
Postbank 234342
Bank MeesPierson NV
Rek.nr. 25.92.35.911

INHOUDSOPGAVE

1	Inleiding	5
---	-----------	---

Deel 1 Gedrag van organische klei lokatie Bergambacht

Deel 2 Gedrag van organische klei lokatie Oostvaardersplassen

Deel 3 Evaluatie Gedrag van Klei en Veen

1 Inleiding

In het Delft Cluster project Gedrag van klei en veen, onderdeel van het basisproject Materiaal- en Ontwerpmodellen, thema 1 Grond en constructie, wordt onderzoek verricht naar het mechanisch gedrag van klei en veen. Binnen het project zijn een aantal subprojecten gedefinieerd. Eén daarvan is het lage spanningsonderzoek, voorheen ondergebracht in een VOP project: “Fundamenteel gedrag van de ondergrond”. In het lage spanningsonderzoek wordt het mechanisch gedrag van organische kleisoorten bij lage axiaal symmetrische effectieve spanningsniveaus (15 – 40 kPa) bestudeerd. Andere subprojecten richten zich op anisotropie van organische klei, het belang van microstructuur, pseudo-tijd, geschiktheid 2-D kruipmodellen, 1-D ontlastgedrag, in-situ spanningen en - stijfheid en monsterverstoring. Dit laatstgenoemde onderwerp heeft recent geleid tot een rapportage [den Haan, 2001]. Deze rapportage behandelt de resultaten van het proefprogramma uitgevoerd in het kader van het lage spanningsonderzoek (overeenkomst DWW-1753).

De kennis van het mechanisch gedrag van Nederlandse organische kleisoorten is beperkt. In het verleden zijn enkele onderzoeken uitgevoerd [den Haan, 1995, 1999]. Kennisleemte van organische klei betreft met name de sterkte van klei met een volumiek gewicht van ongeveer 12.5 kN/m^3 . In het verleden zijn regelmatig zeer hoge waarden van ϕ' waargenomen. Ook is uit de literatuur duidelijk geworden dat ϕ' groter is naarmate het volumiek gewicht kleiner is. Andere kennisleemtes in het gedrag van organische klei betreft de invloed van anisotropie op de sterkte en de reksnelheidsafhankelijkheid.

Niet alleen is het kennisniveau wat betreft bovenbeschreven eigenschappen beperkt maar ook is er behoefte aan geschikte proeftypen en – procedures om het gedrag van deze materialen af te tasten en geschikte modellen. Ook dit vormt onderdeel van het project.

Het overleg van de begeleidingscommissie van het VOP project “Fundamenteel gedrag van de ondergrond” (VOP1) op 1 juli 1999, heeft geleid tot een plan van aanpak hoe het materiaalgedrag van organische klei te onderzoeken. Besloten is om eerst, naast een serie classificatie- en indexproeven, een serie ‘verkennende’ anisotroop geconsolideerde ongedraineerde triaxiaalproeven (CK_0U) uit te voeren waarbij monsters anisotroop worden geconsolideerd bij eenmaal- en tweemaal de terreinspanning en bij een relatief hoge spanning om vervolgens ongedraineerd te worden afgeschoven. Het hoogste spanningsniveau is zodanig hoog gekozen dat normaalgeconsolideerd gedrag kan worden onderzocht. Dit leidde tot effectieve verticale spanningsniveaus van 15kPa, 30kPa en 100kPa. Om de invloed van structuur te onderzoeken was ook een serie triaxiaal proeven (CK_0U) op gereconstitueerde klei gewenst. K_0 -CRS proeven, met als doel het bepalen van de neutrale gronddrukcoëfficiënt en de samendrukkingseigenschappen, en direct simple shear constant volumeproeven om de invloed van anisotropie op de gemeten sterkte waar te nemen maakten het programma compleet. Voor de bruikbaarheid van de onderzoeksresultaten zijn op meerdere locaties monsters verzameld.

De eerste onderzoekslocatie betreft het proefvak actuele sterkte langs de Lekdijk te Bergambacht. Deze site is gekozen vanwege de representativiteit van deze kleisoorten voor de Krimpenerwaard en het feit dat ter plaatse grootschalig onderzoek wordt gedaan naar de stabiliteit van dijken (full scale bezwijkproef). Het project actuele sterkte vormt zo een referentieproject. In de Holocene klei uit de Westlandformatie zijn op grotere diepte organische kleimonsters verzameld. Het verticale effectieve spanningsniveau is laag, ongeveer 15 kPa.

De tweede onderzoekslokatie betreft het Oostvaardersplassengebied, gemeente Lelystad, nabij de gemeentegrens met Almere-buiten. In het verleden is de ondergrond van dit gebied regelmatig onderwerp van studie geweest; een full scale bezwijkproef met een ophoging was in dit gebied gepland. Monsterneming heeft regelmatig plaatsgevonden. De full scale bezwijkproef is later niet uitgevoerd. Ten behoeve van het monsterverstoringsonderzoek heeft monsterneming met 3 verschillende steektechnieken plaatsgevonden. De organische kleimonsters zijn gestoken in een Holocene laag uit de Almere-fase (afzetting van Duinkerke). Het verticale effectieve spanningsniveau is laag, ongeveer 20 kPa.

De beschrijving van het uitgevoerde proefprogramma betreffende de lokaties Bergambacht en Oostvaardersplassen zijn beschreven in respectievelijk deel 1 en deel 2, de evaluatie in deel 3.

Referenties

Haan, E.J. den (1995a). "Theme report on Special Problem Soils and Soft rocks, Part I Peats and organic soils", XI ECSMFE Kopenhagen, 9:139-156.

Haan, E.J. den (1995b). "Veen (en organische klei), een grondmechanisch probleem", KIVI open sprekersdag 20 juni 1995.

Haan, E.J. den (1999). "Celproef of triaxiaalproef ?", geotechniek, jaargang 3, nummer 1, pp. 5-11.

Haan, E.J. den (2001). "Sample disturbance of a soft organic dutch clay", CO-710203/20.

**Gedrag van organische klei
lokatie Bergambacht**

**CO 710203/23
Augustus 2001**

Gedrag van organische klei
lokatie Bergambacht
DC Gedrag van klei en veen

concept

CO-710203/23
Augustus 2001

Opgesteld in opdracht van:
Dienst Weg- en waterbouwkunde
Van der Burghweg 1
2600 GA Delft

AFDELING Verkenning
Projectleider : ir. J.Tigchelaar
Projectbegeleider: dr.ir. E.J. den Haan

GRONDMECHANICA DELFT
Stieltjesweg 2, 2628 CK DELFT
Postbus 69, 2600 AB DELFT

Telefoon (015) 269 35 00
Telefax (015) 261 08 21
Postbank 234342
Bank MeesPierson NV
Rek.nr. 25.92.35.911

Rapportnr: CO-710203/23		datum rapport: Augustus 2001			
Titel en subtitel: Gedrag van organische klei lokatie Bergambacht DC Gedrag van klei en veen		behandelende afdeling: Verkenning			
		projectnaam: Gedrag van klei en veen			
Projectleider(s): ir. J.Tigchelaar		projectbegeleider(s): dr.ir. E.J. den Haan			
Naam en adres opdrachtgever: Dienst Weg- en waterbouwkunde Van der Burghweg 1 2600 GA Delft		referentie opdrachtgever: DWW-1753			
		type rapport: Concept			
Samenvatting rapport: Binnen het DC project Gedrag van klei en veen is onderzoek verricht naar het constitutieve gedrag van organische klei afkomstig van het DC proefvak actuele sterkte te Bergambacht. Het experimentele onderzoek omvatte classificatie-, index-, K_0-CRS -, triaxiaal- en direct simple shearproeven. Uit het onderzoek blijkt dat de klei niet voldoet aan de tekstboekverwachtingen. De organische klei laat een zeer grote variatie van eigenschappen zien. Op een diepteverschil van 10cm kan het watergehalte 50% verschillen. Dit heeft consequenties voor de keuze van monstergrootte voor beproeving. Deze variatie van de eigenschappen pleit voor verder onderzoek. De specifieke massa's van het organische- en minerale deel verschillen per onderzoekslokatie. Daarom wordt aangeraden om voor een groot project proefverzamelingen aan te leggen. Hierbij moet het gloeiverlies een belangrijke rol spelen. Het gloeiverlies correleert sterk met de uitzuigrens, de vloeigrens en de specifieke massa. Voor speurwerk is meer informatie nodig. Per monster is kennis van het watergehalte, volumiek gewicht en de specifieke massa wenselijk. Ook is de waargenomen K_0, tegen de verwachting in, relatief hoog: 0.4. Om de K_0 te schatten wordt vaak de Jaky relatie gebruikt: $K_0 = 1 - \sin \phi'$. De triaxiaalproefresultaten geven aan dat ϕ' wel eens zeer hoog zou kunnen zijn en gaat dus de Jaky relatie niet op. Gereconstitueerde monsters bezitten een hogere K_0 dan het natuurlijk materiaal. Het meest in het oog springend proefresultaat van de uitgevoerde ongedraineerde triaxiaalproeven is het bezwijken van monsters op of nabij de tension cut-off; het vlak in de spanningsruimte dat trek- en drukspanningen scheidt. Dit vlak kan geassocieerd worden met een ϕ' van 90°. Dit impliceert niet dat ϕ' gelijk is aan 90°. Wellicht is het mogelijk dat de organische klei de capaciteit heeft om trekspanningen op te nemen (cohesie). In dat geval is ϕ' lager. Naar verwachting blijft ϕ' relatief hoog. De ϕ' waargenomen in de direct simple shearproeven heeft een veel lagere waarde maar deze ϕ' zal afhankelijk zijn van de wijze van interpretatie. In vergelijking met natuurlijk materiaal laten in de triaxiaalopstelling beproefde gereconstitueerde monsters een kleinere sterkte en stijfheid zien bij gelijke consolidatiespanning. Dit wordt toegeschreven aan structuur en spanningsgeschiedenis van de natuurlijke monsters. De normaalgeconsolideerde natuurlijke monsters laten dezelfde mate van waterspanningsopbouw zien tijdens de ongedraineerde afschuiffase als een normaal geconsolideerd gereconstitueerd monster. Dit geldt ook voor de genormaliseerde ongedraineerde schuifsterkte en stijfheid. Blijkbaar heeft het normaalgeconsolideerde natuurlijke monster zijn structuur verloren. De genormaliseerde ongedraineerde schuifsterkte van normaalgeconsolideerde klei ligt onder de Skempton relatie. Dit geldt voor proefresultaten uit de triaxiaal- en direct simple shearproeven. Dit betekent dat de organische klei bij gelijke plasticiteit minder sterk is in vergelijking met niet organische kleisoorten. De organische klei, zoals beproefd, komt voor in grote delen van het land, nabij waterkeringen. Om de betrouwbaarheid van waterkeringen beter te kunnen inschatten is het dus zaak het gedrag van de kleisoorten goed af te tasten. Dit onderzoek vormt slechts het begin.					
opmerkingen:					
trefwoorden: organische klei, lage spanningen, sterkte, classificatieproeven, indexproeven, variabiliteit, K_0 -CRS proef, triaxiaalproef, direct simple shearproef, structuur.		verspreiding: ir. H.L.Bakker (RWS-DWW), drs.A.Bizzarri (RWS-DWW), prof.dr.ir.A.Verruijt (TUD), dr.ir.E.J.den Haan (GeoDelft), ir. J.W. de Feijter (GeoDelft), dr.ir.M.A. Van (GeoDelft), ir. J.Tigchelaar (GeoDelft).			
opgeslagen op: onder titel: r710203-23-concept					aantal blz.: 70
versie:	datum:	opgesteld door:	paraaf:	Gecontroleerd door:	paraaf:
	Augustus 2001	ir. J.Tigchelaar		dr.ir. E.J. den Haan	

INHOUDSOPGAVE

Samenvatting	1
1 Inleiding	2
2 Grondopbouw Lokatie Bergambacht	3
3 Monsterneming	4
3.1 Monsterverwerking en -opslag	4
3.2 Monsterkwaliteit en -keuze	4
4 Classificatie – en indextesten	5
4.1 Gevolgde procedure	5
4.2 Watergehalte	5
4.3 Atterbergse grenzen	5
4.4 Consistentie van de grond	6
4.5 Soortelijke massa	6
4.6 Kalkgehalte en gloeiverlies	6
4.7 Ongedraineerde schuifsterkte	7
4.8 Resultaten van classificatie- en index testen	8
4.9 Correlaties	9
4.10 Variabiliteit grondeigenschappen	15
4.11 Indicatie effectief verticaal spanningsniveau	17
4.12 Conclusies classificatie – en indextesten	18
5 Proefprogramma constitutief gedrag organische klei	19
5.1 Inleiding	19
5.2 K_0 CRS proeven	21
5.3 Triaxiaalproeven	31
5.4 Direct Simple Shear proeven	52
6 Conclusies	59

Bijlage 1 Boorbeschrijvingen B28, B31 en B35

Samenvatting

Binnen het DC project Gedrag van klei en veen is onderzoek verricht naar het constitutieve gedrag van organische klei afkomstig van het DC proefvak actuele sterkte te Bergambacht. Het experimentele onderzoek omvatte classificatie-, index-, K_0 -CRS -, triaxiaal- en direct simple shearproeven.

Uit het onderzoek blijkt dat de klei niet voldoet aan de tekstboekverwachtingen. De organische klei laat een zeer grote variatie van eigenschappen zien. Op een diepteverschil van 10cm kan het watergehalte 50% verschillen. Dit heeft consequenties voor de keuze van monstergrootte voor beproeving. Deze variatie van de eigenschappen pleit voor verder onderzoek.

De specifieke massa's van het organische- en minerale deel verschillen per onderzoekslokatie. Daarom wordt aangeraden om voor een groot project proefverzamelingen aan te leggen. Hierbij moet het gloeiverlies een belangrijke rol spelen. Het gloeiverlies correleert sterk met de uitrolgrens, de vloeigrens en de specifieke massa. Voor speurwerk is meer informatie nodig. Per monster is kennis van het watergehalte, volumiek gewicht en de specifieke massa wenselijk.

Ook is de waargenomen K_0 , tegen de verwachting in, relatief hoog: 0.4. Om de K_0 te schatten wordt vaak de Jaky relatie gebruikt: $K_0 = 1 - \sin \phi'$. De triaxiaalproefresultaten geven aan dat ϕ' wel eens zeer hoog zou kunnen zijn en gaat dus de Jaky relatie niet op. Gereconstitueerde monsters bezitten een hogere K_0 dan het natuurlijk materiaal.

Het meest in het oog springend proefresultaat van de uitgevoerde ongedraineerde triaxiaalproeven is het bezwijken van monsters op of nabij de tension cut-off; het vlak in de spanningsruimte dat trek- en drukspanningen scheidt. Dit vlak kan geassocieerd worden met een ϕ' van 90° . Dit impliceert niet dat ϕ' gelijk is aan 90° . Wellicht is het mogelijk dat de organische klei de capaciteit heeft om trekspanningen op te nemen (cohesie). In dat geval is ϕ' lager. Naar verwachting blijft ϕ' relatief hoog. De ϕ' waargenomen in de direct simple shearproeven heeft een veel lagere waarde maar deze ϕ' zal afhankelijk zijn van de wijze van interpretatie.

In vergelijking met natuurlijk materiaal laten in de triaxiaalopstelling beproefde gereconstitueerde monsters een kleinere sterkte en stijfheid zien bij gelijke consolidatiespanning. Dit wordt toegeschreven aan structuur en spanningsgeschiedenis van de natuurlijke monsters. De normaalgeconsolideerde natuurlijke monsters laten dezelfde mate van waterspanningsopbouw zien tijdens de ongedraineerde afschuiffase als een normaal geconsolideerd gereconstitueerd monster. Dit geldt ook voor de genormaliseerde ongedraineerde schuifsterkte en stijfheid. Blijkbaar heeft het normaalgeconsolideerde natuurlijke monster zijn structuur verloren.

De genormaliseerde ongedraineerde schuifsterkte van normaalgeconsolideerde klei ligt onder de Skempton relatie. Dit geldt voor proefresultaten uit de triaxiaal- en direct simple shearproeven. Dit betekent dat de organische klei bij gelijke plasticiteit minder sterk is in vergelijking met niet organische kleisoorten.

De organische klei, zoals beproefd, komt voor in grote delen van het land, nabij waterkeringen. Om de betrouwbaarheid van waterkeringen beter te kunnen inschatten is het dus zaak het gedrag van de kleisoorten goed af te tasten. Dit onderzoek vormt slechts het begin.

1 Inleiding

In het Delft Cluster project Gedrag van klei en veen, onderdeel van het basisproject Materiaal- en Ontwerpmodellen, thema 1 Grond en constructie, wordt onderzoek verricht naar het mechanisch gedrag van klei en veen. Binnen het project zijn een aantal subprojecten gedefinieerd. Eén daarvan is het lage spanningsonderzoek, voorheen ondergebracht in een VOP project: “Fundamenteel gedrag van de ondergrond”. In het lage spanningsonderzoek wordt het mechanisch gedrag van organische kleisoorten bij lage axiaal symmetrische effectieve spanningsniveaus (15 – 40 kPa) bestudeerd.

De kennis van het gedrag van Nederlandse organische kleisoorten is beperkt. In het verleden zijn enkele onderzoeken uitgevoerd zoals bijvoorbeeld een grote serie classificatie-, index- en samendrukkingsproeven op klei en veen uit een gedeelte van het Betuwelijn project en uit polder Zegveld nabij Woerden (den Haan, 1995). Kennisleemte van organische klei betreft met name de sterkte van het materiaal, uitgedrukt in bijvoorbeeld de hoek van inwendige wrijving ϕ' . Waargenomen is een relatief hoge ϕ' .

Voor dit onderzoek wordt organische klei van verschillende lokaties beproefd in het laboratorium. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een K_0 -oedometer Constant Rate of Strain -, een state-of-the-art triaxiaal- en een direct simple shear opstelling. Naast deze proeven zullen ook index - en classificatie proeven worden uitgevoerd. Het uitgevoerde werk maakt onderdeel uit van de overeenkomst DWW-1753.

In de gemeente Bergambacht, op het Delft Cluster proefvak Bergambacht (project Actuele sterkte) langs de Lek, zijn enkele boringen gemaakt. Uit deze boringen zijn organische kleimonsters geselecteerd voor beproeving. Het betreft Holocene klei uit de Westland Formatie, afzettingen van Gorkum. Deze site is gekozen vanwege de representativiteit van deze kleisoorten voor de Krimpenerwaard en het feit dat ter plaatse grootschalig onderzoek wordt gedaan naar de stabiliteit van dijken. Het project actuele sterkte vormt zo een referentieproject.

De resultaten van de eerste serie proeven op organische klei zijn en zijn beschreven in dit rapport. Na een beschrijving van de grondopbouw en monsterneming en – behandeling in hoofdstuk 2 en 3 worden in hoofdstuk 4 de resultaten gepresenteerd van de vele index - en classificatie proeven. Hoofdstuk 5 behandelt de resultaten van de K_0 -oedometer CRS, triaxiaal- en constant volume direct simple shearproeven. De belangrijkste conclusies van het onderzoek zijn in hoofdstuk 6 geformuleerd.

2 Grondopbouw Lokatie Bergambacht

De grondopbouw ter plaatse van de gestoken boringen is Tabel 2-1 geschematiseerd weergegeven. Deze resultaten zijn gebaseerd op de in oktober 2000 uitgevoerde Begemann boringen B28, B31 en B35. De lokatie van de boringen is zover mogelijk van dijklichamen of ophogingen gekozen om mogelijke invloeden door de aanwezigheid van de dijk te minimaliseren. Het doel was om monsters te steken die onder uniforme spanningscondities ('verre veld') zijn belast en aangepast. De boringen zijn enkele m's van elkaar gemaakt. De boorbeschrijvingen zijn ingevoegd als bijlage 1. Voor de boorlokaties wordt verwezen naar tekening "situatie veldonderzoek, proefvak actuele sterkte", CO-710301 d.d. 2000-10-25 (niet bijgevoegd).

diepte		grondsoort	Afzetting	
van	tot			
[MV..m]	[MV..m]			
0.0	1.5	klei, matig tot sterk siltig	Antropogeen/Tiel	Holoceen
1.5	5.5	veen, mineraalarm	Hollandveen	
5.5	7.2	veen, zwak kleiig	"	
7.2	9.2	klei, zwak siltig, sterk humeus	Gorkum	
9.2	11	klei, matig tot sterk siltig, enkele plantenresten	"	
11	12	zand, zwak tot matig siltig	"	
12	13	klei, matig siltig	"	
13	13.3	zand, zwak siltig	"	

Tabel 2-1 Geschematiseerde grondopbouw onderzoekslokatie Bergambacht

Het maaiveld ter plaatse van de monsternemingslokatie ligt op NAP+0.0 m. Het freatisch vlak lag ten tijde van monsterneming enkele dm's boven maaiveldniveau.

Voor de classificatie- en indextesten zijn de grondlagen tussen MV-7m en MV-11m onderzocht. De K₀-CRS -, triaxiaal- en direct simple shearproeven zijn uitgevoerd op klei uit de laag tussen MV-7.2m en MV-9.2m.

3 Monsterneming

3.1 Monsterverwerking en -opslag

Na monsterneming zijn de Begemann boringen direct naar het laboratorium gebracht alwaar ze direct zijn verwerkt. De circa 1 meter lange monsters zijn voorzichtig uit de liners gehaald waarna de kous is verwijderd. Na het uitleggen zijn de grondsoorten beschreven en zijn de monsters gefotografeerd. Vervolgens zijn de monsters opgedeeld in kleinere monsters met een lengte van 20 cm. Deze monsters zijn in plastic folie gewikkeld en in PVC buizen opgeslagen in een temperatuur gecontroleerde (11 °C) zeer vochtige (relatieve vochtigheid >90%) opslag tot het moment van beproeving.

3.2 Monsterkwaliteit en -keuze

Voor de in dit rapport gepresenteerde proefresultaten van classificatie- en index testen is alleen gebruik gemaakt van organische klei uit boring 28 afkomstig van een diepte MV-7m tot MV-11m. Het bovenliggende Hollandveen is in een ander subproject beproefd. Van de 3 uitgevoerde boringen (B28, B31 en B35) is B28 waarschijnlijk kwalitatief de minst goede; een stukje hout is tijdens monsterneming aan de steekmond blijven kleven en heeft een groef langs het monster ter plaatse van de organische klei veroorzaakt. Dit heeft mogelijk tot verstoring geleid. Verstoring leidt tot een verandering van structuur waardoor bijvoorbeeld de stijfheid en de ligging van de grensspanning kunnen veranderen. Ook kan de in het monster aanwezige zuigspanning hierdoor lager zijn. De mogelijke verstoring is voor de index- en classificatie proeven geen bezwaar omdat bij deze proefjes monsters worden verkneeld. Wellicht dat de resultaten van de torvane - en valconus testen hierdoor worden beïnvloed. De kwalitatief goede boringen zijn gebruikt voor de K_0 CRS-, triaxiaal-, en direct simple shearproeven.

4 Classificatie – en indextesten

4.1 Gevolgde procedure

De 20 cm lange monsters zijn in 2 delen van respectievelijk 5 cm (bovenzijde) en 15 cm gesplitst met een trimzaag. Hierna is een torvane testje gedaan op het bovenzijde van het 15 cm deel. 3 valconus testen (Zweedse conus: 30°/100 g) zijn uitgevoerd op het ondervlak van het 5cm gedeelte. Vervolgens is het kleinere monster intensief verkneet waarna enkele valconus - en torvane testen zijn gedaan op het verkneede materiaal. Een kleine volume steekring (5 cm³) is vervolgens gevuld en zorgvuldig afgetrimd waarna het volumiek gewicht, het watergehalte, de soortelijke massa, het gloeiverlies en het kalkgehalte is bepaald. Het overgebleven deel van het verkneede 5 cm monster is gebruikt voor de bepaling van de uitrolgrens en vloeigrens (Casagrande). De 15 cm lange monsters zijn in ingepakt en opgeslagen in een temperatuur gecontroleerd vochtige opslag.

4.2 Watergehalte

Het watergehalte is bepaald door de inhoud van de kleine volumesteekring te drogen bij 105 °C gedurende minimaal 24 uur. Door aan te nemen dat het poriënwater geen zout bevat kan het watergehalte worden bepaald met:

$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100 \%$$

Waarin:

w	=	watergehalte	[-]
m _w	=	massa water	[g]
m _s	=	massa korrelmateriaal	[g]

Voor de classificatie- en indextesten van de klei uit de Oostvaardersplassen is een aantal monsters gedroogd bij 60 °C en vervolgens bij 105 °C waarna de behorende watergehaltes zijn bepaald. De bedoeling hiervan was een indicatie te hebben van de invloed van de droogtemperatuur op het watergehalte. Hieruit volgde geringe verschillen: het watergehalte bepaald bij 105 °C lag gemiddeld 2.5% hoger (46 metingen). Voor watergehaltes van organische klei in de orde van 150% - 200% lag deze afwijking rond de 4 %. Het verschil is groter naarmate het watergehalte groter is. Omdat droging bij de verschillende temperaturen achter elkaar is uitgevoerd, kan theoretisch ook de droogtijd nog van invloed zijn. Dit is niet de verwachting. Gezien de geringe verschillen er is geen reden om in dit onderzoek bij een lagere temperatuur te drogen om mogelijke oxidatie van het organisch materiaal te beperken. Dit geldt niet zonder meer voor watergehaltebepalingen op mineraal arm veen. In het vervolg is het watergehalte bepaald door droging bij 105 °C.

4.3 Atterbergse grenzen

Vloeigrens

Een deel van het monster is op een glasplaat verkneet onder toevoeging van gede-ioniseerd water. Hierna is het monster weer ingepakt en opgeslagen gedurende 24 uur zodat de klei zich kan aanpassen aan het nieuwe watergehalte. Uiteindelijk is het monster opnieuw verkneet en is de vloeigrens (w_L) bepaald, gebruik makend van het Casagrande apparaat (BS1977).

Uitrolgrens

Voor het bepalen van de uitrolgrens (w_p) is een gedeelte van de originele verkneede klei gebruikt. De klei is regelmatig tussen de vingers verkneet en op een glasplaats uitgerold tot de gewenste vorm. Bij deze conditie is het watergehalte bepaald.

4.4 Consistentie van de grond

Om de consistentie van de grond te beschrijven is gebruik gemaakt van de liquidity index, gedefinieerd als:

$$I_L = \frac{w - w_p}{I_p}$$

Waarin:

I_L	=	liquidity index	[-]
w	=	watergehalte	[-]
w_p	=	uitrolgrens	[-]
w_L	=	vloeigrens	[-]
I_p	=	plasticiteitsindex = $w_L - w_p$	[-]

4.5 Soortelijke massa

Een deel van de inhoud van de volumesteekring is 24 uur gedroogd bij 105 °C en gemalen voor het bepalen van de dichtheid van het korrelmateriaal, de soortelijke massa. Hierbij zijn het pycnometer apparaat (AccuPyc) en een precisiebalans gebruikt.

In het pycnometerapparaat worden twee kamers gevuld met Helium. In de ene kamer is een container (+/- 8 cm³) ingebracht, gevuld met enkele cm's gemalen droge stof. De andere kamer blijft slechts gevuld met Helium. Helium heeft de eigenschap zeer goed in zeer kleine poriën te kunnen dringen. In de tweede kamer kan de druk worden gevarieerd. Beide kamers kunnen met elkaar in verbinding worden gebracht. Uit de bekende volumes van beide kamers en de gemeten aangebrachte drukveranderingen kan met behulp van de gaswet het volume van de korrels worden bepaald. Met het apparaat is een volledig automatische bepaling van het volume van het korrelmateriaal mogelijk.

In combinatie met de massametingen van de droge stof wordt de soortelijke massa bepaald.

4.6 Kalkgehalte en gloeiverlies

Het gloeiverlies (N) en kalkgehalte (CaCO₃) van de inhoud van de volume steekringen is bepaald door het gedroogde materiaal gedurende 4 respectievelijk 2 uur in een porseleinen schaalte te verhitten bij 500 °C en respectievelijk 900 °C. De eerste verwarmingscyclus leidt tot het verbranden van het organisch materiaal. Uit het massaverlies wordt het gloeiverlies bepaald. De tweede verwarmingscyclus leidt tot het reduceren van CaCO₃ tot CO₂ en CaO. Het CO₂ verlaat het monster en leidt tot een afname van de droge massa. De hoeveelheid CO₂ die het monster heeft verlaten kan worden omgerekend naar de hoeveelheid CaCO₃, oorspronkelijk aanwezig in het monster. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de verhouding van de molaire massa van beide componenten (2,27). Na de verhittingscycli zijn de monsters in een exsiccator afgekoeld om te voorkomen dat de monsters vocht aantrekken.

4.7 Ongedraineerde schuifsterkte

Voor het bepalen van de ongedraineerde schuifsterkte en de gevoeligheid (sensitivity) van de grond is de handtorvane en de GEONOR valconus 30°-100 g gebruikt. Deze conus is gekozen voor voldoende penetratie in zowel natuurlijke - als verkneede klei zonder dat van conus moet worden gewisseld. Dit komt de nauwkeurigheid van gevoeligheidsbepaling van de klei ten goede.

De kleinste zijde van het te penetreren ondervlak van het 5cm gedeelte (4.1) was ongeveer gelijk aan 6 cm. De hoogte van het monster was gelijk aan ongeveer 5 cm. Deze afmetingen en randvoorwaarden overtreffen de monstergrootte voor de 'standaardprocedure' van de valconus. Hierbij bedraagt de hoogte 40 mm en de diameter 55 mm (BS 1377). Daarom is aangenomen dat de randvoorwaarden de penetratie van de valconus niet beïnvloeden.

Ongedraineerde schuifsterkte valconus

De ongedraineerde schuifsterkte kan worden berekend met:

$$C_u = Cg \frac{m}{i^2}$$

waarin:

C_u	=	ongedraineerde schuifsterkte	[kPa]
C	=	empirische constante	[-]
g	=	zwaartekrachtsversnelling	[m/s ²]
m	=	massa valconus	[g]
i	=	penetratiediepte	[mm]

De constante C is een empirische constante die wordt bepaald door de soort conus en de mate van verstoring van de grond. C wordt meestal gekalibreerd aan de hand van in-situ testen zoals de in-situ vane test. Laatstgenoemde testen zijn op de Bergambachtlokatie niet uitgevoerd. De ongedraineerde schuifsterkte is berekend door een waarde van 0.8 aan te nemen, zoals voorgeschreven is de Europese norm ETC5-E1.97 (Larsson et al., 1998).

Sensitivity

De verhouding van de ongedraineerde schuifsterkte van gestoken klei ten opzichte van de ongedraineerde schuifsterkte van verkneede klei bij hetzelfde watergehalte wordt sensitivity genoemd en is te berekenen uit het kwadraat van de verhouding van penetratiedieptes:

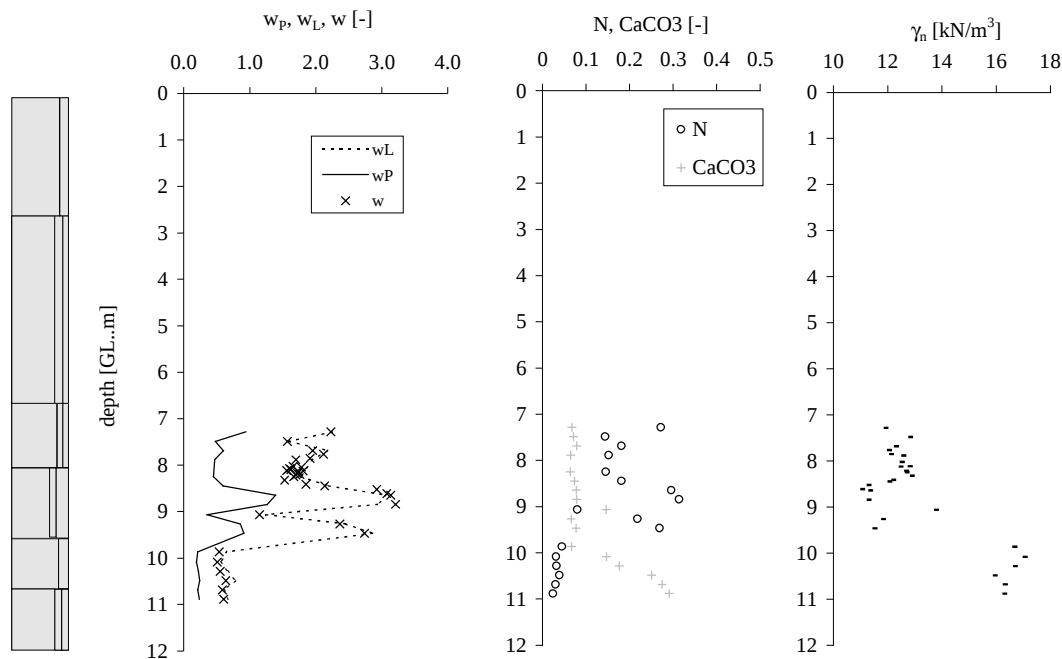
$$S_t = \frac{C_u}{C_r} = \frac{i_r^2}{i_u^2} = \left(\frac{i_r}{i_u} \right)^2$$

waarin:

S_t	=	sensitivity	[-]
C_u	=	ongedraineerde schuifsterkte gestoken klei	[kPa]
C_r	=	ongedraineerde schuifsterkte verkneede klei	[kPa]
i_r	=	penetratie conus in verkneede klei	[mm]
i_u	=	penetratie conus in gestoken klei	[mm]

4.8 Resultaten van classificatie- en index testen

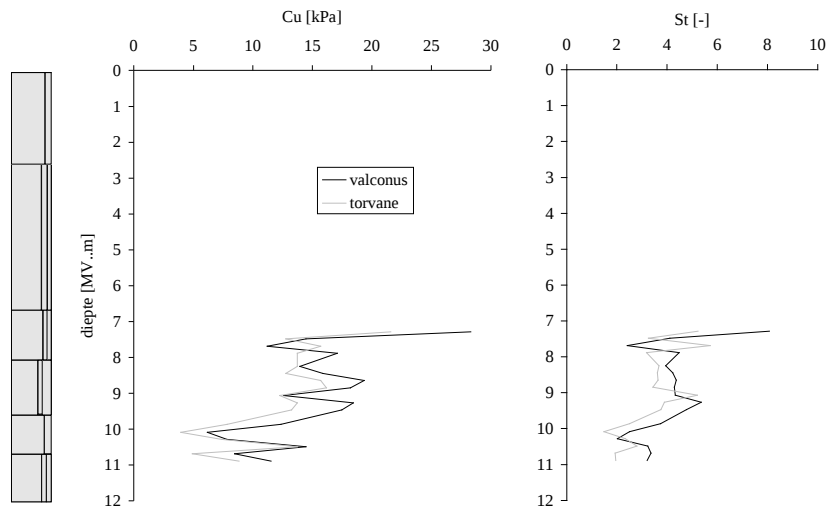
In Figuur 4.1 zijn de resultaten van de classificatie - en indexproeven gepresenteerd in enkele diepteprofielen. Een typisch grondprofiel is naast de proefresultaten geplott.



Figuur 4.1 Diepteprofielen Bergambacht site: N, CaCO₃, w, w_p, w_L, γ_n

Uit de figuur volgt dat de grond tussen MV-7m and MV-11m kan worden opgedeeld in drie lagen: twee organische lagen en een weinig organische kalkrijke laag. De boorbeschrijvingen komen ook overeen met deze indeling. De volumieke gewichten van de lagen zijn gelijk aan respectievelijk 12 kN/m³, 11 kN/m³ en 16 kN/m³. De liquidity indices van de lagen zijn relatief hoog: voor de organische lagen tussen 0.83 en 1.16 en voor de kalkrijke laag tussen 0.73 – 0.93. De diepst gelegen organische laag bevat meer organisch materiaal. Dit uit zich in een hoger gloeiverlies. Die laag is dan ook niet gebruikt voor verdere beproeving; het volumiek gewicht is te laag. De kalkrijke laag heeft een laag gloeiverlies.

Figuur 4.2 toont het verloop van de ongedraineerde schuifsterkte, bepaald met de valconus en de handtorvane, en de verhouding van de ongedraineerde schuifsterkte van ongeroerd ongestoorde grond en verkneede grond (gevoeligheid S_r) met de diepte. De torvane resultaten laten een zelfde verloop zien van de ongedraineerde schuifsterkte met de diepte. Ondanks de eenvoud lijkt de handtorvane een goede indicator te zijn. Uit de figuur blijkt verder dat de organische lagen een ongedraineerde schuifsterkte van ongeveer 15 kPa hebben terwijl de kalkrijke klei een ongedraineerde schuifsterkte van ongeveer 10 kPa heeft.



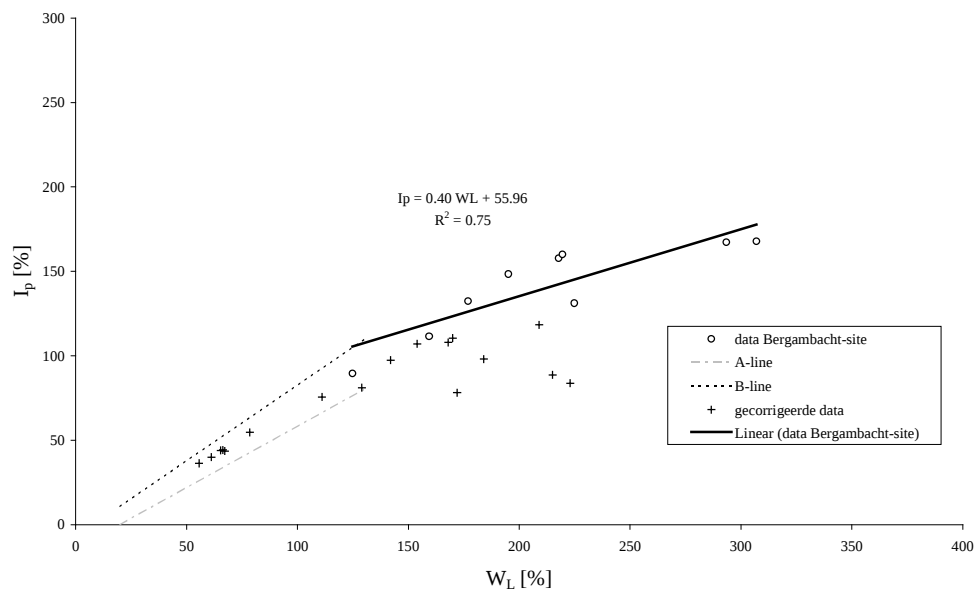
Figuur 4.2 Diepteprofielen Bergambacht site: C_u en S_t

De met de valconus bepaalde gevoeligheid van de grond bedraagt ongeveer 4. Dit is niet in overeenstemming met de waarnemingen in de uitgevoerde triaxiaalproeven (5.3.5). Uit die proeven blijkt namelijk dat de gevoeligheid veel kleiner is; meer in de orde van 1 tot 2. Omdat de spanningstoestand in de triaxiaalproef veel nauwkeuriger bekend is dan in de valconusproef, geeft de triaxiaalproef naar verwachting een meer betrouwbaar resultaat.

4.9 Correlaties

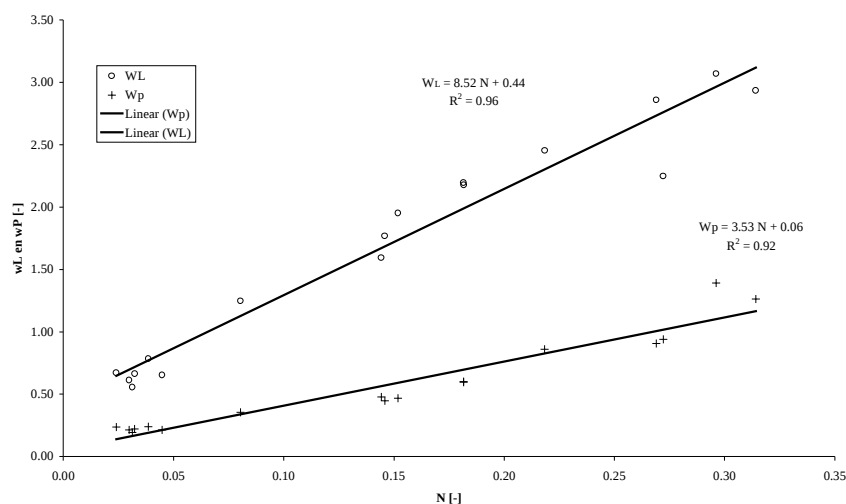
In Figuur 4.3 is de plasticiteitsgrafiek weergegeven. De A-lijn, die kleisoorten en siltige grondsoorten scheidt, en de B-lijn, die een bovengrens vormt voor alle kleisoorten, zijn ingetekend. Het is belangrijk te vermelden dat de A- en B-lijn horen bij niet organische kleisoorten. Punten behorend bij organische kleisoorten liggen onder de A-lijn (Head, 1992). Uit de figuur blijkt dat pas bij zeer hoge vloeigrens de A-lijn benaderd wordt. Het verlengde van de B-lijn wordt niet overschreden. Voor de Atterbergse grenzen bepaald met het Casagrande apparaat volgt voor de organische klei de relatie: $I_p = 0.40 w_L + 56$.

Het is bekend dat het Casagrande apparaat bij zeer plastische kleisoorten ($w_L > 100\%$) een hogere vloeigrens in vergelijking met de BS valconus geeft als gevolg van (ongewenste) dynamische effecten (Littleton en Farmilo, 1977). Ter indicatie zijn met bekende relaties de waarden gecorrigeerd en in Figuur 4.3 weergegeven. Met deze correctie vallen de punten beneden de A-lijn, conform de verwachting. Omdat de bekende correlaties voor metingen gedaan met de BS valconus en het Casagrande apparaat niet voor organische klei zijn bepaald en het Casagrande apparaat in de Nederlandse adviespraktijk veelvuldig wordt gebruikt, zijn in het vervolg de niet gecorrigeerde vloeigrensbepalingen volgens Casagrande gebruikt.



Figuur 4.3 Plasticiteitsgrafiek: I_p tegen w_L

In Figuur 4.4 is de afhankelijkheid van de vloe- en uitrolgrens van het gloeiverlies weergegeven. Naarmate de klei meer organisch materiaal bevat, nemen beide Atterbergse grenzen toe. De relaties kunnen beschreven worden met $w_L = 8.52 N + 0.44$ en $w_p = 3.53 N + 0.06$. Ook de mineralogische samenstelling en de samenstelling van het poriënwater zijn normaliter van belang. Gezien de duidelijke correlaties zijn deze invloeden of nauwelijks van belang of ze correleren met het gloeiverlies. De variatie van de mineralogische samenstelling en de samenstelling van het poriënwater is niet onderzocht. Deze correlatie kan vooralsnog alleen voor de onderzochte grondlagen worden gebruikt.



Figuur 4.4 w_L en w_p tegen N

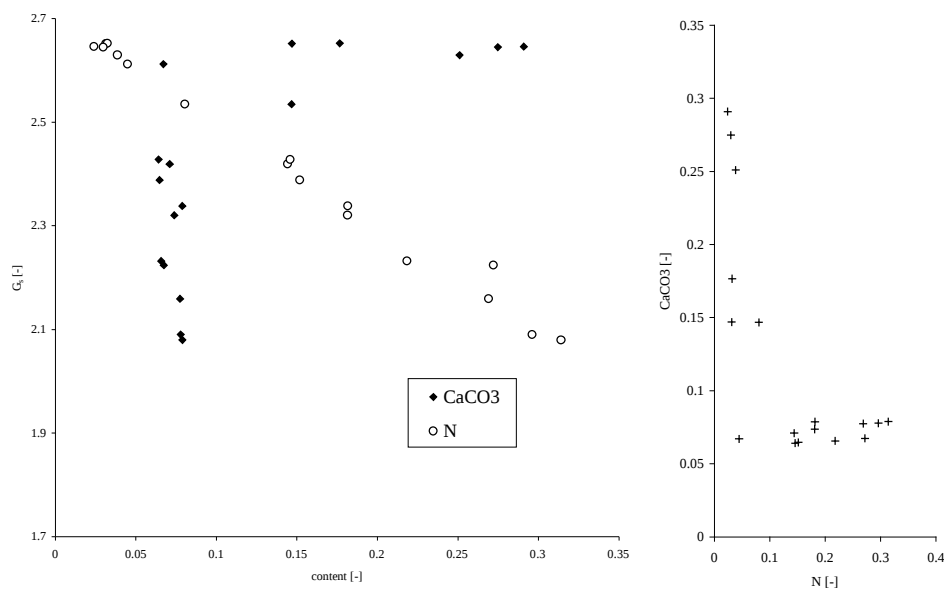
In Figuur 4.5 is de specifieke massa, de verhouding tussen de dichtheid van het korrelmateriaal en de dichtheid van water, uitgezet tegen het kalkgehalte en het gloeiverlies. G_s correleert duidelijk beter met het gloeiverlies dan met het kalkgehalte; de dichtheid van kalk is ongeveer gelijk aan 2710 kg/m^3 , vergelijkbaar met de dichtheid van andere minerale delen. De figuur met het kalkgehalte uitgezet tegen het gloeiverlies laat zien dat klei met een hoog kalkgehalte een laag organisch gehalte heeft terwijl klei met een hoog organisch gehalte slechts weinig kalk bevat. Wellicht hangt dit samen met de condities tijdens de afzetting van de grondsoorten.

Door aan te nemen dat het korrelmateriaal van grond bestaat uit minerale- en organische bestanddelen, kan voor G_s worden afgeleid:

$$G_s = \frac{1}{\frac{P}{G_o} + \frac{1-P}{G_m}}$$

waarin:

G_o	=	specifieke massa organische bestanddelen	[-]
G_m	=	specifieke massa minerale bestanddelen	[-]
P	=	organisch gehalte	[-]



Figuur 4.5 Specifieke massa - N, CaCO_3 en CaCO_3 - N

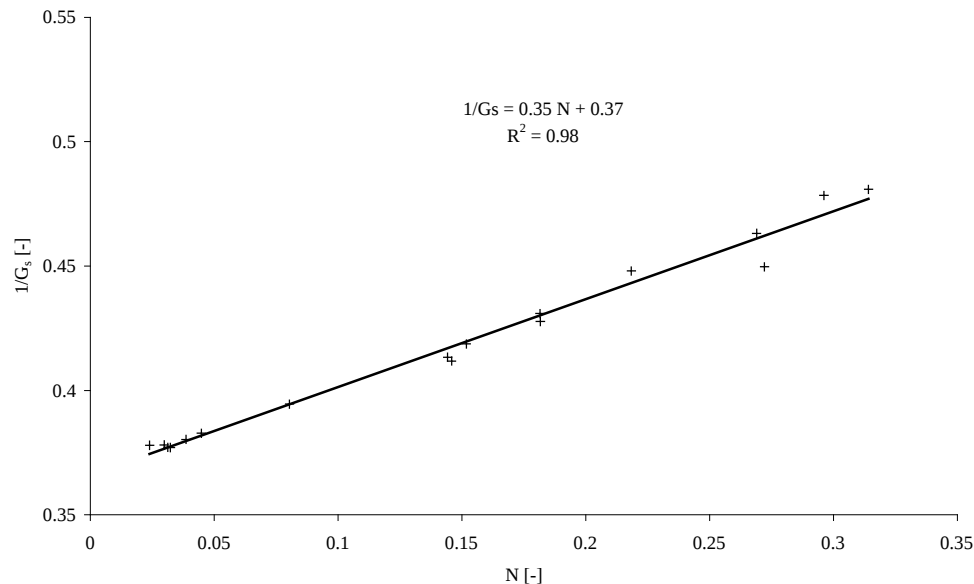
Vaak wordt aangenomen dat het organisch gehalte gelijk is aan het gloeiverlies. Dit is bij lage gloeiverliezen zeker niet het geval. Er bestaat overigens wel een lineaire relatie tussen het gloeiverlies en het organische gehalte (Skempton en Petley, 1970):

$$\text{organisch gehalte} = 100 - 1.04(N - 100)$$

waarin:

N	=	gloeiverlies	[%]
---	---	--------------	-----

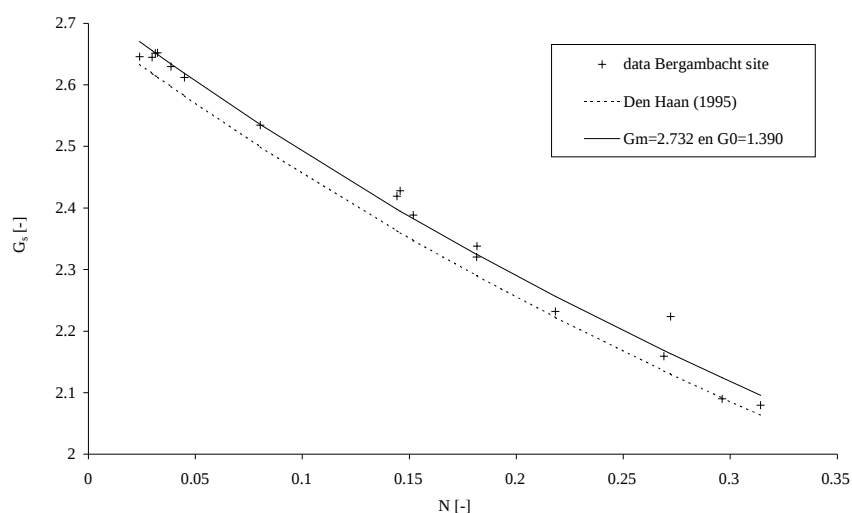
Door aan te nemen dat het organisch gehalte gelijk is aan het gloeiverlies $P=N$ en $1/G_s$ uit te zetten tegen het gloeiverlies, N , kunnen de waarden van G_o en G_m eenvoudig worden afgeleid. Zie Figuur 4.6.



Figuur 4.6 $1/G_s$ tegen N

Uit Figuur 4.6 volgt dat $G_o=1.390$ en $G_m=2.732$.

In eerdere onderzoeken uitgevoerd op klei en veen uit het Betuwelijn project en uit polder Zegveld (Den Haan, 1995) zijn soortgelijke correlaties afgeleid. In die onderzoeken varieerde het gloeiverlies tussen 0.03 en 0.90. Dat is een veel ruimere range in vergelijking met de data van klei uit Bergambacht. De hierbij gevonden waarden van de specifieke massa's bedroegen respectievelijk, 1.365 en 2.695. De gevonden resultaten zijn in Figuur 4.7 uitgezet.



Figuur 4.7 G_s tegen N

Door de hogere waarden van de specifieke massa's G_o en G_m ligt de gevonden curve boven de curve behorend bij polder Zegveld. Dit betekent dat de correlaties niet zonder meer universeel toepasbaar zijn.

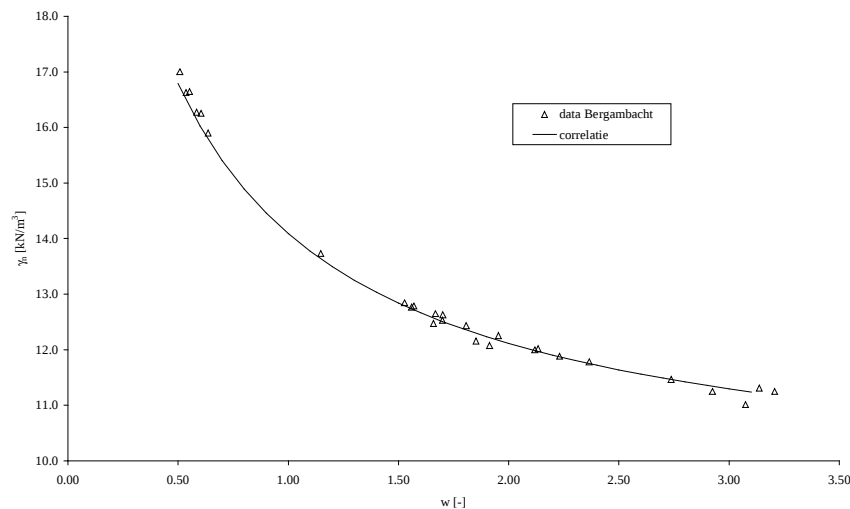
Duidelijk gemaakt is dat er een relatie bestaat tussen de specifieke massa en het gloeiverlies. Ook is er een relatie tussen het watergehalte en de volumieke massa. Voor volledig verzadigde grond kan worden afgeleid dat:

$$g_n = g_w G_s \left(\frac{1+w}{1+wG_s} \right)$$

waarin:

γ_n	=	volumiek gewicht verzadigde grond	kN/m^3
γ_w	=	volumiek gewicht water	kN/m^3
w	=	watergehalte	-

In Figuur 4.8 is het volumiek gewicht tegen het watergehalte uitgezet. Om zonder kennis van het gloeiverlies voor de Bergambacht site een schatting te maken van γ_n op basis van het watergehalte is extra informatie nodig omtrent G_s . Deze waarde is niet constant voor de site en is sterk afhankelijk van het gloeiverlies. Om het verband af te leiden is gebruik gemaakt van de correlatie van het watergehalte en de specifieke massa. Een fysische achtergrond voor het bestaan van dit verband is dat klei met een hoger organisch gehalte, en dus met een lagere dichtheid van het korrelmateriaal, een groter poriënvolume kan bezitten.



Figuur 4.8 g_n - watergehalte

Data van verschillende sites laat zien dat het verband tussen G_s en het watergehalte benaderd kan worden door een lineaire relatie:

$$G_s = a w + b$$

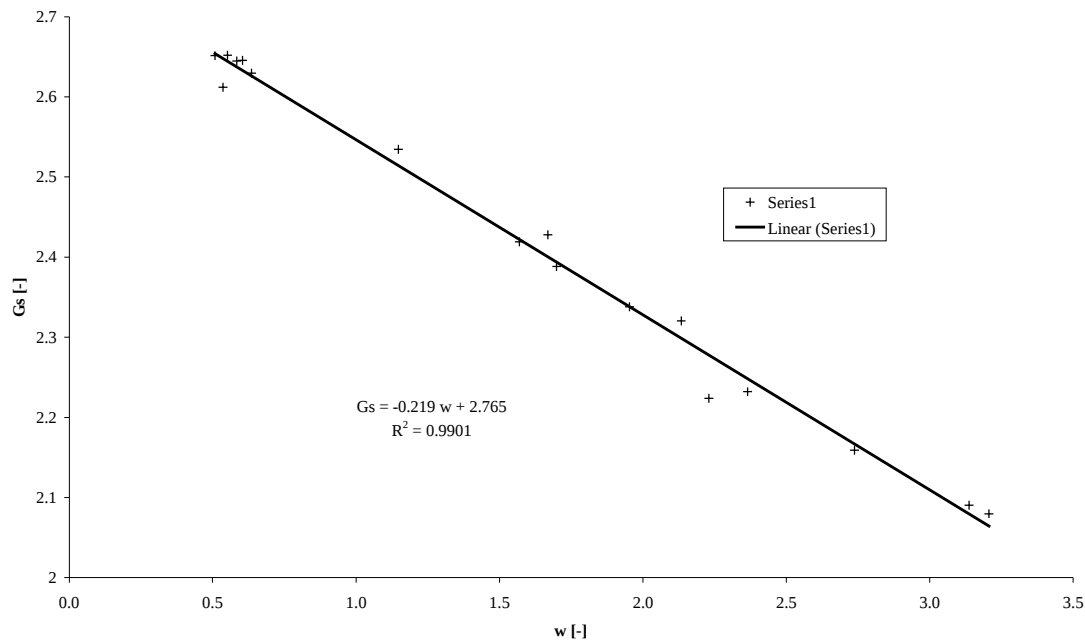
waarin:

G_s	=	specifieke massa	[-]
a, b	=	coëfficiënten	[-]
w	=	watergehalte	[-]

Per lokatie variëren de parameters a en b. Voor de Bergambacht site geldt $a = -0.219$ en $b = 2.765$. Zie Figuur 4.9. Uitgeschreven levert dit:

$$g_n = \frac{27.13 + 24.98w - 2.14w^2}{1.00 + 2.77w - 0.220w^2}$$

Het resulterende verband tussen γ_n en w is in Figuur 4.8 weergegeven.



Figuur 4.9 G_s - w

Figuur 4.10 laat het verloop van de ratio ongedraineerde schuifsterkte en effectieve verticale consolidatiespanning tegen de plasticiteitsindex zien. Hierbij is gebruik gemaakt van de ongedraineerde schuifsterkte volgend uit de valconus testen. De effectieve verticale consolidatiespanning is geschat. Zie 4.11. Ook is de Skempton relatie, ter indicatie, ingetekend. Deze relatie luidt:

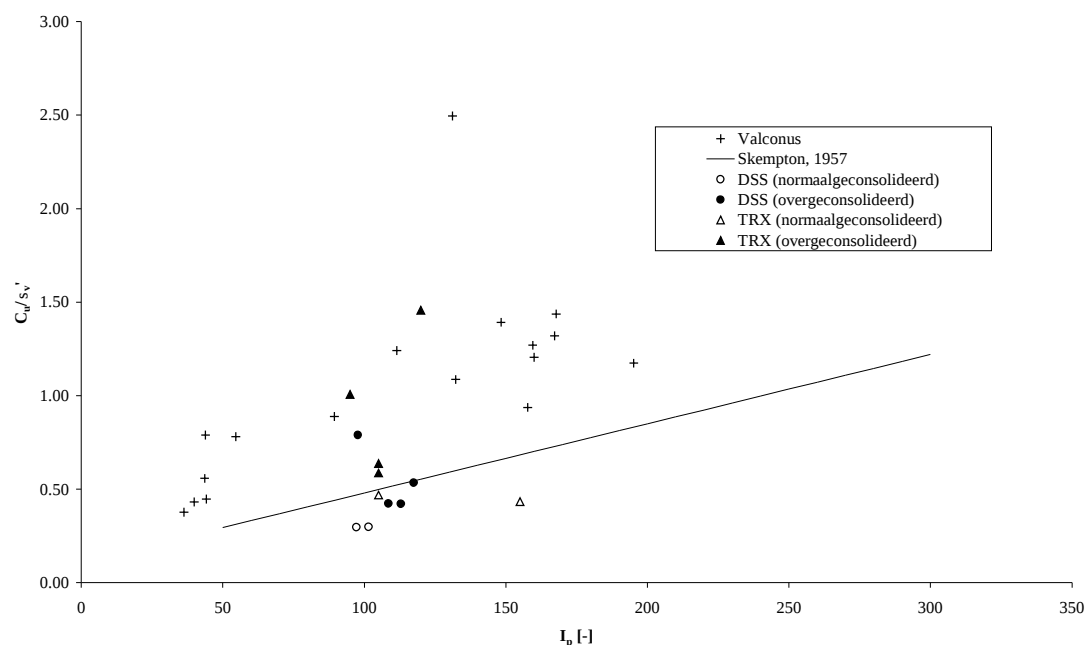
$$\frac{C_u}{s_v'} = 0.11 + 0.0037 I_p$$

waarin:

C_u	=	ongedraineerde schuifsterkte	[-]
σ_v'	=	effectieve verticale spanning	[-]
I_p	=	plasticiteitsindex	[-]

De Skempton relatie geldt voor normaalgeconsolideerde klei en is afgeleid aan de hand van vane testen. De vergelijking van deze relatie met de proefdata is niet helemaal correct. In de Skempton relatie weerspiegelt het verloop van de plasticiteitsindex het verloop van de mineralogische

samenstelling terwijl het verloop van de plasticiteit van organische kleisoorten, zoals in dit project zijn bepaald, vermoedelijk meer afhankelijk is van het organisch gehalte en minder van de variatie van de mineralogische samenstelling. Bovendien is de correlatie gebaseerd op proefresultaten uit vane testen. Dit kan zorgen voor verschil in ongedraineerde schuifsterkte als gevolg van een andere vervormingstoestand bij bezwijken in vergelijking met de triaxiaal- of direct simple shearproef. Tussen laatstgenoemde proeftypen kunnen hierdoor ook verschillen in ongedraineerde schuifsterkte optreden. Andere proefresultaten van triaxiaal- en direct simple shearproeven zijn ingetekend. Opvallend is dat de normaalgeconsolideerde monsters een genormaliseerde sterkte hebben die onder de Skempton relatie ligt. Overgeconsolideerde monsters hebben een relatief hoge sterkte en liggen erboven. Blijkbaar reageren de beproefde monsters met de valconus overgeconsolideerd.

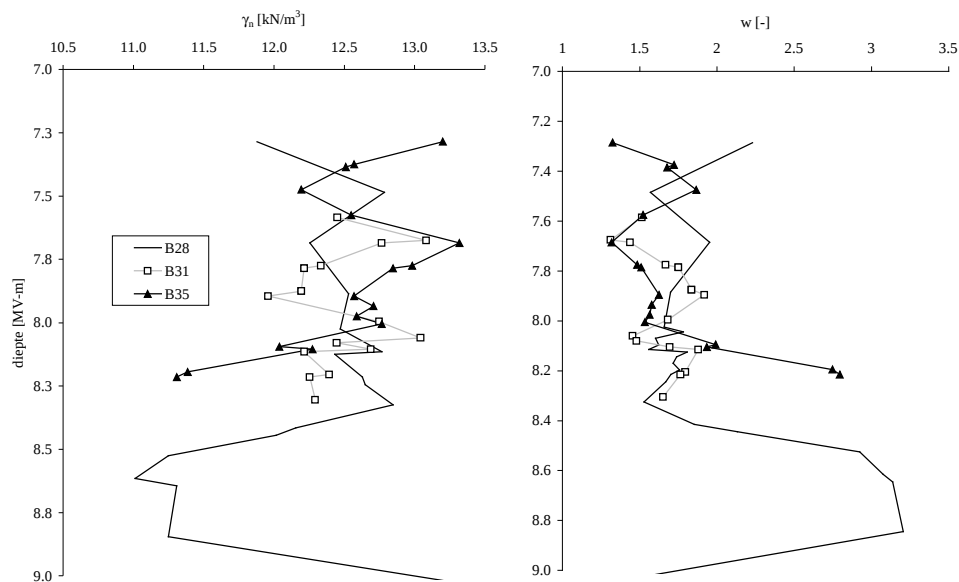


Figuur 4.10 $C_u/s_v' - I_p$

Uit Figuur 4.10 blijkt dat de Skempton relatie niet bij de data past. Mogelijk is de Skempton relatie niet bruikbaar voor deze kleisoort of zijn de proeven zodanig anders uitgevoerd of geïnterpreteerd dan de proeven waarop de correlatie van Skempton is gebaseerd dat er een significante afwijking is.

4.10 Variabiliteit grondeigenschappen

De eigenschappen van organische grond kunnen zeer sterk afhankelijk zijn van de geometrische positie. Voorafgaand aan de verschillende proeven, beschreven in dit rapport, zijn het watergehalte en het volumiek gewicht bepaald. De resultaten behorend bij boring B28, B31 en B35 zijn in Figuur 4.11 weergegeven.



Figuur 4.11 Variabiliteit w en γ_n

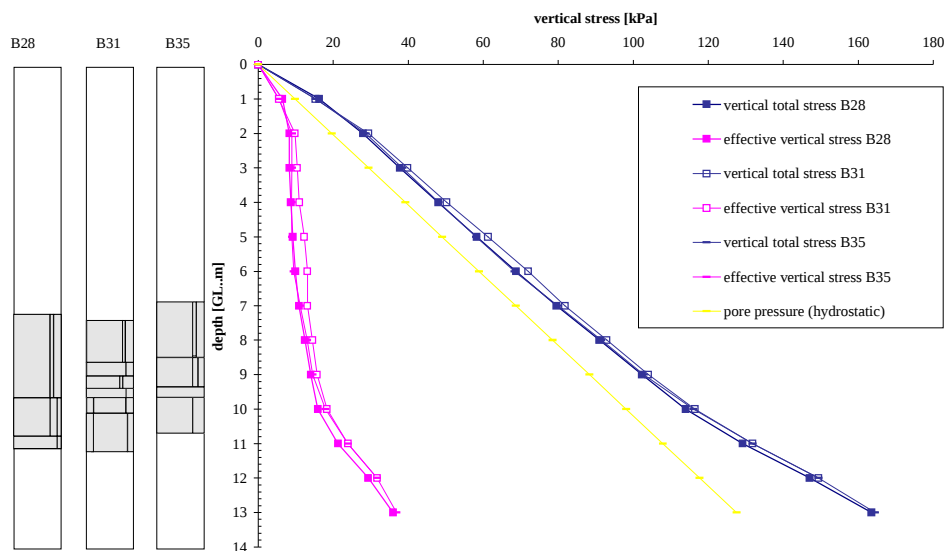
De variabiliteit van de gepresenteerde eigenschappen in de grondlagen is relatief groot. Binnen een fictief monster van 10 cm genomen uit de organische laag kan het watergehalte tussen boven- en onderzijde 50% verschillen. Hierbij zal de resolutie van de metingen een rol spelen. Bij een grotere resolutie zullen de eigenschappen nog sterker variëren. Voor γ_n is een variatie van 0.5 kN/m^3 mogelijk op een geschat gemiddelde γ_n van 12.5 kN/m^3 . De relatieve invloed is kleiner.

Bij een standaard triaxiaalmonster van 15 cm hoog kan dus door de variërende eigenschappen een sterke niet uniformiteit optreden. De rekken die gemeten worden weerspiegelen dan niet het feitelijke materiaalgedrag. Voor een representatieve beproeving van amorfe organische klei zijn meerdere proeven op kleinere monsters wenselijk. Bij de aanwezigheid van stengels, wortelresten e.d. zijn juist grotere monsters wenselijk.

Het verloop van de verschillende eigenschappen met de diepte in de verschillende boringen komt redelijk goed overeen maar de verschillende grondlagen worden niet op dezelfde diepte aangetroffen. Er kan niet geconcludeerd worden dat dit door geometrische invloeden wordt veroorzaakt vanwege de onzekerheid in de hoogteligging van het maaiveld ter plaatse. Deze onzekerheid ligt in de orde van 0.15 m; enkele boringen zijn in enkele dm's water gestoken.

4.11 Indicatie effectief verticaal spanningsniveau

Uit in situ metingen van de waterspanningen gedurende een korte periode bleek dat de stijghoogte in de Pleistocene laag enkele dm's boven NAP lag. Verwacht wordt dat gedurende een hoogwaterperiode in rivier de Lek de stijghoogte in de Pleistocene laag zal toenemen met als gevolg een mogelijke afname van de effectieve spanning in de Holocene lagen. Voor het schatten van de in situ effectieve verticale spanning is een hydrostatisch drukverloop aangenomen.



Figuur 4.12 Geschat effectief verticaal spanningsniveau site Bergambacht

De effectieve verticale spanning is geschat op basis van het gemeten volumieke gewicht per strekkende meter boring, de ligging van het freatisch vlak en de aanname van een hydrostatisch drukverloop. In Figuur 4.12 zijn de spanningen weergegeven. Ook zijn de grondprofielen van de onderzochte lagen (MV-7 m – MV-11 m) van de 3 boringen gepresenteerd. De effectieve verticale spanning in de desbetreffende lagen wordt geschat op 13 – 15 kPa.

4.12 Conclusies en bevindingen classificatie – en indextesten

De classificatie - en indextesten hebben veel interessante resultaten opgeleverd. De belangrijkste conclusies die uit proefresultaten kunnen worden afgeleid zijn:

- de boorbeschrijvingen goed overeenkomen met de bevindingen uit de proeven;
- de handtorvane evenals de valconus een goede indicator is van het verloop van de ongedraineerde schuifsterkte met de diepte;
- de proefresultaten van de organische klei in liggen in de plasticity chart in het verlengde van de bekende A-lijn. Dit is niet volgens verwachting en wordt mogelijk veroorzaakt door dynamische effecten bij gebruik van het Casagrande apparaat. Na correctie liggen de proefresultaten onder de A-lijn. Ondanks de grote ervaring met deze wijze van vloeigrensbepaling lijkt het Casagrande apparaat minder geschikt voor de organische klei en is het gebruik van valconus wenselijk;
- uit correlaties volgt:
 - een verband tussen vloe- en uitrolgrens en het gloeiverlies;
 - een verband tussen de inverse van de specifieke massa en het gloeiverlies;
 - de specifieke massa van de organische- en minerale bestanddelen verschillen van andere Nederlandse sites; correlaties gebaseerd op deze parameters zijn dus niet zonder meer universeel toepasbaar;
- de genormaliseerde ongedraineerde schuifsterkte uit valconus-, triaxiaal- en direct simple shearproeven is, ter indicatie, vergeleken met de bekende Skempton relatie (voor niet organische klei). Hieruit volgt dat normaalgeconsolideerde monsters een genormaliseerde sterkte hebben die duidelijk onder de Skempton relatie ligt. De relatie is dus niet bruikbaar. Overgeconsolideerde monsters hebben een relatief hoge genormaliseerde sterkte. De genormaliseerde triaxiaalsterkte is groter dan de genormaliseerde direct simple shear sterkte. Met name de laatstgenoemde zal sterk afhankelijk zijn van de interpretatie van de proefresultaten;
- de variabiliteit van het watergehalte en volumiek gewicht met de diepte is relatief groot. Daarom is het raadzaam voor amorfe organische klei met een groter aantal kleine monsters te werken. Dit verhoogt de representativiteit van de proefresultaten. Voor organische klei met plantenresten (stengels e.d.) zijn kleine monsters niet haalbaar.

5 Proefprogramma constitutief gedrag organische klei

5.1 Inleiding

Voor het onderzoeken van het mechanisch gedrag van organische klei bij lage effectieve spanningsniveaus is een uitgebreid proefprogramma opgesteld: het proefprogramma constitutief gedrag organische klei. De opzet van dit programma was het gevolg van een bijeenkomst van de begeleidingscommissie “Fundamenteel gedrag van de ondergrond” op 1 juli 1999.

Aandachtspunten proefprogramma

Van belang is grond te beproeven bij zowel in situ spanningscondities ($\sigma_v' = 15$ kPa) als bij hogere verticale effectieve spanningen zoals die bijvoorbeeld na een ophoging kunnen optreden. Daarom zijn ook monsters beproefd bij consolidatiespanningen van $\sigma_v' = 30$ kPa en $\sigma_v' = 100$ kPa.

Voor een hoge representativiteit van de metingen is het belangrijk dat monster worden geconsolideerd zonder het optreden van radiale rekken (K_0 consolidatie) zoals in situ in ‘verre veld’ condities gebeurt. Bij de consolidatie van K_0 -oedometer monsters en DSS monsters worden radiale rekken tijdens samendrukking verhinderd door respectievelijk een stalen ring en een gewapend membraan. In de triaxiaalproeven zijn de monsters of K_0 geconsolideerd door sturing van de celdruk op een (radiale) verplaatsingsopnemer of zijn spanningsgestuurd geconsolideerd met een vooraf ingesteld verhouding van horizontale en verticale spanning.

Het gedrag van (organische) klei is reksnelheidsafhankelijk. Daarom zal gestreefd worden naar een reksnelheidsgestuurde belasting. Dit is standaard voor K_0 -CRS proeven. Ook in de uitvoering van de triaxiaalproef is dit gerealiseerd, voor zover het K_0 geconsolideerde monsters betreft. De DSS monsters zijn spanningsgestuurd geconsolideerd.

Een mogelijk belangrijk aspect van het gedrag van organische klei is de aanwezigheid van structuur (bindingen tussen korrels, korreloriëntatie). Daarom zijn enkele monsters verkneed, aangemengd met water tot een watergehalte groter dan de vloeigrens en opnieuw (K_0) geconsolideerd in Perspex buizen. Deze monsters zijn in het triaxiaalapparaat beproefd. Dit waargenomen gedrag vormt een referentie waarmee het gedrag van de onverstoorde ongeroerde monsters kunnen worden vergeleken.

Bij proefnemingen op klei kunnen de temperatuur en de temperatuurswisselingen een belangrijke invloed hebben op het constitutief gedrag. De resultaten van een aantal triaxiaalproeven op gereconstitueerde Oostvaardersplassenklei uitgevoerd bij 2 verschillende temperaturen (Tigchelaar, 2000) lieten een grote invloed zien. Omdat de temperatuur geen variabele in het proefprogramma is, zijn alle proeven uitgevoerd in een temperatuur gecontroleerde ruimte bij een temperatuur van 19.3 °C. Voor deze temperatuur is gekozen vanwege de praktische haalbaarheid. Wenselijk was een, verwachte in situ, temperatuur van 10 °C.

Toekomst

Het proefprogramma moet gezien worden als een eerste verkennende serie proeven die de noodzaak voor verdere aftasting van het mechanisch gedrag van organische klei bij lage effectieve spanningsniveaus duidelijk moet maken. Bij toekomstig onderzoek moet worden gedacht aan de bepaling van de ligging van het vloeiooppervlak door rotatie van het totaalspanningspad en invloed reksnelheid.

Binnen dit onderzoek zijn, naast de eerder gepresenteerde classificatie- en indexproeven, 2 K_0 -oedometer-, 8 triaxiaal- en 6 direct simple shearproeven uitgevoerd op organische klei uit Bergambacht.

In dit hoofdstuk worden de uitgevoerde proeven, proefprocedures en proefresultaten beschreven.

5.2 K_0 CRS proeven

5.2.1 Inleiding

In de K_0 -oedometer CRS opstelling, gebouwd in een triaxiaalcel, wordt een monster ($h=20$ mm, $\phi 63$ mm) verplaatsingsgestuurd axiaal vervormd zonder dat radiale rekken kunnen optreden; oedometer condities. Tijdens de proef kan de horizontale spanning gemeten worden met een opnemer. De opnemer bestaat uit een serie rekstrookjes aangebracht op een verjongd deel van de ring. Door zorgvuldige calibratie kan de gemeten rek omgezet worden in een horizontale totaalspanning. Optredende verticale spanning kan zowel boven als onder het monster gemeten worden door 2 afzonderlijke krachtopnemers. Omdat de ring door de voet van de opstelling wordt ondersteund en de spanning boven en onder wordt gemeten, kan de wrijving worden bepaald. De monsters zijn eenzijdig gedraineerd, aan de bovenzijde. Aan de onderzijde van de monsters worden de poriëndrukken gemeten. Met een op de plunjer aangebrachte opnemer worden de axiale verplaatsingen gemeten. In deze opstelling kan een backpressure worden aangebracht.

Deze proef geeft informatie over o.a. de samendrukbaarheid, K_0 bij normaalgeconsolideerde toestand en doorlatendheid. Door het monster te ontlasten kan ook het gedrag in overgeconsolideerde toestand worden onderzocht.

5.2.2 Monsters

In de organische lagen zijn 2 monsters gekozen voor beproeving. De gegevens van de monsters zijn gepresenteerd in Tabel 5-1.

monster	boring	diepte			γ_n	w_{na}	$\epsilon_{a,max}$	w^{*1}	G_s^{*2}	v_0^{*3}
[-]	[-]	[MV..m]			[kN/m ³]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
62A	31	8.06	-	8.10	12.45	0.67	0.325	1.48	2.44	3.90
76A	35	7.95	-	8.00	12.59	0.74	0.325	1.56	2.42	4.16

*1) bepaald met afsnijdsels

*2) uit correlatie G_s met w (4.9), met w^{*1}

*3) door terugrekenen watergehalte na de proef $v_0 = (1 + w_{na} G_s) / (1 - \epsilon_{a,max})$

Tabel 5-1 Data Monsters K_0 - CRS testen

5.2.3 Procedure en belastingsfase

De monsters zijn verplaatsingsgestuurd vervormd bij een axiale reksnelheid van, $\dot{\epsilon}_a$, 2.0×10^{-6} 1/s tot een effectieve verticale spanning van 60 kPa. De verwachting is dat vervorming tot deze spanning leidt tot een normaalgeconsolideerde toestand; de verwachte grensspanning bedraagt ongeveer 30 kPa. Hierna zijn de monsters verplaatsingsgestuurd ontlast bij dezelfde reksnelheid tot een effectieve verticale spanning van 30 kPa gevolgd door een verplaatsingsgestuurde herbelasting tot 90 kPa, wederom een verwachte normaalgeconsolideerde toestand. Tenslotte zijn de monsters opnieuw ontlast tot een effectieve verticale spanning van 30 kPa. Op deze wijze is de graad van overconsolidatie gevarieerd tussen respectievelijk 2 en 4. Beide proeven zijn uitgevoerd met een backpressure van 300 kPa.

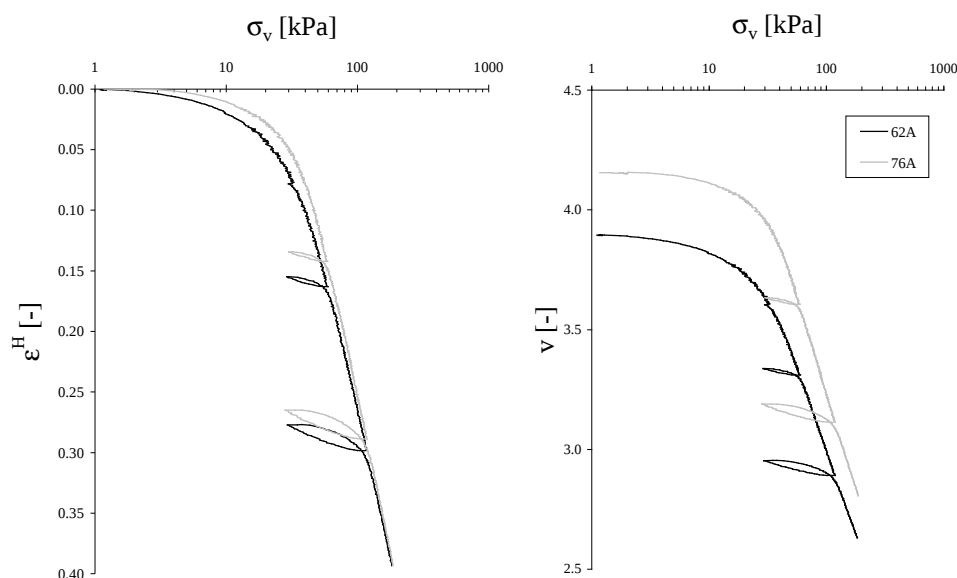
5.2.4 Resultaten

In Figuur 5.1 is de natuurlijke (axiale) rek en specifiek volume v tegen de gemeten effectieve verticale spanning weergegeven. Het specifiek volume is bepaald met $v = 1 + wG_s$. Het specifiek gewicht is geschat op basis van de eerder afgeleide correlaties tussen (natuurlijk) watergehalte en het specifiek gewicht. Het initieel specifiek volume is teruggerekend met behulp van het watergehalte na de proef en de opgetreden volumieke rek. Dit geeft naar verwachting een beter beeld van het specifiek volume voor de proef dan door gebruik te maken van het watergehalte van de afsnijdsels voor de proef. De variabiliteit van de eigenschappen van het organisch materiaal is relatief groot. Uit de figuur volgt dat het initiële specifiek volume van beide monsters ongeveer 5% verschilt. Dit verschil zal zijn veroorzaakt door de grote natuurlijke variabiliteit, de nauwkeurigheid van de bepaalde correlaties en de gedane aannames.

Figuur 5.1 laat zien dat de verticale spanning gedurende de vervorming oploopt. Bij kleine rekken loopt de logaritmisches uitgezette spanning sneller op dan bij grote rekken. Er is duidelijk sprake van een grensspanning; onder de grensspanning een relatief stijf gedrag, boven de grensspanning een relatief slap gedrag. Bij grote rekken is er duidelijk een lineair verband tussen de rek en de logaritme van het verticale spanningsniveau. Bekend is dat dit gedrag ook afhankelijk is van de opgelegde reksnelheid; de spanningsopbouw vindt bij constante reksnelheid plaats op een isotach. Het bepalen van de ligging van de isotachen was geen variabele in het uitgevoerde onderzoek.

Kwaliteit monsters

De relatieve verandering van het poriëngetal ($\Delta e/e_0$) die nodig is voor het bereiken van de terreinspanning (15 kPa) kan gebruikt worden als een maat voor de monsterkwaliteit (Lo Presti, 1999). Bij verstoring verliest het monster structuur waardoor de stijfheid kleiner wordt; de optredende rekken zullen dan groter zijn. De verhouding $\Delta e/e_0$ bedraagt voor monsters 62A en 76A respectievelijk 4.1% en 2.5%. Volgens de indeling gebruikt door o.a. Lo Presti is de kwaliteit van monster 62A 'good to fair' en 76A 'excellent'.



Figuur 5.1 Natuurlijke rek e^H tegen s_v en v tegen s_v K₀-CRS proeven Bergambacht

Grensspanning

De grensspanning van beide monster is bepaald door raaklijnen aan de spanning - (lineaire) rek kromme, $\epsilon_a - \log \sigma_v'$, te trekken. Voor deze constructie is gekozen omdat er geen sprake is van een scherpe overgang. Uit de constructie volgt een grensspanning van ongeveer 20 kPa. Dit is slechts weinig groter dan de geschatte in situ effectieve verticale terreinspanning. De resultaten zijn in Tabel 5-2 weergegeven. Uit de literatuur is bekend dat de grensspanning afhankelijk is van de reksnelheid. Naarmate de reksnelheid lager is, is de grensspanning kleiner. Dit zal afhankelijk zijn van de kleisoort. Per logaritme van de reksnelheid kan dit 10% van de grensspanning schelen (Leroueil, 1988).

Samendrukkingsconstanten Cam Clay denkraam

Voor het beschrijven van de grond kan gebruik worden gemaakt van het Cam Clay denkraam. Hierbij horen de grondparameters λ , κ en N volgens:

belasten:

$$v = N - l \ln p$$

ontlasten:

$$v = v_k - k \ln p$$

Voor het bepalen van de parameter κ moet er isotroop worden ontlast. Dit is niet mogelijk in het apparaat waardoor κ niet kan worden bepaald. Voor het bepalen van N en λ is een raaklijn aan de $v - \ln p'$ kromme getrokken in het normaal geconsolideerde gebied. v_k is geen grondparameter maar wordt bepaald door de effectieve isotrope spanning bij ontlasten. In Tabel 5-2 zijn de resultaten gepresenteerd.

	λ	N	$\Delta u / \sigma_{v'NC}$	K_0	p_g	v_1	$a^{1)}$	$a^{2)}$	b
	[-]	[-]	[-]	[-]	[kPa]	[-]	[-]	[-]	[-]
62A	0.66	5.73	0.07	0.40	19.0	7.78	0.011	0.015	0.21
76A	0.78	6.48	0.10	0.43	22.6	8.98	0.011	0.016	0.22

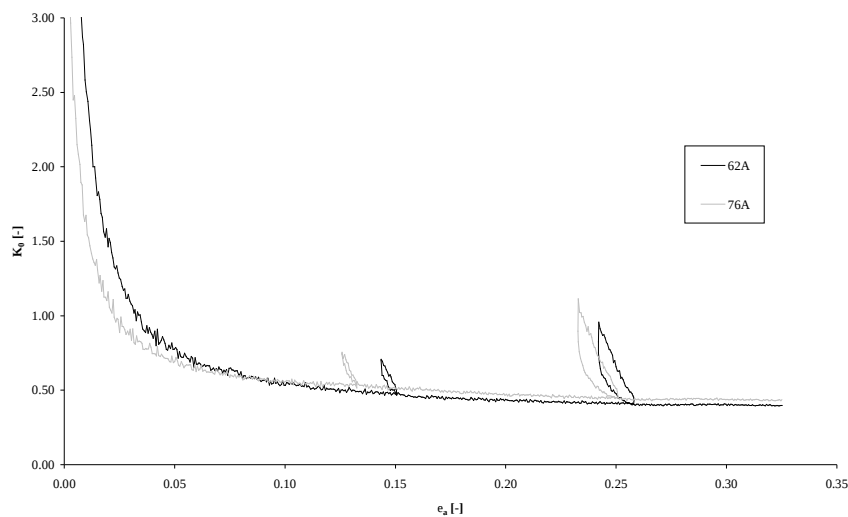
¹⁾ ontlasten tot OCR = 2

²⁾ ontlasten tot OCR = 4

Tabel 5-2 Grondparameters uit K_0 -oedometer CRS testen

Samendrukkingsconstanten a-b-c isotrachen model

Uit de K_0 -CRS proefresultaten kunnen op gemakkelijke wijze de parameters a en b van het a-b-c isotrachen model worden afgeleid. In dit model beschrijft a het ontlast/herbelast gedrag, b de maagdelijk samendrukking en c het kruipgedrag. b bepaalt de helling van de $\epsilon^H - \ln \sigma_v'$ curve in het maagdelijk gebied. Omdat de monsters 7B en 14B bij constante reksnelheid zijn vervormd en er dus geen sprake is geweest van kruip- of relaxatiefasen kan parameter c niet worden bepaald. Om de positie van de samendrukkingscurve te fixeren is een specifiek volume bij een referentie spanning van 1 kPa gedefinieerd. Dit is de parameter v_1 . Parameter a , b en v_1 zijn weergegeven in Tabel 2-1.



Figuur 5.2 Verloop K_0 - e_a , K_0 -oedometer CRS proeven

Verloop K_0

Uit de verhouding van de gemeten effectieve horizontale- en verticale spanning kan de K_0 worden afgeleid. Het resultaat is weergegeven in Figuur 5.2.

Bij zeer lage rekken is de waargenomen K_0 zeer groot. Het monster heeft zich mogelijk in de ring aangepast aan de nieuwe spanningstoestand waarbij het monster wellicht in zekere mate heeft kunnen zwellen. Doordat het meetsysteem in radiale richting stijver reageert dan in axiale richting kan K_0 zeer hoog oplopen (>12). Bovendien is het spanningsniveau laag. Variaties van drukken werken dan zeer sterk door.

K_0 neemt relatief snel af tot een waarde van 0.5 bij een axiale rek van 0.1. Bij doorgaande axiale vervorming tot 0.35 neemt K_0 nog verder af tot 0.40 – 0.43. Voor het schatten van K_0 wordt vaak gebruik gemaakt van de relatie van Jaky die stelt dat K_0 afhankelijk is van de hoek van inwendige wrijving, ϕ' :

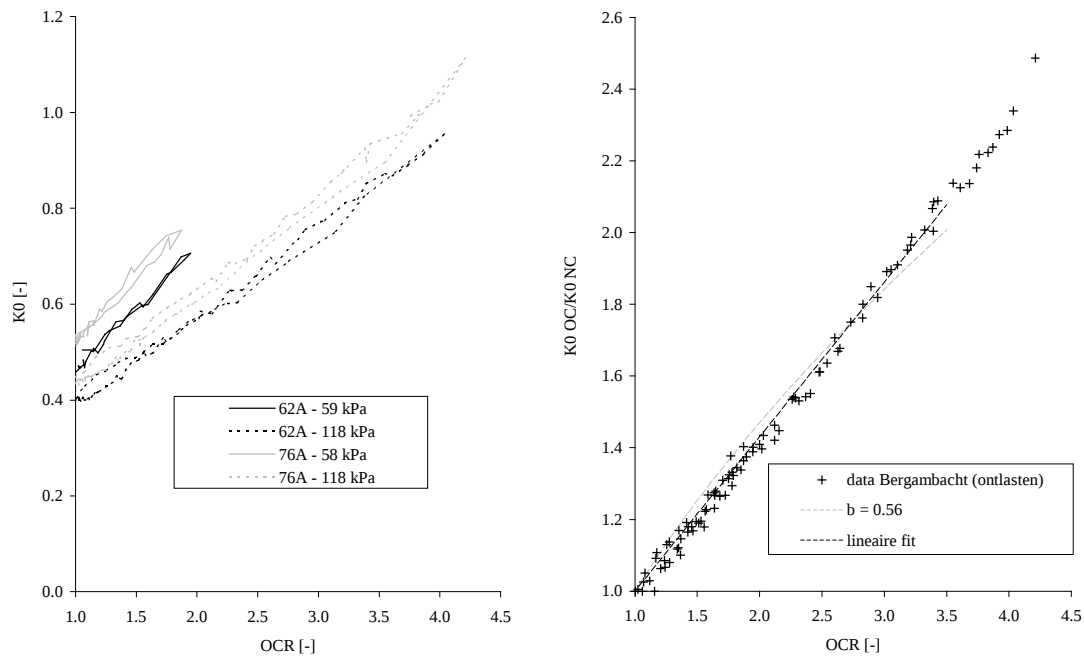
$$K_0 = 1 - \sin \phi'$$

In dit onderzoek zijn ook triaxiaalproeven uitgevoerd (5.3). Hieruit blijkt dat de hoek van inwendige wrijving vermoedelijk een zeer hoge waarde heeft en dat de Jaky relatie op deze wijze niet bruikbaar is.

Bij ontlasten nemen de effectieve verticale - en effectieve horizontale spanning af. Naar verwachting neemt σ_v' sterker af dan σ_h' waardoor K_0 toeneemt. Zie Figuur 5.2 en Figuur 5.3. Bij ontlasten tot een hogere graad van overconsolidatie treden grotere plastische rekken op; er is meer hysteresis. Zie Figuur 5.1. Tussen de afname van de σ_h' en σ_v' lijkt, binnen het onderzochte bereik van de overconsolidatiegraad (OCR), een lineaire relatie te bestaan waardoor K_0 evenredig met OCR toeneemt. Door te normaliseren voor de K_0 bij normaal geconsolideerde omstandigheden K_{0NC} volgt het volgende verband:

$$\frac{K_{0OC}}{K_{0NC}} = 0.431 \text{ OCR} + 0.569 \quad R^2 = 0.995 \quad 1.0 < \text{OCR} < 4.0$$

Zie Figuur 5.3.



Figuur 5.3 Relatie K_0 en genormaliseerde K_0 met OCR

De in de literatuur gevonden relaties hebben meer de vorm:

$$\frac{K_{0OC}}{K_{0NC}} = OCR^b$$

Door de natuurlijke logaritme van de ratio uit te zetten tegen de natuurlijke logaritme van OCR is β bepaald: 0.56. De gevonden relatie is ook uitgezet in Figuur 5.3 maar geeft een minder goede fit.

Wrijving

De ring neemt een gedeelte van de verticale spanning over door wrijving tussen het monster en de ring. Hierdoor kan een niet uniforme spanningstoestand ontstaan. Uit de meetresultaten (niet gepresenteerd) blijkt dat bij 30% axiale rek slechts 5% van de aangebrachte belasting wordt overgedragen op de ring. Bij kleinere rekken is dit minder.

Bij ontlasting neemt de wrijving in eerste instantie af; de richting van de schuifspanningen wisselt. Ontlasting tot de gekozen spanningsniveaus leidt wederom tot een wrijving van maximaal 5% van aangebrachte verticale belasting.

De lage optredende wrijving zorgt voor een relatief uniforme spanningstoestand.

Opbouw wateroverspanning, verticale doorlatendheid, samendrukbaarheid en consolidatiecoëfficiënt
 Gedurende de proef is de opbouw van de wateroverspanning gemeten. Opvallend is dat tot 10 - 15 % er geen noemenswaardige opbouw van de wateroverspanning gemeten is terwijl bij grotere rekken de wateroverspanning toeneemt. Zie Figuur 5.4. Door de constante reksnelheid wordt het verzadigde monster gedwongen om per tijdseenheid een volume water af te staan; het debiet is dus constant. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat het monster door het gebruik van een backpressure van 300 kPa volledig verzadigd is.

Met de volgende aannames:

- grond verzadigd en homogeen, korrels onsamendrukbaar;
- principe van Terzaghi geldig;
- wet van Darcy;
- doorlatendheid en samendrukbaarheid constant voor kleine spannings- of rekverandering

en:

- 1-D vervorming;
- eenzijdige afstroming;

kan de bekende diffusie vergelijking voor consolidatie worden opgesteld en gereduceerd tot:

$$c_v \frac{d^2 u}{dz^2} = C$$

waarin:

c_v	=	consolidatiecoëfficiënt	[m ² /s]
u	=	poriëndruk	[kN/m ²]
C	=	constante	[kN/m ² s]

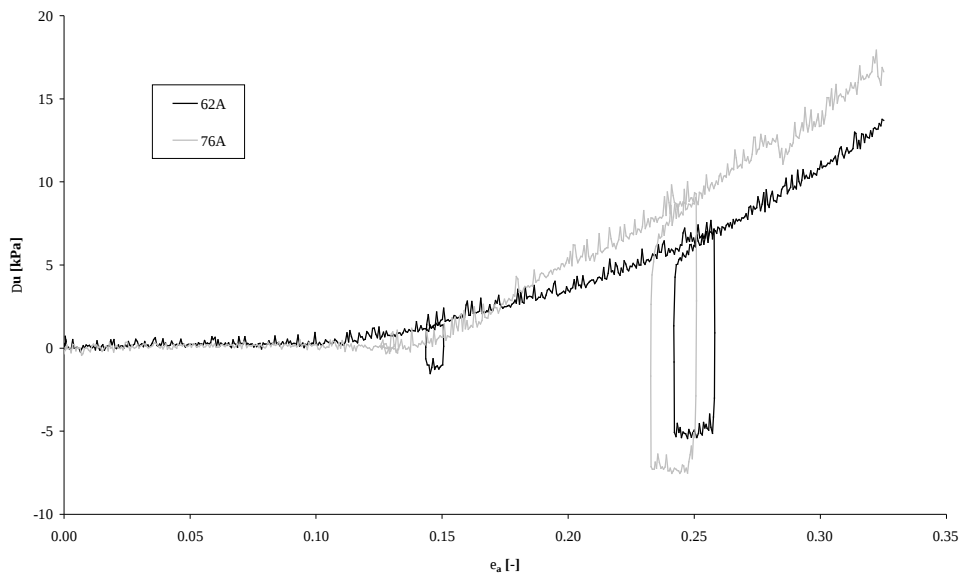
Hieruit volgt door integratie een parabolisch verloop van de poriëndruk met de diepte. Voor de doorlatendheid geldt dan:

$$k = 0.5 \left(\dot{e}_a \right) H^2 g_w \frac{1}{u_{\text{onder}}}$$

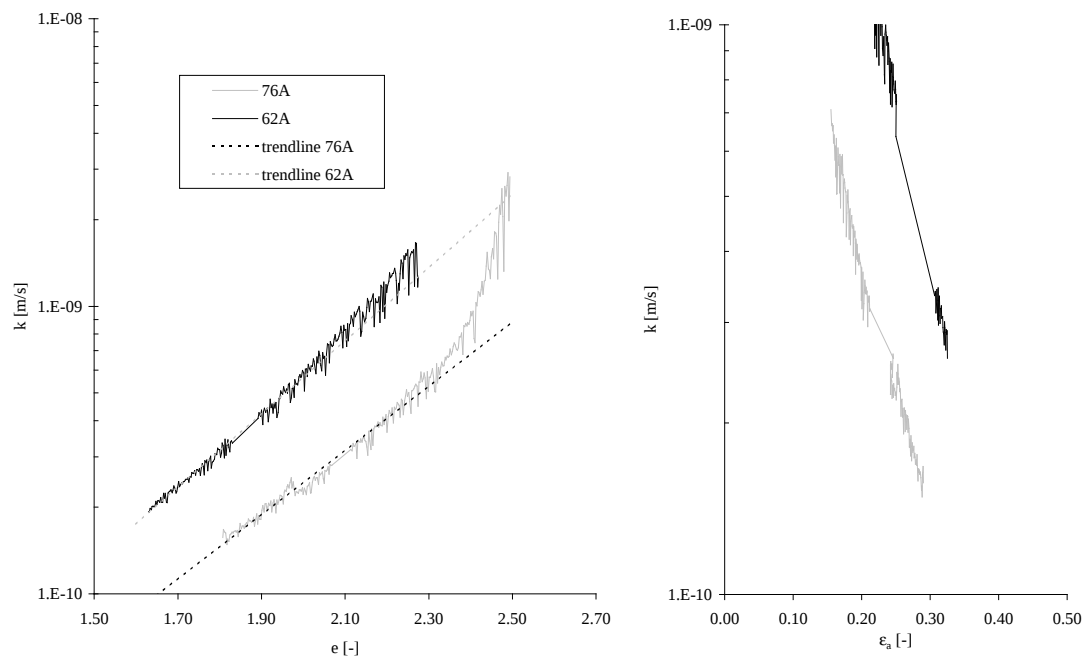
waarin:

k	=	verticale doorlatendheid	[m/s]
$\dot{\epsilon}_a$	=	axiale reksnelheid tijdens proef	[1/s]
H	=	hoogte tijdens proef	[m]
γ_w	=	volumiek gewicht water	[kN/m ³]
u_{onder}	=	wateroverspanning onderzijde monster	[kPa]

De wateroverspanning aan onderzijde van het monster wordt tijdens de proef gemeten. Ook is de hoogte en de opgelegde reksnelheid gedurende de proef bekend. In Figuur 5.5 is de verticale doorlatendheid tegen het watergehalte weergegeven. Het betreft de doorlatendheid berekend bij axiale rekken groter dan 16% en normaal geconsolideerd gedrag. Het watergehalte gedurende de proef is berekend op basis van het watergehalte na de proef en de tijdens de proef optredende volumieke rekken.



Figuur 5.4 Opbouw van de wateroverspanning



Figuur 5.5 Verticale doorlatendheid – poriëngetal en axiale (lineaire) rek

Uit de bepaling van de verticale doorlatendheid bij axiale rekken >16% volgt een exponentieel verloop tussen de verticale doorlatendheid en het poriëngetal. Dit geldt met name voor de doorlatendheid bij een relatief laag watergehalte.

Voor de doorlatendheid kan worden geschreven:

$$k = a \exp(b e)$$

waarin voor a en b:

	a x 10 ⁻¹² [m/s]	b [-]
62A	1.59	2.94
76A	1.41	2.58

Door de doorlatendheid uit te zetten tegen de opgetreden axiale rek kan door extrapolatie de doorlatendheid worden bepaald bij het begin van de proef (k_0). De op deze wijze bepaalde doorlatendheden zijn voor monster 62A en 76A gelijk aan respectievelijk 2.2×10^{-8} [m/s] en 3.0×10^{-9} [m/s].

Een vaak gebruikte relatie is die tussen de verandering van het poriëngetal en de verticale doorlatendheid:

$$\log\left(\frac{k}{k_0}\right) = \frac{\Delta e}{c_k}$$

De eerder gebruikte exponentiële relatie is omschreven. De waarden voor c_k bedragen voor monster 62A en 76A respectievelijk 0.78 en 0.89.

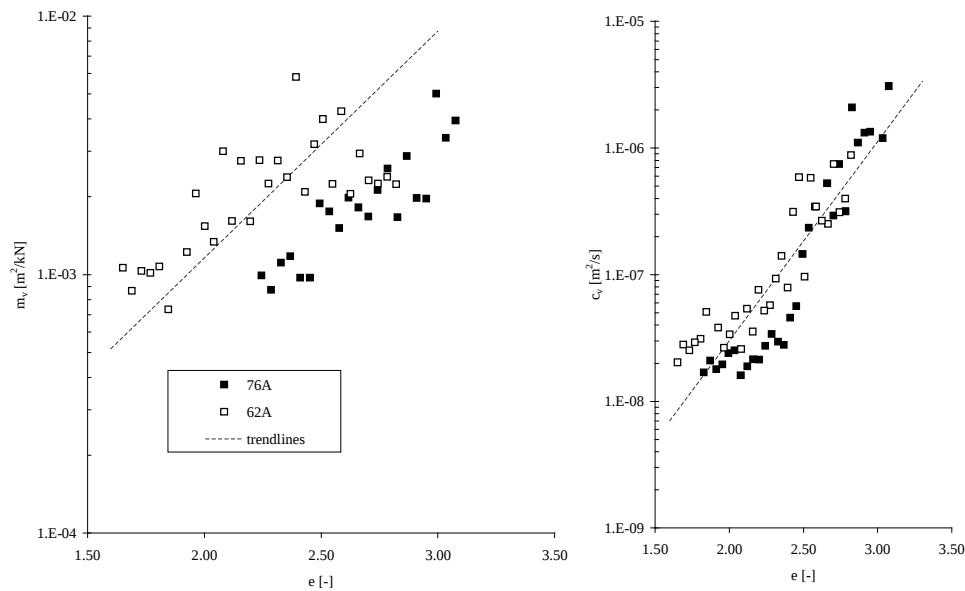
Uit de proefresultaten is ook de samendrukbaarheid van het korrelskelet te bepalen uit:

$$de_v = m_v ds'$$

waarin:

$\delta \varepsilon_v$	=	incrementele volumieke rek	[-]
m_v	=	samendrukbaarheid	[m ² /kN]
$\delta \sigma_v'$	=	incrementele effectieve spanning	[kN/m ²]

Per rekincrement van 1% is de incrementele spanning berekend. De samendrukbaarheid van de organische klei is in Figuur 5.6 weergegeven. Hierbij is alleen de data behorend bij grote rekken ($\varepsilon_a > 12\%$) gebruikt.



Figuur 5.6 Samendrukbaarheid en consolidatiecoëfficiënt tegen het poriëngetal

De consolidatiecoëfficiënt volgt uit:

$$c_v = \frac{k}{m_v \gamma_w}$$

waarin:

c_v	=	consolidatiecoëfficiënt	$[m^2/s]$
m_v	=	samendrukbaarheid	$[m^2/kN]$
k	=	doorlatendheid	$[m/s]$
γ_w	=	volumiek gewicht water	$[kN/m^3]$

Zie Figuur 5.6. Zowel de samendrukbaarheid als de consolidatiecoëfficiënt zijn afhankelijk van het poriëngetal. Op basis van beide proeven zijn de volgende correlaties bepaald:

$$m_v = 2.04 \times 10^{-5} \exp(2.02 e) \quad [m^2 / kN]$$

$$c_v = 2.12 \times 10^{-11} \exp(3.63 e) \quad [m^2 / s]$$

De correlaties zijn ingetekend in Figuur 5.6.

5.2.5 Conclusies en bevindingen beproeving organische klei in K_0 -oedometer CRS

De K_0 -oedometer CRS proef levert zeer veel interessante resultaten op. Uit de proeven kan het volgende worden geconcludeerd:

- de organische klei heeft een stijfheid die logaritmisch met de gemiddelde effectieve isotrope spanning verloopt. In het v - $\ln p$ diagram zijn 2 takken te onderscheiden: voor en na de grensspanning. De waargenomen grensspanning ligt slechts enkele kPa's boven de geschatte effectieve verticale terreinspanning.
- bij ontlasten tot een hogere overconsolidatiegraad (OCR) zijn de plastische rekken groter; bij ontlasten en herbelasten neemt de hoeveelheid gedissipeerde energie toe (hysterese).
- de K_0 van normaal geconsolideerde organische klei is hoger dan verwacht. De vaak gebruikte Jâky relatie, $1 - \sin \phi'$, lijkt niet bruikbaar als uitgegaan wordt van vermoedelijk zeer hoge waarde van ϕ' uit de triaxiaalproef;
- bij ontlasten tot $OCR=4$ neemt K_0 toe, praktisch lineair met OCR;
- de relaties tussen het poriëngetal en de doorlatendheid, het poriëngetal en de samendrukbaarheid en het poriëngetal en de consolidatiecoëfficiënt kunnen zeer goed met een exponentiële functie worden benaderd;
- vanwege de hoge variabiliteit van de grond wordt aanbevolen na de proef watergehalte en soortelijk massa van het monster te bepalen. Daarmee is het verloop van het poriëngetal tijdens de proef nauwkeuriger te bepalen.

5.3 Triaxiaalproeven

5.3.1 Inleiding

Op de klei uit Bergambacht is een serie triaxiaalproeven uitgevoerd met een state-of-the art triaxiaalopstelling. Zowel de opstelling als de proefomstandigheden wijken af van wat standaard is in de adviespraktijk. Enkele bijzonderheden worden in deze paragraaf beschreven.

Gladde eindvlakken

Bekend is dat in een ‘standaard’ triaxiaalproef een relatief grote schuifspanning langs de poreuze stenen aan onder- en bovenzijde van het monster kan optreden door wrijving. Om de invloed van deze schuifspanning op het gedrag van het monster te beperken wordt een grote hoogte/diameter verhouding (H/D) aangehouden, normaliter tussen 1.8 en 2.2. Vervolgens wordt aangenomen dat de grootheden die worden gemeten (spanningen, rekken) representatief zijn voor wat er in het hart van het monster gebeurt. Feitelijk wordt een uniforme spannings- en rektoestand aangenomen. Om de wrijving langs de eindvlakken te reduceren, zijn gesmeerde eindvlakken toegepast.

In een relatief hoog monster kan er, als het materiaal softening vertoont, lokalisatie van rekken optreden (ontwikkeling schuifvlak) waardoor ‘overall’ gemeten rekken niet meer representatief zijn voor de zone waarin bezwijken optreedt. Deze wijze van beproeven is wel praktisch maar niet wenselijk, zeker niet voor fundamenteel onderzoek. Daarom is in dit onderzoek de H/D verhouding verkleind naar 1 om de ontwikkeling van schuifvlakken te verhinderen zodat het monster als een element vervormt. Dit is belangrijk in relatie tot constitutieve modellering.

Drainage en poriëndrukmetingen

Omdat de eindvlakken gesmeerd zijn kan er niet via gangbare poreuze stenen aan boven- en onderzijde van het monster worden gedraineerd en kunnen dus de water(over)spanningen niet worden gemeten via deze poreuze stenen. Daarom moet het monster tijdens de consolidatie radiaal worden gedraineerd. Hierbij wordt gebruik gemaakt van om het monster gewikkelde side drains. Deze side drains staan in verbinding met keramische poreuze ringen in boven- en ondervoet, aan respectievelijk boven- en onderzijde van de gesmeerde eindvlakken. Omdat de afstromingsrichting van het poriënwater in het monster niet gelijk is aan de vervormingsrichting tijdens consolidatie, kan, bij een relatief grote wateroverspanning, sterke niet uniformiteit optreden. Daarom moet er voldoende tijd worden genomen voor consolidatie. In eerste instantie vond drainage plaats via ringen van gelijkmatige glasparels in boven- en ondervoet. Deze ringen zijn later vervangen door ringen van keramische materiaal. Deze ringen zijn speciaal op maat gezaagd door medewerkers van de TU Delft, faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen.

De poriëndrukmetingen vinden plaats via een naaldvormig poreuze steentje in de hartlijn van het monster, bij radiale drainage de meest kritische plaats om de poriëndrukken te meten. Deze steen staat via een stalen drainageleiding in verbinding met een drukopnemer. Gekozen is voor een stalen leiding om een relatief stijf meetsysteem te creëren.

Apparatuurfouten

Bij het meten van het grondgedrag bij lage spanningsniveaus kunnen het triaxiaalmembraan en de side drains een belangrijke foutenbron zijn bij het bepalen van het juiste spanningsniveau. Uit eerdere onderzoeken is gebleken dat onder een hoek van 35° (ten opzichte van de horizontaal) geplaatste side drains een verwaarloosbare bijdrage hebben aan de gemeten deviator in de ongedraineerde afschuiffase (Greeuw et al. , 2000). In dit onderzoek zijn de side drains onder een hoek van 40° aangebracht om rekening te houden met rotatie van de side drains tijdens consolidatie.

Om de invloed van het triaxiaalmembraan te beperken zijn zeer dunne membranen gebruikt (0.14 mm), gemaakt door de sectie Geotechniek van de Technische Universiteit Delft. Daardoor is de verwachte bijdrage aan de deviator- en isotrope spanning relatief klein. Voor de consolidatiefase waarin axiale- en volumieke rekken optreden wordt gecorrigeerd volgens een methode waarbij rekening gehouden wordt met zowel axiale- als volumieke rekken (Duncan and Seed, 1967). Hierbij wordt het membraan beschouwd als lineair elastische cilinder. Voor de afschuiffase vindt correctie plaats volgens een methode gebaseerd op schuifproeven op monsters gemaakt van gelatine (Greeuw et al., 2000). Hierbij wordt de bijdrage van het membraan tijdens de consolidatiefase opgeteld (superpositie).

Metten kleine rekken

In de opstelling kunnen de verplaatsingen op verschillende manieren worden gemeten: op ‘externe’ wijze met de stappenmotor en een verplaatsingsopnemer en op lokale wijze door Hall effect opnemers (HET’s) gelijmd op het triaxiaalmembraan. De stappenmotor, die de plunjer aandrijft, legt in stapjes van 1 μm , een verplaatsing op. Door het aantal stappen te tellen kan de verplaatsing worden bepaald. De externe verplaatsingsopnemer bevindt zich in de voet van de triaxiaalopstelling en is verbonden met de plunjer. Onstijfheden tussen monster en plunjer (bedding- en seatingsfouten) kunnen een grote invloed hebben op het bepalen van de rek bij kleine vervormingen en beïnvloeden daarmee de stijfheidsbepaling. Daarom is ook de rek lokaal gemeten, met op het triaxiaalmembraan gelijmde Hall Effect Transducer (HET). De radiale rek is gemeten met een op het monster gelijmde scharnierende constructie met aan de niet scharnierende zijde een HET. In enkele proeven is dit signaal gebruikt om met behulp van de celdruk de radiale rekken tijdens consolidatie zo gering mogelijk te houden zodat K_0 wordt geconsolideerd. Hierbij wordt aangenomen dat deze rekmeting representatief is voor de radiale rek in het monster.

Benderelementen

In de onder – en bovenvoet zijn benderelementen aangebracht. Vanuit de voet wordt een schuifgolfje door het benderelement opgewekt waarna het schuifgolfje zich voortplant door het monster. Met het benderelement in de bovenvoet wordt de schuifgolf gedetecteerd en kan de looptijd van de golf worden bepaald. Met de bekende afstand tussen de benderelementen kan de voortplantingssnelheid worden berekend. De voortplantingssnelheid van de schuifgolf is een functie van de dichtheid en de schuifmodulus van de grond. Er geldt:

$$G_{vh} = \rho v_s^2$$

waarin:

G_{vh}	=	schuifmodulus	[kPa]
ρ	=	dichtheid	[kg/m ³]
v_s	=	schuifgolfsnelheid	[m/s]

De dichtheid van het monster kan ten tijde van de proefneming worden geschat op basis van de dichtheid voor de proef en de opgetreden rekken. Met dit meetsysteem kan tijdens de proef, dus bij verschillende rekken en spanningen, de schuifmodulus worden bepaald. Het betreft de schuifmodulus G_{vh} (v = verticale voortplanting schuifgolf, h = horizontale uitslag bender).

De ontwikkelingen rond het inbouwen van benderelementen in de onder- en bovenvoet van de triaxiaalopstelling is in een GD-rapport beschreven (Greeuw, 1999).

Beperkingen van de uitgevoerde proevenserie

Niet alle triaxiaalmonsters zijn uitgerust met bovenbeschreven lokale rekopnemers. Bij hoge spanningen (100 kPa) treden grote rekken op ($\epsilon_a = 0.25$ -) waardoor lokale rekmeting moeilijk te

realiseren is vanwege het geringe meetbereik (7 mm) van de HET's. De afstand tussen de bevestigingspunten van de HET's kan niet onbeperkt worden verkleind.

Ook het signaal van de externe verplaatsingsopnemer is niet altijd bruikbaar geweest. Waarschijnlijk is het gebruik van siliconenolie als celvloeistof hier debet aan. Uit meetdata is gebleken dat er weinig verschil is tussen de verplaatsing gemeten met de verplaatsingsopnemer en de stappenmotor. Zodat het signaal van de stappen motor goed bruikbaar is.

De monsters zijn niet allen K_0 -rekgestuurd geconsolideerd. Gebleken is dat op deze wijze consolideren een grote kans op falen heeft. Enkele oorzaken hiervan zijn:

- het lijmen van de klem van de radiale rekopnemer op het membraan is erg lastig. De klem moet zeer goed ontvet zijn. Ook de lijmsort is speciaal gekozen om te kunnen gebruiken in combinatie met siliconenolie.
- gedurende de vervorming kan het membraan de neiging hebben om te plooiën. Dit kan de meting van de radiale rek verstoren.

Omdat er al enkele goede metingen van de K_0 in normaal geconsolideerde grond zijn gedaan (met K_0 CRS proef en enkele geslaagde triaxiaalproeven) is het restant van de serie anisotroop spanningsgestuurd geconsolideerd met ingestelde vaste verhouding van de horizontale en verticale totaalspanning. Door het spanningsniveau relatief langzaam te verhogen heeft het monster zich kunnen aanpassen. In de geslaagde K_0 -rekgestuurde triaxiaalproeven is de gradiënt van K_0 met ε_a waargenomen. Deze geleidelijke verandering van spanning is in de spanningsgestuurde consolidatiefasen gesimuleerd.

5.3.2 Monsters

In het monsternummer is extra informatie verwerkt omtrent de wijze van consolidatie en het effectief verticaal consolidatieniveau. Ook is aangegeven of het een gereconstitueerd monster betreft. Het laatste cijfer in het monsternummer is het volgnummer in geval van duplo proeven. Zie 5.3.3.

monster	boring	diepte			γ_n^{*1}	γ_n^{boven}	γ_n^{onder}	γ_n	w^{*1}	h_{ini}
[-]	[-]	[MV-m]			[kN/m ³]	[kN/m ³]	[kN/m ³]	[kN/m ³]	[-]	[mm]
CK ₀ U-15(1)	31	7.79	-	7.86	12.2	12.2	12.2	11.4	1.80	69.4
CK ₀ U-15(2)	35	7.59	-	7.66	12.8	12.5	13.1	12.8	1.41	69.1
CAU-30(1)	35	7.49	-	7.56	12.6 ^{*2}	-	12.6	12.0	1.52 ^{*2}	69.9
CAU-30(2)	35	7.29	-	7.36	12.9	13.2	12.6	12.6	1.52	72.2
CAU-100(1)	31	7.69	-	7.76	12.6	12.8	12.3	12.2	1.56	80.3
CAU-100(2)	35	8.11	-	8.18	11.8	12.3	11.4	11.5	2.34	81.5
R-CAU-15	-	gereconstitueerd			12.3	12.5	12.2	12.2	1.80	68.3
R-CAU-30	-	gereconstitueerd			12.5	12.5	12.4	12.3	1.73	79.8

*1) Gemiddelde waarde bepaald met volume steekring aan boven- en onderzijde monster

*2) Alleen onderzijde monster

*boven/onder) volumiek gewicht bepaald met volume steekring aan boven- resp. onderzijde monster

Tabel 5-3 Data monsters triaxiaalproeven

Uit Tabel 5-3 volgt dat het volumiek gewicht van de onderzochte monsters ligt tussen 11.4 en 12.8 kN/m³. Ook lijkt het gemiddeld volumiek gewicht bepaald met de kleine volume steekring systematisch hoger te zijn dan het volumiek gewicht bepaald na meting van de massa, hoogte en diameter van het monster. Uit 16 bepalingen van het volumiek gewicht met beide methodes blijkt dat het volumiek gewicht bepaald met de volume steekringen gemiddeld 0.06 kN/m³ hoger is. De standaarddeviatie van de afwijking is gelijk aan 0.4 kN/m³. Er dus slechts een kleine systematische

afwijking en een wat grotere toevallige fout. Mogelijke verwachte oorzaken van de afwijkingen zijn: het verschil in γ_n door de variabiliteit van de grond en de onnauwkeurigheid van de diameterbepaling van het monster. Het monster is niet altijd regelmatig van vorm; de benadering van een rond monster is niet altijd even goed.

Uit de tabel volgt dat γ_n bepaald met de volume steekring aan boven- en onderzijde van het monster behoorlijk kan verschillen; de variabiliteit van de grond is groot (Zie 4.10). Dit heeft wellicht consequenties voor de uniformiteit van rekken tijdens consolidatie van de ongeveer 70 mm hoge triaxiaalmonsters.

Fabricage gereconstitueerde monsters

De gereconstitueerde monsters zijn gemaakt door een slurry in Perspex buizen te consolideren. De slurry is gemaakt door natuurlijke klei aan te mengen met water tot een watergehalte 25% groter dan de vloeigrens. Dit is gebruikelijk voor het maken van gereconstitueerde monsters. Vervolgens zijn twee monsters geconsolideerd bij respectievelijk 10 kPa en 20 kPa. Deze monsters zijn in het triaxiaalapparaat ingebouwd om te worden geconsolideerd bij respectievelijk 15 kPa en 30 kPa, spanningen hoger dan de opgelegde (fabricage) consolidatiespanning. Op deze wijze wordt ongestructureerd gedrag verwacht.

5.3.3 Procedure

De aangehouden procedure kan als volgt worden omschreven:

Gladde eindvlakken

Voorafgaand aan het trimmen en inbouwen van het monster zijn de eindvlakken van een vetlaag voorzien waarna een rond rubberen schijfje met een dikte van 0.15 mm is aangebracht. Vervolgens heeft voorbelasting van de eindvlakken plaatsgevonden om een gelijkmatige dikte van de vetlaag te krijgen.

Trimmen monster

Het monster heeft, door monsterneming met het Begemann steekapparaat, bij aanvang een diameter van ongeveer 63 mm. Nadat het monster zich in de klimaatstapel heeft kunnen aanpassen aan de temperatuur, is het monster op hoogte getrimd, gebruik makend van een trimzaag en een statief. De monsterhoogte voor de proef bedroeg ongeveer 70 mm. Zie Tabel 5-3. Na het trimmen is de hoogte en diameter op 3 plaatsen gemeten. De grootst gemeten hoek tussen de eindvlakken bedroeg gemiddeld 0.46° (standaarddeviatie 0.25°). Met de afsnijdsels van boven- en onderzijde is een kleine volumesteekring gevuld. Hiermee is het volumieke gewicht en watergehalte bepaald. Zie Tabel 5-3.

Installatie monster en lokale rekopnemers

Na het trimmen van het monster zijn de side drains bevochtigd en aangebracht op het monster onder een hoek van 40° met de horizontaal. Vervolgens is het membraan aangebracht met een membraanhouders, is het monster in de cel geïnstalleerd en zijn de lokale rekopnemers op het membraan gelijmd.

Instellen initiële spanning en verzadiging

Uit eerder uitgevoerde metingen bleek dat monsters gestoken op de Bergambacht site een zuigspanning van ongeveer 5 kPa bezitten. Dit betekent dat de effectieve isotrope spanning gelijk is aan 5 kPa. Na het inbouwen van het monster wordt de lucht tussen het monster en het membraan grotendeels verwijderd door een geringe hoeveelheid ontlucht water langs het monster te laten stromen. In theorie zou het monster water kunnen opnemen waardoor de zuigspanning zou kunnen afnemen. Dit heeft zwel en mogelijk structuurverlies tot gevolg. Daarom is deze periode relatief kort (enkele minuten) en is na het doorspoelen een zuigspanning tussen het monster en membraan van 5

kPa aangebracht. Uiteindelijk wordt in de verzadigingsfase een effectieve spanning van 5 kPa aangebracht. De monsters verzadigen gedurende een periode van minimaal 16 uur bij een backpressure van 200 kPa.

Anisotrope consolidatie

Voor consolidatie zijn 2 procedures gevolgd:

- **A** rekgestuurde consolidatie: het monster wordt axiaal vervormd met constante reksnelheid. Tegelijkertijd wordt de celdruk aangepast afhankelijk van de radiale vervorming van het monster;
- **B** spanningsgestuurde consolidatie: de celdruk wordt met een ingestelde snelheid verhoogd. Tegelijkertijd wordt de axiale kracht zodanig aangepast dat de verhouding van horizontale - en verticale **totaal**spanning (A) constant blijft. De waarde van A is gedurende de consolidatiefase verkleind conform de metingen uit proeven uitgevoerd met procedure A.

De grootte van de op te leggen axiale reksnelheid in procedure A is afhankelijk van het materiaal. Voor een keuze van een geschikte snelheid zijn de K_0 CRS proefresultaten gebruikt. De drainagelengtes in beide proeven bedragen respectievelijk 2 cm en 3.5 cm. Voor een isotroop materiaal zou dit betekenen dat de reksnelheid ongeveer 3x zo klein moet zijn om evenveel wateroverspanning te creëren. Dit komt overeen met een snelheid van 6.7×10^{-7} [1/s] (0.2 %/uur). De gehanteerde snelheden in de consolidatiefasen hebben deze axiale reksnelheid niet overschreden.

Monster	σ_{vc}^{*1}	σ_{vc}^{*2}
[-]	[kPa]	[kPa]
CK ₀ U-15(1)	15	14
CK ₀ U-15(2)	15	14
CAU-30(1)	30	28
CAU-30(2)	30	29
CAU-100(1)	100	89
CAU-100(2)	100	98
R-CAU-15	15	15
R-CAU-30	30	-

*1) indicatie van de te bereiken effectieve verticale consolidatiespanning

*2) bereikte effectieve verticale consolidatiespanning

Tabel 5-4 Proefgegevens triaxiaalproeven

In de spanningsgestuurde procedure is het spanningsverloop, zoals dit in een rekgestuurde consolidatie is waargenomen, gesimuleerd. Het heeft, gezien de reksnelheidsafhankelijkheid van het materiaal, de voorkeur om rekgestuurd te consolideren. Deze procedure kent een hoge faalkans. Daarom is de procedure B aangehouden. In Tabel 5-4 is per monsternummer het gewenste – en het bereikte effectief verticaal spanningsniveau tijdens consolidatie weergegeven. Het verschil tussen beide spanningen wordt voornamelijk bepaald door de keuze van het moment van afschuiven en membraancorrecties.

Ongedraineerd afschuiven

Nabij het gewenste spanningsniveau zijn de drainagekranen gesloten en zijn de monsters zonder dat drainage mogelijk is afgeschoven bij een axiale reksnelheid van ongeveer 1.4×10^{-6} [1/s] (0.5%/uur) tot een axiale rek van 0.2 (20%). Deze reksnelheid wordt voldoende laag geacht voor voldoende vereffening van gradiënten in de wateroverspanningen in het monster.

Einde proef

Bij het bereiken van een axiale rek van 0.2 [-] zijn de monsters ontlast, gefotografeerd en zijn de hoogte en diameter gemeten. Het monster is vervolgens in acht taartpunten gesneden. Vier van deze

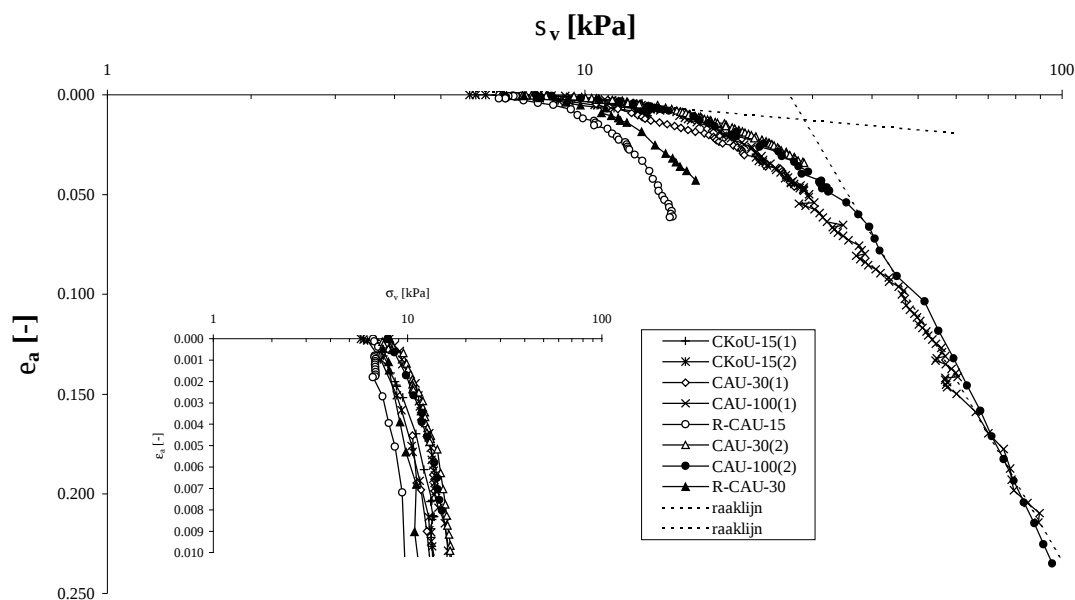
taartpunten zijn in vijf delen gesplitst voor watergehaltebepaling. Op deze wijze kan een beeld van het verloop van het watergehalte over de hoogte van het monster worden verkregen.

De proefresultaten van de anisotrope consolidatiefase en de ongedraineerde afschuiffase zijn separaat beschreven.

5.3.4 Resultaten triaxiaalproeven; anisotrope consolidatie

Verloop e_a - s_v

In Figuur 5.7 is het verloop van de axiale rek tegen de effectieve verticale spanning uitgezet. Uit de figuur volgt dat de verticale spanning gedurende de vervorming oploopt. Bij kleine rekken loopt de logaritmisches uitgezette spanning sneller op dan bij grote rekken. Ook in deze monsters is een grensspanning aanwezig; onder de grensspanning een relatief stijf gedrag, boven de grensspanning een relatief slap gedrag. Slechts twee monsters zijn duidelijk voorbij de grensspanning beproefd. Met de meetdata is de grensspanning bepaald door raakklijnen aan het begin en einde van de curven te trekken. Zie Figuur 5.7. Hieruit volgt een grensspanning van 28.7 kPa; ongeveer 40% hoger als die waargenomen in de K_0 CRS proeven. De grensspanning is een functie van de opgelegde reksnelheid; naarmate de reksnelheid lager is, neemt ook de grensspanning af. De, tijdens de uitgevoerde proeven, opgetreden axiale reksnelheid ligt tussen de 1.4×10^{-7} en 5.6×10^{-7} [1/s]. Deze variatie verklaart niet het verschil in grensspanning.

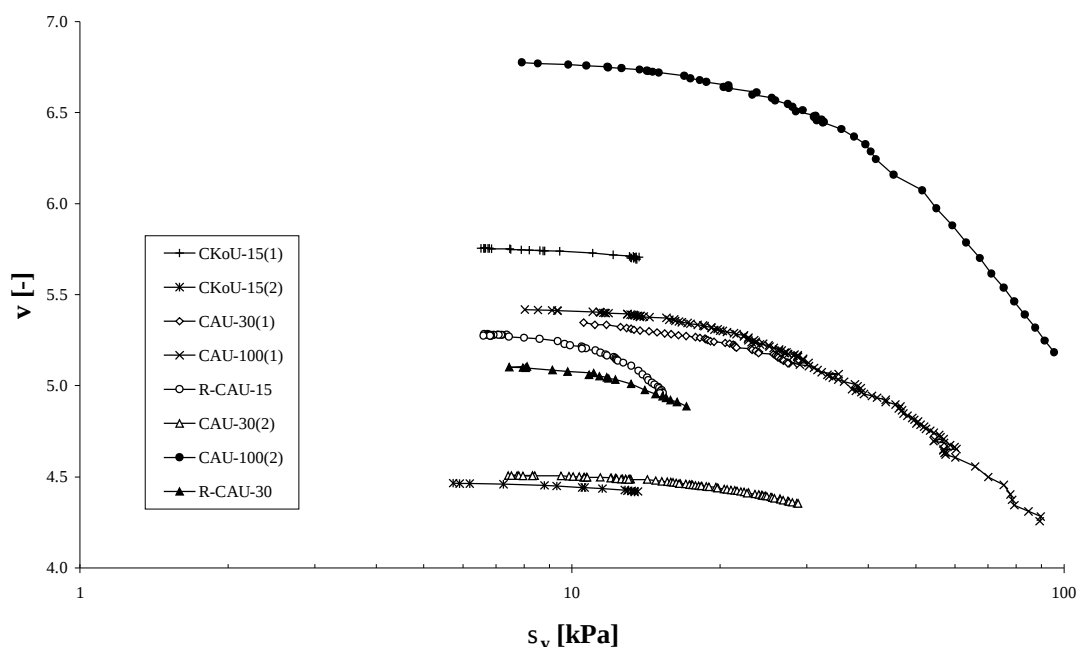


Figuur 5.7 e_a tegen s_v triaxiaalproeven

De gereconstitueerde monsters laten bij een zelfde spanning relatief veel rek zien en zijn dus minder stijf dan natuurlijke monsters. Dit wordt veroorzaakt door de verandering van structuur. De grensspanning van het gereconstitueerde monster R-CAU-15 is gelijk aan 11.5 kPa. Dit ligt iets boven de, gedurende de reconstitutieprocedure opgelegde, spanning van 10 kPa. Dit is mogelijk veroorzaakt door het optreden van kruipverstevinging aan het begin van consolidatie. Zie detail Figuur 5.7.

Het tweede gereconstitueerde monster, R-CAU-30, bezweek tijdens consolidatie als gevolg van een sterke waterspanningsopbouw. Alleen de data tot bezwijken is gepresenteerd. De grensspanning is niet bepaald.

In Figuur 5.8 is het verloop van specifiek volume tegen de effectieve verticale spanning gepresenteerd. Het specifiek volume is bepaald op basis van het gemiddeld watergehalte na de proef, de opgetreden rekken en de specifieke massa uit de correlatie van de specifieke massa met het natuurlijk watergehalte (4.9). Wat in de figuur naar voren komt is de zeer grote spreiding van het initieel specifiek volume. De grote variatie in het gemiddelde watergehalte voor de proef gaf al een indicatie van de te verwachten spreiding.



Figuur 5.8 Verloop $v - s_v$

Kwaliteit triaxiaalmonsters

De relatieve verandering van het poriëngetal ($\Delta e/e_0$) die nodig is voor het herbelasten tot de terreinspanning (ongeveer 15 kPa) kan gebruikt worden als een maat voor de monsterkwaliteit (Lo Presti, 1999). Bij verstoring verliest het monster structuur waardoor de stijfheid kleiner wordt; de optredende rekken bij herbelasten zullen dan groter zijn.

De verhouding $\Delta e/e_0$ is bepaald en weergegeven in Tabel 5-5. Hierbij is de specifieke massa bepaald met de correlatie tussen het (natuurlijke) watergehalte en de specifieke massa (4.9). Het gebruikte watergehalte is het gemiddelde watergehalte van de volume steekring van de boven- en onderzijde van het monster. Ook voor de gereconstitueerde monsters zijn de gegevens van de oorspronkelijke klei gebruikt.

Bij de beschouwing is aangenomen dat de axiale rek tijdens consolidatie gelijk is aan de volumieke rek. Dit is een goede aanname (Figuur 5.9).

Niet altijd is tijdens consolidatie van de natuurlijke monsters een effectieve verticale spanning van 15 kPa bereikt. In dat geval is de maximaal bereikte spanning gebruikt. Zie Tabel 5-5. Voor een

beschouwing van de kwaliteit van de gereconstitueerde monsters is de rek beschouwd bij de, tijdens de reconstitutieprocedure opgelegde, spanning.

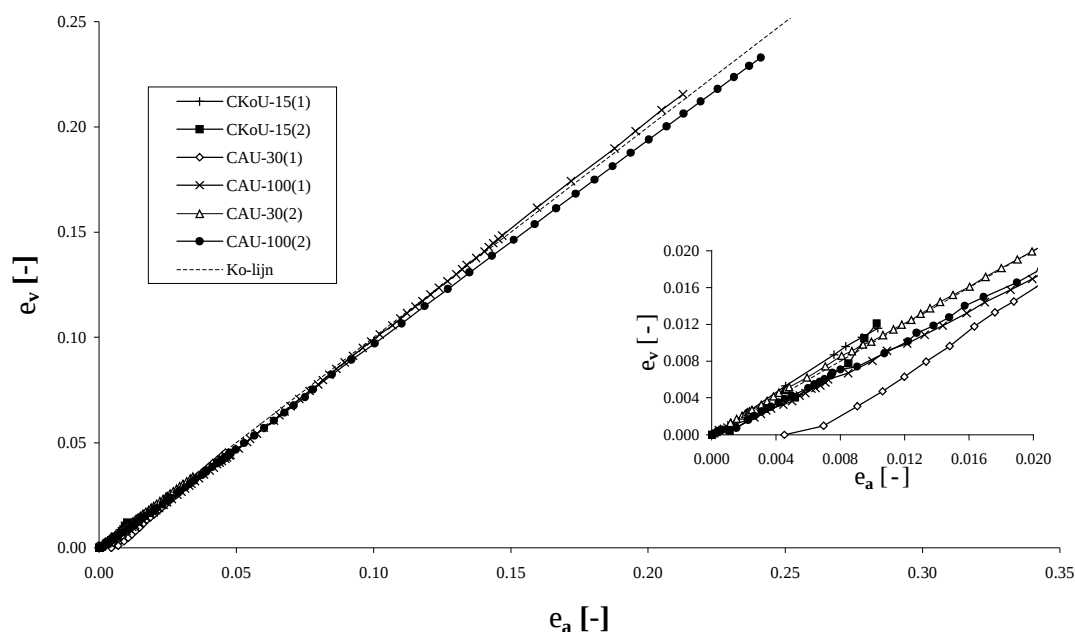
monster	w^{*1}	G_s	e_0	ε_a	σ_v'	$\Delta e/e_0$
[-]	[-]	[-]	[-]	$\times 10^{-2}$ [-]	[kPa]	$\times 10^{-2}$ [-]
CK ₀ U-15(1)	1.80	2.37	4.27	1.0	14	1.27
CK ₀ U-15(2)	1.41	2.46	3.46	1.0	13	1.33
CAU-30(1)	1.52 ^{*2}	2.43	3.70	1.5	15	1.91
CAU-30(2)	1.52	2.43	3.70	0.72	15	0.91
CAU-100(1)	1.56	2.42	3.78	0.84	15	1.06
CAU-100(2)	2.34	2.25	5.27	0.79	15	0.94
R-CAU-15	1.80	2.35	4.23	1.2	10	1.48
R-CAU-30	1.73	2.35	4.07	-	20	-

*1) Gemiddelde waarde bepaald met volume steekring aan boven- en onderzijde monster

*2) Alleen onderzijde monster

Tabel 5-5 Monsterkwaliteit triaxiaalmonsters

Uit de resultaten volgt dat $\Delta e/e_0$ ligt tussen 0.91×10^{-2} en 1.48×10^{-2} [-]. Met deze waarden verdienen de monsters het predikaat “excellent” (Lo Presti, 1999) en is de kwaliteit beter dan de K_0 CRS monsters. Tijdens proef R-CAU-30 bezweek het monster voortijdig. Daarom is de opgetreden rek bij 20 kPa niet verder beschouwd.



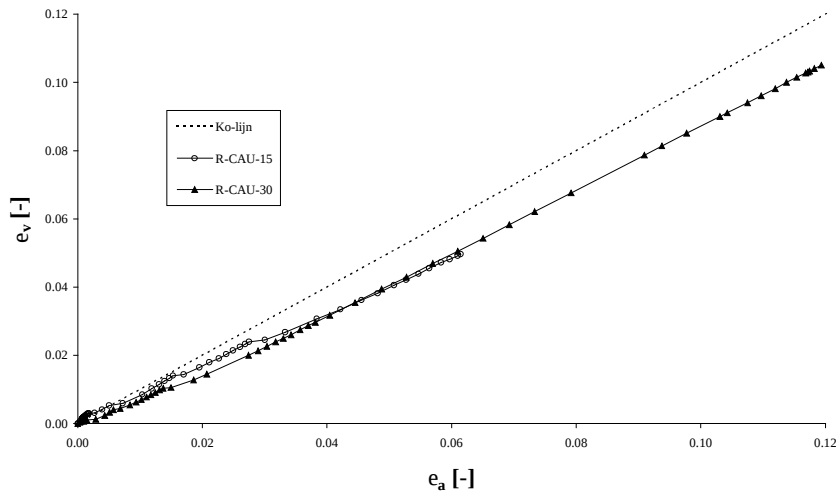
Figuur 5.9 ε_a - e_v natuurlijke monsters

Verloop ε_a - ε_v

In Figuur 5.9 is de waargenomen axiale rek tegen de volumieke rek weergegeven. Een perfect K_0 geconsolideerd monster ondergaat tijdens consolidatie geen radiale rekken. Hieruit volgt dat, in dat geval, ε_a gelijk is aan ε_v . Dit verband is in Figuur 5.9 weergegeven als K_0 -lijn. Het is duidelijk dat tijdens de proeven op de natuurlijke monsters, ondanks de soms spanningsgestuurde consolidatiefase met constante verhouding van verticale- en horizontale totaalspanning, de K_0 -lijn goed gevolgd wordt. De helling van de lijn wijkt slechts enkele procenten af. Blijkbaar is de complexe sturing op de radiale

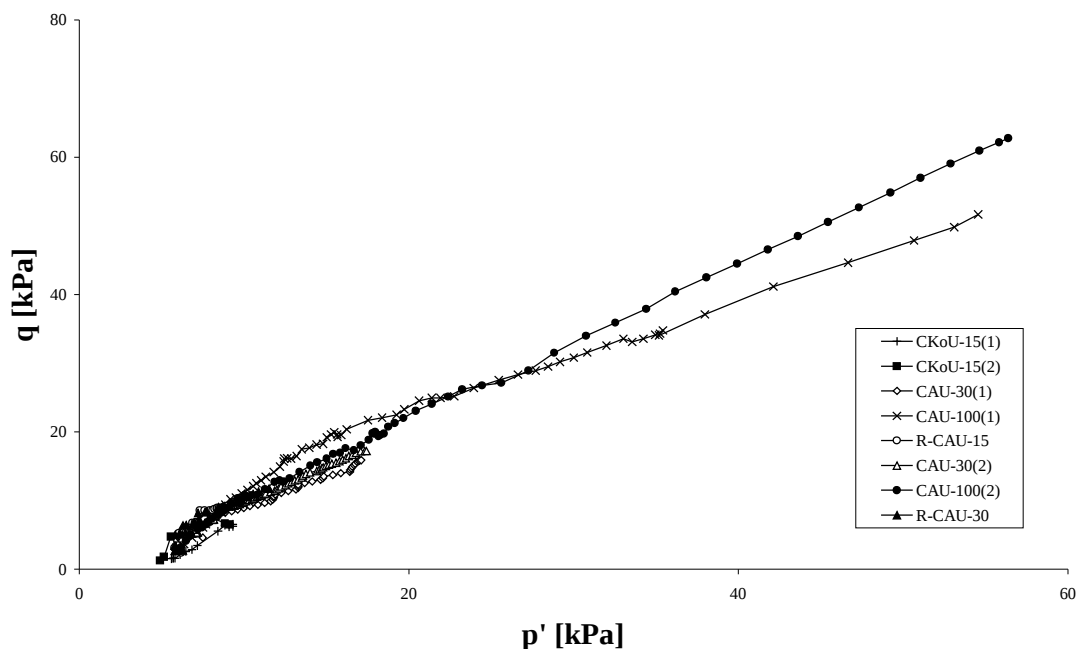
rekopnemer niet nodig als K_0 en het verloop van K_0 bekend is uit bijvoorbeeld enkele goed uitgevoerde K_0 CRS proeven. Het resultaat is niet verwonderlijk; bij de spanningsgestuurde consolidatie is het natuurlijk spanningsgedrag als reactie op de opgelegde rekken en reksnelheden gesimuleerd.

Dit geldt niet voor de gereconstitueerde monsters. Zie Figuur 5.10. De verhouding tussen axiale - en volumieke rekken ligt rond de 1.1 – 1.2. Dit betekent dat bij een gegeven effectieve verticale spanning en axiale rek de volumieke rek te klein is. De effectieve horizontale spanning zou dus hoger moeten zijn, met andere woorden: de echte K_0 van deze gereconstitueerd kleimonsters is groter dan die van de natuurlijke monsters.



Figuur 5.10 e_a - e_v gereconstitueerde monsters

Verloop effectief spanningspad q - p'



Figuur 5.11 Effectief spanningspad (ESP) tijdens consolidatie

In Figuur 5.11 is het ESP weergegeven. Hierbij is gebruik gemaakt van de Cambridge parameters voor de spanningen:

$$q = s_a' - s_r' \quad \text{en} \quad p' = \frac{s_a' + 2s_r'}{3}$$

waarin:

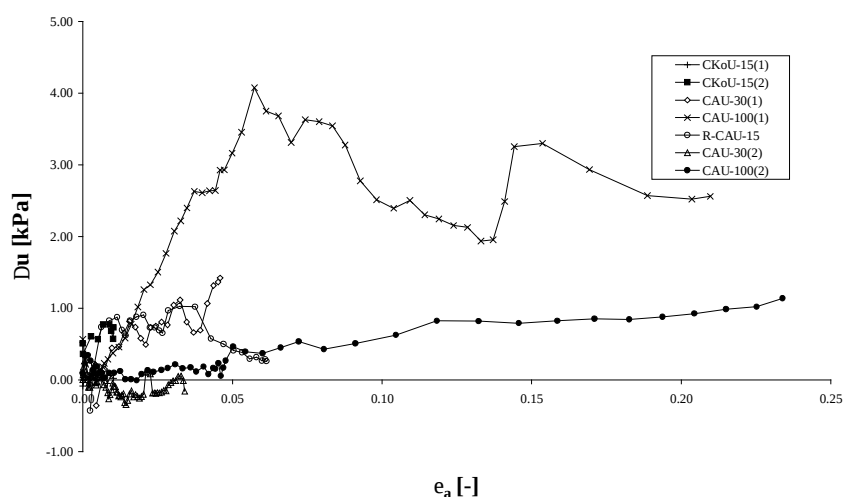
q	=	Deviatorspanning	[kPa]
p'	=	effectieve isotrope spanning	[kPa]
σ_a'	=	effectieve axiale spanning	[kPa]
σ_r'	=	effectieve radiale spanning	[kPa]

De gevolgde procedure leidt ertoe dat belast wordt vanaf een spanningsniveau q , p' van respectievelijk 3 kPa en 6 kPa. Bij rekgestuurd consolideren kan het ESP worden beschouwd als ware het een vrijheidsgraad, materiaalafhankelijk. Tussen proefresultaten van verschillende monsters wordt dan veel spreiding in de ligging van ESP verwacht. Bij spanningsgestuurd consolideren wordt, in theorie, het totaalspanningspad opgelegd en vormen de rekken de vrijheidsgraad. Spreiding in de eigenschappen van de monsters geeft dan spreiding in de waargenomen rekken.

Ondanks de spanningssturing is er toch spreiding in de ligging van de effectieve spanningspaden. Dit wordt verklaard vanuit de onzekerheid in A_b , de doorsnede van het monster en de opbouw van wateroverspanning gedurende consolidatie. Dit treedt met name op bij het aanbrengen van een kleine deviatorische belasting (het stapsgewijs verlagen van de verhouding van horizontale en verticale totaalspanning. Zie 5.3.3 en 5.3.5) en bij belasten voorbij de grensspanning.

Verloop e_a - Du

De tijdens de proef waargenomen opbouw van de wateroverspanning is gepresenteerd in Figuur 5.12. Bij de spanningsgestuurde consolidatie wordt in het begin van de procedure de verhouding van de horizontale – en verticale totaalspanning in kleine stappen verlaagd van ongeveer 0.7 tot ongeveer 0.4. Dit stapsgewijs opleggen van een deviator leidt tot wateroverspanning (orde 1 kPa) die na verloop van tijd wegebt (consolidatie). Ook kleine temperatuurswisselingen in de klimaatstaat beïnvloeden de poriëndrukmeting.

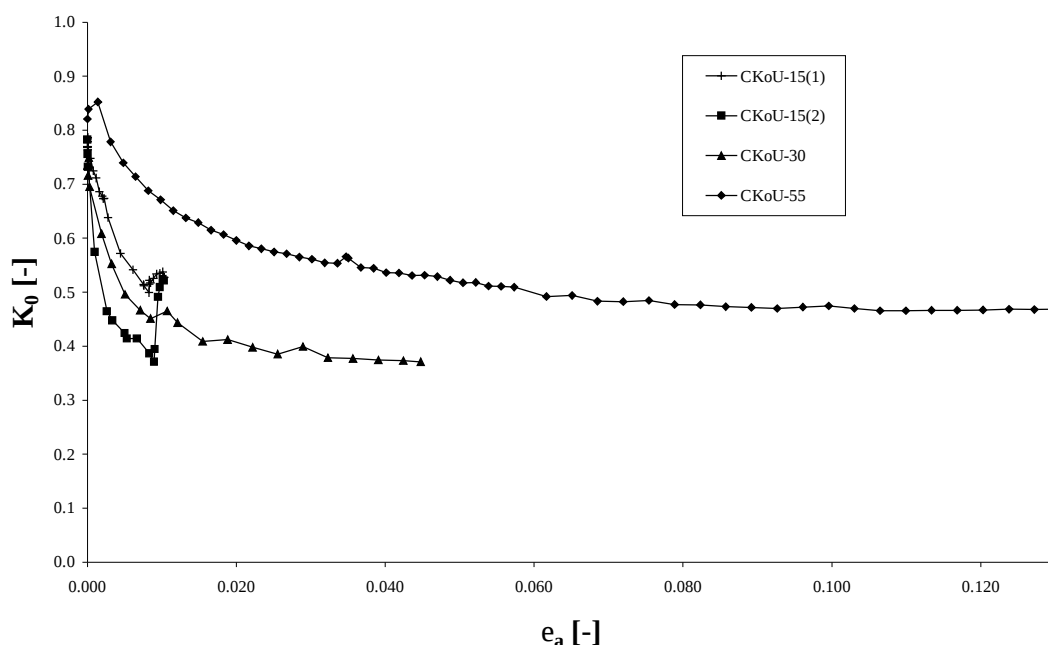


Figuur 5.12 $Du - e_a$

De data laten zien dat bij doorgaande vervorming de waterspanning in het monster de neiging heeft om toe te nemen. De waarde de wateroverspanning ligt in de orde van 1 kPa. Uitzondering hierop vormt monster CAU-100(1) met een waterspanning van 3 kPa. Desondanks zijn de wateroverspanningen klein ten opzichte van de verticale effectieve spanning resulterend in redelijk uniforme spanningscondities.

Verloop K_0

In Figuur 5.13 is het verloop van K_0 van de, als CK₀U uitgevoerde, triaxiaalproeven, weergegeven. Ter aanvulling van het geringe aantal volgens procedure A uitgevoerde proeven zijn in de figuur zijn ook proefresultaten gepresenteerd van de proeven CK₀U-55 en CK₀U-30. Eerstgenoemde proef is niet eerder gepresenteerd vanwege afwijkingen in de aangehouden procedure. Daardoor was de effectieve isotrope spanningstoestand aan het einde van de verzadingsfase relatief hoog en gelijk aan ongeveer 14 kPa. Ook is dit monster in de ongedraineerde afschuiffase afgeschoven met een lagere reknelheid (5.6×10^{-7} 1/s). In de figuur is ook te zien dat er relatief veel axiale rek nodig is (0.06 – 0.07) om een constante K_0 waarde te bereiken. Tijdens proef CK₀U-30 bezweek het monster voortijdig door sterke opbouw van wateroverspanning; alleen bruikbare data is gepresenteerd. De rek tot aan een constante waarde van K_0 bedraagt bij dit monster ongeveer 0.04. De overige gepresenteerde monsters hebben nog geen constante K_0 bereikt; zij reageren nog overgeconsolideerd. De K_0 van de twee beproefde natuurlijke organische kleimonsters was gelijk aan respectievelijk 0.47 en 0.37.



Figuur 5.13 Verloop K_0 in CK₀U proeven

De overige twee monsters laten in de eindfase van de consolidatie, bij een rek van ongeveer 0.01, een toename van K_0 zien. In beide proeven is vlak voor die toename van K_0 de opgelegde axiale reknelheid verlaagd met een factor 4. Hierdoor nam de effectieve horizontale spanning toe. In monster CK₀U-55 is tijdens consolidatie de reknelheid verhoogd met een factor 2. Dit vond plaats in het normaalgeconsolideerde gebied en leidde niet tot verandering van K_0 .

Bendermetingen

Direct na inbouwen, vlak voor consolidatie en gedurende de consolidatie van de triaxiaalmonsters is regelmatig de voortplantingssnelheid van een, door de benderelementen opgewekte, schuifgolf

gemeten. Ook is tijdens deze fasen de dichtheid(sverandering) van het monster bekend. De (tangent) schuifmodulus G_{vh} is bepaald en weergegeven in Tabel 5-6.

monster	ρ^{*1}	$v_{s; ini}^{*2}$	$G_{vh; ini}^{*2}$	G_{vh}^{*3}	G_{vh}^{*4}	$\sigma_v'^{*4}$	$G_{vh}/\sigma_v'^{*4}$
[-]	$10^3 \text{ [kg/m}^3\text{]}$	[m/s]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[kPa]	[-]
CK ₀ U-15(1)	1.17	36.6	1.56	1.68	1.85	13	140
CK ₀ U-15(2)	1.30	30.1	1.18	1.47	1.74	14	129
CAU-30(1)	1.25	28.4	1.00	1.23	2.24	29	78
CAU-100(1)	1.28	35.1	1.58	2.02	3.01	89	34
R-CAU-15	1.24	22.6	0.64	0.39	0.62	15	41
CAU-30(2)	1.29	33.7	1.38	1.66	2.23	25	37
CAU-100(2)	1.17	32.4	1.22	1.40	2.62	98	27
R-CAU-30	1.25	25.1	0.79	1.00	1.46	16	90

*1) uit massa - en volumemetingen monster voor de proef

*2) direct na inbouwen, zonder aanpassing aan mogelijk nieuwe spanningstoestand (verzadiging)

*3) begin consolidatie, na aanpassing aan mogelijke nieuwe spanningstoestand (verzadiging)

*4) eindfase van de consolidatie

Tabel 5-6 Resultaten bendermetingen

Uit de tabel volgt dat G_{vh} van de natuurlijke monsters na installatie gemiddeld 1.32 MPa bedraagt. Na verzadiging en het aanbrengen van een effectieve spanning ($q=3$ kPa, $p'=6$ kPa) neemt de gemiddelde waarde van G_{vh} toe tot 1.58 MPa. Tijdens consolidatie neemt G_{vh} verder toe als gevolg van een toenemende dichtheid en schuifgolfsnelheid.

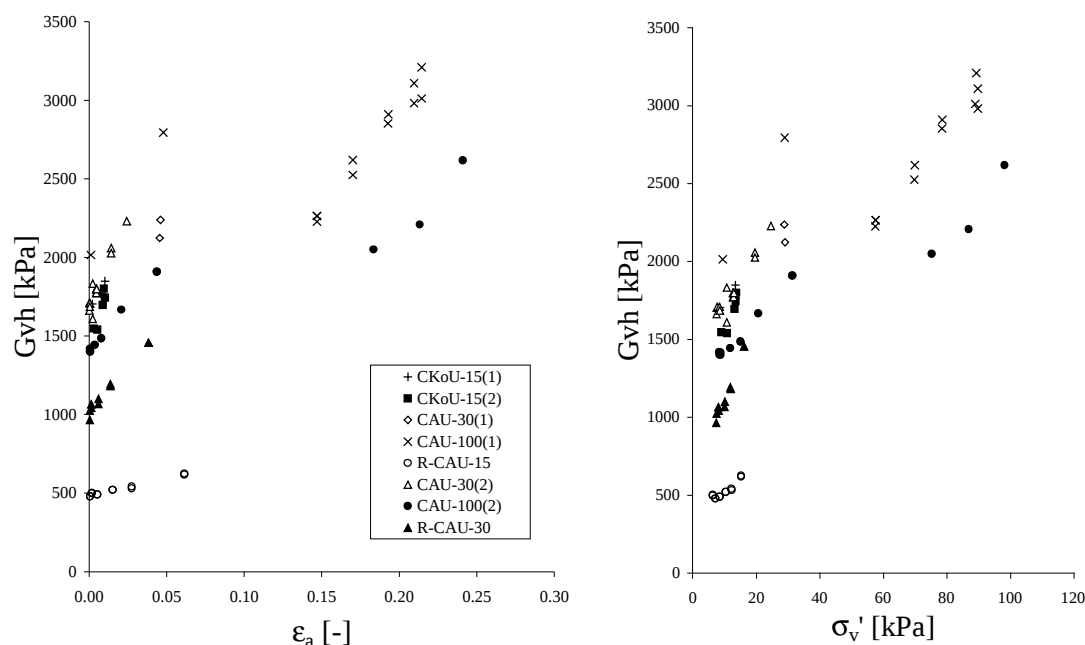
Uit de metingen blijkt ook dat de gereconstitueerde monsters een veel lagere stijfheid hebben ondanks een vergelijkbare dichtheid; de schuifgolfsnelheid is veel lager. Er is wel verschil tussen de gereconstitueerde monsters onderling. Het gereconstitueerde monster dat bij 20 kPa is geconsolideerd heeft een 23% hogere stijfheid. Dit is niet evenredig met het verschil in dichtheid (+1.1%). Hierbij speelt de geschiedenis van de monsters waarschijnlijk een grote rol. Zowel de belastingsduur als de consolidatiespanning verschilt tussen de monsters.

Omdat de dichtheid van de natuurlijke- en gereconstitueerde monsters van gelijke orde van grootte is en er toch grote verschillen in stijfheid zijn, kan worden verondersteld dat de spanningsgeschiedenis en de structuurontwikkeling de parameters zijn die in deze metingen het verschil in schuifgolfsnelheid bepalen. Om de invloed van het spanningsniveau weg te delen is G_{vh} genormaliseerd met de actuele effectieve verticale spanning. Zie Tabel 5-6. De genormaliseerde stijfheid van de natuurlijke monsters neemt af naarmate de overconsolidatiegraad kleiner is. De normaalgeconsolideerde natuurlijke monsters (100 kPa) hebben een genormaliseerde stijfheid die vergelijkbaar is met de genormaliseerde stijfheid van het normaal geconsolideerde gereconstitueerde monster R-CAU-15. Het tweede gereconstitueerde monster heeft een relatief hoge genormaliseerde stijfheid. Dit monster reageert nog enigszins overgeconsolideerd door een, tijdens de reconstitutieprocedure, opgelegde consolidatiespanning van 20 kPa.

Omdat de genormaliseerde stijfheid van normaalgeconsolideerde gereconstitueerde monsters en de normaalgeconsolideerde monsters een gelijke orde van grootte hebben, is het waarschijnlijk dat normaalconsolideren van natuurlijke monsters bij 100 kPa leidt tot volledige vernietiging van structuur.

Het verloop van G_{vh} tijdens consolidatie is in Figuur 5.14 weergegeven. Hierbij is een selectie gemaakt van de meetgegevens. Alleen stijfheden behorend bij een bekende spannings- en rektoestand zijn gepresenteerd. De meetdata vertoont nogal wat spreiding. De verschillen tussen gemeten stijfheden van natuurlijke monsters zijn groot. Een verschil van 0.5 MPa is mogelijk. Opvallend is de sterke

toename van G_{vh} bij kleine rekken en lage effectieve verticale spanning en de minder sterke toename bij grotere rekken en spanningen. Wellicht speelt de mate van overconsolidatie hierbij een rol.



Figuur 5.14 Verloop G_{vh} tijdens consolidatie triaxiaalmonsters

5.3.5 Resultaten triaxiaalproeven; afschuiffase

Direct na het bereiken van de gewenste consolidatiespanning zijn de drainagekranen gesloten en zijn de monsters ongedraineerd afgeschoven bij constante celdruk. Het gereconstitueerde monster R-CAU-30 is niet ongedraineerd afgeschoven door storingen tijdens consolidatie. Proefdata uit deze fase is weergegeven in Tabel 5-7.

Monster	h_c	T	$\epsilon_a, \dot{\epsilon}$	$C_{u; \max}$	σ_{vc}'	$C_{u; \max}/\sigma_{vc}'$	A_f	G_{sec}^{*1}
[-]	[mm]	[°C]	$\times 10^{-6}$ [1/s]	[-]	[kPa]	[kPa]	[-]	[MPa]
CK ₀ U-15(1)	68.7	19.4	1.39	20	14	1.46	-	1.11
CK ₀ U-15(2)	68.4	19.3	1.39	14	14	1.01	-	1.22
CAU-30(1)	66.7	19.2	1.39	18	28	0.64	-	1.22
CAU-30(2)	69.7	19.4	1.39	17	29	0.59	-	1.41
CAU-100(1)	63.1	19.1	1.61	42	89	0.47	1.01	4.44
CAU-100(2)	61.7	19.3	1.19	43	98	0.43	1.41	3.39
R-CAU-15	64.4	19.4	1.33	7.8	15	0.51	0.92	0.740
R-CAU-30	-	-	-	-	-	-	-	-

*1) geschatte waarde schuifmodulus bij een rekniveau van 10^{-4} (extern gemeten).

Tabel 5-7 Data ongedraineerde afschuiffase

waarin:

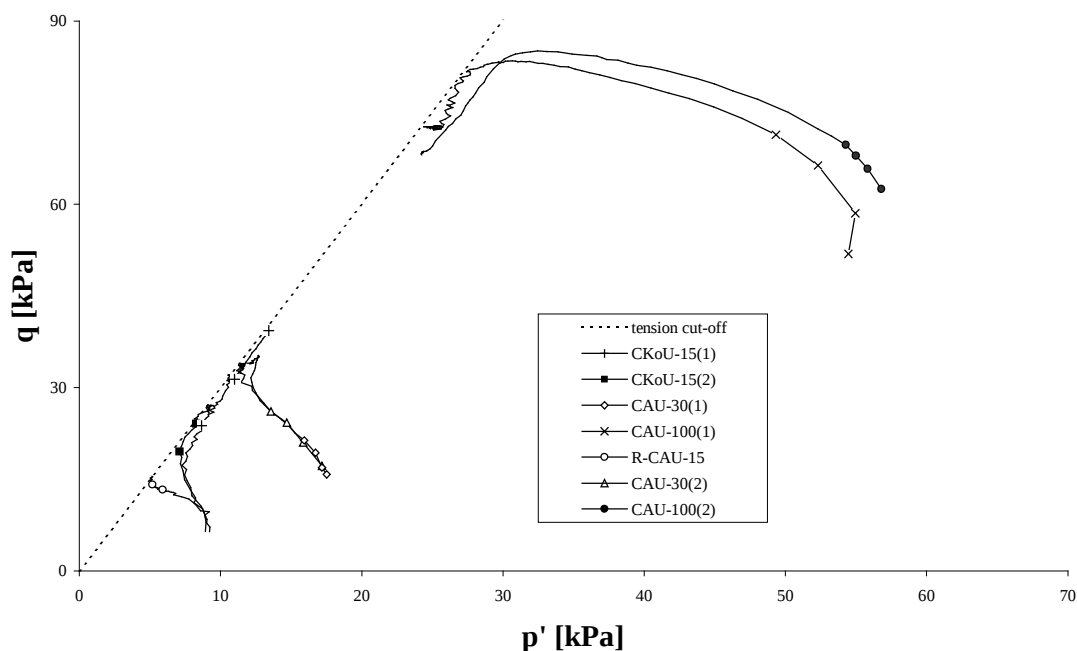
h_c	=	hoogte na consolidatie	[mm]
T	=	temperatuur gedurende de afschuiffase	[°C]
$\dot{\epsilon}_a, \dot{\gamma}$	=	axiale reksnelheid	[1/s]
$C_{u;\max}$	=	maximaal bereikte ongedraineerde schuifsterkte	[kPa]
σ'_{vc}	=	bereikte effectieve verticale consolidatiespanning	[kPa]
$C_{u;\max}/\sigma'_{vc}$	=	genormaliseerde sterkte	[-]
σ'_{vc}	=	effectieve verticale consolidatiespanning	[kPa]
A_f	=	Skempton A-factor bij bezwijken	[-]
$G_{\sec}$	=	secant schuifmodulus	[MPa]

Figuur 5.15 presenteert de effectieve spanningspaden van de ongedraineerde afschuiffasen van zeven proeven. Monster R-CAU-30 bezweek voortijdig. Het merendeel van de monsters is spanningsgestuurd geconsolideerd met een constante verhouding van de horizontale - en verticale totaalspanning. Deze vaste verhouding (A) geeft in het q-p' vlak een lijn met een constante helling:

$$\frac{q}{p'} = \frac{3(s'_a - s'_r)}{s'_a + 2s'_r} = \frac{3(1-A)}{1+2A}$$

De waarde van A is gedurende consolidatie aangepast om het natuurlijke spanningsgedrag van het materiaal te simuleren. Voor de monsters geconsolideerd bij een effectieve verticale spanning van ongeveer 100 kPa, is als invoer A=0.4 gebruikt. Hieruit volgt dat q/p'=1. Dit is uit de figuur af te leiden door een lijn vanuit de oorsprong naar het begin van het ESP te trekken.

Voor de presentatie van de ESP's is de data bewerkt. Daardoor zijn invloeden van bijvoorbeeld temperatuurswisselingen op de poriëndrukmeting en dus op het ESP niet meer zichtbaar. Dit komt de presentatie van het fundamentele gedrag ten goede.



Figuur 5.15 q-p' diagram triaxiaalproeven

Alle beproefde monsters hebben bij afschuiven de neiging tot compactie getuige de waterspanningsopbouw. Gedurende de afschuiffase wordt een gedeelte van de totaalspanning overgedragen op het poriënwater. De effectieve spanning neemt tijdens dit proces af. Deze effectieve spanning neemt gedurende enkele proeven zelfs zover af dat de effectieve horizontale spanning reduceert tot 0 kPa. De tension cut-off wordt bereikt. Dit is het vlak in de spanningsruimte dat druk- en trekspanningen scheidt. De tension cut-off is als stippellijn in Figuur 5.14 weergegeven. Spanningstoestanden boven de tension cut-off zijn alleen mogelijk als het materiaal trekspanningen kan opnemen. De bij de tension cut-off behorende ϕ' bedraagt 90° .

Het waargenomen gedrag voor organische klei is bijzonder. Zelfs enkele normaalgeconsolideerde monsters bezwijken nabij de tension cut-off. Als wordt aangenomen dat cohesie gelijk is aan 0 kPa, liggen de waarden van de gemeten ϕ 's boven de 60° . Dit betekent dat een ophoging van enkele m's zand op een ondergrond met organische klei, onder vergelijkbare spanningscondities, ook dit gedrag laat zien. Hier zijn de huidige rekenmethodes niet op afgestemd.

Tijdens de afschuiffasen van de 15 kPa monsters is visueel waargenomen dat het triaxiaalmembraan los rond het monster hing en dat de monsters doorgaand vervormden onder uitstroom van poriënwater. Het gevolg hiervan is dat niet meer wordt voldaan aan de ongedraineerde conditie. Eénmaal is de hoeveelheid uitgeperst poriënwater gemeten. Dit bedroeg enkele cm^3 's. Omdat het monster zijn poriënwater kwijt kan, is verdere compactie mogelijk zonder dat er bezwijken optreedt. Dit leidt met de constante reksnelheid tot een toename van de effectieve verticale spanning en een toename van q en p' in de verhouding van 3:1; dus langs de tension cut-off. Bij hogere spanningen is het 'losraken' van het membraan niet maar de toename van q na het bereiken van de tension cut-off wel waargenomen. Dit gedrag lijkt op het gedrag dat veen laat zien in een standaard triaxiaal CU proef.

De proeven bij 15 kPa hadden tot doel het in situ gedrag te simuleren. Bij bezwijken van een organische kleilaag in situ (afschuiven) kan alleen met de extra sterkte (relatief hoge C_u) worden gerekend als afstroom naar de omgeving mogelijk is.

Bij de hoogste consolidatiespanning neemt de wateroverspanning gedurende het afschuiven toe tot het naderen van de tension cut-off. Vervolgens neemt de effectieve verticale spanning af en blijft de effectieve radiale spanning laag. q en p' nemen af in de verhouding 3:1. Het spanningspunt 'wandelt' evenwijdig aan de tension cut-off omlaag.

Uit het q - p' diagram volgt dat bij de lage consolidatiespanningen (15 kPa en 30 kPa) het ESP steiler is dan die behorend bij het gereconstitueerde monster en het hoogste spanningsniveau. Dit betekent een minder anistroop gedrag. Mogelijke oorzaak hiervan is de mate van overconsolidatie. De overconsolidatiegraad van de beproefde monsters bedraagt dus 1 tot 2. De grensspanning is niet als scherpe knik waargenomen in het ϵ_a - σ_v' diagram en dus zal ook het gedrag van het monster, geconsolideerd bij 30 kPa, beïnvloed worden door de spanningsgeschiedenis.

Uit de proefresultaten volgt verder dat de toename of afname van de sterkte afhankelijk is van het feit of de klei normaal- of overgeconsolideerd is. Bij normaalgeconsolideerde monsters treedt na het bereiken van een maximale deviator uiteindelijk een afname van de deviator op terwijl overgeconsolideerde monsters een toename laten zien. Het gedrag van normaalgeconsolideerde monsters lijkt vooralsnog normaliseerbaar.

De genormaliseerde sterkte is in Figuur 4.10 uitgezet. De plasticiteitsindex is met de correlaties bepaald. Uit de vergelijking volgt dat de genormaliseerde sterkte van de normaalgeconsolideerde monsters onder de Skempton relatie liggen. De overgeconsolideerde monsters zijn relatief sterk en liggen boven de Skempton relatie.

Het beproefde gereconstitueerde monster heeft bij een consolidatiespanning vergelijkbaar met de natuurlijke monsters (15 kPa) een veel lagere sterkte en heeft gedurende de afschuiffase meer de neiging tot waterspanningsopbouw. Dit wordt toegeschreven aan het (gedeeltelijk) ontbreken van structuur en het kleine verschil in spanningsgeschiedenis. De mate van waterspanningsopbouw is vergelijkbaar met de normaalgeconsolideerde natuurlijke monsters. Het monster bezwijkt ook op de tension cut-off.

De proefresultaten van de in duplo uitgevoerde proeven laten zien dat de proefresultaten, ondanks de sterk variërende eigenschappen van de organische klei, reproduceerbaar zijn.

Stijfheid

In Figuur 5.16 is het q - ϵ_a diagram weergegeven. Uit de helling van de q - ϵ_a kromme is de secant stijfheid bepaald. In de literatuur wordt bij de beschouwing van dergelijke proevenseries verondersteld dat bij kleine rekken het materiaal isotroop lineair elastisch reageert. Dit is een vereenvoudiging. Soms bestaat er een relatie tussen $\delta\epsilon_s$ en $\delta p'$ en tussen $\delta\epsilon_v$ en δq middels koppeltermen en gaat de vereenvoudiging niet op.

Voor een lineair elastisch materiaal geldt:

$$de_s = \frac{1}{3G} dq$$

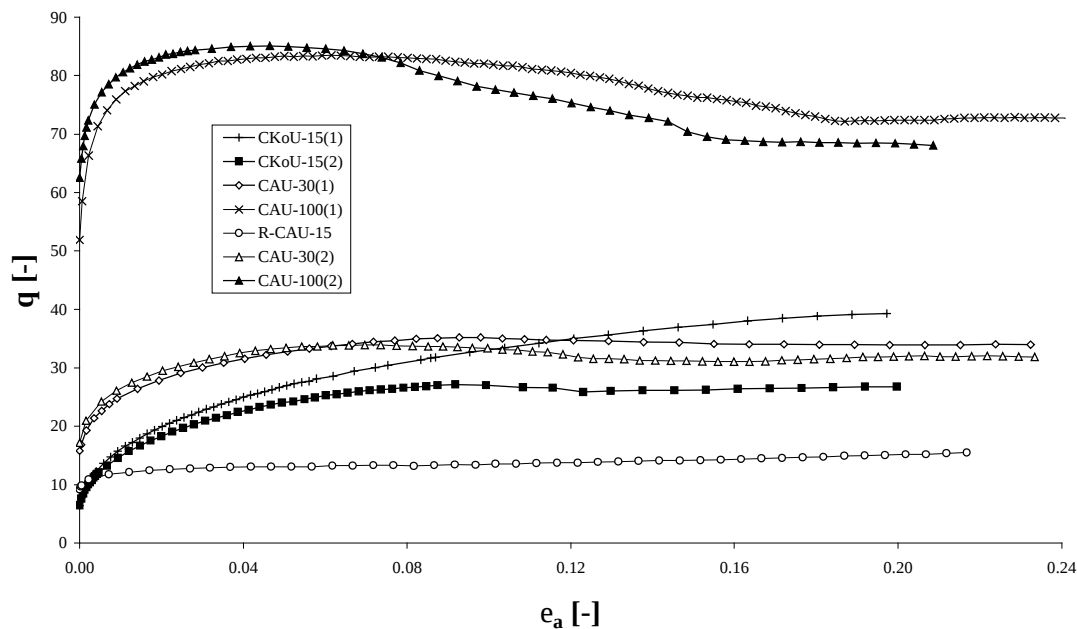
waarin:

$\delta\epsilon_s$	=	incrementele verandering van de invariant van de schuifrek	[-]
G	=	Schuifmodulus	[kPa]
δq	=	incrementele verandering van de invariant van de deviatorspanning	[kPa]

Aangenomen dat de afschuiffase ongedraineerd is, dan geldt $\delta\epsilon_s = \delta\epsilon_a$ en:

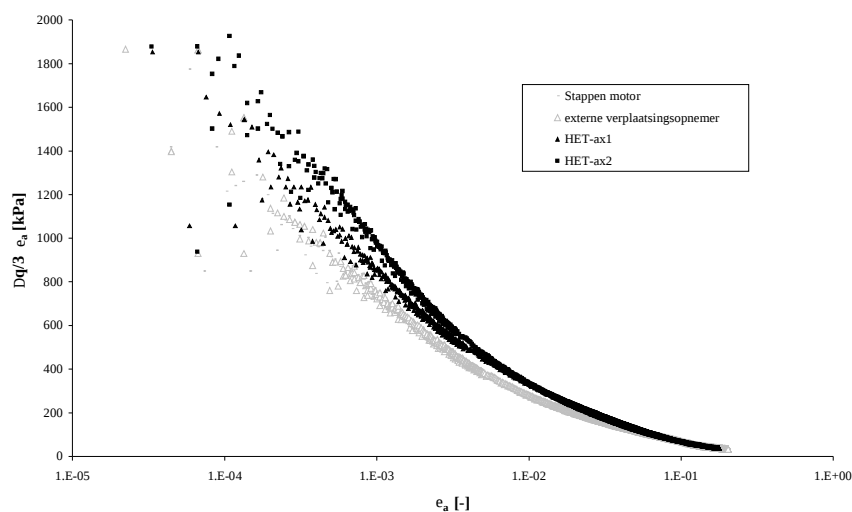
$$G = \frac{dq}{3e_a}$$

Indien lineair elastisch materiaal op een soortgelijke wijze wordt belast, ligt het ESP vanaf het begin van belasten verticaal. Vooral bij de proeven met een hoge consolidatiespanning is dit niet het geval. Voor een exacte bepaling van G (en de koppeltermen) moet of q of p' constant gehouden worden (gedraineerde proef). De exacte bepaling van deze waarden was niet het belangrijkste doel van dit onderzoek. Voor de beschouwing wordt wel lineair isotroop gedrag verondersteld.



Figuur 5.16 q-e_a diagram

In Figuur 5.18 is de secant waarde van de stijfheid G (of $\delta q/3\varepsilon_a$) uitgezet tegen ε_a op logaritmische schaal. Omdat meting van de rek met de lokale rekopnemers niet altijd een succes is geweest, is de rek bepaald uit het signaal van de stappen motor. Deze stappen motor drijft de plunjer aan. Hierbij worden stapjes van $1\ \mu\text{m}$ opgelegd. Als gevolg van beddingfouten, kan de waargenomen stijfheid kleiner zijn. Ter indicatie is een goed verlopen meting weergegeven in Figuur 5.17. Het meten van de stijfheid met de Hall Effect Opnemers (HET's) leidt tot een toename van de stijfheid in de orde van grootte van 10% tot 20%. Het is nog de vraag in hoeverre lokale rekmeting zinvol is bij triaxiaalbeproeving van organische klei met een sterke variatie van de initiële eigenschappen waardoor lokalisatie van rekken een grote rol zou kunnen spelen.



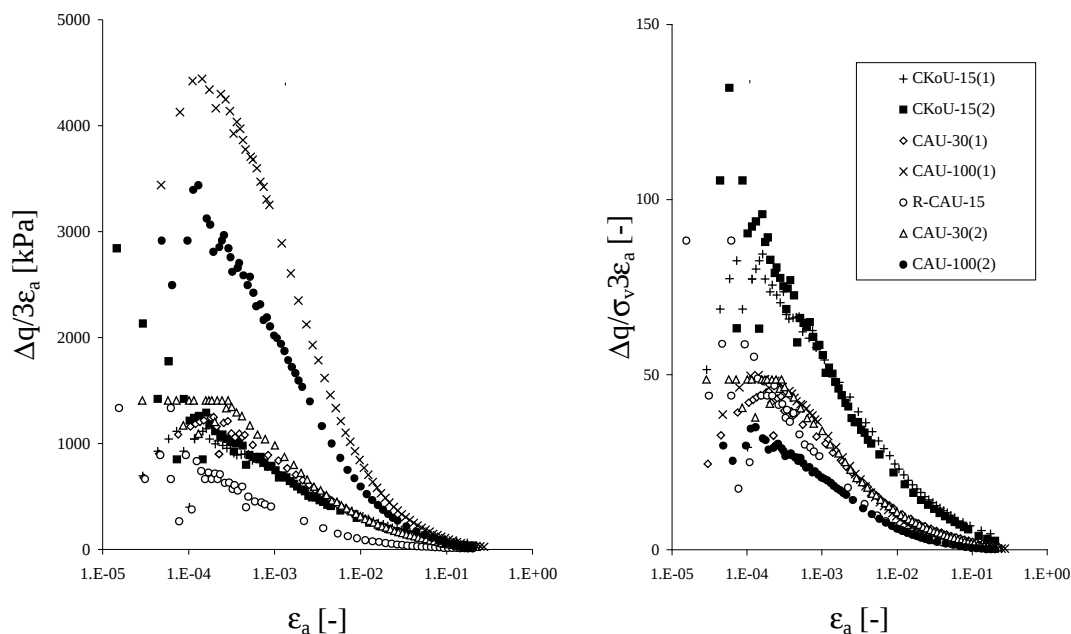
Figuur 5.17 Verloop stijfheid monster CK₀U-15(2)

De meetresultaten gepresenteerd in Figuur 5.18 laten een sterke niet lineaire stijfheid zien. Hierbij is de stijfheid bij kleine rekken groot. Rekken kleiner dan 10^{-4} lijken sterk te worden beïnvloed door beddingfouten. Ook de meetfrequentie speelt hierbij een rol.

De monsters geconsolideerd bij 100 kPa laten de grootste stijfheid zien (3-4 MPa). Het gereconstitueerde monsters heeft de kleinste stijfheid (0.7 MPa). Dit is consistent met de resultaten van de bendermetingen.

Om de invloed van de consolidatiespanning weg te delen is de stijfheid genormaliseerd met de effectieve verticale consolidatiespanning. Het resultaat is ook in Figuur 5.18 weergegeven. De figuur laat zien dat monsters geconsolideerd bij 15 kPa en 30 kPa een relatief grote genormaliseerde stijfheid hebben, in tegenstelling tot de normaalgeconsolideerde monsters (100 kPa) en het gereconstitueerde monster. De hoge waarde van de genormaliseerde stijfheid is een gevolg van overconsolidatie en structuurontwikkeling. In Tabel 5-7 zijn de waarden van de stijfheid gepresenteerd.

Het feit dat de genormaliseerde stijfheid van het gereconstitueerde monster en de normaal geconsolideerde monsters een gelijke orde van grootte hebben, betekent dat de structuur en spanningsgeschiedenis van de normaalgeconsolideerde monsters nagenoeg verdwenen moet zijn. Deze bevindingen komen overeen met de bendermetingen.



Figuur 5.18 Verloop stijfheid - ϵ_a en genormaliseerde stijfheid

Uniformiteit monster

Na de uitgevoerde triaxiaalproeven zijn de monsters opgedeeld in acht taartpunten. Vier taartpunten zijn opgedeeld in vijf gelijke delen met als doel het verloop van het watergehalte over de hoogte van het monster te bepalen. Met het verloop van het watergehalte kan de uniformiteit van het monster worden bepaald. Uit de metingen kan een indicatie worden verkregen van de invloed van de randvoorwaarden van de proeven zoals bijvoorbeeld wrijving langs eindvlakken.

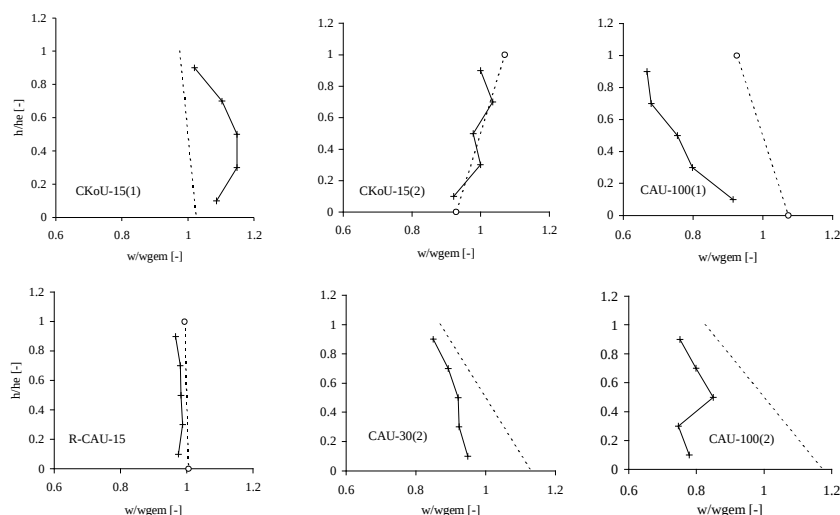
	h/h_{gem}	CK ₀ -15(1)	CK ₀ -15(2)	CAU-30(1)	CAU-100(1)	R-CAU-15	CAU-30(2)	CAU-100(2)
$w_{\text{voor;bov}}$	1.0	175	151	-	144	179	132	193
w_1	0.8	183	141	186	104	174	129	176
w_2	0.6	198	146	172	106	176	136	187
w_3	0.4	206	138	170	117	177	140	199
w_4	0.2	206	141	164	124	178	140	175
w_5	0.0	195	130	156	142	176	144	182
$w_{\text{voor;ond}}$	0.0	184	131	152	167	181	172	275

waarin:

h	=	Verticale positie gedeelte taartpunt	[mm]
h_{gem}	=	gemiddelde hoogte na de proef	[mm]
$w_{\text{voor;bov}}$	=	watergehalte voor de proef aan bovenzijde monster	[-]
w_I	=	watergehalte gedeelte taartpunt, deel i (1=boven)	[-]
$w_{\text{voor;ond}}$	=	watergehalte voor de proef aan bovenzijde monster	[-]

Tabel 5-8 Verloop watergehalte tegen genormaliseerde hoogte

Omdat de hoogte na de proef verschilt is de verticale positie van het gedeelte van de taartpunt genormaliseerd met de hoogte van het monster na de proef. In Figuur 5.19 is het watergehalte genormaliseerd met het gemiddelde watergehalte voor de proef uitgezet tegen de genormaliseerde hoogte. Ook is, ter vergelijking, het genormaliseerde watergehalte voor de proef aan boven- en onderzijde gepresenteerd (2 metingen, $h/h_{\text{gem}}=0$ en 1) en geeft een indicatie van de natuurlijke variabiliteit.



Figuur 5.19 Verloop watergehalte voor en na de proef

Uit de figuur volgt dat na verzadiging, consolidatie en afschuiven het watergehalte na de proef toch min of meer dezelfde lijn lijkt te volgen als het watergehalte vòòr de proef. Van enige randinvloeden lijkt geen sprake te zijn. In ieder geval komt dit niet tot uitdrukking in het verloop van het watergehalte.

5.3.6 Conclusies en bevindingen beproeving organische klei; triaxiaalproeven

Uit de resultaten van de serie triaxiaalproeven kan het volgende worden geconcludeerd:

- de variabiliteit van de bepaalde watergehaltes en volumieke gewichten is groot. Dit beeld is consistent met de bevindingen uit classificatie- en indextesten en de K_0 CRS proeven.
- de waargenomen grensspanning in de triaxiaalproeven ligt 40% hoger dan die waargenomen in de K_0 CRS proeven. Dit verschil in grensspanning wordt veroorzaakt door monsterverstoring; de triaxiaalmonsters hebben een hogere kwaliteit dan de beproefde K_0 CRS monsters.
- de simulatie van het verloop en de grootte van K_0 in de spanningsgestuurde anisotrope consolidatie heeft geleid tot zeer kleine radiale rekken. Een complexe, risicovolle, rekgestuurde consolidatie kan zo worden vermeden.
- de waargenomen K_0 in de triaxiaalproef is vergelijkbaar met die waargenomen in de K_0 CRS proef en bedraagt ongeveer 0.41. Gereconstitueerde monsters hebben een hogere K_0 dan natuurlijke monsters.
- de gehanteerde of opgetreden reksnelheden tijdens consolidatie leidden niet tot noemenswaardige opbouw van wateroverspanning resulterend in een uniforme spanningstoestand.
- de stijfheid van natuurlijke monsters bij zeer kleine rekken, bepaald met bendermetingen, is groter dan die van gereconstitueerde monsters. Dit wordt toegeschreven aan de structuur en de spanningsgeschiedenis van natuurlijke monsters.
- de duplo proeven laten onderling een kleine variatie zien in de ligging van het effectief spanningspad. De reproduceerbaarheid van de testresultaten is hoog, ondanks variaties van de initiële porositeit.
- alle monsters lijken tijdens ongedraineerd afschuiven te bezwijken op of nabij de tension cut-off. Dit vlak in de spanningsruimte scheidt druk- en trekspanningen en kan worden geassocieerd met een ϕ' van 90° . Dit impliceert niet dat de ϕ' gelijk is aan 90° graden. Wellicht hebben de monsters een zekere capaciteit om trek op te nemen (cohesie) en is ϕ' iets lager. Na het bereiken van dit vlak hebben de monsters bij relatief lage spanningen ($OCR > 1$) laten zien nog te beschikken over een extra sterkte. Dit uit zich in toenemende waarden van de deviator- en effectieve isotrope spanning (verhouding 3:1). Bij doorgaand vervormen wordt niet meer voldaan aan 'the undrained condition'. Nabij de tension cut-off laten normaalgeconsolideerde monsters juist afnemende waarden van de deviator- en effectieve isotrope spanning zien (verhouding 3:1); er is sprake van een duidelijke 'failure' toestand. In ieder geval is dit geschetste gedrag voor normaal- en overgeconsolideerde klei bijzonder. Bij beproeving van veen wordt dit vaker waargenomen.
- de overgeconsolideerde monsters verstevigen na het bereiken van de tension cut-off. Het verstevigen lijkt op te treden omdat verdere compactie mogelijk is; na het bereiken van de tension cut-off kunnen monsters poriënwater uitpersen. Hierbij wordt het membraan weggedrukt. Dit betekent dat de proef niet meer ongedraineerd is. Bij een afschuiving in situ is het waarschijnlijk dat deze drainage niet mogelijk is. Gevolg hiervan is dat met de toename van sterke veiligheidshalve niet kan worden gerekend.
- de normaalgeconsolideerde monsters verzwakken na het bereiken van de tension cut-off. Deze monsters vertonen piekgedrag en hebben een duidelijke 'failure'. Dit gedrag lijkt normaliseerbaar. De genormaliseerde ongedraineerde schuifsterkte, C_u/σ_v' , van normaalgeconsolideerde monsters bedraagt ongeveer 0.45. Deze waarde ligt onder de Skempton relatie. De overgeconsolideerde monsters zijn relatief sterk en liggen boven de Skempton relatie.
- De bepaalde secant schuifmodulus laat zien dat de stijfheid sterk niet lineair is; bij kleine rekken is de stijfheid groot. Metingen met lokale rekopnemers laten een stijfheid zien die 10-20% groter is dan die gemeten met externe opnemers als gevolg van beddingfouten. Het is nog de vraag in hoeverre lokale rekopnemers zinvol zijn bij triaxiaalbeproeving van een materiaal met zeer sterk variërende eigenschappen. De genormaliseerde stijfheid van de overgeconsolideerde monsters is

veel groter dan die van normaalgeconsolideerde monsters. Dit wordt toegeschreven aan de spanningsgeschiedenis en de aanwezigheid van structuur.

- het gereconstitueerde monster laat een sterke opbouw van de wateroverspanning zien tijdens de ongedraineerde afschuiffase vergelijkbaar met de normaalgeconsolideerde natuurlijke monsters. Ook de genormaliseerde sterkte heeft dezelfde orde van grootte. Blijkbaar is de structuur in de normaalgeconsolideerde natuurlijke monsters grotendeels verdwenen.
- verzadiging, anisotrope consolidatie en afschuiven lijkt niet tot grote niet uniformiteit te leiden. Het verloop van het watergehalte na de proef volgt min of meer dezelfde lijn als voor de proef. Van enige randinvloeden tijdens de proef lijkt geen sprake.

5.4 Direct Simple Shear proeven

5.4.1 Inleiding

Op de gestoken klei zijn 6 direct simple shear (DSS) constant volume testen uitgevoerd. Deze proeven vormen onderdeel van het proefprogramma constitutief gedrag organische klei.

In deze proef wordt een monster ($\phi 63$ mm, $h = 20$ mm) K_0 geconsolideerd in een met constantaan verstevigd membraan. Vervolgens wordt het monster, in dit geval, ongedraineerd afgeschoven door de hoogte en daarmee het volume constant te houden. De hierbij vaak gedane aanname is dat beproeving bij constant volume niet leidt tot generatie van extra poriëndrukken. Het afschuiven vindt plaats door boven- en ondervlak van het monster relatief te verschuiven loodrecht op de lengteas van het monster met een constante snelheid. Dit afschuiven vindt plaats onder plane strain condities.

Tijdens de uitvoering van de proeven wordt de verticale – en horizontale kracht op de bovenplaat en de verticale – en horizontale verplaatsing van de bovenplaat geregistreerd. De onderplaat is gefixeerd.

Met deze waarnemingen kunnen de verticale totaalspanning op het bovenzvlak (σ_v), de schuifspanning op het bovenzvlak (τ_h) en de hoekverdraaiing (γ) (engineering strain) worden bepaald. Het betreft gemiddelde waarden van de spanningen en rekken. Met de gedane aanname dat er tijdens afschuiven geen wateroverspanning optreedt, betekent dit dat effectieve spanningen gelijk zijn aan de totaalspanningen.

Door de mogelijke afwezigheid van complementaire schuifspanningen op de verticale vlakken van het monster tijdens afschuiven, kan een excentriciteit van de verticale normaalkrachten op het monster ontstaan. Dit heeft spanningsextremen aan de randen van het monster tot gevolg en leidt tot een niet uniforme, onbekende, spannings- en rektoestand. Uit de literatuur is bekend dat de mate van niet uniformiteit afhankelijk is van de hoogte/diameterverhouding van het monster, de stijfheid van het membraan en het gedrag van de grond. Daarentegen heeft de proef een praktische waarde. Bij de in dit hoofdstuk beschreven beschouwingen is aangenomen dat niet uniformiteiten een verwaarloosbare invloed hebben.

Bij de verwerking van de meetgegevens is de horizontale kracht gecorrigeerd voor de wrijvingsverliezen van de plunjer, de slede en de schuifweerstand van het membraan.

5.4.2 Monsters

De proeven zijn uitgevoerd op Begemann monsters uit boring 31 en 35.

Voor het begin van de proef is het watergehalte van afsnijdsels aan bovenzijde van het monster bepaald. Dit geeft een indicatie van het watergehalte van het monster. Door gebruik te maken van de data van de indexproeven is de specifieke massa van de monsters geschat. Met deze waarde en het watergehalte van het afsnijdsel is het initiële specifieke volume, uit $v_0 = 1 + w_0 G_s$, berekend. Zie Tabel 5-9.

Tabel 5-9 Monstergegevens DSS; voor de proef

monster	boring	diepte			γ_n	w^{*1}	G_s^{*2}	v_0^{*2}	γ_n^{*3}	$\sigma'_{v;c}$
[-]	[-]	[MV..m]			[kN/m ³]	[-]	[-]	[-]	[kN/m ³]	[kPa]
61C751	31	7.48	-	7.53	11.8	1.74	2.38	5.14	12.30	30
61C756	31	7.53	-	7.58	12.4	1.53	2.43	4.72	12.78	100
75B711	35	7.08	-	7.13	12.1	1.90	2.35	5.46	12.24	15
75B716	35	7.13	-	7.18	11.6	1.82	2.37	5.31	12.33	30
75B721	35	7.18	-	7.23	12.7	1.61	2.41	4.88	12.65	100
75B726	35	7.23	-	7.28	12.5	1.54	2.43	4.74	12.77	15

*¹) bepaald met afsnijdsels

*²) met correlaties. Zie 4.9.

*³) door terugrekenen watergehalte na de proef

Uit Tabel 5-9 volgt dat het volumiek gewicht van de monsters maximaal 0.9 kN/m³ verschilt. Dit grote verschil heeft deels te maken met de onnauwkeurigheid van het bepalen van het initiële volume van het monster in de DSS proef. Door gebruik te maken van eerder afgeleide correlaties tussen w en γ_n kan worden afgeleid dat het maximale verschil in volumiek gewicht mogelijk kleiner is: 0.5 kN/m³. Zie Tabel 5-9. Ondanks het vermoedelijk onnauwkeurig bepaalde volumiek gewicht en het feit dat afsnijdsel is gebruikt voor het bepalen van het watergehalte, is de grote variabiliteit van de organische klei zichtbaar.

5.4.3 Procedure

Na het op temperatuur laten komen van het monster in de klimaatstaat zijn de monsters getrimd en ingebouwd. Vervolgens zijn de monsters in één belastingsstap van 15 kPa, 30 kPa of 100 kPa belast gedurende minimaal 24 uur. De belasting is krachtgestuurd aangebracht met òf dood gewicht òf met een servo gestuurd systeem. Dit is aangegeven in Tabel 5-10.

In de afschuif fase is een constante reksnelheid, $\dot{\gamma}$, van $1.4 - 2.2 \times 10^{-6}$ [1/s] opgelegd tot een rek (γ) van minimaal 0.4 [-]. Deze variatie in opgelegde reksnelheid is te klein om wezenlijke verschillen in de uitkomsten als gevolg van de reksnelheidsafhankelijkheid van het materiaal te veroorzaken.

De proeven zijn uitgevoerd bij constante temperatuur van 19.3 °C.

5.4.4 Resultaten; consolidatie

In Tabel 5-10 is de gedurende de consolidatie opgetreden volumieke rek weergegeven. Hieruit blijkt een behoorlijke spreiding in de proefresultaten van de, in duplo uitgevoerde, proeven. Ook is de volumieke rek bij de consolidatiespanning veel groter dan in de triaxiaalproeven en de K_0 -CRS proeven is waargenomen. Dit geldt met name bij lage spanningen en wordt mogelijk veroorzaakt door beddingfouten en monsterverstoring. Bij 100 kPa consolidatiespanning zijn de rekken waargenomen in de verschillende proeftypen vergelijkbaar.

Uit het verloop van de volumieke rek tegen de tijd is geen betrouwbare c_v – waarde af te leiden. Dit heeft deels te maken met de moeilijkheid de verticale spanning te sturen. Enkele monsters zijn daarom geconsolideerd met dood gewicht. Zie Tabel 5-10.

monster	e_v	belasting
[-]	[-]	[-]
61C751 – 30 kPa	0.051	dood gewicht
61C756 – 100 kPa	0.224	dood gewicht
75B711 – 15 kPa	0.054	servo
75B716 – 30 kPa	0.084	servo
75B721 – 100 kPa	0.260	dood gewicht
75B726 – 15 kPa	0.030	dood gewicht

Tabel 5-10 Proefresultaten consolidatiefase**5.4.5 Resultaten; afschuiffase**

In Tabel 5-11 zijn de proefresultaten van de afschuiffase gepresenteerd.

Tabel 5-11 Proefresultaten constant volume DSS proeven

Monster	w	$(\tau_h/\sigma_v)_e$	C_u/s_v'	I_p^{*1}
[-]	[-]	[-]	[-]	[%]
61C751 – 30 kPa	1.75	0.71	0.42	109
61C756 – 100 kPa	1.24	0.69	0.30	97
75B711 – 15 kPa	1.77	0.85	0.53	101
75B716 – 30 kPa	1.94	0.86	0.42	98
75B721 – 100 kPa	1.14	0.64	0.30	109
75B726 – 15 kPa	1.60	0.89	0.79	97

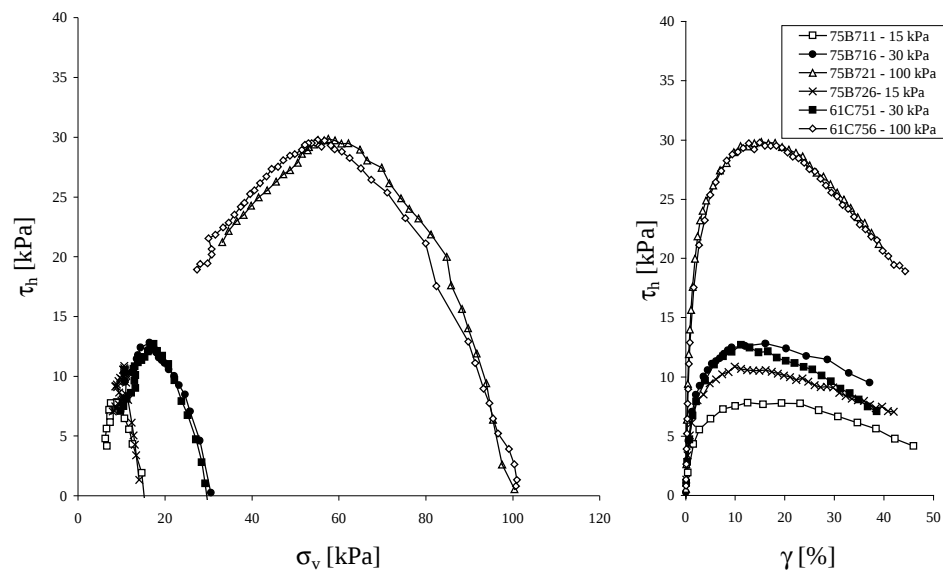
^{*1)} uit correlaties bepaald

waarin:

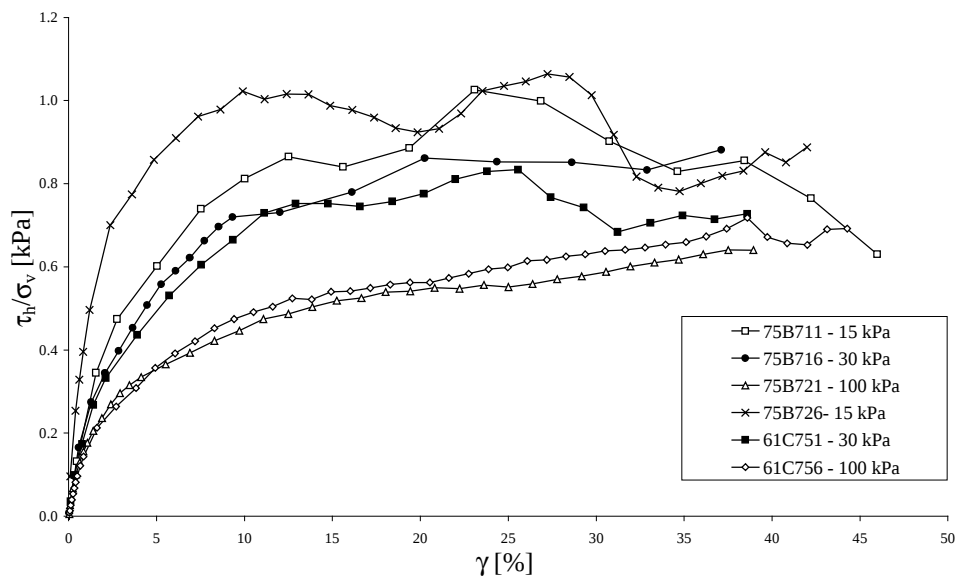
- w = gemiddeld watergehalte van het monster na de proef
- $(\tau_h/\sigma_v)_e$ = verhouding schuifspanning en verticale totaalspanning aan het einde van de proef
- C_u/s_v' = verhouding ongedraineerde schuifsterkte en effectieve verticale consolidatiespanning
- I_p = plasticiteitsindex

Verloop t_h - s_v' en g - t_h

In Figuur 5.20 zijn het τ_h - σ_v' diagram en het γ - τ_h diagram weergegeven. Uit de resultaten volgt dat de op te nemen schuifspanning in sterke mate wordt bepaald door de effectieve verticale consolidatiespanning. De vorm van de effectieve spanningspaden behorend bij de proeven uitgevoerd bij de lage consolidatiespanning, 15 kPa, is anders dan die behorend bij de hogere consolidatiespanningen, 30 kPa en 100 kPa. Dit wordt veroorzaakt door overconsolidatie. De grensspanningen waargenomen in de K_0 -CRS samendrukkingsproeven en triaxiaalproeven van monsters van gelijke diepte bedroegen respectievelijk 20.8 kPa en 28.7 kPa. Dit betekent dat de overconsolidatiegraad van de monsters, geconsolideerd bij 15 kPa, 1.4 tot 1.9 bedraagt.



Figuur 5.20 τ_h - σ_v diagram



Figuur 5.21 Verloop τ_h/σ_v met γ

In Figuur 5.21 is de verhouding τ_h/σ_v uitgezet tegen de rek. Gedurende de afschuiffase neemt de verticale spanning af; het monster heeft de neiging te compacteren. Door het handhaven van de constante hoogte neemt de verticale spanning af. Tijdens dit proces neemt de schuifspanning toe. Dit heeft tot gevolg dat de verhouding τ_h/σ_v toeneemt tot een eindwaarde $(\tau_h/\sigma_v)_e$. Zie Tabel 5-11. Naarmate de consolidatiespanning hoger is, neemt de maximale waarde van $(\tau_h/\sigma_v)_e$ af. Ook het verloop van de verhouding met de rek verloopt meer glooiend. Wellicht spelen invloeden vanuit het monster of membraan dan een kleinere rol.

Hoek van inwendige wrijving j°

Voor de bepaling van de hoek van inwendige wrijving, ϕ' , wordt uitgegaan van co-axiaal gedrag zonder dilatantie [Teunissen, 1991]. In dat geval is bij grote vervormingen σ_v' gelijk aan σ_h' en kan ϕ' worden bepaald met:

$$\sin j' = \tan \left(\frac{t_{h;2} - t_{h;1}}{s_{v;2} - s_{v;1}} \right)$$

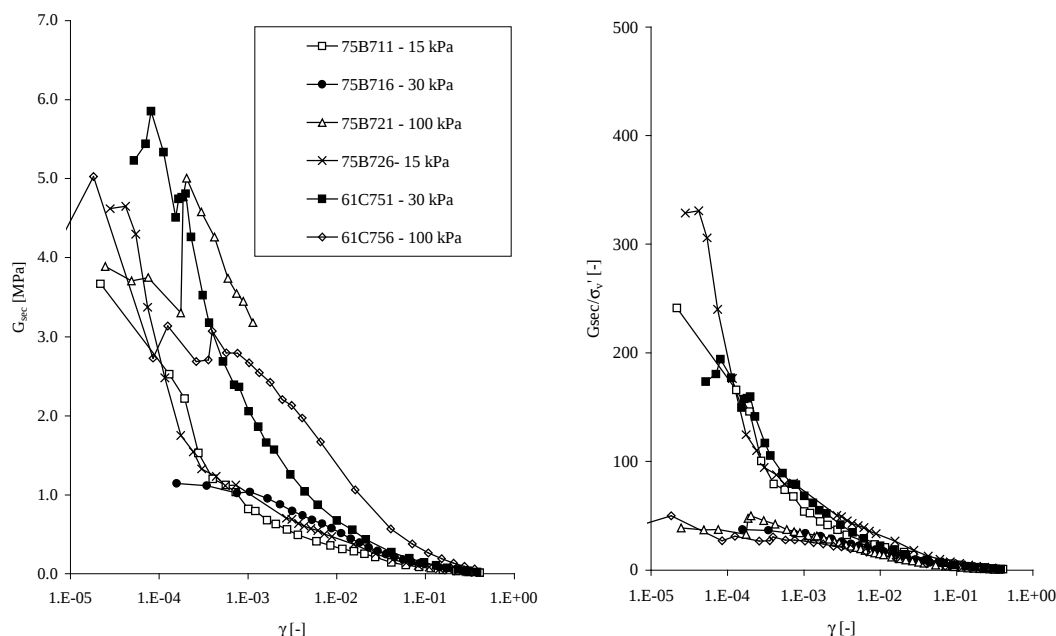
waarin:

ϕ'	=	hoek van inwendige wrijving	[°]
$\tau_{h,i}$	=	schuifspanning bij spanningsniveau i	[kPa]
$\sigma_{v,i}$	=	normaalspanning bij spanningsniveau i	[kPa]

De hoek van inwendige wrijving en cohesie zijn gelijk aan respectievelijk 37.3° en 1.8 kPa. Bij de bepaling zijn alleen de proefresultaten van de hogere spanningsniveaus (30 kPa en 100 kPa) gebruikt. Hier wordt benadrukt dat de keuze van interpretatiemethode sterk van invloed is op de waarde van ϕ' .

Secant stijfheid G_{sec}

Uit de het verloop van τ_h met γ kan de secant schuifmodulus (G_{sec}) worden bepaald uit $\gamma = G_{sec} \tau$. Zie Figuur 5.22. De spreiding tussen de gemeten stijfheden is groot. Opvallend is de geringe invloed van de consolidatiespanning op de gemeten stijfheid bij zeer kleine rekken ($10^{-5} - 10^{-4}$). Bij grotere rekken ($10^{-3} - 10^{-2}$) is er een duidelijk onderscheid afhankelijk van het spanningsniveau; naarmate het spanningsniveau toeneemt, neemt de stijfheid toe.



Figuur 5.22 Verloop G_{sec} - g en genormaliseerde stijfheid G_{sec}/s_v - g

Uitzondering hierop vormt proef 75B716. Bij grote rekken ($>10^{-2}$) wordt de invloed van het spanningsniveau steeds duidelijker. Ook de proefresultaten van proef 75B716 liggen nu nabij de proefresultaten van de andere 30 kPa proef.

De secant stijfheid uit de DSS proef kan mogelijk niet één op één worden vergeleken met de secant schuifmodulus uit triaxiaalproeven als gevolg van de invloed van anisotropie; de monsters worden op andere wijze belast. De bendermeting uit de triaxiaalproef hebben wel een soortgelijke vervormingstoestand maar geven een tangent schuifmodulus. Het is de verwachting dat bij zeer lage rekniveaus de secant modulus de tangent modulus benadert. Uit vergelijking van de metingen volgt dat de genormaliseerde tangent schuifmodulus uit de bendermetingen, respectievelijk 27 en 34, goed overeenkomen met de genormaliseerde secant schuifmodulus van de normaalgeconsolideerde DSS monsters. Deze vergelijking gaat niet op voor de overgeconsolideerde monsters (lagere spanningsniveaus). De bendermetingen geven een lagere genormaliseerde stijfheid. Mogelijk speelt de reksnelheid aan het einde van consolidatie hierbij een rol (kruipversteving) of zijn er invloeden van het membraan.

De stijfheid is genormaliseerd met de effectieve verticale consolidatiespanning. Zie Figuur 5.22. Het figuur laat zien dat de relatieve stijfheid van de monsters geconsolideerd bij 15 kPa ongeveer 6 maal hoger is dan de ratio volgend uit de 100 kPa proeven. Dit duidt op overconsolidatie. De 30 kPa proeven laten een wat ambivalent gedrag zien. Vanuit de triaxiaalproefresultaten wordt verwacht dat ook de monsters geconsolideerd bij 30 kPa niet normaalgeconsolideerd reageren en dus ook een grotere G_{sec}/σ_v verhouding hebben.

Genormaliseerde sterkteverhouding C_u/s_v'

De ongedraineerde schuifsterkte wordt bepaald door de maximale waarde van τ_h en kan worden genormaliseerd met effectieve verticale consolidatie spanning. Zie Tabel 5-11. De plasticiteitsindex van de monsters is geschat op basis van de eerder bepaalde correlaties. De resultaten van de naar verwachting normaalgeconsolideerde monsters ($\sigma_v' = 100$ kPa) zijn in Figuur 4.10 weergegeven. Hieruit blijkt dat de proefresultaten onder de Skempton relatie liggen.

5.4.6 Conclusies en bevindingen beproeving organische klei; direct simple shear proeven

Uit de resultaten van de serie constant volume direct simple shearproeven kan het volgende worden geconcludeerd:

- de variabiliteit van het initiële watergehalte en het volumiek gewicht van de monsters is groot. Dit wordt niet alleen veroorzaakt door de onnauwkeurigheid in de bepaling van het initiële volume van de DSS monsters maar ook door de natuurlijke variabiliteit van de monsters. Het geeft een consistent beeld met de bevindingen uit de classificatie-, index-, triaxiaal- en K_0 -CRS proeven op klei afkomstig van de Bergambacht site;
- de grote variatie in volumiek gewicht lijkt de ligging van de effectieve spanningspaden niet of nauwelijks te beïnvloeden;
- de duplo proeven laten onderling een grote variatie zien in, tijdens consolidatie, opgetreden volumieke rekken. Dit wordt vermoedelijk veroorzaakt door beddingfouten en monsterverstoring;
- bij een lage spanning van 15 kPa reageren monsters anders dan bij de hogere spanningen. Dit wordt toegewezen aan de overconsolidatie. Dit uit zich in kleine rekken bij herbelasten tot de terreinspanning en een steiler verloop van het ESP in het τ_h - σ_v' vlak. Dit betekent dat monsters onder in situ spanningscondities overgeconsolideerd reageren.
- de genormaliseerde ongedraineerde schuifsterkte, C_u/σ_v' , bedraagt ongeveer 0.35. Deze waarde ligt onder de Skempton relatie. De hoek van inwendige wrijving en cohesie bedragen respectievelijk 37.3° en 1.8 kPa;
- de gemeten secant stijfheid lijkt, bij zeer kleine rekken, niet sterk afhankelijk van het effectief verticaal spanningsniveau opgelegd tijdens consolidatie. Dit gaat niet op voor de secant stijfheid bij grotere rekken. Uit vergelijking van de genormaliseerde stijfheid volgt dat monsters geconsolideerd bij 15 kPa overgeconsolideerd reageren, de ratio is ongeveer 6 maal zo groot als de ratio gemeten in de 100 kPa proeven;
- de genormaliseerde tangent schuifmodulus uit bendermetingen uitgevoerd tijdens de triaxiaalproef en de genormaliseerde secant schuifmodulus bij zeer kleine rekken gemeten in de direct simple shearproef komen zeer goed overeen in geval van normaalgeconsolideerde monsters. Dit gaat vooralsnog niet op voor overgeconsolideerde monsters.

6 Conclusies

Dit hoofdstuk bevat de belangrijkste conclusies betreffende het constitutieve gedrag van organische klei.

Classificatie- en indextesten

De proefresultaten van de organische klei van de Bergambacht site liggen in een plasticity chart in het verlengde van de A-lijn. Organische materialen zouden volgens de literatuur juist beneden deze lijn moeten liggen. Dit verschil wordt mogelijk bepaald door dynamische effecten in het Casagrande apparaat. Wellicht is het valconus apparaat beter geschikt om de vloeigrens te bepalen.

De specifieke massa's van het organische- en minerale deel verschillen per lokatie. Daarom wordt aangeraden om voor een groot project proefverzamelingen aan te leggen. Hierbij moet het gloeiverlies een belangrijke rol spelen. Het gloeiverlies correleert sterk met de uitrolgrens, de vloeigrens en de specifieke massa. Voor speurwerk is meer informatie nodig. Per monster is kennis van het watergehalte, volumiek gewicht en de specifieke massa wenselijk.

De genormaliseerde sterkte van normaalgeconsolideerde organische klei is relatief laag in vergelijking met de bekende Skempton relatie. Deze relatie is niet bruikbaar voor deze kleisoort.

De onderzochte grondlaag laat een zeer grote variatie van de eigenschappen zien. Binnen een hoogteverschil van 10 cm kan het watergehalte 50% verschillen. Dit heeft consequenties voor het beproeven van grond in relatie tot monstergrootte. Deze variatie van de eigenschappen pleit voor verder onderzoek.

K₀ CRS proeven

De K₀ CRS proef heeft ondanks het geringe aantal proeven bijzonder veel informatie opgeleverd. Zo lieten de organische kleimonsters een hoge K₀ van rond de 0.4 zien. Dit was tegen de verwachting in gezien de vermoedelijk zeer hoge ϕ' waargenomen in triaxiaalproeven en de vaak gebruikte Jaky relatie: $K_0 = 1 - \sin \phi'$.

Triaxiaalproeven

Het belangrijkste resultaat uit de anisotroop geconsolideerde ongedraineerd afgeschoven triaxiaalmonsters is het bezwijken van monsters op de tension cut-off. Dit vlak in de spanningsruimte kan geassocieerd worden met een ϕ' van 90°. De sterke neiging tot opbouw van wateroverspanningen leidt ertoe dat er niet meer wordt voldaan aan ongedraineerd gedrag; het monster kan verder compacteren. Wellicht heeft organische klei de capaciteit om een behoorlijke trekspanning op te nemen (cohesie). Dit impliceert niet dat ϕ' gangbare waarden aan zal nemen.

Spanningsgeschiedenis en de mate van structuurontwikkeling heeft een grote rol gespeeld bij de ligging van het effectief spanningspad in de ongedraineerde fase. Na de opbouw van wateroverspanning en het bereiken van de tension cut-off trad bij overgeconsolideerde monsters versteviging op terwijl bij normaalgeconsolideerde monsters juist een afname van sterkte zichtbaar was. Het normaalgeconsolideerde gedrag lijkt normaliseerbaar. De genormaliseerde ongedraineerde schuifsterkte van normaalgeconsolideerde klei ligt onder de Skempton relatie.

De waargenomen K₀ in triaxiaal- en K₀ CRS proeven is ongeveer gelijk. Gereconstitueerde monsters bezitten een hogere K₀ als het natuurlijk materiaal.

Direct Simple Shearproeven

In deze proef zijn uit de resultaten van de normaalgeconsolideerde monsters de hoek van inwendige wrijving en de cohesie bepaald en bedragen respectievelijk 37.3° en 1.8 kPa. De genormaliseerde ongedraineerde schuifsterkte van normaal geconsolideerde monsters ligt evenals de triaxiaalproefresultaten onder de Skempton relatie. De spanningsgeschiedenis en structuurontwikkeling van de natuurlijke monsters zorgen ervoor dat monsters relatief sterk en stijf zijn. Dit is consistent met eerdere bevindingen.

De organische klei zoals beproefd komt voor in grote delen van het land, nabij waterkeringen. Om de betrouwbaarheid van waterkeringen beter te kunnen inschatten is dus zaak het gedrag van de kleisoorten goed af te tasten. Dit onderzoek vormt slechts het begin.

Referenties

BSI, BS 1377 (1975). "Methods of test for soil for civil engineering purposes".

Duncan, J.M., Seed, H.B. (1967) "Corrections for strength test data", Journal of the soil mechanics and foundation division, pp.121-137

Greeuw, G., Adel, H. den, Schapers, A.L., Haan, E.J. den. (2000) "Reduction of axial resistance due to membrane and side drains in the triaxial test", ASCE Geotechnical Special Publication No.112, ed. Hanson, J.L., Termaat, R.J., pp.30-42.

Greeuw, G. (1999) "Benderelementen in de GDS-opstelling", CO-378510/57.

Haan, E.J. den (1995). "Theme report on Special Problem Soils and Soft rocks, Part I Peats and organic soils", XI ECSMFE Kopenhagen, 9:139-156.

Haan, E.J. den (1995). "Veen (en organische klei), een grondmechanisch probleem", KIVI open sprekersdag 20 juni 1995.

Head, K.H. "manual of soil laboratory testing", vol. 1, Pentech Press, London, sec.ed., 1992.

Larsson, R, Farrell, E, Foged, N. "Laboratory method for determination of undrained shear strength: Fall-cone test", document number ETC5-E1.97, 1998.

Leroueil, S.,Kabbaj, M., Tavenas, F. (1988). "Study of the validity of a σ'_v - ϵ_v - ϵ_a model in situ conditions", Soils and foundations, Vol. 28, No.3, pp. 13-25.

Lo Presti, D.C.F., Pallara, O., Jamiolkowski, M., Cavallaro, A (1999). "Anisotropy of small strain stiffness of undisturbed and reconstituted clays", proc. IS Torino, vol.1, Torino, pp.3-10.

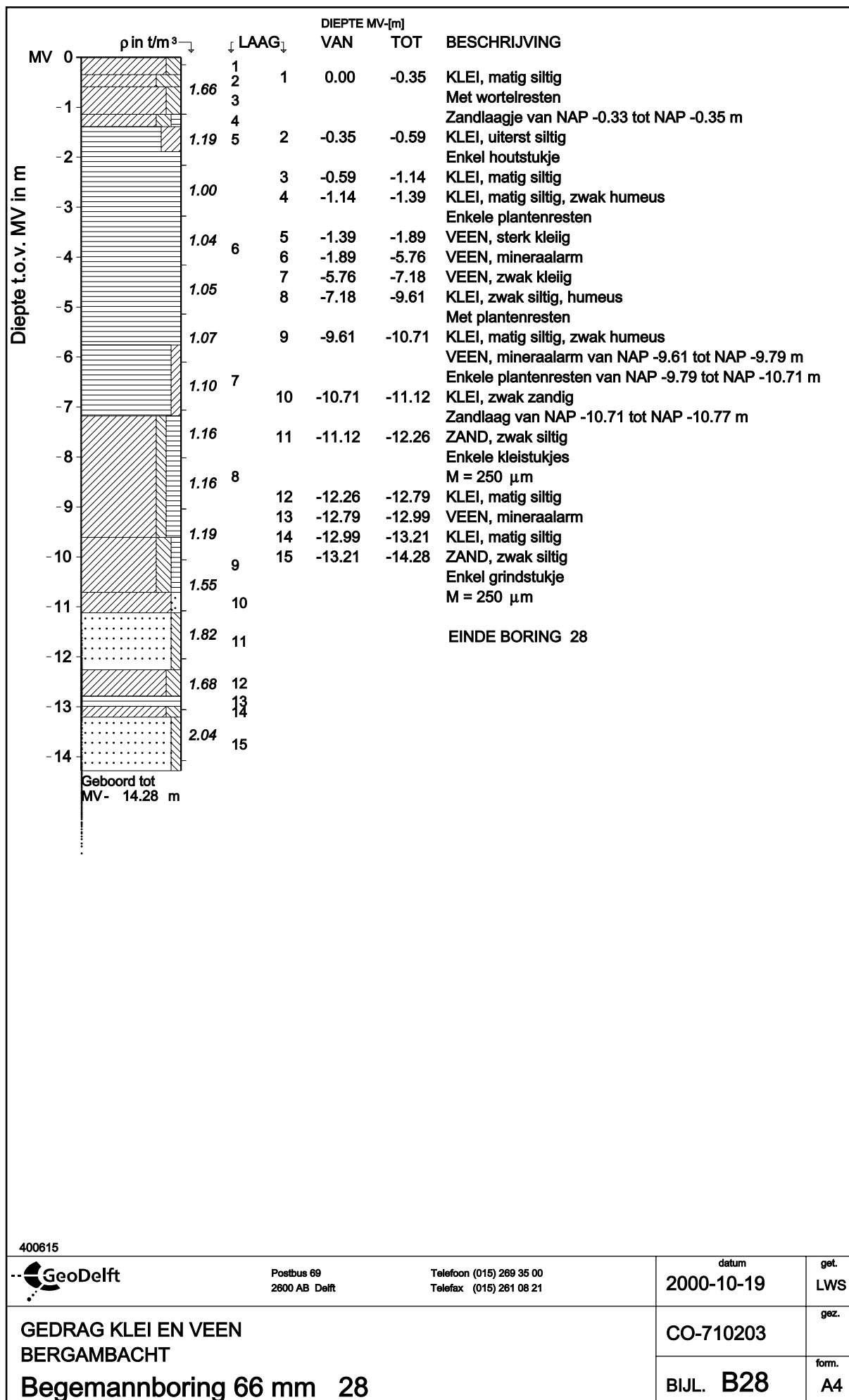
Skempton, A.W., Petley, D.J. (1970). "Ignition loss and other properties of peats and clays from avonmouth, king's lynn and cranberry moss", Géotechnique 20, No. 4., pp. 343-356.

Teunissen, J.A.M. (1991) "Analysis of plasticity and non-coaxiality in geomaterials", PhD thesis Delft University of Technology.

Tigchelaar, J., Feijter, J.W., Haan, E.J. den. (2000) "Shear tests on reconstituted Oostvaardersplassen clay", ASCE Geotechnical Special Publication No.112, ed. Hanson, J.L., Termaat, R.J., pp.67-81.

BIJLAGEN

Bijlage 1 Boorbeschrijvingen B28, B31 en B35



400615



Postbus 69
2600 AB Delft

Telefoon (015) 269 35 00
Telefax (015) 261 08 21

datum
2000-10-19

get.
LWS

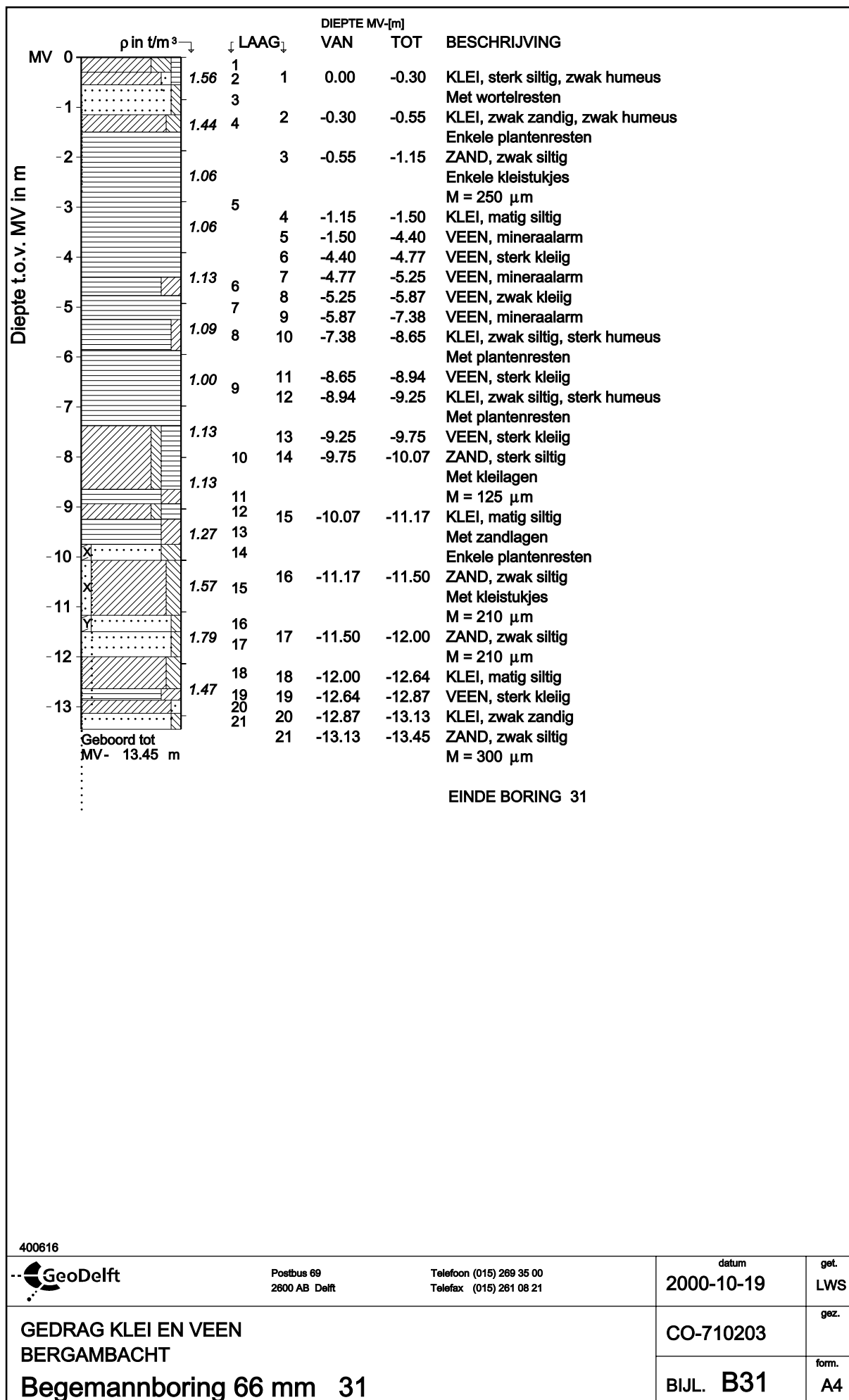
GEDRAG KLEI EN VEEN
BERGAMBACHT

gez.
CO-710203

Begemannboring 66 mm 28

form.
BIJL. B28

form.
A4



400616



Postbus 69
2600 AB Delft

Telefoon (015) 269 35 00
Telefax (015) 261 08 21

datum
2000-10-19

get.
LWS

GEDRAG KLEI EN VEEN
BERGAMBACHT

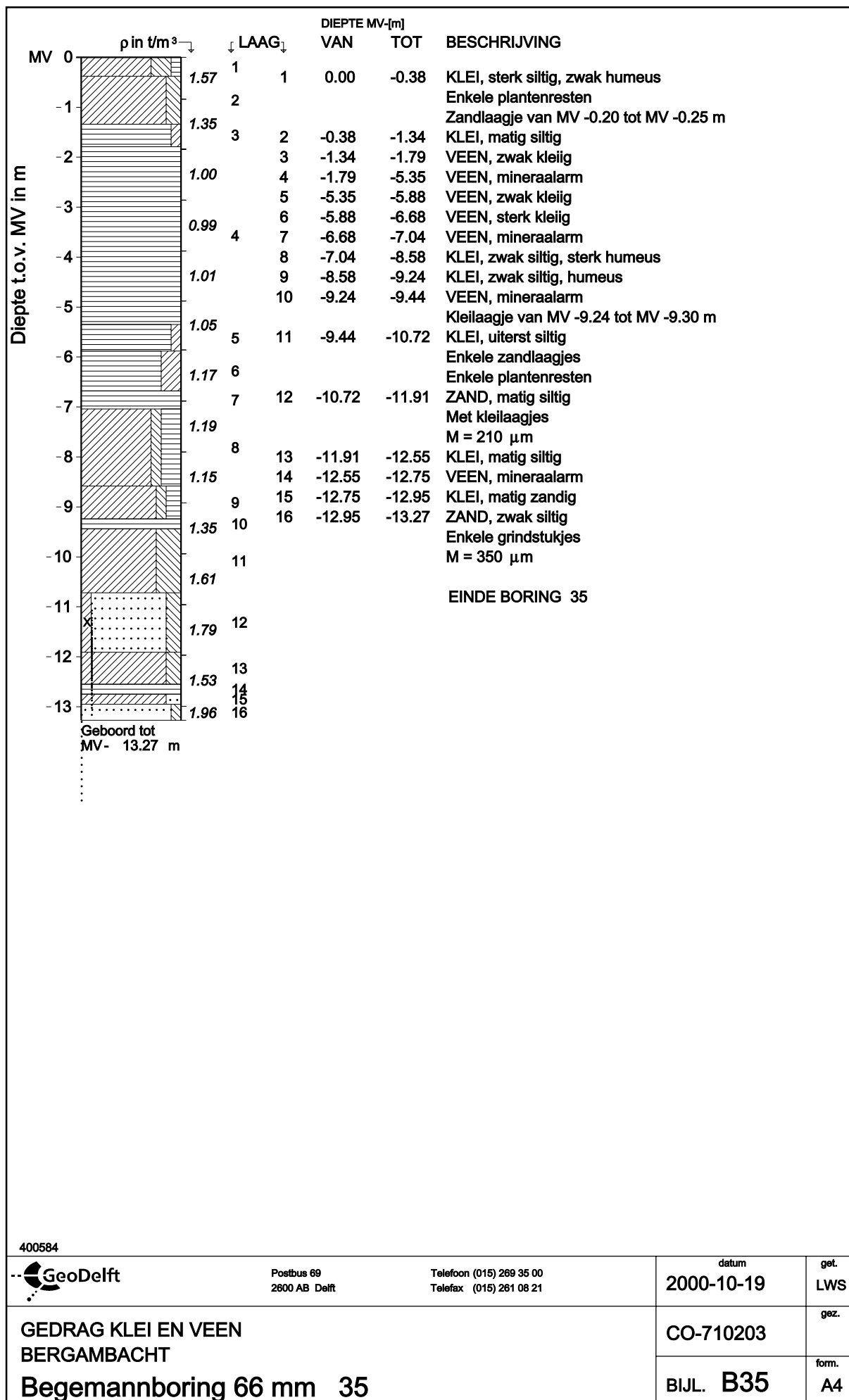
CO-710203

gez.

Begemannboring 66 mm 31

BIJL. B31

form.
A4



400584



Postbus 69
2600 AB Delft

Telefoon (015) 269 35 00
Telefax (015) 261 08 21

datum
2000-10-19

get.
LWS

GEDRAG KLEI EN VEEN
BERGAMBACHT

CO-710203

gez.

Begemannboring 66 mm 35

BIJL. B35

form.
A4

**Gedrag van organische klei
lokatie Oostvaardersplassen**

**CO 710203/26
November 2001**

Gedrag van organische klei
lokatie Oostvaardersplassen
DC Gedrag van klei en veen

CO-710203/26
November 2001

Opgesteld in opdracht van:
Dienst Weg- en waterbouwkunde
Van der Burghweg 1
2600 GA Delft

AFDELING Verkenning
Projectleider : ir. J.Tigchelaar
Projectbegeleider: dr.ir. E.J. den Haan

GRONDMECHANICA DELFT
Stieltjesweg 2, 2628 CK DELFT
Postbus 69, 2600 AB DELFT

Telefoon (015) 269 35 00
Telefax (015) 261 08 21
Postbank 234342
Bank MeesPierson NV
Rek.nr. 25.92.35.911

rapportnr: CO-710203/26		datum rapport: November 2001			
titel en subtitel: Gedrag van organische klei lokatie Oostvaardersplassen DC Gedrag van klei en veen		behandelende afdeling: Verkenning			
		projectnaam: Gedrag van klei en veen			
projectleider(s): ir. J.Tigchelaar		projectbegeleider(s): dr.ir. E.J. den Haan			
naam en adres opdrachtgever: Dienst Weg- en waterbouwkunde Van der Burghweg 1 2600 GA Delft		referentie opdrachtgever: DWW-1753			
		verzenden in:			
		type rapport: onderzoek			
samenvatting rapport: Binnen het DC project Gedrag van klei en veen is onderzoek verricht naar het constitutieve gedrag van organische klei afkomstig uit het Oostvaardersplassengebied. Het experimentele onderzoek omvatte classificatie-, index-, K_0 -CRS -, triaxiaal- en direct simple shearproeven. Uit het onderzoek blijkt dat de klei niet voldoet aan de tekstboekverwachtingen. De organische klei laat een aanzienlijke variatie van eigenschappen zien. Op een diepteverschil van 10cm kan het watergehalte 25% verschillen. De specifieke massa's van het organische- en minerale deel verschillen per onderzoekslokatie. Daarom wordt aangeraden om voor een groot project proefverzamelingen aan te leggen. Hierbij moet het gloeiverlies een belangrijke rol spelen. Het gloeiverlies correleert sterk met de uitrolgrens, de vloeigrens en de specifieke massa. Voor speurwerk gaat dit nog een stap verder. Per monster is kennis van het watergehalte, volumiek gewicht en de specifieke massa wenselijk. Ook is de waargenomen K_0 van natuurlijke klei, tegen de verwachting in, relatief hoog: 0.34-0.50. Om de K_0 te schatten wordt vaak de Jaky relatie gebruikt: $K_0=1-\sin\phi'$. De triaxiaalproefresultaten geven aan dat ϕ' wel eens zeer hoog zou kunnen zijn en gaat dus de Jaky relatie niet op. Gereconstitueerde monsters bezitten een hogere K_0 dan het natuurlijk materiaal. Het meest in het oog springend proefresultaat van de uitgevoerde ongedraineerde triaxiaalproeven is het bezwijken van monsters op of nabij de tension cut-off; het vlak in de spanningsruimte dat trek- en drukspanningen scheidt. Dit vlak kan geassocieerd worden met een ϕ' van 90°. Dit impliceert niet dat ϕ' gelijk is aan 90°. Wellicht is het mogelijk dat de organische klei de capaciteit heeft om trekspanningen op te nemen (cohesie). In dat geval is ϕ' lager. Naar verwachting blijft ϕ' relatief hoog. De ϕ' waargenomen in de direct simple shearproeven heeft een veel lagere waarde maar deze ϕ' zal afhankelijk zijn van de wijze van interpretatie. In vergelijking met natuurlijk materiaal laten in de triaxiaalopstelling beproefde gereconstitueerde monsters een kleinere sterkte en stijfheid zien bij gelijke consolidatiespanning. Dit wordt toegeschreven aan structuur en spanningsgeschiedenis van de natuurlijke monsters. De normaalgeconsolideerde natuurlijke monsters laten dezelfde mate van waterspanningsopbouw zien tijdens de ongedraineerde afschuif fase als een normaal geconsolideerd gereconstitueerd monster. Dit geldt ook voor de genormaliseerde ongedraineerde schuifsterkte en stijfheid. Blijkbaar heeft het normaalgeconsolideerde natuurlijke monster zijn structuur verloren. De organische klei, zoals beproefd, komt voor in grote delen van het land, nabij waterkeringen. Om de betrouwbaarheid van waterkeringen beter te kunnen inschatten is het dus zaak het gedrag van de kleisoorten goed af te tasten. Dit onderzoek vormt slechts het begin.					
opmerkingen:					
trefwoorden: organische klei, lage spanningen, sterkte, classificatieproeven, indexproeven, variabiliteit, K_0 -CRS proef, triaxiaalproef, direct simple shearproef, structuur.		verspreiding: ir. H.L.Bakker (RWS-DWW), drs. A.Bizzarri (RWS-DWW), prof. dr.ir. A. Verruijt (TUD), dr.ir. E.J. den Haan (GeoDelft), ir. J.W. de Feijter (GeoDelft), dr.ir. M.A. Van (GeoDelft), ir.J.Tigchelaar (GeoDelft).			
opgeslagen op: onder titel:				aantal blz.: 76	
versie:	datum:	opgesteld door:	paraaf:	Gecontroleerd door:	paraaf:
	november 2001	ir. J.Tigchelaar		dr.ir. E.J. den Haan	

INHOUDSOPGAVE

Samenvatting	5
1 Inleiding	6
2 Grondonderzoek en monsterneming	7
2.1 Monsterneming	7
2.2 Korte toelichting gebruikte 'boor'systemen	7
2.3 Monsterverwerking en –opslag	8
2.4 Monsterkwaliteit en -keuze	9
3 Grondopbouw en geologie Oostvaardersplassen	10
3.1 Grondopbouw	10
3.2 Geologische geschiedenis Oostvaardersplassen	10
3.3 Bodemkundige informatie	11
4 Classificatie – en indextesten	12
4.1 Gevolgde procedure	12
4.2 Watergehalte	12
4.3 Atterbergse grenzen	13
4.4 Consistentie van de grond	13
4.5 Soortelijke massa	14
4.6 Kalkgehalte en gloeiverlies	14
4.7 Ongedraineerde schuifsterkte	14
4.8 Resultaten van classificatie- en index testen	15
4.9 Correlaties	17
4.10 Variabiliteit grondeigenschappen	24
4.11 Indicatie effectief verticaal spanningsniveau	26
4.12 Conclusies en bevindingen classificatie – en indextesten	27
5 Proefprogramma constitutief gedrag organische klei	28
5.1 Inleiding	28
5.2 K_0 CRS proeven	29
5.3 Triaxiaalproeven	38
5.4 Direct Simple Shear proeven	58
6 Conclusies en bevindingen	66

Samenvatting

Binnen het DC project Gedrag van klei en veen is onderzoek verricht naar het constitutieve gedrag van organische klei afkomstig uit het Oostvaardersplassengebied. Het experimentele onderzoek omvatte classificatie-, index-, K_0 -CRS -, triaxiaal- en direct simple shearproeven.

Uit het onderzoek blijkt dat de klei niet voldoet aan de tekstboekverwachtingen. De organische klei laat een aanzienlijke variatie van eigenschappen zien. Op een diepteverschil van 10cm kan het watergehalte 25% verschillen.

De specifieke massa's van het organische- en minerale deel verschillen per onderzoekslokatie. Daarom wordt aangeraden om voor een groot project proefverzamelingen aan te leggen. Hierbij moet het gloeiverlies een belangrijke rol spelen. Het gloeiverlies correleert sterk met de uitrolgrens, de vloeigrens en de specifieke massa. Voor speurwerk gaat dit nog een stap verder. Per monster is kennis van het watergehalte, volumiek gewicht en de specifieke massa wenselijk.

Ook is de waargenomen K_0 van natuurlijke klei, tegen de verwachting in, relatief hoog: 0.34-0.50. Om de K_0 te schatten wordt vaak de Jâky relatie gebruikt: $K_0=1-\sin\phi'$. De triaxiaalproefresultaten geven aan dat ϕ' wel eens zeer hoog zou kunnen zijn en gaat dus de Jâky relatie niet op. Gereconstitueerde monsters bezitten een hogere K_0 dan het natuurlijk materiaal.

Het meest in het oog springend proefresultaat van de uitgevoerde ongedraineerde triaxiaalproeven is het bezwijken van monsters op of nabij de tension cut-off; het vlak in de spanningsruimte dat trek- en drukspanningen scheidt. Dit vlak kan geassocieerd worden met een ϕ' van 90° . Dit impliceert niet dat ϕ' gelijk is aan 90° . Wellicht is het mogelijk dat de organische klei de capaciteit heeft om trekspanningen op te nemen (cohesie). In dat geval is ϕ' lager. Naar verwachting blijft ϕ' relatief hoog. De ϕ' waargenomen in de direct simple shearproeven heeft een veel lagere waarde maar deze ϕ' zal afhankelijk zijn van de wijze van interpretatie.

In vergelijking met natuurlijk materiaal laten in de triaxiaalopstelling beproefde gereconstitueerde monsters een kleinere sterkte en stijfheid zien bij gelijke consolidatiespanning. Dit wordt toegeschreven aan structuur en spanningsgeschiedenis van de natuurlijke monsters. De normaalgeconsolideerde natuurlijke monsters laten dezelfde mate van waterspanningsopbouw zien tijdens de ongedraineerde afschuiffase als een normaal geconsolideerd gereconstitueerd monster. Dit geldt ook voor de genormaliseerde ongedraineerde schuifsterkte en stijfheid. Blijkbaar heeft het normaalgeconsolideerde natuurlijke monster zijn structuur verloren.

De organische klei, zoals beproefd, komt voor in grote delen van het land, nabij waterkeringen. Om de betrouwbaarheid van waterkeringen beter te kunnen inschatten is het dus zaak het gedrag van de kleisoorten goed af te tasten. Dit onderzoek vormt slechts het begin.

1 Inleiding

In het Delft Cluster project Gedrag van klei en veen, onderdeel van het basisproject Materiaal- en Ontwerpmoedellen, thema 1 Grond en constructie, wordt onderzoek verricht naar het mechanisch gedrag van klei en veen. Binnen het project zijn een aantal subprojecten gedefinieerd. Eén daarvan is het lage spanningsonderzoek, voorheen ondergebracht in een VOP project: “Fundamenteel gedrag van de ondergrond”. In het lage spanningsonderzoek wordt het mechanisch gedrag van organische kleisoorten bij lage axiaal symmetrische effectieve spanningsniveaus (15 – 40 kPa) bestudeerd. Een tweede subproject betreft het monsterverstoringsonderzoek. Hierin wordt onderzoek verricht naar de invloed van de monsternemingstechniek op de kwaliteit van de organische kleimonsters.

De kennis van het mechanisch gedrag van Nederlandse organische kleisoorten is beperkt. In het verleden zijn enkele onderzoeken uitgevoerd zoals bijvoorbeeld een grote serie classificatie-, index- en samendrukkingsproeven op klei en veen uit een gedeelte van het betuwelijnproject en uit polder Zegveld nabij Woerden [den Haan, 1995a, 1995b]. Kennisleemte van organische klei betreft met name de sterkte van klei met een volumiek gewicht van ongeveer 12.5 kN/m³. De sterkte kan worden uitgedrukt in bijvoorbeeld de ongedraineerde schuifsterkte of, gebruik makend van effectieve parameters, van de hoek van inwendige wrijving ϕ' en de cohesie c' . In het verleden zijn regelmatig zeer hoge waarden van ϕ' waargenomen [den Haan, 1999].

Ook ontbreekt kennis van verstoring van plastische Nederlandse kleisoorten door en het gebruik van verschillende monsternemingsmethoden. Uit de literatuur is bekend dat plastische kleisoorten minder goed te verstoren zijn. Binnen het project Gedrag van klei en veen is hier aandacht aan geschonken en is een eerste begin gemaakt met het in kaart brengen van mogelijke invloeden. De resultaten van het monsterverstoringsonderzoek zijn separaat beschreven [den Haan, 2001].

Voor beide subprojecten zijn organische kleimonsters verzameld in het Oostvaardersplassengebied, gemeente Lelystad, nabij de gemeentegrens met Almere-buiten. Voor het monsterverstoringsonderzoek heeft monsterneming met drie verschillende steektechnieken plaatsgevonden: met het Ackermann -, Begemann ϕ 66mm – en Laval steekapparaat. Deze laatste steektechniek is ingezet als onderdeel van een samenwerkingsverband met het Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) uit Parijs.

Dit rapport beschrijft de resultaten van een serie proeven op organische klei voor het lage spanningsonderzoek. Voor deze serie is de K_0 - CRS -, een state-of-the-art triaxiaal- en een direct simple shear opstelling ingezet. Ook zijn er vele index - en classificatieproeven uitgevoerd. Een eerste serie proeven op organische klei van de site nabij Bergambacht (Proefproject actuele sterkte) is separaat beschreven [Tigchelaar, 2001].

Na een beschrijving van het uitgevoerde grondonderzoek en de monsterneming in hoofdstuk 2 wordt in hoofdstuk 3 de grondopbouw en geologie behandeld. In hoofdstuk 4 zijn de resultaten gepresenteerd van de vele index - en classificatie proeven. Hoofdstuk 5 behandelt de resultaten van de K_0 -oedometer CRS, triaxiaal- en constant volume direct simple shearproeven als onderdeel van het proefprogramma constitutief gedrag van organische klei.

2 Grondonderzoek en monsterneming

2.1 Monsterneming

Al in 1991 heeft GeoDelft samen met Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, gewerkt met klei uit het Oostvaardersplassengebied. Destijds zou een full scale bezwijkproef van een ophoging worden uitgevoerd. Dit bezwijken zou ook in de centrifuge worden gemodelleerd. Voor dit eerste onderzoek zijn enkele sonderingen en een Begemann boring $\varnothing 66$ mm uitgevoerd. Na dit grondonderzoek volgde in 1993 een tweede grondonderzoek bestaande uit enkele gestoken Delftse bussen (Ackermann steekapparaat) op een diepte van MV-1.2 m tot MV-1.6 m. Vervolgens zijn 8 containers (1 m^3) met organische klei (MV-1.2 m tot MV-2.5 m) gevuld, getransporteerd en verwerkt tot kleibroden. Op deze licht organische, sterk siltige, klei zijn inmiddels vele onderzoeksprogramma's uitgevoerd [Bizzarri, 1998], [CUR B76, 1999], [Tigchelaar, 2000]. De full scale bezwijkproef is later niet uitgevoerd.

Uit de verschillende proeven bleek dat het gedrag van deze klei representatief is voor het gedrag van de Nederlandse plastische kleisoorten. Met nadruk wordt erop gewezen dat het gaat om licht organische klei met een volumiek gewicht van 14 kN/m^3 . Achteraf blijkt dat kleimonsters met een hoger organisch gehalte ($\gamma_n = 12 \text{ kN/m}^3$), ook van dezelfde site, afwijkend gedrag vertonen.

Bij het zoeken naar een geschikte lokatie in het gebied is gelet op uniforme (maagdelijke) spanningscondities. Vervolgens is met een gutsboor de ondergrond verkend en is voor deze site een boorplan opgesteld. Centraal in dit boorplan staat een sondering met dissipatietesten. De afstanden tussen de boringen zijn zodanig groot gekozen dat naar verwachting de aanwezigheid van de boorgaten de kwaliteit van de grond niet zal beïnvloeden. Uit de gutsboring bleek dat de grondopbouw zeer sterke overeenkomsten had met de grondopbouw op de oude monsternemingslokatie. Het enige verschil betrof de afwezigheid van mineraal arm veen op een diepte van MV-2.55m tot MV-3.00m. Op de nieuwe lokatie werd een zeer humeuze kleilaag aangetroffen.

De beheerder van het gebied, Staatsbosbeheer, gaf eenmalig toestemming om nabij de oude lokatie monsters te verzamelen. De afstand tussen de oude – en nieuwe lokatie bedroeg ongeveer 50 m. Zie bijlage 2-1. Het grondonderzoek heeft bestaan uit:

- 1 gutsboring;
- 1 sondering met dissipatietesten op 2 dieptes;
- 3 continu boringen met het Begemann $\varnothing 66$ mm steekapparaat;
- 2 continu boringen met Delftse bussen (Ackermann steekapparaat);
- 7 continu boringen met de Lavalmethode;

Ook zijn, voor toekomstige grootschalige onderzoeken, een aantal vaten gevuld met klei (MV-1.8 tot MV-2.3 m) en grondwater. Met deze klei is bijvoorbeeld een kleibrood aangemaakt voor het ringonderzoek samendrukkingsproef.

2.2 Korte toelichting gebruikte 'boor'systemen

Begemann $\varnothing 66$ mm steekapparaat

Het Begemann steekapparaat wordt vanuit een boorvoertuig weggedrukt met een boorbuis. De belangrijkste onderdelen van het steekapparaat zijn de steekmond, de koushouder en een PVC liner. Tijdens het steken beweegt het steekapparaat om het monster. Tegelijkertijd rolt de kous, die opgestroopt is aangebracht op de koushouder, om het monster. Monster en kous worden omsloten door een PVC liner. Tussen de kous en de PVC liner zorgt een spoeling voor goede smering en het

ondersteunen van het monster. Op de gewenste diepte wordt de boorbuis opgehaald en treedt een mechanisme in werking waarmee de laatste PVC liner, de afsluiterbuis, ter plaatse van een verjonging wordt afgeklemd. Het monster en de liners volgen nu de boorbuis en het lange monster kan in delen van 1m worden gesplitst. Na het steken wordt het monster met kous en spoeling in de PVC liner vervoerd.

In verband met de lage dichtheden van de grond ter plaatse van de monsternemingslokatie, is een relatief lichte boorspoeling gebruikt van 1.05 t/m^3 .

Delftse bussen (Ackermann steekapparaat)

Voorafgaand aan het steken wordt met een Edelmanboor voorgeboord tot een diepte van, in dit geval, 0.9m. Vervolgens wordt een casing aan het rupsvoertuig bevestigd. Deze casing wordt op de gewenste diepte gebracht door middel van het wegpulsen van de grond. Hierna wordt de puls verwijderd en wordt het steekapparaat ingehangen. Dit steekapparaat bestaat uit een RVS steekbus ($\varnothing 67\text{mm}$, hoogte 440mm, dikte 0.8mm) en een steekbushouder met valgewicht en ventiel (stalen bal). Met dit valgewicht wordt de bus op diepte geslagen. Per bus wordt normaliter 30cm gestoken. Hierna wordt het steekapparaat getrokken waarbij wordt aangenomen dat het ventiel sluit (dit is de stalen bal die door eigengewicht een opening afsluit) en dat de grond ter hoogte van de snijrand bezwijkt. Na het ophalen van het steekapparaat wordt met de puls de casing op een nieuwe diepte gebracht.

Laval methode

De 'boor' stelling bestaat uit een vrachtauto met makelaar. Op deze makelaar is een aandrijfunit bevestigd. Hiermee kan een boorstang worden geroteerd en/of verplaatst. Met een avegaar wordt het boorgat gemaakt tot de gewenste diepte. Vervolgens wordt de avegaar verwijderd en wordt het steekapparaat ingehangen. Dit steekapparaat bestaat uit een dunwandige steekbus ($\varnothing 20\text{cm}$, 66cm, dikte enige mm's) hoog opgehangen in een boorbuis met snijtanden. De boorbuis en de steekbus kunnen onafhankelijk van elkaar bewegen doordat de steekbus middels een steekbushouder is verbonden met een stang in de boorbuis. Aan beide boorstangen kan op maaiveldniveau worden gedraaid zodat de steekbushouder in de boorbuis kan worden opgehangen of een ventielconstructie in de steekbushouder kan worden bediend. Op diepte wordt het monster gestoken door de binnenste stang weg te drukken. Hierna wordt het ventiel in de steekbushouder gesloten en wordt de boorbuis al draaiend op diepte gebracht zodat de grond om het gestoken monster wordt weggegraven. Hierbij kan spoeling worden gebruikt. Het gesloten ventiel zorgt ervoor dat het monster in de steekbus gefixeerd is. Na het boren van de boorbuis wordt de steekbus, incl. monster, gedraaid en getrokken zodat het monster nabij de snijrand afschuift. De gevulde steekbus en steekbushouder worden vervolgens in de boorbuis opgehangen waarna het steekapparaat kan worden bovengehaald. Met het inbrengen van de avegaar begint het proces opnieuw.

Omdat het Oostvaardersplassengebied een natuurgebied betreft is ervoor gekozen geen chemische boorspoeling te gebruiken.

2.3 Monsterverwerking en –opslag

Begemann monsters

Na monsterneming zijn de Begemann boringen direct naar het laboratorium gebracht alwaar ze direct zijn verwerkt. De circa 1 meter lange monsters zijn voorzichtig uit de liners gehaald waarna de kous is verwijderd. Na het uitleggen zijn de grondsoorten beschreven en zijn de monsters gefotografeerd. Vervolgens zijn de monsters opgedeeld in kleinere monsters met een lengte van 20 cm. Deze monsters zijn in plastic folie gewikkeld en in PVC buizen opgeslagen in een temperatuur gecontroleerde (11°C) zeer vochtige (relatieve vochtigheid $>90\%$) opslag tot het moment van beproeving.

Delftse bussen

Ook de Delftse bussen zijn direct na het steken getransporteerd naar GeoDelft alwaar ze in dezelfde temperatuurgecontroleerde zeer vochtige kamer zijn opgeslagen.

Laval monsters

Onderdeel van het Lavalsteekproces is het opdelen van een gestoken Laval monster (ø20 cm, 50 cm hoog) in tweeën. Hiervoor is een speciale tool ontwikkeld waarmee op de boorlocatie de steekbus kan worden leeggedrukt. Na het doorsnijden van het monster (loodrecht op de lengte as) wordt de helft van het monster op een met was en folie bedekte houten plank geschoven. Hierna wordt het monster met een aantal was- en folielagen bedekt. Tijdens dit bedekken wordt ervoor gezorgd dat luchtinsluitingen niet mogelijk zijn. De monsters zijn in speciale kratten vervoerd naar GeoDelft.

2.4 Monsterkwaliteit en -keuze

Voor de in dit rapport gepresenteerde proefresultaten van classificatie- en indextesten is gebruik gemaakt van Begemann boring B1. Dit is kwalitatief de minst goede boring als gevolg van het niet sluiten van het afsluitermechanisme. Hierdoor zal het monster zijn verstoord. Monsterverstoring leidt tot een verandering van structuur waardoor bijvoorbeeld de stijfheid en de ligging van de grensspanning kunnen veranderen. Ook kan monsterverstoring de in het monster aanwezige zuigspanning beïnvloeden. De mogelijke verstoring is voor het doen van index- en classificatieproeven geen bezwaar omdat bij deze proefjes monsters worden verkneet en hun structuur hierbij volledig verliezen. Wellicht dat de resultaten van de torvane - en valconus testen hierdoor worden beïnvloed. De kwalitatief goede Begemann boringen zijn gebruikt voor de K_0 CRS-, triaxiaal-, en direct simple shearproeven.

Voor het monsternamen- en – verstoringsonderzoek zijn monsters verkregen met de verschillende steektechnieken gebruikt. Voornamelijk van een diepte MV-1.6m tot MV-2.4m.

Niet alle Lavalboringen zijn in het bezit van GeoDelft. Alleen de boringen L1, L3 en L7 kunnen worden gebruikt voor onderzoek. De overige boringen zijn in het bezit van het Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC).

3 Grondopbouw en geologie Oostvaardersplassen

3.1 Grondopbouw

De grondopbouw op de lokatie is in Tabel 3-1 geschematiseerd weergegeven. Deze resultaten zijn gebaseerd op de Begemann boringen B1, B2 en B3 en informatie uit de literatuur. De boorlokatie en de boorbeschrijvingen zijn ingevoegd als respectievelijk bijlage 2-1 en 2-2. In Tabel 3-1 is ook de geologische- en geotechnische indeling van de voorkomende grondlagen gepresenteerd.

van	tot					jaren voor en na Christus		
0	0.9	klei, matig tot sterk siltig met schelpresten	Holoceen	Duinkerke	IJsselmeer-/Zuiderzee afzetting		nu	1600
0.9	1.6	klei, zwak siltig, zwak humeus			Almere afzetting (sloef)	Al ^p	1600	-
1.6	2.0	klei, zwak siltig, humeus				Al ^{c1}	-	-
2.0	3.0	klei, zwak siltig, sterk humeus				Al ^{c2+3}	-	0
3.0	3.6	sterk humeuze kleilagen (detritus gyttja)			Flevomeer afzetting		0	1200
3.6	5.8	veen- en kleilagen			wadafzetting onderwaterkleien en veenlagen	1200	8000	
5.8	-	Zand	Pleistoceen		Weichselien	8000	-	

Tabel 3-1 Geschematiseerde grondopbouw onderzoekslokatie Oostvaardersplassen

De maaiveldligging ten opzichte van NAP is niet afzonderlijk bepaald. Het freatisch vlak lag ten tijde van monsterneming tussen MV-0.85m en MV-1.0m. Dit was gelijk aan het niveau in de nabijgelegen sloot. Zie bijlage 2-1. Bij het graven van de klei is een sterke scheurvorming tot een diepte van MV-1.3m waargenomen. Deze scheuren stonden waarschijnlijk in verbinding met de nabijgelegen sloot.

In het lage spanningsonderzoek is klei afkomstig van een diepte MV-2m tot MV-3m onderzocht. Deze klei behoort tot de eerste fase van de Almere afzettingen (geologisch aangeduid door Al^{c2+3}).

3.2 Geologische geschiedenis Oostvaardersplassen

Aan het einde van de laatste ijstijd (Weichselien tot 8000 v.Chr.) rees het zee- en grondwatervniveau als gevolg van het afsmelten van het landijs. Onder andere door de grondwaterstijging kon veenvorming plaatsvinden. Op de meeste plaatsen startte dit in het Atlanticum (6000-3000 v.Chr.). Het is niet uitgesloten dat er op Zuidelijk Flevoland al veen in het Boreaal (7000 – 6000 v.Chr.) is gevormd. Door veenvorming ontstonden uitgebreide venen. Halverwege het Atlanticum was de zeespiegel al zover gestegen dat de zee het land ver kon binnendringen. Periodes van doorbraken en het terugtrekken van de zee wisselden elkaar af. Bij de doorbraken zijn grote delen van de venen aangetast. Niet al het veen is verwijderd. Bekend is dat in Oostelijk Flevoland, de noordwestelijke Veluwe en bij Elburg nog veen uit die periode voorkomt. De ongeveer 3 m dikke laag, voornamelijk zeggeveen, wordt door een laagje veenmosveen afgedekt. Het veenpakket wordt tot het Hollandveen gerekend. Aan het einde van het Subboreaal (3000 – 900 v.Chr.) is door verschillende doorbraken het meer Flevo ontstaan (1200 v.Chr.). Dit binnenmeer breidde zich steeds verder uit. In het meer werd onder zoete omstandigheden detritus-gyttja afgezet. Dit bestond voor een belangrijk deel uit resten van afgebroken veen. Het meer ontwikkelde zich uiteindelijk, door geleidelijke veenafslag, tot de Zuiderzee. Op de bodem van de Zuiderzee zijn de Flevomeer-, Almere – en Zuiderzee-afzettingen gedeponneerd. De Flevomeer- en Almere afzettingen (900 v.Chr.- 1600 n.Chr.) vonden plaats in een zoet milieu. Aan het einde van de Almerefase nam, door een ruimere verbinding van de Zuiderzee met de Waddenzee, de verzilting toe. De Zuiderzee-afzetting (1600 n.Chr.) heeft dus in een brak tot zout milieu plaatsgevonden. De Zuiderzee-afzetting bevat mariene schelpen in tegenstelling tot de Almere periode waarin

zoetwaterschelpen zijn afgezet. Na het afsluiten van de Zuiderzee in 1932 door de afsluitdijk is de IJsselmeerafzetting gedeponeed. De laag is te onderscheiden van de Zuiderzee-afzetting door afwezigheid van mariene schelpen. De vrij dunne laag wordt momenteel niet meer aangetroffen doordat de laag tijdens het bewerken van de grond met de Zuiderzee-afzetting is vermengd (bouwvoor). In de dertiger jaren is men gestart met de droogmaking van de Zuiderzee. Dit leidde tot het ontstaan van de polder Zuidelijk Flevoland in 1968.

3.3 Bodemkundige informatie

Volgens bodemkundige definities kan de bodem worden beschreven als nesvaaggrond in kalkrijke jonge zeeklei [Bakker, 1976]. Het betreft dan een classificatie op basis van de toplaag (1.2m). Nesvaaggrond is niet-gerijpte, licht gekleurde en niet venige grond. Het spreekt voor zich dat de diepere organische lagen niet in dit profiel passen. Inmiddels kan de rijping van de bodem zich zo hebben ontwikkeld dat er sprake is van poldervaaggrond. De Pleistocene zandlaag komt, volgens de bodemkundige informatie, in zowel Oostelijk- als Zuidelijk Flevoland voor op 75 – 100 cm onder maaiveld. Dit komt niet overeen met de bevindingen. In [Rijniersce, 1983] wordt verwezen naar een bron die aangeeft dat de bovenkant van de Pleistocene zandlaag naar het Westen toe dieper ligt. De dikte van de Holocene lagen neemt navenant toe. Alleen aan de randen van het IJsselmeer kan de dikte van de Holocene lagen zeer beperkt zijn (mogelijk door o.a. Pleistocene rivierduinen).

De voormalig Zuiderzee**bodem** heeft een aantal typische kenmerken:

- oplopen van het humusgehalte met de diepte (tot 10%);
- oplopen van koolstof/stikstof verhouding (C/N) met de diepte (10-24) door afname stikstof gehalte met de diepte. Dit geeft de naar boven toe afnemende invloed van op de sedimentatie van het in afbraak verkerende veenlandschap weer;
- Almere afzetting heeft een lage lutum/slib verhouding (40);
- Zuiderzee afzetting heeft een hoge lutum/slib verhouding (60);
- Door rijping is de slappe klei veranderd in een stevige sterk gescheurde grond;
- Door oxidatie is de kleur veranderd van blauw naar grijs.

4 Classificatie – en indextesten

4.1 Gevolgde procedure

De 1m lange Begemann monsters zijn in een temperatuur gecontroleerde ruimte in goten gelegd waarna de bovenste 2 cm van het monster, evenwijdig aan de lengte-as, is verwijderd met de trimzaag. Op dit afgesneden deel is per 5 cm de ongedraineerde schuifsterkte bepaald met de torvane en is materiaal verzameld voor het vullen van een kleine volumesteekring. Op het overgebleven monster is de valconus (Zweedse conus: 30°/100 g) gebruikt om, om de 5 cm, de ongedraineerde schuifsterkte te bepalen. Het afgesneden deel is vervolgens verkneed. Op dit verkneede materiaal zijn enkele valconus - en torvane testen uitgevoerd. Ook zijn de Atterbergse grenzen bepaald op deze verkneede klei. Van de inhoud van de kleine volume steekring (5 cm³) is het volumiek gewicht, het watergehalte, de soortelijke massa, het gloeiverlies en het kalkgehalte bepaald. De boring is vervolgens afgevlakt en gefotografeerd.

4.2 Watergehalte

Het watergehalte is bepaald door de inhoud van de kleine volumesteekring te drogen bij 105 °C gedurende minimaal 24 uur. Door aan te nemen dat het poriënwater geen zout bevat kan het watergehalte worden bepaald met:

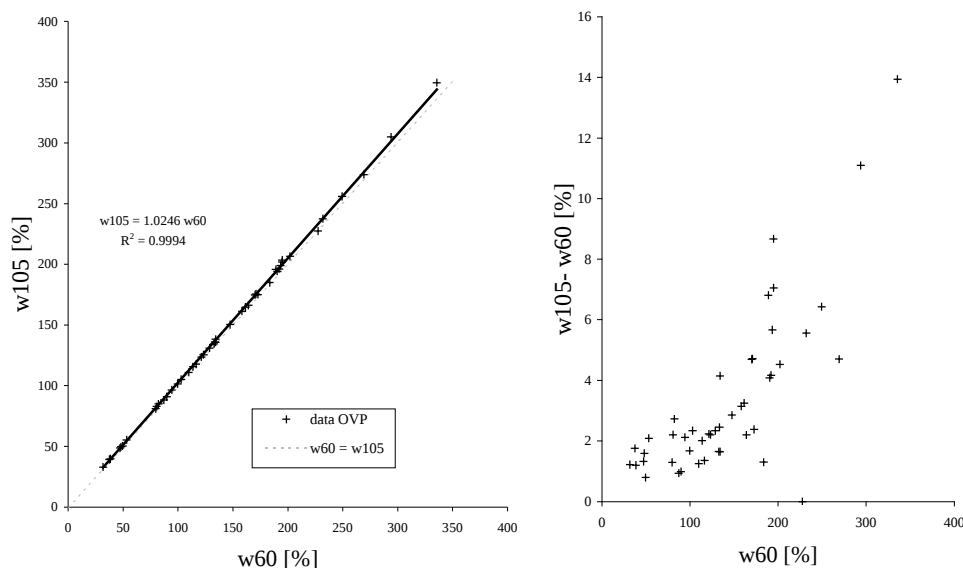
$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100 \quad \%$$

Waarin:

w	=	watergehalte	[-]
m _w	=	massa water	[g]
m _s	=	massa korrelmateriaal	[g]

Voor de classificatie- en indextesten van de klei uit de Oostvaardersplassen is een aantal monsters gedroogd bij 60 °C en vervolgens bij 105 °C waarna de behorende watergehaltes zijn bepaald. De bedoeling hiervan was een indicatie te hebben van de invloed van de droogtemperatuur op het watergehalte.

Hieruit volgde geringe verschillen: het watergehalte bepaald bij 105 °C lag gemiddeld 2.5% hoger (46 metingen). Voor watergehaltes van organische klei in de orde van 150% - 200% ligt deze afwijking rond de 4 %. Het verschil is groter naarmate het watergehalte groter is. Zie Figuur 4.1.



Figuur 4.1 Invloed droogtemperatuur op watergehalte

Omdat droging bij de verschillende temperaturen achter elkaar is uitgevoerd, kan theoretisch ook de droogtijd nog van invloed zijn. Dit is niet de verwachting. Gezien de geringe verschillen is er geen reden om in dit onderzoek bij een lagere temperatuur te drogen om mogelijke oxidatie van het organisch materiaal te beperken. Dit geldt niet zonder meer voor watergehaltebepalingen op mineraal arm veen. In het vervolg is het watergehalte bepaald door droging bij 105 °C.

4.3 Atterbergse grenzen

Vloeigrens

Een deel van het monster is op een glasplaat verkneed onder toevoeging van gede-ioniseerd water. Hierna is het monster weer ingepakt en opgeslagen gedurende 24 uur zodat de klei zich kan aanpassen aan het nieuwe watergehalte. Uiteindelijk is het monster opnieuw verkneed en is de vloeigrens (w_L) bepaald, gebruik makend van het Casagrande apparaat (BS1977).

Uitrolgrens

Voor het bepalen van de uitrolgrens (w_p) is een gedeelte van de originele verkneede klei gebruikt. De klei is regelmatig tussen de vingers verkneed en op een glasplaat uitgerold tot de gewenste vorm. Bij deze conditie is het watergehalte bepaald.

De Atterbergse grenzen zijn bepaald in een vochtige temperatuur gecontroleerde ruimte. De temperatuur bedroeg ongeveer 11 °C.

4.4 Consistentie van de grond

Om de consistentie van de grond te beschrijven is gebruik gemaakt van de liquidity index, gedefinieerd als:

$$I_L = \frac{w - w_p}{I_p}$$

Waarin:

I_L	=	liquidity index	[-]
w	=	watergehalte	[-]
w_p	=	uitrolgrens	[-]
w_L	=	vloeigrens	[-]
I_p	=	plasticiteitsindex = $w_L - w_p$	[-]

4.5 Soortelijke massa

Een deel van de inhoud van de volume steekring is 24 uur gedroogd bij 105 °C en gemalen voor het bepalen van de dichtheid van het korrelmateriaal, de soortelijke massa. Hierbij zijn het pycnometer apparaat (AccuPyc) en een precisiebalans gebruikt.

In het pycnometerapparaat worden twee kamers gevuld met Helium. In de ene kamer is een container (+/- 8 cm³) ingebracht, gevuld met enkele cm's gemalen droge stof. De andere kamer blijft slechts gevuld met Helium. Helium heeft de eigenschap zeer goed in zeer kleine poriën te kunnen dringen. Hierbij wordt lucht verdrongen. In de tweede kamer kan de druk worden gevarieerd. Beide kamers kunnen met elkaar in verbinding worden gebracht. Uit de bekende volumes van beide kamers en de gemeten aangebrachte drukveranderingen kan met behulp van de gaswet het volume van de korrels worden bepaald. Met het apparaat is een volledig automatische bepaling van het volume van het korrelmateriaal mogelijk. In combinatie met de massametingen van de droge stof wordt de soortelijke massa bepaald.

4.6 Kalkgehalte en gloeiverlies

Het gloeiverlies (N) en kalkgehalte (CaCO₃) van de inhoud van de volume steekringen is bepaald door het gedroogde materiaal gedurende 4 respectievelijk 2 uur in een porseleinen schaalte te verhitten bij 500 °C en respectievelijk 900 °C. De eerste verwarmingscyclus leidt tot het verbranden van het organisch materiaal. Uit het massaverlies wordt het gloeiverlies bepaald. De tweede verwarmingscyclus leidt tot het reduceren van CaCO₃ tot CO₂ en CaO. Het CO₂ verlaat het monster en leidt tot een afname van de droge massa. De hoeveelheid CO₂ die het monster heeft verlaten kan worden omgerekend naar de hoeveelheid CaCO₃, oorspronkelijk aanwezig in het monster. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de verhouding van de molaire massa van beide componenten (2,27). Na de verhittingscycli zijn de monsters in een exsiccator afgekoeld om te voorkomen dat de monsters vocht aantrekken.

4.7 Ongedraineerde schuifsterkte

Voor het bepalen van de ongedraineerde schuifsterkte en de gevoeligheid (sensitivity) van de grond is de handtorvane en de GEONOR valconus met een massa van 100 g en een tophoek van 30° gebruikt. Deze conus is gekozen voor voldoende penetratie in zowel onverkneet als verkneet materiaal zonder dat van conus moet worden gewisseld. Dit komt de nauwkeurigheid van gevoeligheidsbepaling van de klei ten goede.

De kleinste zijde van het te penetreren ondervlak van het monster (4.1) was ongeveer gelijk aan 6 cm. De hoogte van het monster was gelijk aan ongeveer 5 cm. Deze afmetingen en randvoorwaarden overtreffen de monstergrootte voor de 'standaardprocedure' van de valconus. Hierbij bedraagt de hoogte 40 mm en de diameter 55 mm (BS 1377). Daarom is aangenomen dat de randvoorwaarden de penetratie van de valconus niet beïnvloeden.

Ongedraineerde schuifsterkte valconus

De ongedraineerde schuifsterkte kan worden berekend met:

$$C_u = Cg \frac{m}{i^2}$$

waarin:

C_u	=	ongedraineerde schuifsterkte	[kPa]
C	=	empirische constante	[-]
g	=	zwaartekrachtsversnelling	[m/s ²]
m	=	massa valconus	[g]
i	=	penetratiediepte	[mm]

De constante C is een empirische constante die wordt bepaald door de soort conus en de mate van verstoring van de grond. C wordt meestal gekalibreerd aan de hand van in-situ testen zoals de in-situ vane test. Laatstgenoemde testen zijn op de lokatie in het Oostvaardersplassengebied niet uitgevoerd. De ongedraineerde schuifsterkte is berekend door een waarde van 0.8 te gebruiken, zoals voorgeschreven is in de Europese norm ETC5-E1.97 [Larsson et al., 1998].

Sensitivity

De verhouding van de ongedraineerde schuifsterkte van gestoken klei ten opzichte van de ongedraineerde schuifsterkte van verkneide klei bij hetzelfde watergehalte wordt sensitivity genoemd en is te berekenen uit het kwadraat van de verhouding van penetratiedieptes:

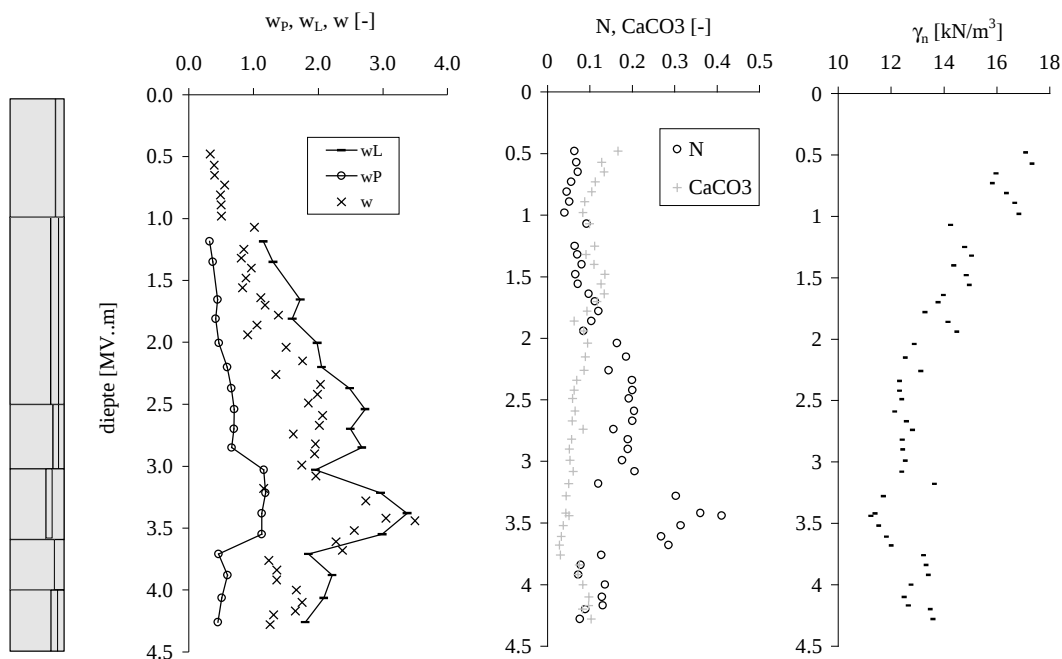
$$S_t = \frac{C_u}{C_r} = \frac{i_r^2}{i_u^2} = \left(\frac{i_r}{i_u} \right)^2$$

waarin:

S_t	=	sensitivity	[-]
C_u	=	ongedraineerde schuifsterkte gestoken klei	[kPa]
C_r	=	ongedraineerde schuifsterkte verkneide klei	[kPa]
i_r	=	penetratie conus in verkneide klei	[mm]
i_u	=	penetratie conus in gestoken klei	[mm]

4.8 Resultaten van classificatie- en index testen

In Figuur 4.2 zijn de resultaten van de classificatie - en indexproeven gepresenteerd in enkele diepteprofielen. Een typisch grondprofiel is naast de proefresultaten geplot. Dit grondprofiel is gebaseerd op een handmatige beschrijving van de boring.



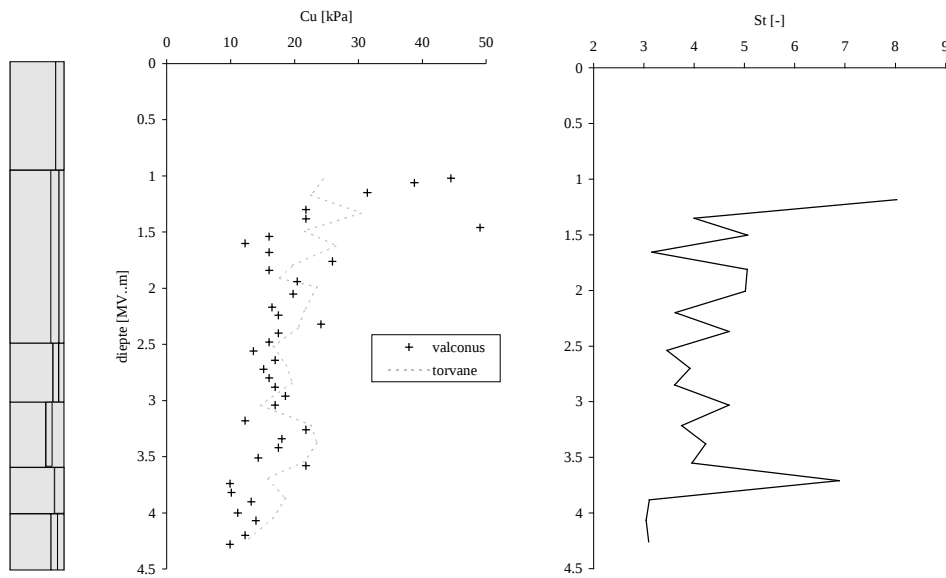
Figuur 4.2 Diepteprofielen Oostvaardersplassen site: N, CaCO_3 , w , w_p , w_L , γ_n

Op basis van de classificatie- en indexproeven volgt dat de grond tussen MV-0m and MV-4.5m kan worden opgedeeld in zes lagen. Direct onder maaiveld ligt een matig tot sterk siltige kleilaag met een laag organische gehalte. Het volumiek gewicht van deze laag bedraagt ongeveer 16 kN/m^3 . Hieronder ligt een zwak siltige zwak humeuze laag van 0.7 m dik. Het organisch gehalte van deze laag, weerspiegeld in het gloeiverlies N, is hoger dan eerstgenoemde laag, het volumiek gewicht bedraagt ongeveer 14 kN/m^3 . Tussen MV-1.6m en MV-2.0m ligt een zwak siltige humeuze klei met een volumiek gewicht van 13 kN/m^3 . Het organisch gehalte neemt al duidelijk met de diepte toe. Tussen MV-2m en MV-3m ligt een redelijk homogene zwak siltige sterk humeuze kleilaag. Het volumiek gewicht van deze klei ligt rond de 12.5 kN/m^3 . Het proefprogramma zal gericht zijn op deze organische klei. Tussen MV-3m en MV-3.6m ligt een sterk humeuze laag met een volumiek gewicht tussen 11 en 12 kN/m^3 . Onder deze laag ligt een weinig organische kleilaag met een volumiek gewicht van 13 kN/m^3 . Het kalkgehalte in deze laag is hoger dan in de daarboven gelegen organische lagen.

Uit vergelijking van de handmatig beschreven boring en de proefresultaten blijkt dat het verschil tussen humeuze en zeer sterk humeuze grond goed waargenomen wordt evenals het verschil tussen humeuze en niet humeuze grondsoorten.

Uit Figuur 4.2 kan worden afgeleid dat de liquidity indices met de diepte toenemen: van 0.6 voor de eerste laag direct onder maaiveld tot 0.8 voor de sterk organische lagen tot een diepte van MV-3.5m. De liquidity index voor de kleilaag op een diepte van MV-3.5m bedraagt 0.6.

Figuur 4.3 toont het verloop van de ongedraineerde schuifsterkte, bepaald met de valconus en de handtorvane, en de gevoeligheid, S_u , met de diepte. De torvane resultaten laten eenzelfde verloop zien van de ongedraineerde schuifsterkte met de diepte. Ondanks de eenvoud lijkt de handtorvane een goede indicator te zijn. Uit de figuur blijkt verder dat de organische lagen een ongedraineerde schuifsterkte van ongeveer 17.5 kPa hebben. De eerste laag heeft een grotere C_u , de kleilaag op grotere diepte een lagere C_u .

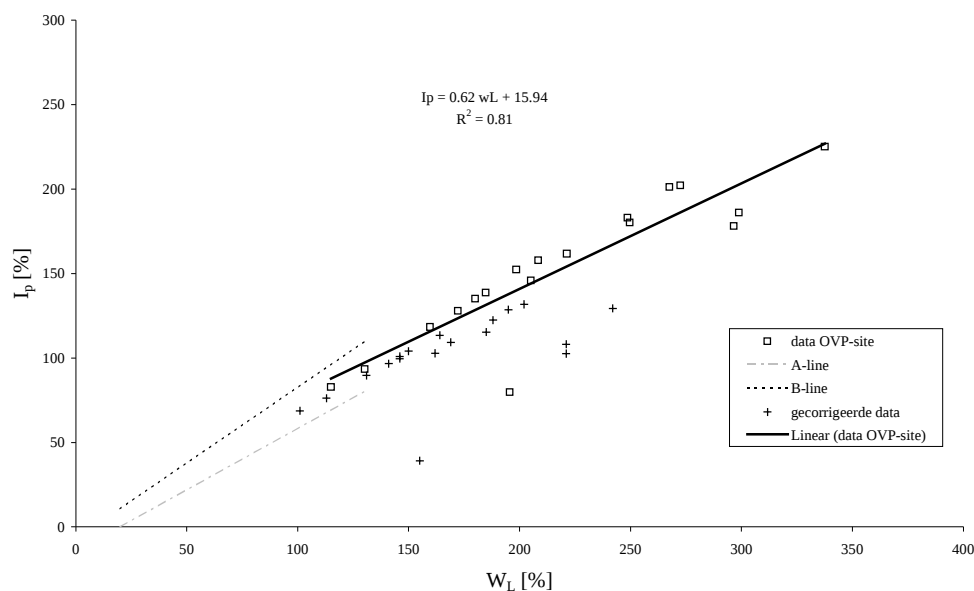


Figuur 4.3 Diepteprofielen Oostvaardersplassen site: C_u en S_t

De met de valconus bepaalde gevoeligheid van de grond bedraagt ongeveer 4. Dit is niet in overeenstemming met de waarnemingen in de uitgevoerde triaxiaalproeven (5.3.5). Uit die proeven blijkt namelijk dat de gevoeligheid veel kleiner is; meer in de orde van 1 tot 2. Omdat de spanningstoestand in de triaxiaalproef veel nauwkeuriger bekend is dan in de valconusproef, geeft de triaxiaalproef naar verwachting een meer betrouwbaar resultaat.

4.9 Correlaties

In Figuur 4.4 is de plasticiteitsgrafiek weergegeven. De A-lijn, die kleisoorten en siltige grondsoorten scheidt, en de B-lijn, die een bovengrens vormt voor alle kleisoorten, zijn ingetekend. Het is belangrijk te vermelden dat de A- en B-lijn horen bij niet organische kleisoorten. Punten behorend bij organische kleisoorten liggen volgens de literatuur onder de A-lijn [Head, 1992]. Uit de figuur blijkt dat de meetdata tussen de verlengde A- en verlengde B-lijn liggen. Voor de Atterbergse grenzen bepaald met het Casagrande apparaat volgt voor de organische klei de relatie: $I_p = 0.62 w_L + 16$.

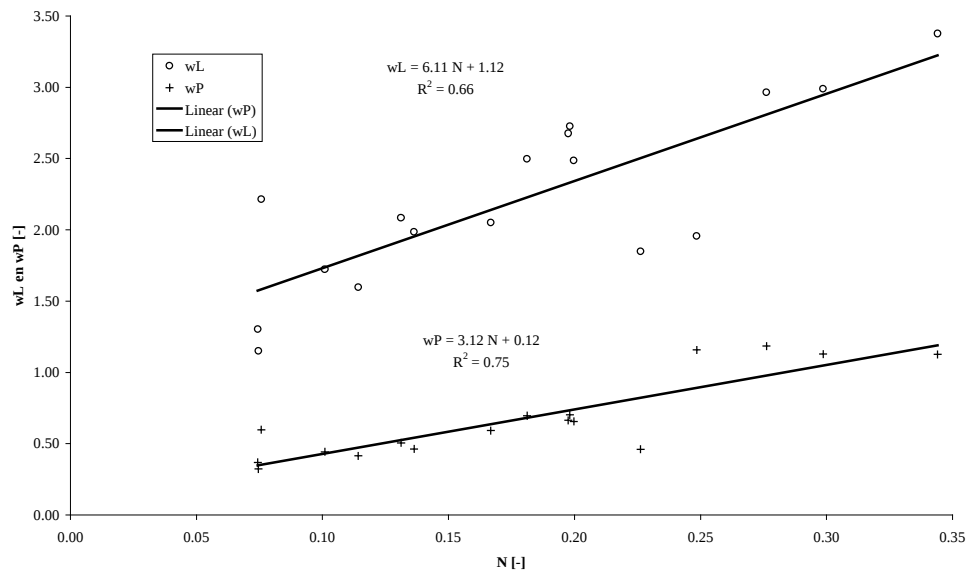


Figuur 4.4 Plasticiteitsgrafiek: I_p tegen w_L

Het is bekend dat het Casagrande apparaat bij zeer plastische kleisoorten ($w_L > 100$ %) een hogere vloeigrens in vergelijking met de BS valconus geeft, als gevolg van (ongewenste) dynamische effecten [Littleton en Farmilo, 1977]. Ter indicatie zijn met bekende relaties de waarden gecorrigeerd en in Figuur 4.4 weergegeven. Het resultaat van de correctie is een verschuiving richting de A-lijn. De organische klei afkomstig van de Oostvaardersplassen site voldoet dus, wat betreft de plasticiteit, niet helemaal aan de tekstboekverwachtingen.

Omdat de bekende correlaties voor metingen gedaan met de BS valconus en het Casagrande apparaat niet voor organische klei zijn bepaald en het Casagrande apparaat in de Nederlandse adviespraktijk veelvuldig wordt gebruikt, zijn in het vervolg de niet gecorrigeerde vloeigrensbepalingen volgens Casagrande gebruikt.

In Figuur 4.5 is de afhankelijkheid van de vloe- en uitrolgrens van het gloeiverlies weergegeven. Naarmate de klei meer organisch materiaal bevat, nemen beide Atterbergse grenzen toe. De relaties kunnen beschreven worden met $w_L = 6.11 N + 1.12$ en $w_p = 3.12 N + 0.12$. Ook de mineralogische samenstelling en de samenstelling van het poriënwater zijn normaliter van belang. Gezien de duidelijke correlaties zijn deze invloeden of nauwelijks van belang of ze correleren met het gloeiverlies. De variatie van de mineralogische samenstelling en de samenstelling van het poriënwater is niet onderzocht. Deze correlatie kan vooralsnog alleen voor de onderzochte grondlagen worden gebruikt.



Figuur 4.5 w_L en w_P tegen N

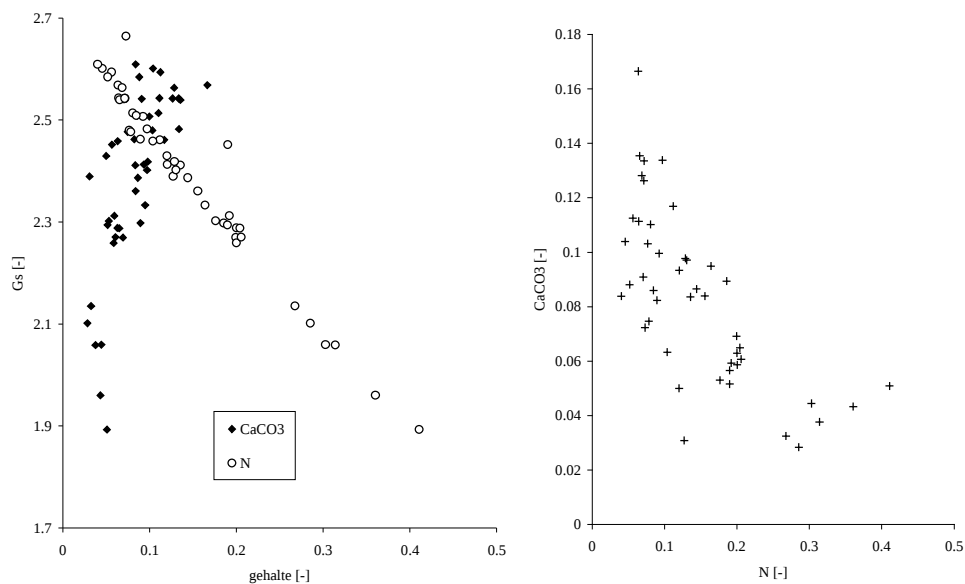
In Figuur 4.6 is de specifieke massa uitgezet tegen het kalkgehalte en het gloeiverlies. G_s correleert duidelijk beter met het gloeiverlies dan met het kalkgehalte; de dichtheid van kalk is ongeveer gelijk aan 2710 kg/m^3 , vergelijkbaar met de dichtheid van andere minerale delen. De figuur met het kalkgehalte uitgezet tegen het gloeiverlies laat zien dat klei met een hoog kalkgehalte een laag organisch gehalte heeft terwijl klei met een hoog organisch gehalte slechts weinig kalk bevat. Wellicht hangt dit samen met de condities tijdens de afzetting van de grondsoorten.

Door aan te nemen dat het korrelmateriaal van grond bestaat uit minerale- en organische bestanddelen, kan voor G_s worden afgeleid:

$$G_s = \frac{1}{\frac{P}{G_o} + \frac{1-P}{G_m}}$$

waarin:

G_o	=	specifieke massa organische bestanddelen	[-]
G_m	=	specifieke massa minerale bestanddelen	[-]
P	=	organisch gehalte	[-]



Figuur 4.6 Specifieke massa - N, $CaCO_3$ en $CaCO_3$ - N

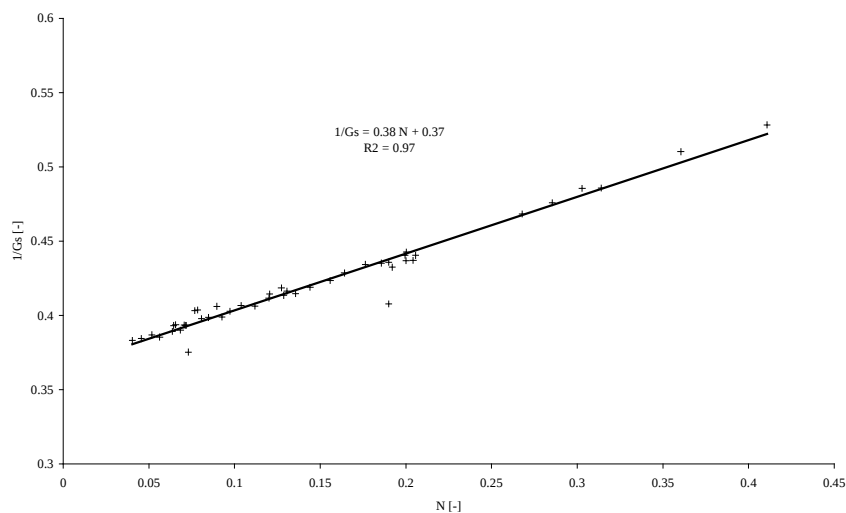
Vaak wordt aangenomen dat het organisch gehalte gelijk is aan het gloeiverlies. Dit is bij lage gloeiverliezen zeker niet het geval. Er bestaat overigens wel een lineaire relatie tussen het gloeiverlies en het organische gehalte [Skempton en Petley, 1970]:

$$\text{organisch gehalte} = 100 - 1.04(N - 100)$$

waarin:

$$N = \text{gloeiverlies} \quad [\%]$$

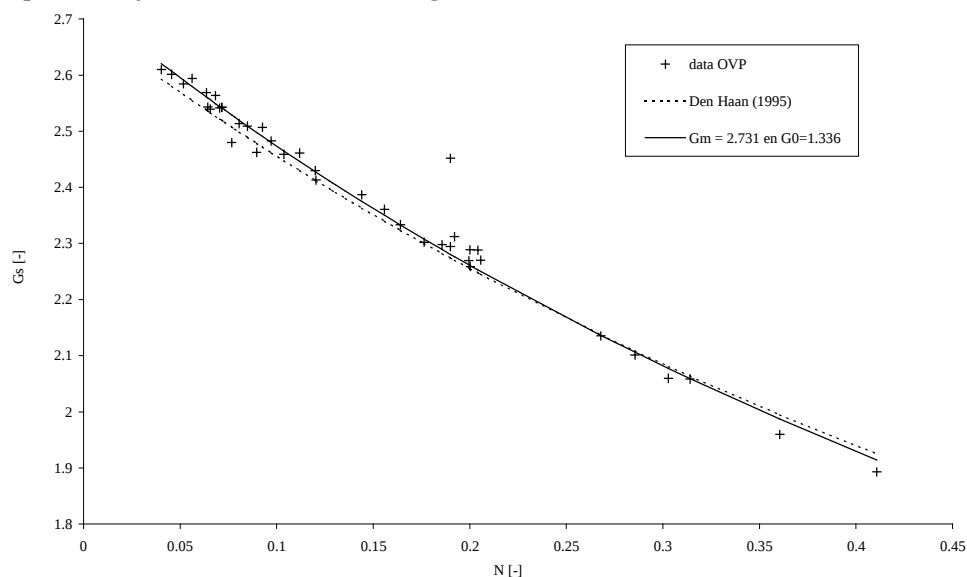
Door aan te nemen dat het organisch gehalte gelijk is aan het gloeiverlies $P=N$ en $1/G_s$ uit te zetten tegen het gloeiverlies, N , kunnen de waarden van G_o en G_m eenvoudig worden afgeleid. Zie Figuur 4.7.



Figuur 4.7 $1/G_s$ tegen N

Uit Figuur 4.7 volgt dat $G_0 = 1.336$ en $G_m = 2.731$.

In eerdere onderzoeken uitgevoerd op klei en veen uit het Betuwelijn project en uit polder Zegveld [Den Haan, 1995] zijn soortgelijke correlaties afgeleid. In die onderzoeken varieerde het gloeiverlies tussen 0.03 en 0.90. Dat is een veel ruimere range in vergelijking met de data van klei uit het Oostvaardersplassengebied. De hierbij gevonden waarden van de specifieke massa's bedroegen respectievelijk 1.365 en 2.695. Zie Figuur 4.8.



Figuur 4.8 G_s tegen N

De correlatie verkregen uit polder Zegveld en uit het Betuwelijnproject sluit redelijk goed aan op de data. De correlatie geeft een te lage specifieke massa bij een laag gloeiverlies en een te hoge specifieke massa bij een hoog gloeiverlies. Dit is te wijten aan hogere waarden van G_0 en de lagere waarde van G_m in vergelijking met de gevonden waarden van klei uit het Oostvaardersplassengebied. Alle dataseries geven aan dat de correlaties niet zonder meer universeel toepasbaar zijn.

Duidelijk gemaakt is dat er een relatie bestaat tussen de specifieke massa en het gloeiverlies. Ook is er een relatie tussen het watergehalte en de volumieke massa. Voor volledig verzadigde grond kan worden afgeleid dat:

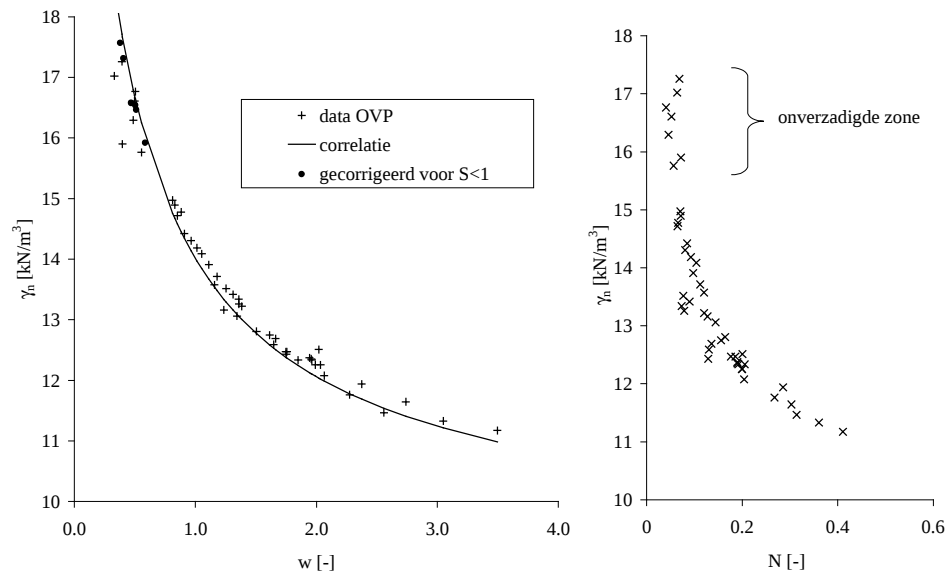
$$g_n = g_w G_s \left(\frac{1 + w}{1 + w G_s} \right)$$

waarin:

γ_n	=	volumiek gewicht verzadigde grond	kN/m^3
γ_w	=	volumiek gewicht water	kN/m^3
G_s	=	Specifieke massa korrelmateriaal	-
w	=	watergehalte	-

In Figuur 4.9 is het volumiek gewicht tegen het watergehalte uitgezet. Een deel van de data is afkomstig uit de onverzadigde zone. Dit zijn de zwaardere kleisoorten op de lokatie. Deze data is gecorrigeerd. Om zonder kennis van het gloeiverlies voor de Oostvaardersplassen site een schatting te maken van γ_n op basis van het watergehalte is extra informatie nodig omtrent G_s . Deze waarde is niet

constant voor de site en is sterk afhankelijk van het gloeiverlies. Om het verband af te leiden is gebruik gemaakt van de correlatie van het watergehalte en de specifieke massa. Een fysische achtergrond voor het bestaan van dit verband is dat klei met een hoger organisch gehalte, en dus met een lagere dichtheid van het korrelmateriaal, een groter poriënvolume kan bezitten.



Figuur 4.9 γ_n - watergehalte

Data van verschillende sites laat zien dat het verband tussen G_s en het watergehalte benaderd kan worden door een lineaire relatie:

$$G_s = a w + b$$

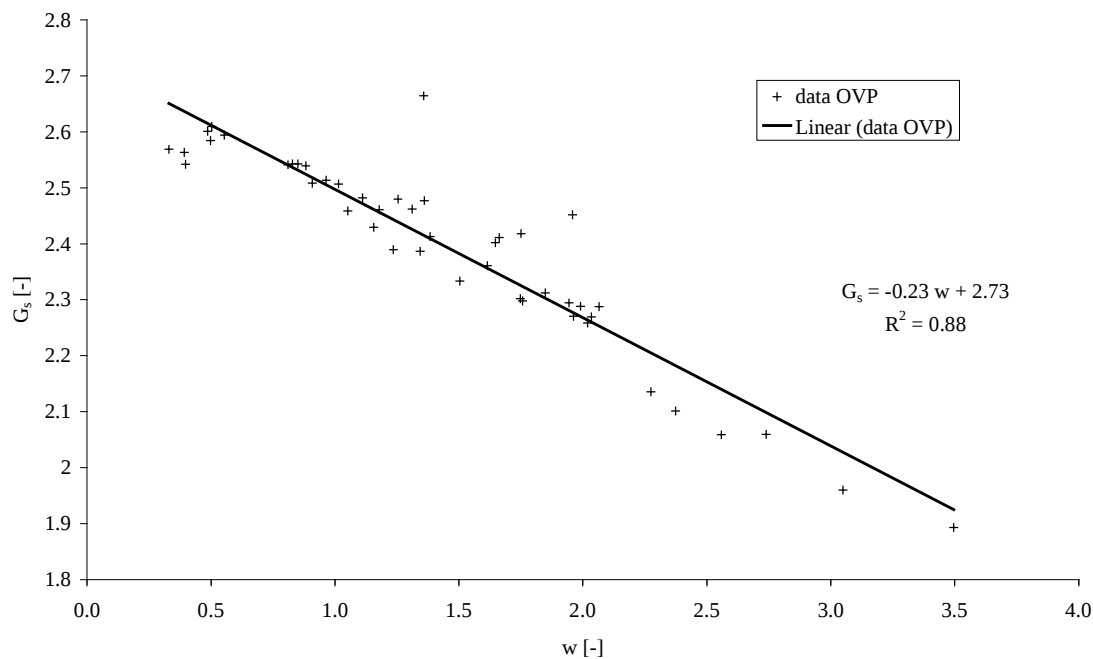
waarin:

G_s	=	specifieke massa	[-]
a, b	=	coëfficiënten	[-]
w	=	watergehalte	[-]

Per lokatie variëren de parameters a en b . Voor de Oostvaardersplassen site geldt $a = -0.23$ en $b = 2.73$. Zie Figuur 4.10. Uitgeschreven levert dit:

$$g_n = \frac{26.78 + 24.53w - 2.26w^2}{1.00 + 2.73w - 0.23w^2}$$

Het resulterende verband tussen γ_n en w is in Figuur 4.9 weergegeven. Hieruit blijkt dat bij lage waarden van het watergehalte het volumiek gewicht overschat wordt terwijl bij hogere waarden van het watergehalte het volumiek gewicht onderschat wordt.



Figuur 4.10 G_s - w

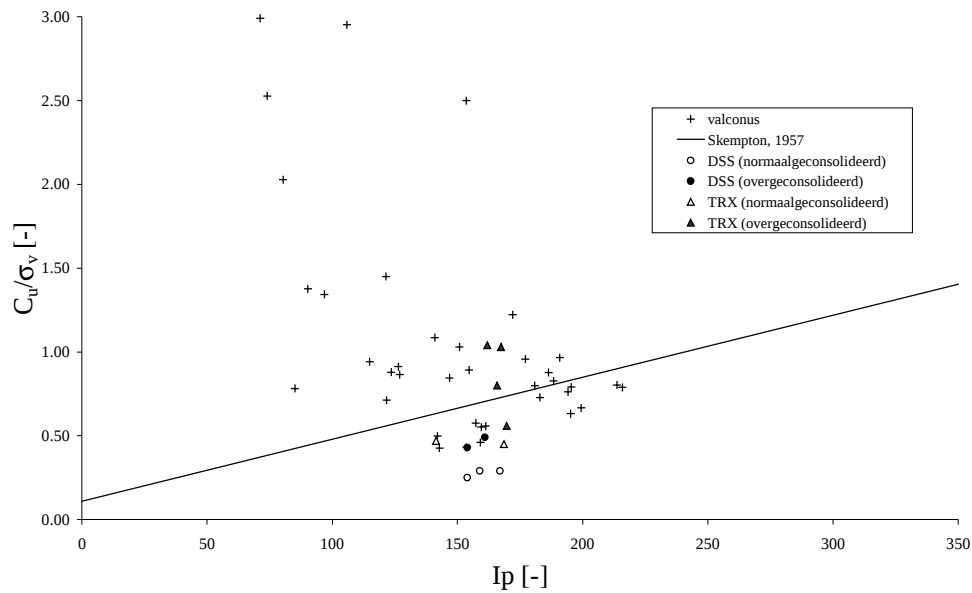
Figuur 4.11 laat het verloop van de ratio ongedraineerde schuifsterkte en effectieve verticale consolidatiespanning tegen de plasticiteitsindex zien. Hierbij is gebruik gemaakt van de ongedraineerde schuifsterkte volgend uit de valconus testen. De effectieve verticale consolidatiespanning is geschat. Zie 4.11. Ook is de Skempton relatie, ter indicatie, ingetekend. Deze relatie luidt:

$$\frac{C_u}{s_v'} = 0.11 + 0.0037 I_p$$

waarin:

C_u	=	ongedraineerde schuifsterkte	[-]
s_v'	=	effectieve verticale spanning	[-]
I_p	=	plasticiteitsindex	[-]

De Skempton relatie geldt voor normaalgeconsolideerde klei en is afgeleid aan de hand van vane testen. De vergelijking van deze relatie met de proefdata is niet helemaal correct. In de Skempton relatie weerspiegelt het verloop van de plasticiteitsindex het verloop van de mineralogische samenstelling terwijl het verloop van de plasticiteit van organische kleisoorten, zoals in dit project zijn bepaald, vermoedelijk meer afhankelijk is van het organisch gehalte en minder van de variatie van de mineralogische samenstelling. Bovendien is de correlatie gebaseerd op proefresultaten uit vane testen. Dit kan zorgen voor verschil in ongedraineerde schuifsterkte als gevolg van een andere vervormingstoestand bij bezwijken in vergelijking met de triaxiaal- of direct simple shearproef. Tussen laatstgenoemde proeftypen kunnen hierdoor ook verschillen in ongedraineerde schuifsterkte optreden. Andere proefresultaten van triaxiaal- en direct simple shearproeven zijn ingetekend. Opvallend is dat de normaalgeconsolideerde monsters een genormaliseerde sterkte hebben die onder de Skempton-relatie ligt. Overgeconsolideerde monsters hebben een relatief hoge sterkte en liggen erboven. Blijkbaar reageren de met de valconus beproefde monsters overgeconsolideerd.

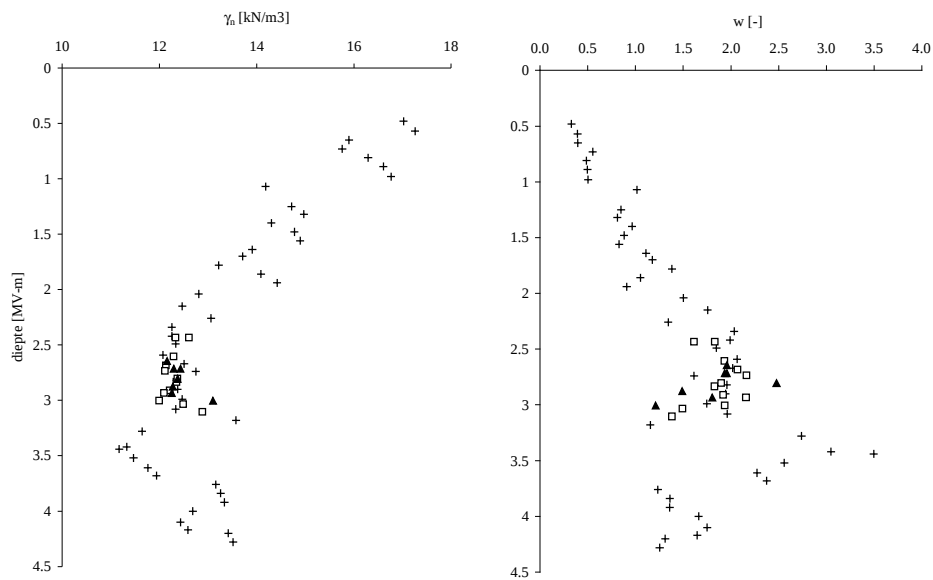


Figuur 4.11 $C_u/s_v' - I_p$

Uit Figuur 4.11 blijkt dat de Skempton relatie niet bij de data past. Mogelijk is de Skempton relatie niet bruikbaar voor deze kleisoort of zijn de proeven zodanig anders uitgevoerd of geïnterpreteerd dan de proeven waarop de correlatie van Skempton is gebaseerd dat er een significante afwijking is.

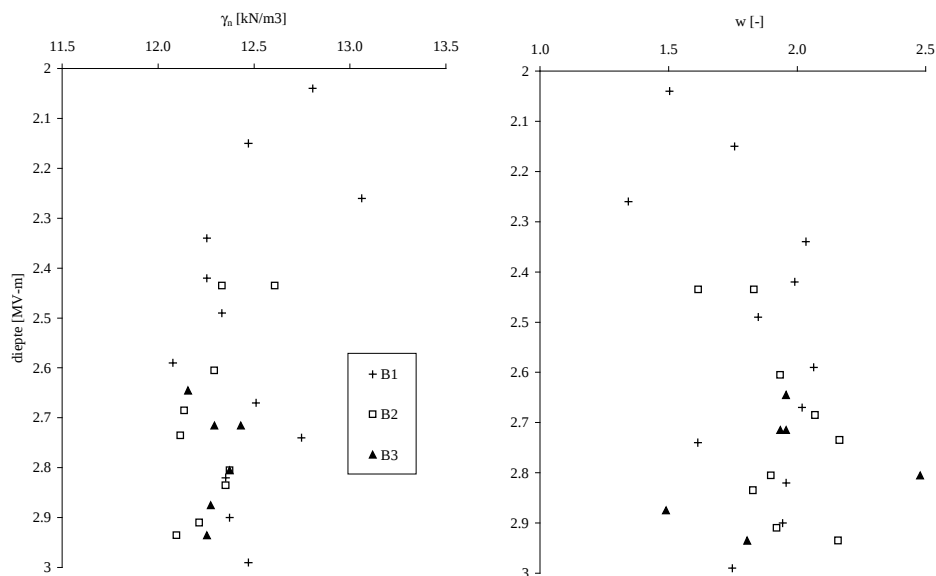
4.10 Variabiliteit grondeigenschappen

De eigenschappen van organische grond kunnen zeer sterk afhankelijk zijn van de geometrische positie. Voorafgaand aan de verschillende proeven, beschreven in dit rapport, zijn het watergehalte en het volumiek gewicht bepaald. De resultaten behorend bij boring B1, B2 en B3 zijn in Figuur 4.12 weergegeven.



Figuur 4.12 Variabiliteit w en γ_n boring B1, B2 en B3

In Figuur 4.13 zijn het watergehalte en volumiek gewicht op een diepte van MV-2m tot MV-3m weergegeven.

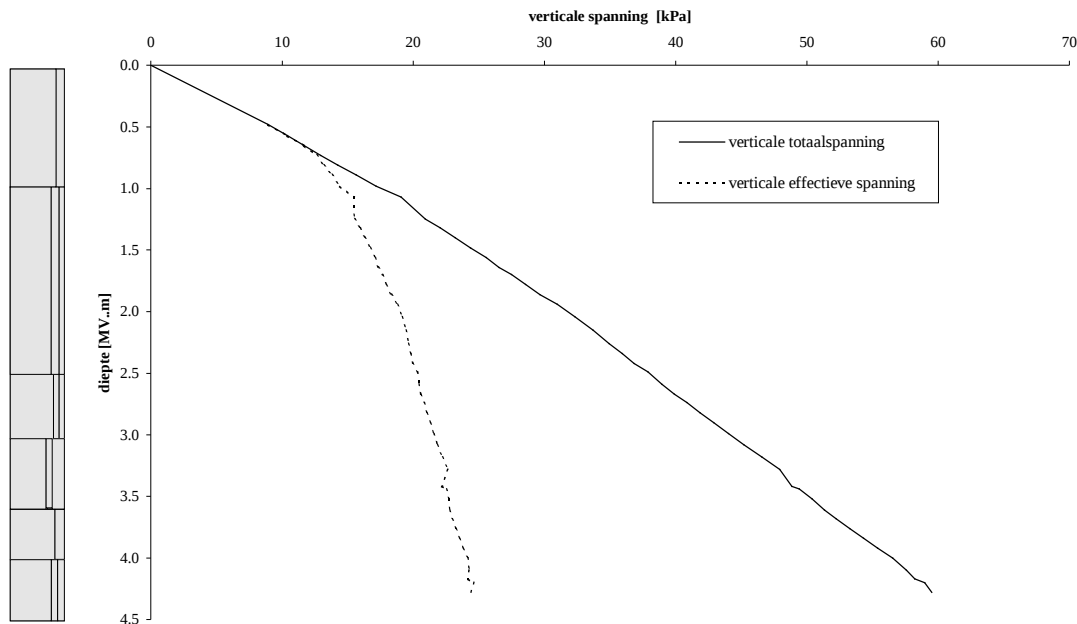


Figuur 4.13 Detail γ_n en w tegen de diepte MV-2m tot MV-3m

Binnen een fictief monster van 10 cm genomen uit de organische laag kan het watergehalte tussen boven- en onderzijde 25% verschillen. Hierbij kan de resolutie van de metingen nog een rol spelen. Voor γ_n is een variatie van 0.25 kN/m^3 mogelijk op een geschat gemiddelde γ_n van 12.2 kN/m^3 . De relatieve invloed is kleiner. Het is de verwachting dat de variatie van de eigenschappen in verticale richting vele malen groter is dan die in laterale richting als gevolg van de ontstaansgeschiedenis.

Bij een standaard triaxiaalmonster van 15 cm hoog kan dus door de variërende eigenschappen een niet uniformiteit optreden. De rekken die gemeten worden weerspiegelen dan niet het feitelijke materiaalgedrag. Daarom zijn voor een representatieve beproeving van amorfe organische klei meerdere proeven op kleinere (of lagere) monsters wenselijk. Bij de aanwezigheid van stengels, wortelresten e.d. zijn juist grotere monsters wenselijk. In de Oostvaardersplassen klei onderzocht in het lage spanningsonderzoek zijn vezels niet visueel waargenomen. Aangehouden monsterhoogtes zijn kleiner dan 8 cm.

4.11 Indicatie effectief verticaal spanningsniveau



Figuur 4.14 Geschat effectief verticaal spanningsniveau site Oostvaardersplassengebied

De effectieve verticale spanning is geschat op basis van het verloop van het gemeten volumieke gewicht, de ligging van het freatisch vlak (MV-0.85m) en de aanname van een hydrostatisch drukverloop. In Figuur 4.14 zijn de spanningen weergegeven. Ook is het grondprofiel geplott. De effectieve verticale spanning in de grondlaag liggend tussen MV-2m en MV-3m wordt geschat op ongeveer 20 kPa.

4.12 Conclusies en bevindingen classificatie – en indextesten

De classificatie - en indextesten hebben veel interessante resultaten opgeleverd. De belangrijkste conclusies die uit de proefresultaten kunnen worden afgeleid zijn:

- de proefresultaten van de organische klei liggen in de plasticity chart in het verlengde van de bekende A-lijn, zelfs na correctie voor de invloed van dynamische effecten. Literatuur geeft aan dat organische materialen juist onder deze A-lijn liggen. Hierin wijkt organische klei uit het Oostvaardersplassengebied af. Mogelijk speelt de aangehouden in-situ temperatuur hierin een rol;
- uit correlaties volgt:
 - een verband tussen vloeï- en uitrolgrens en het gloeiverlies;
 - een verband tussen de inverse van de specifieke massa en het gloeiverlies;
 - de specifieke massa van de organische- en minerale bestanddelen verschilt van andere Nederlandse sites; correlaties zijn niet zonder meer universeel toepasbaar;
- de genormaliseerde sterkte van organische klei is relatief laag en ligt onder de bekende Skempton relatie voor niet organische kleisoorten. De relatie is niet bruikbaar. Overgeconsolideerde monsters hebben een relatief hoge genormaliseerde sterkte. De genormaliseerde triaxiaalsterkte is groter dan de genormaliseerde direct simple shear sterkte. Met name de laatstgenoemde zal sterk afhankelijk zijn van de interpretatie van de proefresultaten;
- de variatie van het watergehalte en volumiek gewicht met de diepte is aanzienlijk. Daarom wordt aangeraden om voor amorfe klei met een groter aantal kleinere (in ieder geval lagere) monsters werken. Dit zal de representativiteit van de proefresultaten verhogen. Voor organische klei met plantenresten (stengels e.d.) zijn kleine monsters voor bijvoorbeeld triaxiaalonderzoek niet haalbaar.

5 Proefprogramma constitutief gedrag organische klei

5.1 Inleiding

Voor het onderzoeken van het mechanisch gedrag van organische klei bij lage effectieve spanningsniveaus is een uitgebreid proefprogramma opgesteld: het proefprogramma constitutief gedrag organische klei. De opzet van dit programma vloeit voort uit een bijeenkomst van de begeleidingscommissie “Fundamenteel gedrag van de ondergrond” op 1 juli 1999.

Aandachtspunten proefprogramma

Van belang is grond te beproeven bij zowel spanningscondities ($\sigma_v' = 15$ kPa) rond de in-situ waarde als bij hogere verticale effectieve spanningen zoals die bijvoorbeeld na een ophoging kunnen optreden. Daarom zijn ook monsters beproefd bij consolidatiespanningen van ongeveer $\sigma_v' = 30$ kPa en $\sigma_v' = 100$ kPa.

Voor een hoge representativiteit van de metingen is het belangrijk dat monsters worden geconsolideerd zonder het optreden van radiale rekken (K_0 consolidatie) zoals in-situ in ‘verre veld’ condities gebeurt. Bij de consolidatie van K_0 -oedometer monsters en DSS monsters worden radiale rekken tijdens samendrukking verhinderd door respectievelijk een stalen ring en een gewapend membraan. In de triaxiaalproeven zijn de monsters of K_0 geconsolideerd door sturing van de celdruk op een (radiale) verplaatsingsopnemer of zijn spanningsgestuurd geconsolideerd met een vooraf ingesteld verhouding van horizontale en verticale totaalspanning.

Het gedrag van (organische) klei is reksnelheidsafhankelijk. Daarom zal gestreefd worden naar een reksnelheidsgestuurde belasting. Dit is standaard voor K_0 -CRS proeven. Ook in de uitvoering van de triaxiaalproef is dit gerealiseerd, voor zover het K_0 geconsolideerde monsters betreft. De DSS monsters zijn spanningsgestuurd geconsolideerd.

Bij proefnemingen op klei kan de temperatuur een belangrijke invloed hebben op het constitutief gedrag. De resultaten van een aantal triaxiaalproeven op gereconstitueerde Oostvaardersplassenklei uitgevoerd bij 2 verschillende temperaturen [Tigchelaar, 2000] lieten een grote invloed zien. De temperatuur is geen onderzoeksvariabele in het proefprogramma. Daarom zijn alle proeven uitgevoerd in een temperatuur gecontroleerde. Wenselijk was een in-situ temperatuur van ongeveer 10 °C te gebruiken. Dit was niet praktisch haalbaar. Enkele direct simple shearproeven zijn wel bij deze lage temperatuur beproefd. De overige testen zijn uitgevoerd bij een temperatuur van ongeveer 19 °C.

Toekomst

Het proefprogramma moet gezien worden als een verkennende serie proeven die de noodzaak voor verdere aftasting van het mechanisch gedrag van organische klei bij lage effectieve spanningsniveaus duidelijk moet maken. Bij toekomstig onderzoek moet worden gedacht aan de bepaling van de ligging van het vloeiooppervlak door rotatie van het spanningspad (gedraineerd) en invloed reksnelheid.

Binnen dit onderzoek zijn, naast de eerder gepresenteerde classificatie- en indexproeven, 2 K_0 -oedometer-, 8 triaxiaal- en 6 direct simple shearproeven uitgevoerd op organische klei uit Oostvaardersplassen.

In dit hoofdstuk worden de uitgevoerde proeven, proefprocedures en proefresultaten beschreven.

5.2 K₀ CRS proeven

5.2.1 Inleiding

In de K₀-oedometer CRS opstelling, geplaatst in een triaxiaalcel, wordt een monster (h=20 mm, ø63 mm) verplaatsingsgestuurd axiaal vervormd zonder dat radiale rekken kunnen optreden; oedometer condities. Tijdens de proef kan de horizontale spanning gemeten worden met een opnemer. De opnemer bestaat uit een serie rekstrookjes aangebracht op een verjongd deel van de ring. Door zorgvuldige calibratie kan de gemeten rek omgezet worden in een horizontale totaalspanning. Optredende verticale spanning kan zowel boven als onder het monster gemeten worden door 2 afzonderlijke krachtopnemers. Hiermee kan de wrijving worden bepaald. De monsters zijn eenzijdig gedraineerd, aan de bovenzijde. Aan de onderzijde van de monsters worden de poriëndrukken gemeten. Met een op de plunjer aangebrachte opnemer worden de axiale verplaatsingen gemeten. In deze opstelling kan een backpressure worden aangebracht.

Deze proef geeft informatie over o.a. de samendrukbaarheid, K₀ bij normaalgeconsolideerde toestand en doorlatendheid. Door het monster te ontlasten kan ook het gedrag in overgeconsolideerde toestand worden onderzocht.

5.2.2 Monsters

In de organische lagen liggend tussen MV-2m en MV-3m zijn 2 monsters gekozen voor beproeving. De gegevens van de monsters zijn gepresenteerd in Tabel 5-1.

monster	boring	diepte			γ_n	w_{na}	w_{voor}^{*1}	G_s^{*2}	v_0^{*3}
[-]	[-]	[MV..m]			[kN/m ³]	[-]	[-]	[-]	[-]
7B	2	2.20	-	2.25	12.20	-	1.83	2.307	5.22
14B	3	2.16	-	2.21	12.07	0.97	1.82	2.310	5.20

*1) bepaald met afsnijdsels

*2) uit correlatie G_s met w (4.9), met w_{voor}^{*1}

*3) met $v_0 = 1 + w_{voor} G_s$

Tabel 5-1 Data Monsters K₀ - CRS testen Oostvaardersplassen

5.2.3 Procedure en belastingsfase

De monsters zijn verplaatsingsgestuurd vervormd bij een axiale reksnelheid, $\dot{\epsilon}_a$, van 2.0×10^{-6} 1/s. In het K₀-CRS apparaat kan tot een rekniveau van 0.325 nauwkeurig worden gemeten. Van dit bereik is volledig gebruik gemaakt. Bij dit rekniveau wordt verondersteld dat de monsters zich normaalgeconsolideerd gedragen. De monsters zijn niet onderworpen aan ontlaststappen.

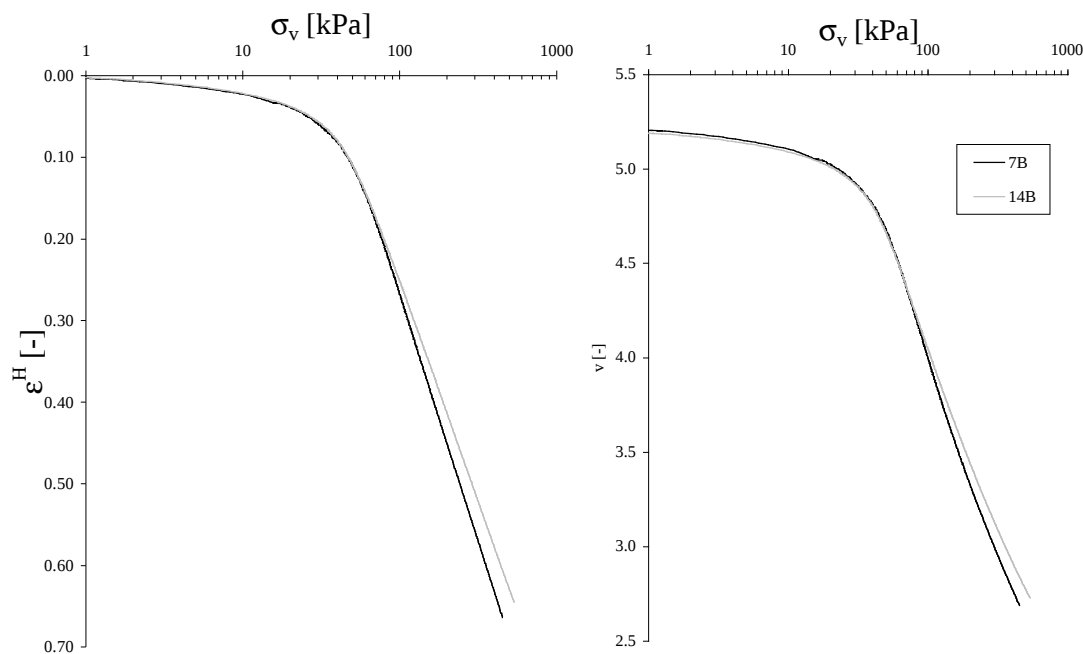
5.2.4 Resultaten

In Figuur 5.1 is de natuurlijke rek en specifiek volume v tegen de gemeten effectieve verticale spanning weergegeven. In de figuur Het specifiek volume van verzadigde grond wordt bepaald door $v = 1+wG_s$. Het specifiek gewicht is geschat op basis van de eerder afgeleide correlaties tussen (natuurlijk) watergehalte en het specifiek gewicht. Het initieel specifiek volume is berekend met behulp van het watergehalte voor de proef. Het verschil tussen het initiële specifiek volume van de twee monsters is klein.

Figuur 5.1 laat zien dat de verticale spanning gedurende de vervorming oploopt. Bij kleine rekken loopt de logaritmisches uitgezette spanning sneller op dan bij grote rekken. Er is duidelijk sprake van een grensspanning; onder de grensspanning een relatief stijf gedrag, boven de grensspanning een relatief slap gedrag. Bij grote rekken is er duidelijk een lineair verband tussen het specifiek volume en de logaritme van het verticale spanningsniveau. Bekend is dat dit gedrag ook afhankelijk is van de opgelegde reksnelheid; de spanningsopbouw vindt bij constante reksnelheid plaats op een isotach.

Kwaliteit monsters

De relatieve verandering van het poriëngetal ($\Delta e/e_0$) die nodig is voor het bereiken van de terreinspanning (15 kPa) wordt vaak gebruikt als maat voor de monsterkwaliteit [Lo Presti, 1999]. Bij verstoring verliest het monster structuur waardoor de stijfheid kleiner wordt; de optredende rekken zullen dan groter zijn. Dit is ook afhankelijk van het initiële poriëngetal. De verhouding $\Delta e/e_0$ bedraagt voor beide monsters 7B en 14B 4.7%. Volgens de indeling gebruikt door o.a. Lo Presti voor Pisa Clay is de kwaliteit van de monsters 'good to fair'.



Figuur 5.1 Natuurlijke rek e^H tegen s_v en v tegen s_v K_0 -CRS proeven Oostvaardersplassen

Grensspanning

De grensspanning van beide monsters is bepaald door raaklijnen aan de $\varepsilon^H - \log \sigma_v'$ kromme te trekken. Uit de constructie volgt een grensspanning van 38.6 kPa en 35.6 kPa voor respectievelijk monster 7B en 14B. Dit is ongeveer 1.9 maal de geschatte in-situ effectieve verticale terreinspanning. De resultaten zijn in Tabel 5-2 weergegeven. Uit de literatuur is bekend dat de grensspanning afhankelijk is van de reksnelheid. Naarmate de reksnelheid lager is, is de grensspanning kleiner. Dit zal afhankelijk zijn van de kleisoort. Per logaritme van de reksnelheid kan dit 10% van de grensspanning schelen [Leroueil, 1988].

Samendrukkingsconstanten Cam Clay denkraam

Voor het beschrijven van de grond kan bijvoorbeeld gebruik worden gemaakt van het Cam Clay denkraam. Hierbij horen de grondparameters λ , κ en N waarvoor geldt:

belasten:

$$v = N - l \ln p$$

ontlasten:

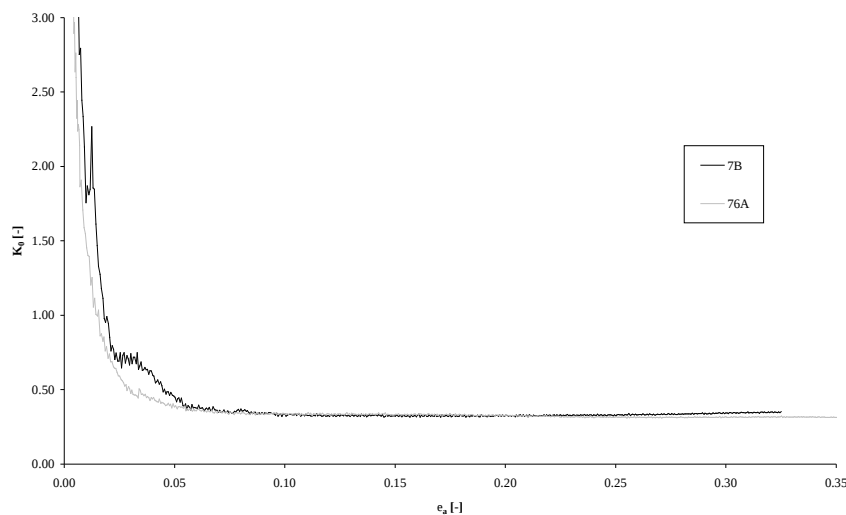
$$v = v_k - k \ln p$$

Voor het bepalen van de parameter κ moet er isotroop worden ontlast. Dit is niet mogelijk in het apparaat waardoor κ niet kan worden bepaald. Voor het bepalen van N en λ is een raaklijn aan de $v - \ln p'$ kromme getrokken in het normaal geconsolideerde gebied. v_k is geen grondparameter maar wordt bepaald door de effectieve isotrope spanning bij ontlasten. In Tabel 5-2 zijn de resultaten gepresenteerd.

	λ	N	$\Delta u / \sigma_{v'NC}$	K_0	p_g	v_1	b
	[-]	[-]	[-]	[-]	[kPa]	[-]	[-]
7B	0.97	7.89	0.15	0.347	38.6	13.58	0.27
14B	0.92	7.73	0.11	0.317	35.6	11.62	0.23

*1 voor de grensspanning

Tabel 5-2 Grondparameters uit K_0 -oedometer CRS testen Oostvaardersplassen



Figuur 5.2 Verloop $K_0 - e_a$, K_0 -oedometer CRS proeven

Samendrukkingsconstanten a-b-c isotachen model

Uit de K_0 -CRS proefresultaten kan op gemakkelijke wijze de parameter b van het a-b-c isotachen model worden afgeleid. In dit model beschrijft a het ontlast/herbelast gedrag, b de maagdelijk samendrukking en c het kruipgedrag. b bepaalt de helling van de ϵ^H - $\ln \sigma_v'$ curve in het maagdelijk gebied. Omdat de monsters 7B en 14B bij constante reksnelheid zijn vervormd en er dus geen sprake is geweest van kruip- of relaxatiefasen kan parameter c niet worden bepaald. Om de positie van de samendrukkingscurve te fixeren is een specifiek volume bij een referentie spanning van 1 kPa gedefinieerd. Dit is de parameter v_1 . Parameter b en v_1 zijn weergegeven in Tabel 5-2.

Verloop K_0

Uit de verhouding van de gemeten effectieve horizontale- en verticale spanning kan de K_0 worden afgeleid. Het resultaat is weergegeven in Figuur 5.2.

Bij zeer lage rekken is de waargenomen K_0 zeer groot. Het monster heeft zich mogelijk in de ring aangepast aan de nieuwe spanningstoestand waarbij het monster wellicht in zekere mate heeft kunnen zwellen. Doordat het meetsysteem in radiale richting stijver reageert dan in axiale richting kan K_0 zeer hoog oplopen (>12). Bovendien is het spanningsniveau laag. Variaties van drukken werken dan zeer sterk door.

K_0 neemt relatief snel af tot een waarde van 0.35 bij een axiale rek van 0.1. Bij doorgaande axiale vervorming tot 0.325 blijft K_0 constant. Dit is het normaalgeconsolideerde gebied.

Voor het schatten van K_0 wordt vaak gebruik gemaakt van de relatie van Jaky die stelt dat K_0 afhankelijk is van de hoek van inwendige wrijving, ϕ' :

$$K_0 = 1 - \sin \phi'$$

In dit onderzoek zijn ook triaxiaalproeven uitgevoerd (5.3). Hieruit blijkt dat de hoek van inwendige vermoedelijk een zeer hoge waarde heeft en dat de relatie van Jaky op deze wijze niet bruikbaar is.

Wrijving

De ring draagt een gedeelte van de verticale spanning door wrijving tegen de bewegingsrichting in. Deze wrijving wordt door schuifspanningen overgedragen op het monster waardoor de spanningstoestand minder uniform is. Uit de meetresultaten blijkt dat bij 5% axiale rek 10% van de aangebrachte belasting wordt overgedragen op de ring. Dit loopt op tot 13% bij 15% axiale rek. Bij grotere rekken neemt deze waarde af tot 10%. Deze redelijk lage waarde van de wrijving zorgt voor een acceptabele uniforme spanningstoestand.

Opbouw wateroverspanning, verticale doorlatendheid, samendrukbaarheid en consolidatiecoëfficiënt

Gedurende de proef is de opbouw van de wateroverspanning gemeten. Opvallend is dat tot 10 - 15 % er geen noemenswaardige opbouw van de wateroverspanning gemeten is terwijl bij grotere rekken de wateroverspanning toeneemt. Zie Figuur 5.3. Door de constante reksnelheid wordt het verzadigde monster gedwongen om per tijdseenheid een volume water af te staan. Het debiet is dus constant. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat het monster door het gebruik van een backpressure van 300 kPa volledig verzadigd is.

Met de volgende aannames:

- grond verzadigd en homogeen, korrels onsamendrukbaar;
- principe van Terzaghi geldig;
- wet van Darcy;

- doorlatendheid en samendrukbaarheid constant voor kleine spannings- of rekverandering en:
- 1-D vervorming;
- eenzijdige afstroming;

kan de bekende diffusie vergelijking voor consolidatie worden opgesteld en gereduceerd tot:

$$c_v \frac{d^2 u}{dz^2} = C$$

waarin:

c_v	=	consolidatiecoëfficiënt	$[m^2/s]$
u	=	poriëndruk	$[kN/m^2]$
C	=	constante	$[kN/m^2s]$
z	=	coördinaat in verticale richting	$[m]$

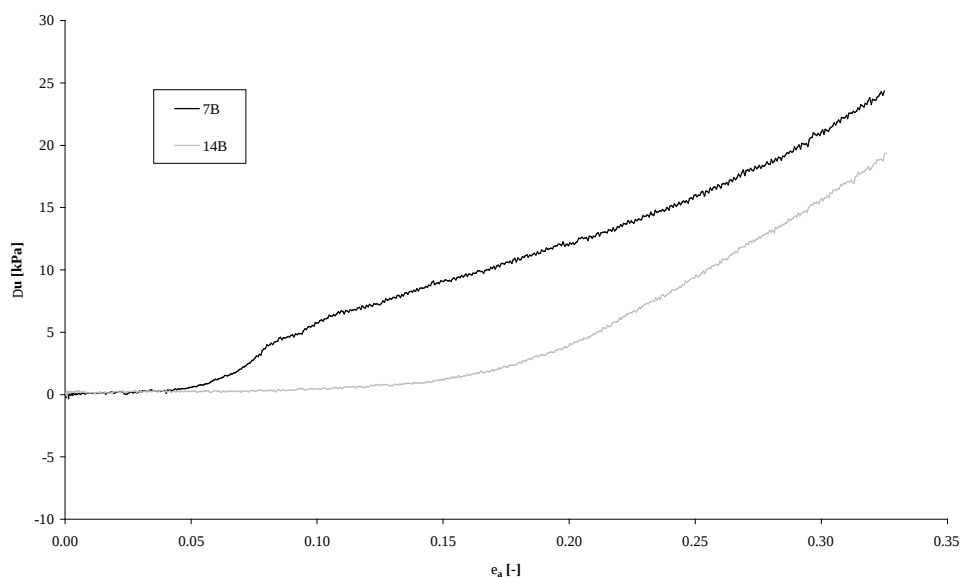
Hieruit volgt door integratie een parabolisch verloop van de poriëndruk met de diepte. Voor de doorlatendheid geldt dan:

$$k = 0.5 \left(\dot{e}_a \right) H^2 g_w \frac{1}{u_{\text{onder}}}$$

waarin:

k	=	verticale doorlatendheid	$[m/s]$
$\dot{\epsilon}_a, \dot{z}$	=	axiale reksnelheid tijdens proef	$[-/s]$
H	=	hoogte tijdens proef	$[m]$
γ_w	=	volumiek gewicht water	$[kN/m^3]$
u_{onder}	=	wateroverspanning onderzijde monster	$[kPa]$

De wateroverspanning aan de onderzijde van het monster wordt tijdens de proef gemeten. Ook is de hoogte en de opgelegde reksnelheid gedurende de proef bekend. In Figuur 5.4 is de verticale doorlatendheid tegen het poriëngetal weergegeven. Het betreft de doorlatendheid berekend bij axiale rekken groter dan 5% en 16% voor respectievelijk monster 14B en 7B.



Figuur 5.3 Opbouw van de wateroverspanning Oostvaardersplassen

Uit de bepaling van de verticale doorlatendheid volgt een exponentieel verloop tussen de verticale doorlatendheid en het poriëngetal. Er kan voor de doorlatendheid worden geschreven:

$$k = a \exp(b e)$$

waarin voor a en b:

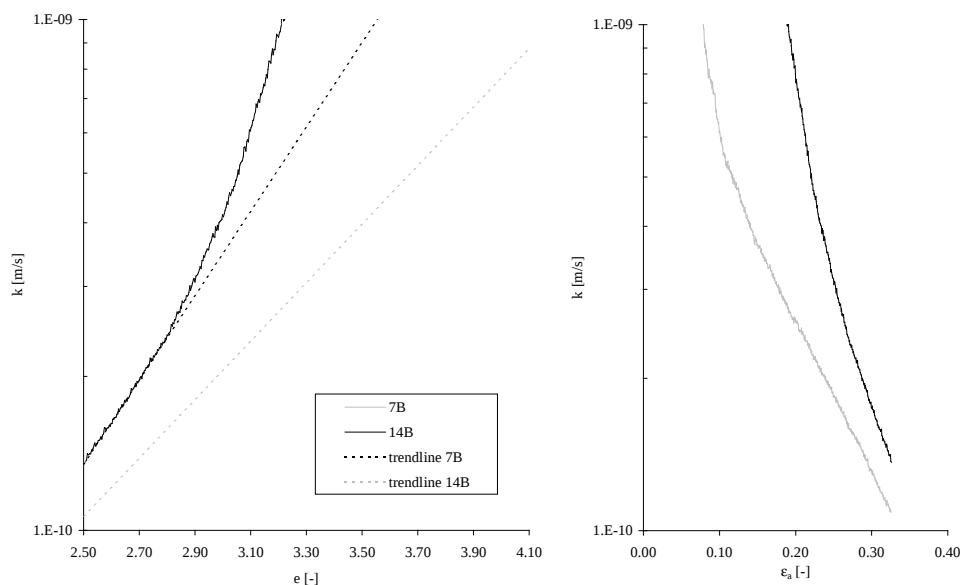
	a	b
	$\times 10^{-12}$ [m/s]	[-]
7B	3.98	1.32
14B	1.17	1.90

Door de doorlatendheid uit te zetten tegen de opgetreden axiale rek kan door extrapolatie de doorlatendheid worden bepaald bij het begin van de proef (k_0). De op deze wijze bepaalde doorlatendheden zijn voor monster 7B en 14B gelijk aan respectievelijk 1.0×10^{-9} [m/s] en 3.4×10^{-9} [m/s].

Een vaak gebruikte relatie is die tussen de verandering van het poriëngetal en de verticale doorlatendheid:

$$\log\left(\frac{k}{k_0}\right) = \frac{\Delta e}{c_k}$$

De eerder gebruikte exponentiële relatie is omgeschreven en c_k is bepaald en bedraagt voor monster 7B en 14B respectievelijk 1.74 en 1.21.



Figuur 5.4 Verticale doorlatendheid – poriëngetal en axiale rek

Uit de proefresultaten is ook de samendrukbaarheid van het korrelskelet te bepalen uit:

$$de_v = m_v ds'$$

waarin:

$\delta\epsilon_v$	=	incrementele volumieke rek	[-]
m_v	=	Samendrukbaarheid	[m ² /kN]
$\delta\sigma_v'$	=	incrementele effectieve spanning	[kN/m ²]

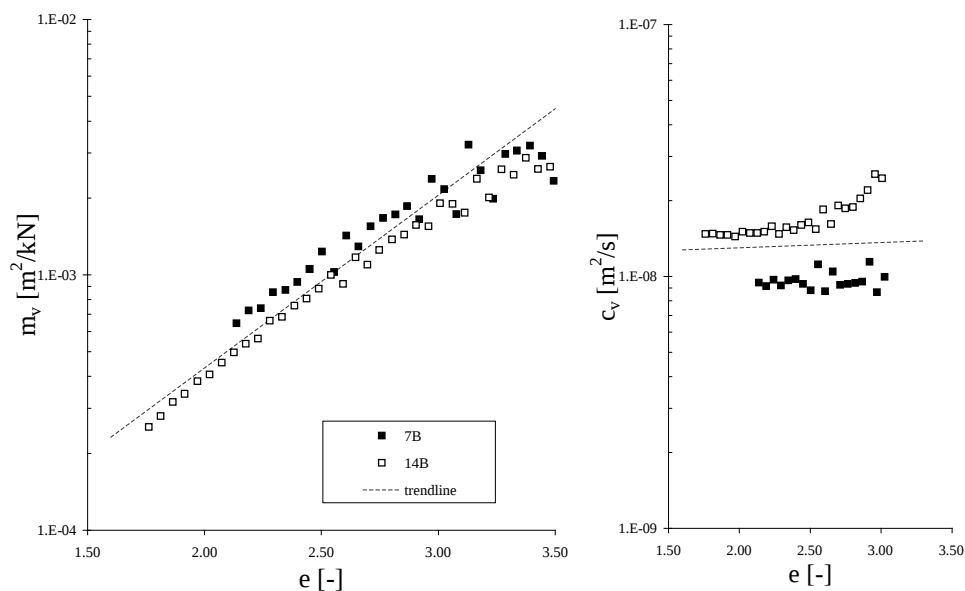
Per rekincrement van 1% is de incrementele spanning berekend. De hieruit afgeleid samendrukbaarheid van de organische klei is in Figuur 5.5 weergegeven. Hierbij is alleen de data behorend bij grote rekken ($\epsilon_a > 12\%$) gebruikt zodat het materiaal normaalgeconsolideerd reageert.

Ook is de consolidatiecoëfficiënt berekend uit:

$$c_v = \frac{k}{m_v g_w}$$

waarin:

c_v	=	consolidatiecoëfficiënt	[m ² /s]
m_v	=	samendrukbaarheid	[m ² /kN]
k	=	doorlatendheid	[m/s]
γ_w	=	volumiek gewicht water	[kN/m ³]



Figuur 5.5 Samendrukbaarheid en consolidatiecoëfficiënt tegen het poriëngetal

Zowel de samendrukbaarheid als de consolidatiecoëfficiënt zijn afhankelijk van het poriëngetal. Op basis van beide proeven zijn de volgende correlaties bepaald:

$$m_v = 1.91 \times 10^{-5} \exp(1.56e) \quad [m^2 / kN]$$

$$c_v = 1.18 \times 10^{-8} \exp(0.05e) \quad [m^2 / s]$$

De correlaties zijn ingetekend in Figuur 5.5. Omdat de doorlatendheid ongeveer 10 maal sneller afneemt dan de samendrukbaarheid, blijft de consolidatiecoëfficiënt nagenoeg gelijk.

5.2.5 Conclusies en bevindingen beproeving organische klei in K_0 -oedometer CRS

De K_0 -oedometer CRS proef levert zeer veel interessante resultaten op. Uit de proeven kan het worden geconcludeerd:

- de organische klei heeft een stijfheid die logaritmisch met de gemiddelde effectieve isotrope spanning verloopt. In het v - $\ln p$ diagram zijn 2 takken te onderscheiden: voor en na de grensspanning
- de waargenomen grensspanning is gelijk aan ongeveer tweemaal de terreinspanning;
- de K_0 van normaalgeconsolideerde organische klei is hoger dan verwacht. De vaak gebruikte Jaky relatie, $1 - \sin \phi'$, lijkt niet bruikbaar als uitgegaan wordt van een vermoedelijk zeer hoge waarde van ϕ' uit de triaxiaalproef;
- vooral de doorlatendheid en samendrukbaarheid van de organische klei afhankelijk zijn van het poriëngetal. De consolidatiecoëfficiënt van de beproefde klei is voor de uitgevoerde proeven niet sterk afhankelijk van het poriëngetal. Voor het verband tussen de genoemde parameters en het poriëngetal zijn correlaties afgeleid.

5.3 Triaxiaalproeven

5.3.1 Inleiding

Op de organische klei van de Oostvaardersplassen site is een serie triaxiaalproeven uitgevoerd met een state-of-the art triaxiaalopstelling. Zowel de opstelling als de proefomstandigheden wijken af van wat standaard is in de adviespraktijk. Enkele bijzonderheden worden in deze paragraaf beschreven.

Gladde eindvlakken

Bekend is dat in een ‘standaard’ triaxiaalproef een relatief grote schuifspanning langs de poreuze stenen aan onder- en bovenzijde van het monster kan optreden door wrijving. Om de invloed van deze schuifspanning op het gedrag van het monster te beperken wordt een grote hoogte/diameter verhouding (H/D) aangehouden, normaliter tussen 1.8 en 2.2. Vervolgens wordt aangenomen dat de grootheden die worden gemeten (spanningen, rekken) representatief zijn voor wat er in het hart van het monster gebeurt. Feitelijk wordt een uniforme spannings- en rektoestand aangenomen. Om de wrijving langs de eindvlakken te reduceren, zijn gesmeerde eindvlakken toegepast.

In een relatief hoog monster kan er, als het materiaal softening vertoont, lokalisatie van rekken optreden (ontwikkeling schuifvlak) waardoor ‘overall’ gemeten rekken niet meer representatief zijn voor de zone waarin bezwijken optreedt. Deze wijze van beproeven is wel praktisch maar niet wenselijk, zeker niet voor fundamenteel onderzoek. Daarom is in dit onderzoek de H/D verhouding verkleind naar 1 om de ontwikkeling van schuifvlakken te verhinderen zodat het monster als een element vervormt. Dit is belangrijk in relatie tot constitutieve modellering.

Drainage en poriëndrukmetingen

Omdat de eindvlakken gesmeerd zijn kan er niet via gangbare poreuze stenen aan boven- en onderzijde van het monster worden gedraineerd en kunnen dus de water(over)spanningen niet worden gemeten via deze poreuze stenen. Daarom moet het monster tijdens de consolidatie radiaal worden gedraineerd. Hierbij wordt gebruik gemaakt van om het monster gewikkelde side drains. Deze side drains staan in verbinding met keramische poreuze ringen in boven- en ondervoet, aan respectievelijk boven- en onderzijde van de gesmeerde eindvlakken. Omdat de afstromingsrichting van het poriënwater in het monster niet gelijk is aan de vervormingsrichting tijdens consolidatie, kan, bij een relatief grote wateroverspanning, sterke niet uniformiteit optreden. Daarom moet er voldoende tijd worden genomen voor consolidatie. In eerste instantie vond drainage plaats via ringen van gelijkmatige glasparels in boven- en ondervoet. Deze ringen zijn later vervangen door ringen van keramische materiaal. Deze ringen zijn speciaal op maat gezaagd door medewerkers van de TU Delft, faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen.

De poriëndrukmetingen vinden plaats via een naaldvormig poreuze steentje in de hartlijn van het monster, bij radiale drainage de meest kritische plaats om de poriëndrukken te meten. Deze steen staat via een stalen drainageleiding in verbinding met een drukopnemer. Gekozen is voor een stalen leiding om een relatief stijf meetsysteem te creëren.

Apparatuurfouten

Bij het meten van het grondgedrag bij lage spanningsniveaus kunnen het triaxiaalmembraan en de side drains een belangrijke foutenbron zijn bij het bepalen van het juiste spanningsniveau. Uit eerdere onderzoeken is gebleken dat onder een hoek van 35° (ten opzichte van de horizontaal) geplaatste side drains een verwaarloosbare bijdrage hebben aan de gemeten deviator in de ongedraineerde afschuiffase [Greeuw et al. , 2000]. In dit onderzoek zijn de side drains onder een hoek van 40° aangebracht om rekening te houden met rotatie van de side drains tijdens consolidatie.

Om de invloed van het triaxiaalmembraan te beperken zijn zeer dunne membranen gebruikt (0.14 mm), gemaakt door de sectie Geotechniek van de Technische Universiteit Delft. Daardoor is de verwachte bijdrage aan de deviator- en isotrope spanning relatief klein. Voor de consolidatiefase waarin axiale- en volumieke rekken optreden wordt gecorrigeerd volgens een methode waarbij rekening gehouden wordt met zowel axiale- als volumieke rekken [Duncan and Seed, 1967]. Hierbij wordt het membraan beschouwd als lineair elastische cilinder. Voor de afschuiffase vindt correctie plaats volgens een methode gebaseerd op schuifproeven op monsters gemaakt van gelatine [Greeuw et al., 2000]. Hierbij wordt de bijdrage van het membraan tijdens de consolidatiefase opgeteld (superpositie).

Meten kleine rekken

In de opstelling kunnen de verplaatsingen op verschillende manieren worden gemeten: op ‘externe’ wijze met de stappenmotor en een verplaatsingsopnemer en op lokale wijze door Hall effect opnemers (HET’s) gelijkend op het triaxiaalmembraan. De stappenmotor, die de plunjer aandrijft, legt in stapjes van 1 μm , een verplaatsing op. Door het aantal stappen te tellen kan de verplaatsing worden bepaald. De externe verplaatsingsopnemer bevindt zich in de voet van de triaxiaalopstelling en is verbonden met de plunjer. Onstijfheden tussen monster en plunjer (bedding- en seatingsfouten) kunnen een grote invloed hebben op het bepalen van de rek bij kleine vervormingen en beïnvloeden daarmee de stijfheidsbepaling. Daarom is ook de rek lokaal gemeten, met op het triaxiaalmembraan gelijkende Hall Effect Transducer (HET). De radiale rek is gemeten met een op het monster gelijkende scharnierende constructie met aan de niet scharnierende zijde een HET. In enkele proeven is dit signaal gebruikt om met behulp van de celdruk de radiale rekken tijdens consolidatie zo gering mogelijk te houden zodat K_0 wordt geconsolideerd. Hierbij wordt aangenomen dat deze rekmeting representatief is voor de radiale rek in het monster.

Benderelementen

In de onder- en bovenvoet zijn benderelementen aangebracht. Vanuit de voet wordt een schuifgolfje door het benderelement opgewekt waarna het schuifgolfje zich voortplant door het monster. Met het benderelement in de bovenvoet wordt de schuifgolf gedetecteerd en kan de looptijd van de golf worden bepaald. Met de bekende afstand tussen de benderelementen kan de voortplantingssnelheid worden berekend. De voortplantingssnelheid van de schuifgolf is een functie van de dichtheid en de schuifmodulus van de grond. Er geldt:

$$G_{vh} = \rho v_s^2$$

waarin:

G_{vh}	=	schuifmodulus	[kPa]
ρ	=	(natte) dichtheid grond	[kg/m ³]
v_s	=	schuifgolfsnelheid	[m/s]

De dichtheid van het monster kan ten tijde van de proefneming worden geschat op basis van de dichtheid voor de proef en de opgetreden rekken. Met dit meetsysteem kan tijdens de proef, dus bij verschillende rekken en spanningen, de schuifmodulus worden bepaald. Het betreft de schuifmodulus G_{vh} (v = verticale voortplanting schuifgolf, h = horizontale uitslag bender).

De ontwikkelingen rond het inbouwen van benderelementen in de onder- en bovenvoet van de triaxiaalopstelling is in een GD-rapport beschreven [Greeuw, 1999].

Beperkingen van de uitgevoerde proevenserie

Niet alle triaxiaalmonsters zijn uitgerust met bovenbeschreven lokale rekopnemers. Bij hoge spanningen (100 kPa) treden grote rekken op ($\epsilon_a = 0.25$ -) waardoor lokale rekmeting moeilijk te realiseren is vanwege het geringe meetbereik (7 mm) van de HET's. De afstand tussen de bevestigingspunten van de HET's kan niet onbeperkt worden verkleind.

Ook het signaal van de externe verplaatsingsopnemer is niet altijd bruikbaar geweest. Waarschijnlijk is het gebruik van siliconenolie als celvloeistof hier debet aan. Uit meetdata is gebleken dat er weinig verschil is tussen de verplaatsing gemeten met de verplaatsingsopnemer en de stappenmotor. Het signaal van de stappen motor is dus goed bruikbaar.

De monsters zijn niet allen K_0 -rekgestuurd geconsolideerd. Gebleken is dat op deze wijze consolideren een grote kans op falen heeft. Enkele oorzaken hiervan zijn:

- het lijmen van de klem van de radiale rekopnemer op het membraan is erg lastig. De klem moet zeer goed ontvet zijn. Ook de lijmsort is speciaal gekozen om te kunnen gebruiken in combinatie met siliconenolie.
- gedurende de vervorming kan het membraan de neiging hebben om te plooiën. Dit kan de meting van de radiale rek verstoren.

De monsters die niet K_0 zijn geconsolideerd bij constante reksnelheid, zijn spanningsgestuurd anisotroop geconsolideerd met een vooraf ingesteld verhouding tussen de horizontale en verticale totaalspanning. Door het spanningsniveau relatief langzaam te verhogen heeft het monster zich kunnen aanpassen. In de geslaagde K_0 -rekgestuurde triaxiaalproeven is de gradiënt van K_0 met ϵ_a waargenomen. Deze geleidelijke verandering van spanning is in de spanningsgestuurde consolidatiefasen gesimuleerd.

5.3.2 Monsters

In het monsternummer is extra informatie verwerkt omtrent de wijze van consolidatie en het effectief verticaal consolidatieniveau. Ook is aangegeven of het een gereconstitueerd monster betreft. Het laatste cijfer in het monsternummer is het volgnummer in geval van duplo proeven. Zie 5.2.3.

Monster	boring	diepte			γ_n^{*1}	γ_n^{boven}	γ_n^{onder}	γ_n	w^{*1}	h_{ini}
[-]	[-]	[MV-m]			[kN/m ³]	[kN/m ³]	[kN/m ³]	[kN/m ³]	[-]	[mm]
CK ₀ U-15(1)	B2	2.84	-	2.91	12.3	12.4	12.2	12.1	1.88	71.63
CK ₀ U-30(1)	B3	2.65	-	2.72	-	-	12.3	12.0	1.95	71.85
CK ₀ U-30(2)	B2	2.44	-	2.50	12.5	12.3	12.6	12.1	1.72	69.87
CAU-100(1)	B2	2.94	-	3.01	12.1	12.2	12.0	11.8	2.05	81.45
CK ₀ U-15(2)	B3	2.81	-	2.88	12.3	12.4	12.3	12.0	1.98	71.13
CAU-55	B2	2.74	-	2.81	12.2	12.1	12.4	12.2	2.02	73.23
CAU-100(2)	B3	2.94	-	3.01	12.7	12.3	13.1	12.5	1.51	81.87
CAU-100(3)	B2	3.03	-	3.10	12.7	12.5	12.9	13.0	1.44	80.28
R-CK ₀ U-15	-	gereconstitueerd			12.2	12.3	12.1	11.5	2.00	73.25
R-CK ₀ U-30	-	gereconstitueerd			12.4	12.3	12.4	12.0	1.78	78.63
R-CAU-30	-	gereconstitueerd			12.4	12.6	12.3	12.1	1.85	77.93

*1) Gemiddelde waarde bepaald met volume steekring aan boven- en onderzijde monster

*2) Alleen onderzijde monster

*boven/onder) volumiek gewicht bepaald met volume steekring aan boven- resp. onderzijde monster

Tabel 5-3 Data monsters triaxiaalproeven

Uit Tabel 5-3 volgt dat het volumiek gewicht van de onderzochte monsters ligt tussen 11.8 en 13.0 kN/m³. Ook lijkt het gemiddeld volumiek gewicht bepaald met de kleine volume steekring systematisch hoger te zijn dan het volumiek gewicht bepaald na meting van de massa, hoogte en diameter van het monster. Uit 8 bepalingen van het volumiek gewicht met beide methodes op OVP klei blijkt dat het volumiek gewicht bepaald met de volume steekringen gemiddeld 0.2 kN/m³ hoger is. De standaarddeviatie van de afwijking is gelijk aan 0.4 kN/m³. Er dus slechts een kleine systematische afwijking en een wat grotere toevallige fout. Mogelijke verwachte oorzaken van de afwijkingen zijn: het verschil in γ_n door de variabiliteit van de grond, de onnauwkeurigheid van de diameterbepaling van het triaxiaalmonster en het verschil in verzadigingsgraad van het verkneede monster in de kleine volume steekring en het triaxiaalmonster.

Uit de tabel volgt dat het verschil tussen γ_n bepaald met de volume steekring aan boven- en onderzijde van het monster niet heel erg groot is. Monster CAU-100(2) vormt hierop een uitzondering.

5.3.3 Procedure

De aangehouden procedure kan als volgt worden omschreven:

Gladde eindvlakken

Voorafgaand aan het trimmen en inbouwen van het monster zijn de eindvlakken van een vetlaag voorzien waarna een rond rubberen schijfje met een dikte van 0.15 mm is aangebracht. Vervolgens heeft voorbelasting van de eindvlakken plaatsgevonden voor het verkrijgen van een gelijkmatige dikte van de vetlaag.

Trimmen monster

Het monster heeft, door monsterneming met het Begemann steekapparaat, bij aanvang een geschikte diameter van ongeveer 63 mm. Nadat het monster zich in de klimaatstaat heeft kunnen aanpassen aan de temperatuur, is het monster op hoogte getrimd gebruik makend van een trimzaag en een statief. De monsterhoogte voor de proef bij de lage spanningsniveaus bedroeg ongeveer 72 mm. Vanwege de hoge verwachte rekken zijn de initiële hoogtes van de gereconstitueerde monsters en de monsters voor consolidatie bij het hoogste spanningsniveau groter, zodat de H/D verhouding bij afschuiven ongeveer 1 bedraagt. Zie Tabel 5-3. Na het trimmen is de hoogte en diameter op 3 plaatsen gemeten. De grootst gemeten hoek tussen de eindvlakken bedroeg gemiddeld 0.6° (standaarddeviatie 0.54°). Met de afsnijdsels van boven- en onderzijde is een kleine volumesteekring gevuld. Hiermee is het volumieke gewicht en watergehalte bepaald. Zie Tabel 5-3.

Installatie monster en lokale rekopnemers

Na het trimmen van het monster zijn de side drains bevochtigd en aangebracht op het monster onder een hoek van 40° met de horizontaal. Vervolgens is het membraan aangebracht met een membraanhouders, is het monster in de cel geïnstalleerd en zijn de lokale rekopnemers op het membraan gelijmd.

Instellen initiële spanning en verzadiging

Uit eerder uitgevoerde metingen bleek dat monsters gestoken op de Oostvaardersplassen site een zuigspanning van ongeveer 5 kPa bezitten. Dit betekent dat de effectieve isotrope spanning gelijk is aan 5 kPa. Na het inbouwen van het monster wordt de lucht tussen het monster en het membraan grotendeels verwijderd door een geringe hoeveelheid ontlucht water langs het monster te laten stromen. In theorie zou het monster water kunnen opnemen waardoor de zuigspanning zou kunnen afnemen. Dit heeft zwel en mogelijk structuurverlies tot gevolg. Daarom is deze periode relatief kort (enkele minuten) en is na het doorspoelen een zuigspanning tussen het monster en membraan van 5 kPa aangebracht. Uiteindelijk wordt in de verzadigingsfase een effectieve spanning van 5 kPa

aangebracht. De monsters verzadigen gedurende een periode van minimaal 16 uur bij een backpressure van 200 kPa.

Anisotrope consolidatie

Voor consolidatie zijn 2 procedures gevolgd:

- **A** rekgestuurde consolidatie: het monster wordt axiaal vervormd met constante reksnelheid. Tegelijkertijd wordt de celdruk aangepast zodanig dat de radiale rek gelijk is aan 0;
- **B** spanningsgestuurde consolidatie: de celdruk wordt met een ingestelde snelheid verhoogd. Tegelijkertijd wordt de axiale kracht zodanig aangepast dat de verhouding van horizontale - en verticale **totaal**spanning (A) constant blijft. De waarde van A is gedurende de consolidatiefase verkleind conform de metingen uit proeven uitgevoerd met procedure A.

Een ongedraineerde triaxiaalproef waarbij procedure A is aangehouden kan verkort worden weergegeven als CK₀U. Procedure B leidt tot een CAU proef.

De grootte van de op te leggen axiale reksnelheid in procedure A is afhankelijk van het materiaal. Voor een keuze van een geschikte snelheid zijn de K₀ CRS proefresultaten gebruikt. De drainagelengtes in beide proeven bedragen respectievelijk 2 cm en 3.5 cm. Voor een isotroop materiaal zou dit betekenen dat de reksnelheid ongeveer 3x zo klein moet zijn om evenveel wateroverspanning te creëren. Dit komt overeen met een snelheid van 6.7×10^{-7} [1/s] (0.2 %/uur). De gehanteerde snelheden in de consolidatiefasen hebben deze axiale reksnelheid niet overschreden.

monster	σ_{vc}^{*1}	σ_{vc}^{*2}
[-]	[kPa]	[kPa]
CK ₀ U-15(1)	15	15
CK ₀ U-30(1)	30	28
CK ₀ U-30(2)	30	-
CAU-100(1)	100	-
CK ₀ U-15(2)	15	15
CAU-55	30	54
CAU-100(2)	100	89
CAU-100(3)	100	96
R-CK ₀ U-15	15	12
R-CK ₀ U-30	30	-
R-CAU-30	30	26

*1) de te bereiken effectieve verticale spanning

*2) bereikte effectieve verticale consolidatiespanning

Tabel 5-4 Proefgegevens triaxiaalproeven

In de spanningsgestuurde procedure is het spanningsverloop, zoals dit in een rekgestuurde consolidatie is waargenomen, gesimuleerd. Het heeft, gezien de reksnelheidsafhankelijkheid van het materiaal, de voorkeur om rekgestuurd te consolideren. Deze procedure kent een hoge faalkans. Daarom is de procedure B bedacht. In Tabel 5-4 is per monsternummer het gewenste – en het bereikte effectief verticaal spanningsniveau tijdens consolidatie weergegeven. Het verschil tussen beide spanningen wordt voornamelijk bepaald door de keuze van het moment van afschuiven en membraancorrecties.

Ongedraineerd afschuiven

Bij het gewenste spanningsniveau zijn de drainagekranen gesloten en zijn de monsters zonder dat drainage mogelijk is afgeschoven bij een axiale reksnelheid van ongeveer 1.4×10^{-6} [1/s] (0.5%/uur) tot een axiale rek van 0.2 (20%). Deze reksnelheid wordt voldoende laag geacht voor volledige vereffening van gradiënten in de wateroverspanningen in het monster.

Einde proef

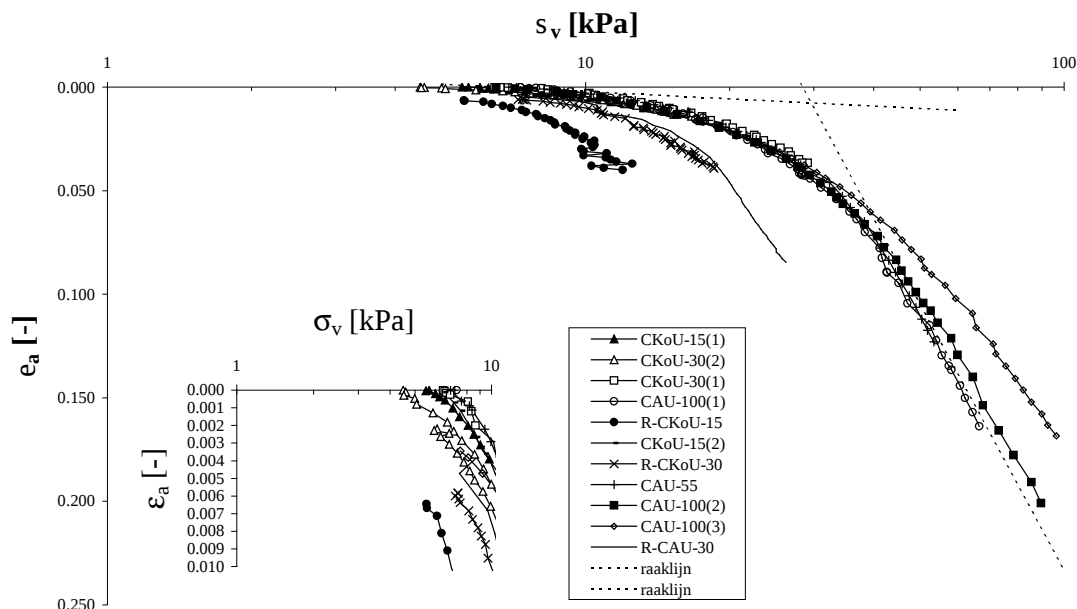
Bij het bereiken van een axiale rek van 0.2 [-] zijn de monsters ontlast, gefotografeerd en zijn de hoogte en diameter gemeten. Het monster is vervolgens in 8 taartpunten gesneden. 4 van deze taartpunten zijn in 5 delen gesplitst voor bepaling van het watergehalte en soortelijk gewicht. Op deze wijze kan een beeld van het verloop van het watergehalte over de hoogte van het monster worden verkregen.

De proefresultaten van de anisotrope consolidatiefase en de ongedraineerde afschuiffase zijn separaat beschreven.

5.3.4 Resultaten triaxiaalproeven; anisotrope consolidatie

Verloop e_a - s_v

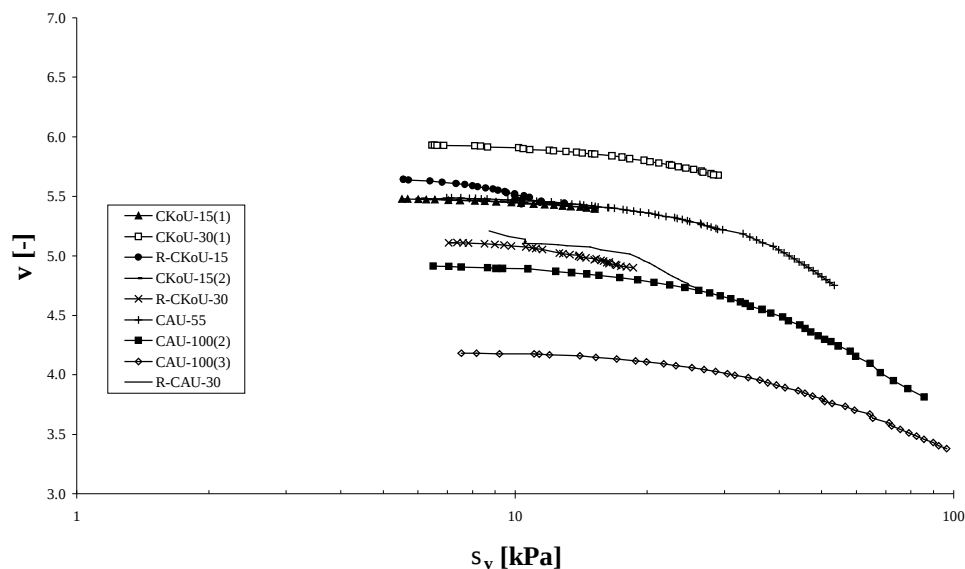
In Figuur 5.6 is het verloop van de axiale rek tegen de effectieve verticale spanning uitgezet. Uit de figuur volgt dat de verticale spanning gedurende de vervorming oploopt. Bij kleine rekken loopt de logaritmisches uitgezette spanning sneller op dan bij grote rekken. Ook in deze monsters is een grensspanning aanwezig; onder de grensspanning een relatief stijf gedrag, boven de grensspanning een relatief slap gedrag. Slechts 3 monsters zijn duidelijk voorbij de grensspanning beproefd. Met de meetdata is de grensspanning bepaald door raaklijnen aan het begin en einde van de curven te trekken. Zie Figuur 5.6. Hieruit volgt een grensspanning van 29.8 kPa; ongeveer 20% lager als die waargenomen in de K_0 CRS proeven. Dit terwijl de triaxiaalmonsters van een iets grotere diepte komen. De grensspanning is een functie van de opgelegde reksnelheid; naarmate de reksnelheid lager is, is de grensspanning lager. De, tijdens de uitgevoerde proeven, opgetreden axiale reksnelheid ligt tussen de 1.33×10^{-7} en 4.75×10^{-7} [1/s]. Dit is 4 tot 14 maal zo laag als de aangehouden reksnelheid in de K_0 -CRS proef. De reksnelheid kan een gedeelte van het verschil verklaren. Een andere mogelijke oorzaak is voorbelasting van hoger gelegen kleimonsters als gevolg van desiccatie door scheurvorming in de ondergrond.



Figuur 5.6 e_a tegen s_v triaxiaalproeven

De gereconstitueerde monsters laten bij eenzelfde spanning relatief veel rek zien en zijn dus minder stijf dan natuurlijke monsters. Dit wordt veroorzaakt door de verandering van structuur. De grensspanning van de gereconstitueerde monsters R-CK₀U-15 en R-CK₀U-30 kan niet worden bepaald omdat de opgetreden rekken tijdens de consolidatie te klein zijn; het monster is nog in overgeconsolideerde toestand.

Opvallend is de tijdens de verzadigingsfase waargenomen axiale rek van de gereconstitueerde monsters. In die fase wordt het monster verzadigd bij een backpressure van 200 kPa en een effectieve isotrope spanning van ongeveer 5 kPa. Zie detail Figuur 5.6. Dit effectief spanningsniveau is lager dan het spanningsniveau opgelegd tijdens de fabricage van de gereconstitueerde monsters. Gedurende het aanbrengen van de backpressure zijn ook radiale rekken waargenomen. De grootte van de radiale rekken is niet nauwkeurig genoeg gemeten. Alleen het teken van de rekken is bekend. Tijdens (relatief snel) aanbrengen van de backpressure is waargenomen dat de diameter van de reconstitueerde monsters afneemt. Dit is logisch; de gasfase zal bij het aanbrengen van de backpressure worden gecomprimeerd alvorens te worden opgelost in het poriënwater. Dit geeft een radiale rek. Vervolgens kan het monster zich aan de nieuwe spanningstoestand aanpassen en verzadigen. De simultaan optredende processen, consolidatie (volumeverandering korrelskelet) en verzadiging, bepalen de volumieke rek. Eén van de 2 gereconstitueerde monsters zwol in die fase. Het is erg moeilijk om de verhouding tussen het volume water benodigd voor verzadiging en voor consolidatie (volumeverandering korrelskelet) te bepalen. In een latere fase zal met behulp van de stijfheid van de cel achterhaald worden hoeveel gas in en om het monster aanwezig is geweest. Geschat wordt dat het gaat om enkele cm³/s.



Figuur 5.7 Verloop $v - s_v$

In Figuur 5.7 is het verloop van specifiek volume tegen de effectieve verticale spanning gepresenteerd. Het specifiek volume is bepaald op basis van het gemiddeld watergehalte na de proef, de opgetreden rekken en de na de proef bepaalde soortelijke massa. Niet van alle monsters is de soortelijke massa bepaald. In dat geval is gebruik gemaakt van eerder afgeleide correlaties. Wat in de figuur naar voren komt is de zeer hoge waarde van het initieel specifiek volume. Afwijkingen in het initieel specifiek volume bedragen maximaal 10% ten opzichte van de gemiddelde waarde.

Kwaliteit triaxiaalmonsters

De relatieve verandering van het poriëngetal ($\Delta e/e_0$) die nodig is voor het herbellen (1-D) tot de terreinspanning (ongeveer 20 kPa) kan gebruikt worden als een maat voor de monsterkwaliteit [Lo Presti, 1999]. Bij verstoring verliest het monster structuur waardoor de stijfheid kleiner wordt; de optredende rekken bij herbellen zullen dan groter zijn.

De verhouding $\Delta e/e_0$ is voor een aantal monsters bepaald en weergegeven in Tabel 5-5. Hierbij is gebruik gemaakt van de soortelijke massa bepalingen na de proef en het gemiddelde watergehalte van boven- en onderzijde van het monster. Enkele monsters zijn voortijdig bezweken. Van deze monsters is geen soortelijke massa bepaald; de soortelijke massa is geschat met de eerder afgeleide correlaties.

Bij de beschouwing is aangenomen dat de axiale rek tijdens consolidatie gelijk is aan de volumieke rek. Dit is een redelijk goede aanname (Figuur 5.8).

Niet altijd is tijdens consolidatie van de natuurlijke monsters een effectieve verticale spanning van 20 kPa bereikt. In dat geval is de maximaal bereikte spanning gebruikt. Zie Tabel 5-5. Voor een beschouwing van de kwaliteit van de gereconstitueerde monsters is de rek beschouwd bij de, tijdens de reconstitutieprocedure opgelegde, spanning.

monster	w^{*1}	G_s	e_0	ε_a	σ'_v	$\Delta e/e_0$
[-]	[-]	[-]	[-]	$\times 10^{-2}$ [-]	[kPa]	$\times 10^{-2}$ [-]
CK ₀ U-15(1)	1.88	2.30	4.32	1.19	15	1.47
CK ₀ U-30(1)	1.95	2.20	4.29	1.96	20	2.42
CK ₀ U-30(2)	1.72	2.33 ^{*2}	4.00	1.40	17	1.75
CAU-100(1)	2.05	2.26 ^{*2}	4.63	2.33	21	2.83
CK ₀ U-15(2)	1.98	2.29	4.53	1.46	15	1.78
CAU-55	2.02	2.32	4.69	2.14	21	2.60
CAU-100(2)	1.51	2.36	3.56	2.33	21	2.98
CAU-100(3)	1.44	2.43	3.50	2.15	20	2.31
R-CK ₀ U-15	2.00	2.30	4.60	2.40	9.9	2.92

*1) Gemiddelde waarde bepaald met volume steekring aan boven- en onderzijde monster

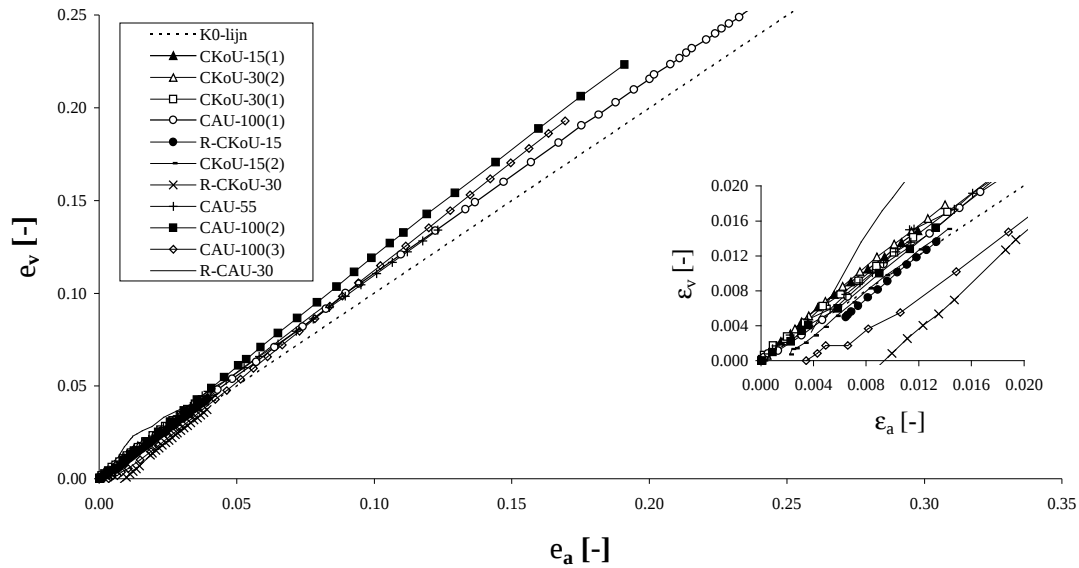
*2) met correlaties bepaald

Tabel 5-5 Monsterkwaliteit triaxiaalmonsters

Uit de resultaten volgt dat $\Delta e/e_0$ gelijk is aan ongeveer 2.5×10^{-2} voor herbellen naar de terreinspanning van ongeveer 20 kPa. Met deze waarden verdienen de monsters het predikaat “excellent” [Lo Presti, 1999] en is de kwaliteit beter dan de K₀ CRS monsters. Verscheidene monsters zijn niet bij 20 kPa geconsolideerd maar bij 15 kPa.

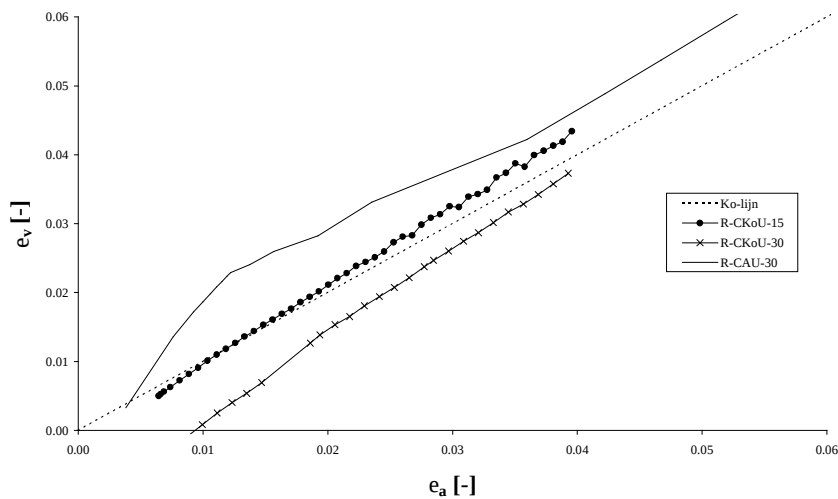
Verloop $\varepsilon_a - \varepsilon_v$

In Figuur 5.8 is de waargenomen axiale rek tegen de volumieke rek weergegeven. Een perfect K₀ geconsolideerd monster ondergaat tijdens consolidatie geen radiale rekken. In dat geval is ε_a gelijk aan ε_v . Dit verband is in Figuur 5.8 weergegeven als K₀-lijn. Het is duidelijk dat tijdens de proeven op de natuurlijke monsters, ondanks de soms spanningsgestuurde consolidatiefase met constante verhouding van verticale- en horizontale totaalspanning, de K₀-lijn redelijk goed gevolgd wordt. De helling van de lijn wijkt wel systematisch af. De volumieke rek is steeds groter dan de axiale rek. Radiaal wordt het monster dus kleiner. Het maakt hierbij niet uit of er sprake is van rekgestuurde – of spanningsgestuurde consolidatie. Blijkbaar is de complexe sturing op de radiale rekopnemer niet nodig als K₀ en het verloop van K₀ bekend is uit bijvoorbeeld enkele goed uitgevoerde K₀ CRS proeven. Het resultaat is niet verwonderlijk; bij de spanningsgestuurde consolidatie is het natuurlijk spanningsgedrag als reactie op de opgelegde rekken en reksnelheden gesimuleerd. Het systematische verschil tussen ε_a en ε_v vormt nog onderwerp van studie.

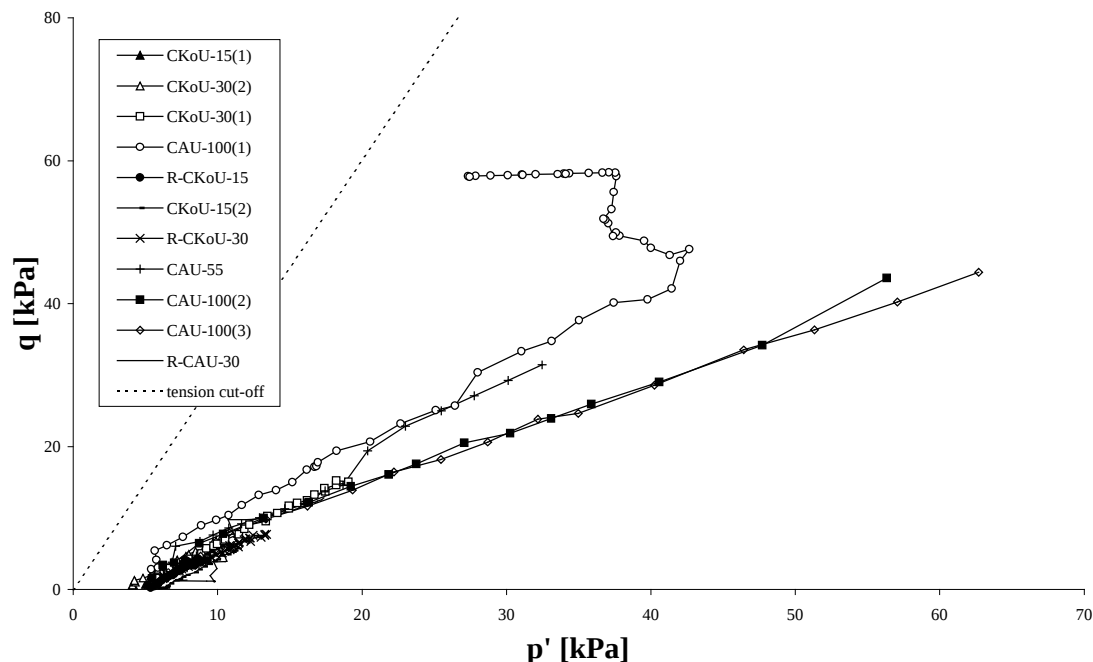


Figuur 5.8 $e_a - e_v$ natuurlijke monsters

In Figuur 5.9 is een gelijksoortig verloop voor de gereconstitueerde monsters weergegeven. Eén van de 2 monsters volgt de K_0 -lijn beter dan het andere. Laatst genoemde monster heeft tijdens de verzadigingsfase kunnen zwellen. Dit is voornamelijk radiaal zwel geweest omdat de gemeten axiale rek positief is (afname monsterhoogte). Ook bij de beproeving van deze monsters is de volumieke rek systematisch groter dan de axiale rek.



Figuur 5.9 $e_a - e_v$ gereconstitueerde monsters

Verloop effectief spanningspad q - p' 

Figuur 5.10 Effectief spanningspad (ESP) tijdens consolidatie

In Figuur 5.10 is het ESP weergegeven. Hierbij is gebruik gemaakt van de Cambridge parameters voor de spanningen:

$$q = s_a' - s_r' \quad \text{en} \quad p' = \frac{s_a' + 2s_r'}{3}$$

waarin:

q	=	deviatorspanning	[kPa]
p'	=	effectieve isotrope spanning	[kPa]
s_a'	=	effectieve axiale spanning	[kPa]
s_r'	=	effectieve radiale spanning	[kPa]

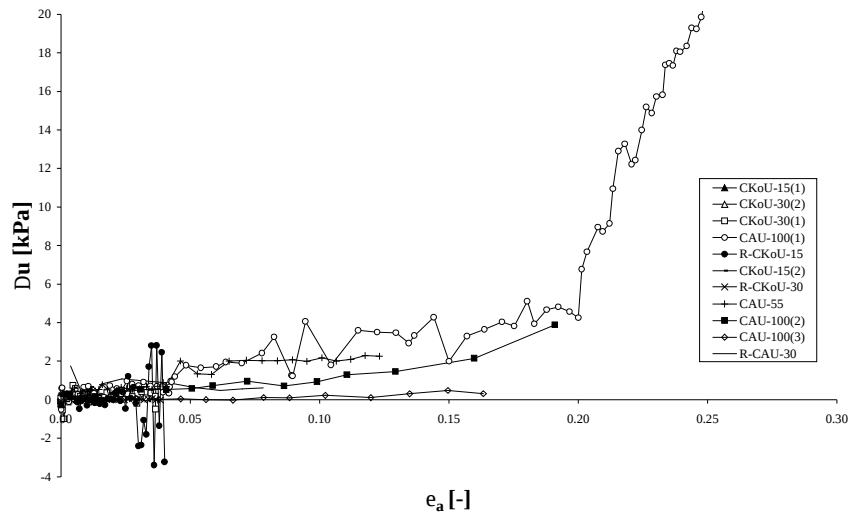
De gevolgde procedure leidt ertoe dat belast wordt vanaf een spanningsniveau q , p' van respectievelijk ongeveer 3 kPa en 6 kPa. Bij rekgestuurd consolideren kan het ESP worden beschouwd als ware het een vrijheidsgraad, materiaalafhankelijk. Tussen proefresultaten van verschillende monsters wordt dan veel spreiding in de ligging van ESP verwacht. Bij spanningsgestuurd consolideren wordt, in theorie, het totaalspanningspad opgelegd en vormen de rekken de vrijheidsgraad. Spreiding in de eigenschappen van de monsters geeft dan spreiding in de waargenomen rekken.

Ondanks de spanningssturing is er toch spreiding in de ligging van de ESP. Dit wordt verklaard vanuit de onzekerheid in A_b , de doorsnede van het monster en de opbouw van wateroverspanning gedurende consolidatie. Dit treedt met name op bij het aanbrengen van een kleine deviatorische belasting (het stapsgewijs verlagen van K) en bij belasten voorbij de grensspanning.

Eén van de monsters bouwde tijdens consolidatie zoveel waterspanning op dat de spanningstoestand zeer dicht bij de omhullende terecht kwam. Zie Figuur 5.10 en Figuur 5.11.

Verloop e_a - D_u

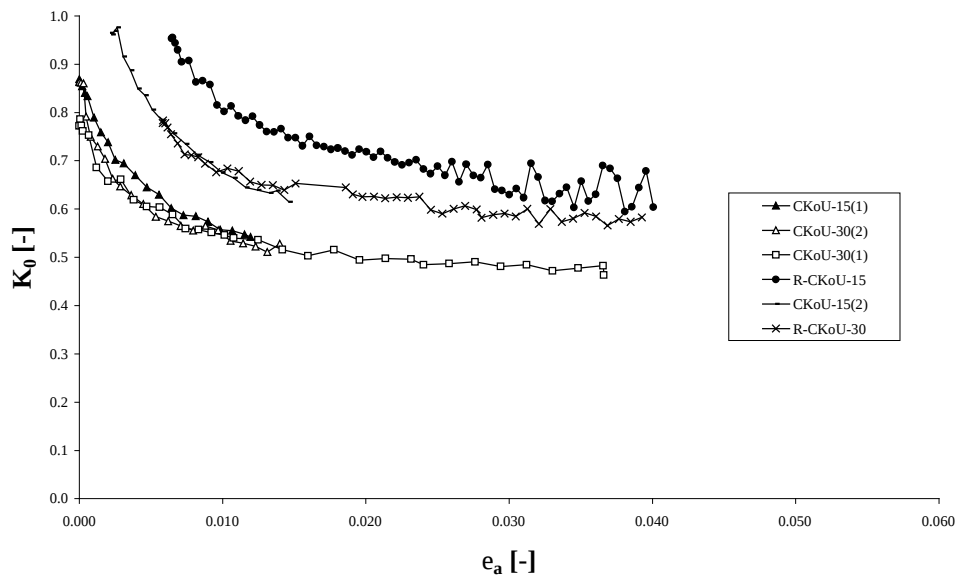
De tijdens de proef waargenomen opbouw van de wateroverspanning is gepresenteerd in Figuur 5.11. Bij grotere rekken ontstaat er een duidelijke opbouw van wateroverspanningen. Zie Figuur 5.10. Deze wateroverspanningen ebden onder de aanwezige spanningsconditie niet meer weg.



Figuur 5.11 D_u - e_a

Verloop K_0

In Figuur 5.12 is het verloop K_0 van de, als CK_0U uitgevoerde, triaxiaalproeven, weergegeven. De K_0 van de natuurlijke organische klei is ongeveer gelijk aan 0.5. De gereconstitueerde monsters lijken een hogere K_0 te bezitten: ongeveer 0.6. Voor het bereiken van een constante waarde van K_0 is een rek van ongeveer 4% nodig.



Figuur 5.12 Verloop K_0 in CK_0U proeven

De K_0 is veel hoger als de K_0 gemeten in de K_0 -CRS proeven. Of dit wordt veroorzaakt door verschillen tussen de monsters of dat dit bepaald wordt door de meetwijze is nog onduidelijk. Wat wel vaststaat is dat het initiële specifiek volume van de triaxiaalmonsters hoger is.

Voorafgaand aan de consolidatiefase ondergaan de gereconstitueerde monsters relatief veel rek. Dit verklaart het begin van de curves; er is geen data van de verzadigingsfase gepresenteerd.

Bendermetingen

Direct na inbouwen, vlak voor consolidatie en gedurende de consolidatie van de triaxiaalmonsters is regelmatig de voortplantingssnelheid van een, door de benderelementen opgewekte, schuifgolf gemeten. Ook is tijdens deze fasen de dichtheid(sverandering) van het monster bekend. De (tangent) schuifmodulus G_{vh} is bepaald en weergegeven in Tabel 5-6.

monster	ρ^{*1}	$v_{s; ini}^{*2}$	$G_{vh; ini}^{*2}$	G_{vh}^{*3}	G_{vh}^{*4}	σ_v^{*4}	G_{vh}/σ_v^{*4}
[-]	$10^3 \text{ [kg/m}^3\text{]}$	[m/s]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[kPa]	[-]
CK ₀ U-15(1)	1.23	30.2	1.13	1.34	1.51	15	98
CK ₀ U-30(1)	1.20	32.1	1.23	1.30	1.75	28	62
CK ₀ U-15(2)	1.23	26.5	0.86	0.54	0.67	15	45
CAU-55	1.24	28.8	1.03	0.68	1.25	54	23
CAU-100(2)	1.27	27.4	0.96	1.17	2.22	89	25
CAU-100(3)	1.33	29.7	1.17	1.52	2.77	96	29
R-CK ₀ U-15	1.18	20.1	0.47	0.70	0.72	5.6	129
R-CK ₀ U-30	1.22	25.6	0.80	0.95	1.22	16	77
R-CAU-30	1.24	23.6	0.81	1.13	1.79	26	68

*1) uit massa - en volumemetingen monster voor de proef

*2) direct na inbouwen, zonder aanpassing aan mogelijk nieuwe spanningstoestand (verzadiging)

*3) begin consolidatie, na aanpassing aan mogelijke nieuwe spanningstoestand (verzadiging)

*4) eindfase van de consolidatie

Tabel 5-6 Resultaten bendermetingen

Uit de tabel volgt dat G_{vh} van de natuurlijke monsters na installatie gemiddeld 1.06 MPa bedraagt. Na verzadiging en het aanbrengen van een effectieve spanning ($q=3$ kPa, $p'=6$ kPa) neemt de gemiddelde waarde van G_{vh} toe tot 1.09 MPa. Tijdens consolidatie neemt G_{vh} verder toe als gevolg van een toenemende dichtheid en schuifgolfsnelheid.

Uit de proefgegevens blijkt ook dat de gereconstitueerde monsters een lagere stijfheid hebben ondanks een vergelijkbare dichtheid; de schuifgolfsnelheid is veel lager. Er is wel verschil tussen de gereconstitueerde monsters onderling. De gereconstitueerde monsters die bij 20 kPa zijn geconsolideerd (R-CK₀U-30 en R-CAU-30) hebben een 70% hogere stijfheid dan het monster dat bij 10 kPa is geconsolideerd (R-CK₀U-15). De stijfheidstoename is niet evenredig met het verschil in dichtheid (+4%). Het stijfheidsverschil wordt verklaard vanuit de spanningsgeschiedenis van de monsters.

Omdat de dichtheid van de natuurlijke- en gereconstitueerde monsters ongeveer gelijk is, en er toch grote verschillen in stijfheid zijn, kan worden verondersteld dat de spanningsgeschiedenis en de structuurontwikkeling de parameters zijn die in deze metingen het verschil in schuifgolfsnelheid bepalen. Om de invloed van het spanningsniveau weg te delen is G_{vh} genormaliseerd met de actuele effectieve verticale spanning. Zie Tabel 5-6. De genormaliseerde stijfheid van de natuurlijke monsters neemt af naarmate de overconsolidatiegraad kleiner is. De normaalgeconsolideerde natuurlijke monsters hebben de kleinste - en de gereconstitueerde monsters en de monsters geconsolideerd of beproefd bij lage spanningen de grootste genormaliseerde stijfheid.

5.3.5 Resultaten triaxiaalproeven; afschuiffase

Direct na het bereiken van de gewenste consolidatiespanning zijn de drainagekranen gesloten en zijn de monsters ongedraineerd afgeschoven bij constante celdruk. Enkele monsters zijn niet afgeschoven door opgetreden storingen in de consolidatiefase of door voortijdig bezwijken. Eén van de monsters is spanningsgestuurd afgeschoven (CAU-55). Proefdata uit deze fase is weergegeven in Tabel 5-7.

Monster	h_c	T	$\epsilon_a, \dot{\epsilon}$	$C_{u; \max}$	σ_{vc}'	$C_{u; \max}/\sigma_{vc}'$	A_f	G_{sec}^{*1}
[-]	[mm]	[°C]	$\times 10^{-6}$ [1/s]	[-]	[kPa]	[kPa]	[-]	[MPa]
CK ₀ U-15(1)	70.62	19.4	1.52	16	15	1.04	-	1.5
CK ₀ U-30(1)	69.23	19.5	1.67	22	28	0.80	-	1.6
CK ₀ U-15(2)	70.24	19.4	1.38	16	15	1.03	-	1.4
CAU-55	64.07	19.0	- ^{*2}	30	54	0.56	-	-
CAU-100(2)	65.38	19.3	1.39	42	88	0.47	1.09	3.1
CAU-100(3)	66.68	18.8	1.44	41	96	0.43	1.22	3.8
R-CK ₀ U-15	70.80	19.3	1.33	5.5	12	0.45	1.00	0.85
R-CAU-30	71.24	19.2	1.42	12	26	0.45	1.03	1.1

*1) geschatte waarde schuifmodulus bij een rekniveau van 10^{-4} (extern gemeten)

*2) spanningsgestuurd afgeschoven

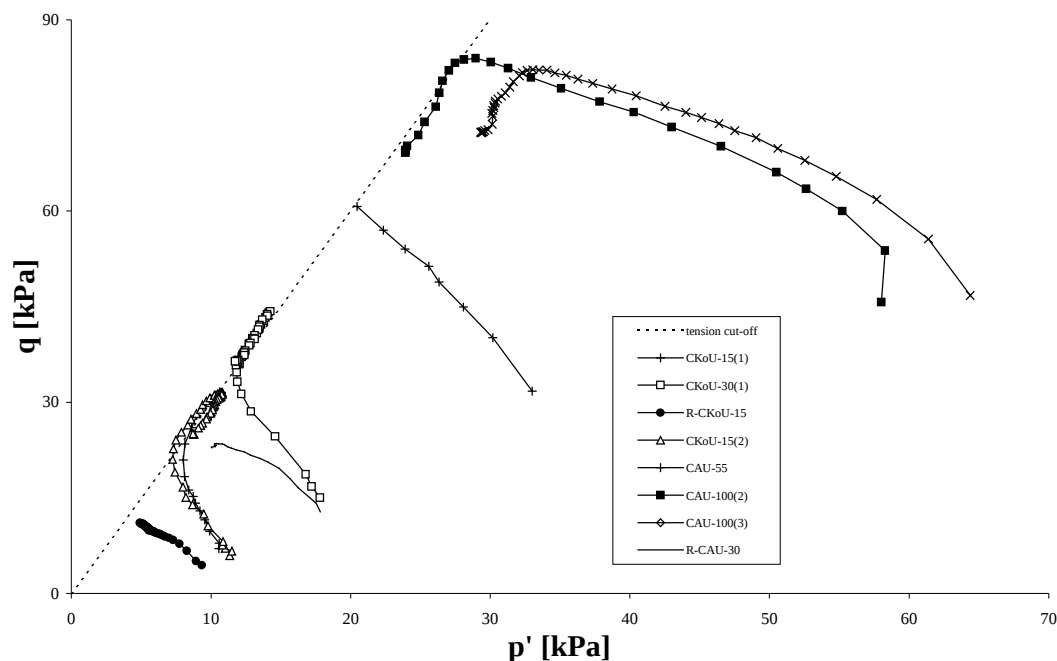
Tabel 5-7 Data ongedraineerde afschuiffase

waarin:

h_c	=	hoogte na consolidatie	[mm]
T	=	temperatuur gedurende de afschuiffase	[°C]
$\epsilon_a, \dot{\epsilon}$	=	axiale reksnelheid	[1/s]
$C_{u; \max}$	=	maximaal bereikte ongedraineerde schuifsterkte	[kPa]
σ_{vc}'	=	bereikte effectieve verticale consolidatiespanning	[kPa]
$C_{u; \max}/\sigma_{vc}'$	=	genormaliseerde sterkte	[-]
σ_{vc}'	=	effectieve verticale consolidatiespanning	[kPa]
A_f	=	Skempton A-factor bij bezwijken	[-]
G_{sec}	=	secant schuifmodulus	[MPa]

Figuur 5.13 presenteert de effectieve spanningspaden van de ongedraineerde afschuiffasen van 6 proeven. Alle ESP's starten vanuit een anisotrope spanningsconditie. De monsters geconsolideerd volgens procedure B zijn anisotroop geconsolideerd met $K=0.5$.

Voor de presentatie van de effectieve spanningspaden is de data bewerkt om ruisinvloeden weg te filteren. Bij de bewerking is de data uitgemiddeld en is een gedeelte van de data geselecteerd voor presentatie.



Figuur 5.13 q-p' diagram triaxiaalproeven

Het totaalspanningspad is niet in Figuur 5.13 weergegeven omdat, in combinatie met een backpressure van 200 kPa de figuur onoverzichtelijk zou worden. Het totaalspanningspad heeft een helling van 1:3.

Alle beproefde monsters hebben bij afschuiven de neiging tot compactie getuige de waterspanningsopbouw. Gedurende de afschuiffase wordt een gedeelte van de totaalspanning overgedragen op het poriënwater. De effectieve spanning neemt tijdens dit proces af. Deze effectieve spanning neemt zelfs zover af dat de effectieve horizontale spanning reduceert tot 0 kPa. De tension cut-off wordt bereikt. Dit is het vlak in de spanningsruimte dat druk-en trekspanningen scheidt. De tension cut-off is als stippellijn in Figuur 5.13 weergegeven. Spanningstoestanden boven de tension cut-off zijn alleen mogelijk als het materiaal trekspanningen kan opnemen. De bij de tension cut-off behorende ϕ' bedraagt 90° .

Het waargenomen gedrag voor organische klei is bijzonder. Zelfs normaalgeconsolideerde monsters bezwijken op de tension cut-off. Dit betekent dat een ophoging van enkele m's zand op een ondergrond met organische klei, onder vergelijkbare spanningscondities, ook dit gedrag laat zien. Hier zijn de huidige rekenmethodes niet op afgestemd.

Tijdens de afschuiffasen van de 15 kPa monsters is visueel waargenomen dat het triaxiaalmembraan los rond het monster hing en dat de monsters doorgaand vervormden onder uitstroom van poriënwater. Het gevolg hiervan is dat niet meer wordt voldaan aan de ongedraineerde conditie. Eénmaal is de hoeveelheid uitgeperst poriënwater gemeten. Dit bedroeg enkele cm^3 's. Omdat het monster zijn poriënwater kwijt kan, is verdere compactie mogelijk zonder dat er bezwijken optreedt. Dit leidt met de constante reksnelheid tot een toename van de effectieve verticale spanning en een toename van q en p' in de verhouding van 3:1; dus langs de tension cut-off. Bij hogere spanningen is het 'losraken' van het membraan niet maar de toename van q na het bereiken van de tension cut-off wel waargenomen. Dit gedrag lijkt op het gedrag dat veen laat zien in een standaard triaxiaal CU proef.

De proeven bij 15 kPa hadden tot doel het in-situ gedrag te simuleren. Bij bezwijken van een organische kleilaag in-situ (afschuiven) kan alleen met de extra sterkte (relatief hoge C_u) worden gerekend als afstroom naar de omgeving mogelijk is.

Bij de hoogste consolidatiespanning neemt de wateroverspanning gedurende het afschuiven toe tot het bereiken van de tension cut-off. Vervolgens neemt de effectieve verticale spanning af en blijft de effectieve radiale spanning verwaarloosbaar klein. q en p' nemen daarbij af in de verhouding 3:1. Het spanningspunt 'wandelt' langs de tension cut-off omlaag.

Uit het q - p' diagram volgt dat bij de lage consolidatiespanningen (15 kPa en 30 kPa) het ESP steiler is dan die behorend bij het gereconstitueerde monster en het hoogste spanningsniveau. Dit betekent een minder anistroop gedrag. Mogelijke oorzaak hiervan is de mate van overconsolidatie. Uit de consolidatiefase is bekend dat de grensspanning van de triaxiaalmonsters gelijk is aan 29.5 kPa. De 15 kPa monster hebben dus een overconsolidatiegraad van ongeveer 2. De grensspanning is niet als scherpe knik waargenomen in het ϵ_a - σ_v' diagram en dus zal ook het gedrag van het monster, geconsolideerd bij 30 kPa, beïnvloed worden door de spanningsgeschiedenis. Het 55 kPa monster valt enigszins uit de toon, een normaalgeconsolideerd gedrag wordt verwacht maar het ESP heeft dezelfde richting als die bij de lagere spanningsniveaus. Dit is mogelijk veroorzaakt door de hoge snelheid van belasten waardoor de respons van het poriëndrukmeetsysteem wellicht niet snel genoeg was. Een lagere snelheid van belasten zou ongetwijfeld een grotere opbouw van wateroverspanningen te zien geven. Hiermee roteert het ESP naar links. Verder leidt een lagere belasting- of reksnelheid tot een lagere deviator door de reksnelheidsafhankelijkheid van de klei.

Uit de proefresultaten volgt verder dat de toename of afname van de sterkte afhankelijk is van het feit of de klei normaal- of overgeconsolideerd is. Bij normaalgeconsolideerde monsters treedt na het bereiken van een maximale deviator uiteindelijk een afname van de deviator op terwijl overgeconsolideerde monsters een toename laten zien. Het gedrag van normaalgeconsolideerde monsters lijkt vooralsnog normaliseerbaar.

De genormaliseerde sterkte is in Figuur 4.11 uitgezet. De plasticiteitsindex is met de correlaties bepaald. Uit de vergelijking volgt dat de genormaliseerde sterkte van de normaalgeconsolideerde monsters onder de Skempton relatie liggen. De overgeconsolideerde monsters zijn relatief sterk en liggen boven de Skempton relatie.

Het beproefde gereconstitueerde monster heeft bij een consolidatiespanning vergelijkbaar met de natuurlijke monsters (15 kPa) een veel lagere sterkte en heeft gedurende de afschuiffase meer de neiging tot waterspanningsopbouw. Dit wordt toegeschreven aan het (gedeeltelijk) ontbreken van structuur en het verschil in spanningsgeschiedenis. De mate van waterspanningsopbouw is vergelijkbaar met de normaalgeconsolideerde natuurlijke monsters. Het monster bezwijkt voor het bereiken van de tension cut-off. Door te stellen dat de cohesie gelijk is aan 0 kPa is ϕ' gelijk aan 60.9° . Ook dit is een relatief hoge waarde van ϕ' .

Stijfheid

In Figuur 5.14 is het q - ϵ_a diagram weergegeven. Uit de helling van de q - ϵ_a kromme is de secant stijfheid bepaald. In de literatuur wordt bij de beschouwing van dergelijke proevenseries verondersteld dat bij kleine rekken het materiaal isotroop lineair elastisch reageert. Dit is een vereenvoudiging. Soms bestaat er een relatie tussen $\delta\epsilon_s$ en $\delta p'$ en tussen $\delta\epsilon_v$ en δq middels koppeltermen en gaat de vereenvoudiging niet op.

Voor een lineair elastisch materiaal geldt:

$$de_s = \frac{1}{3G} dq$$

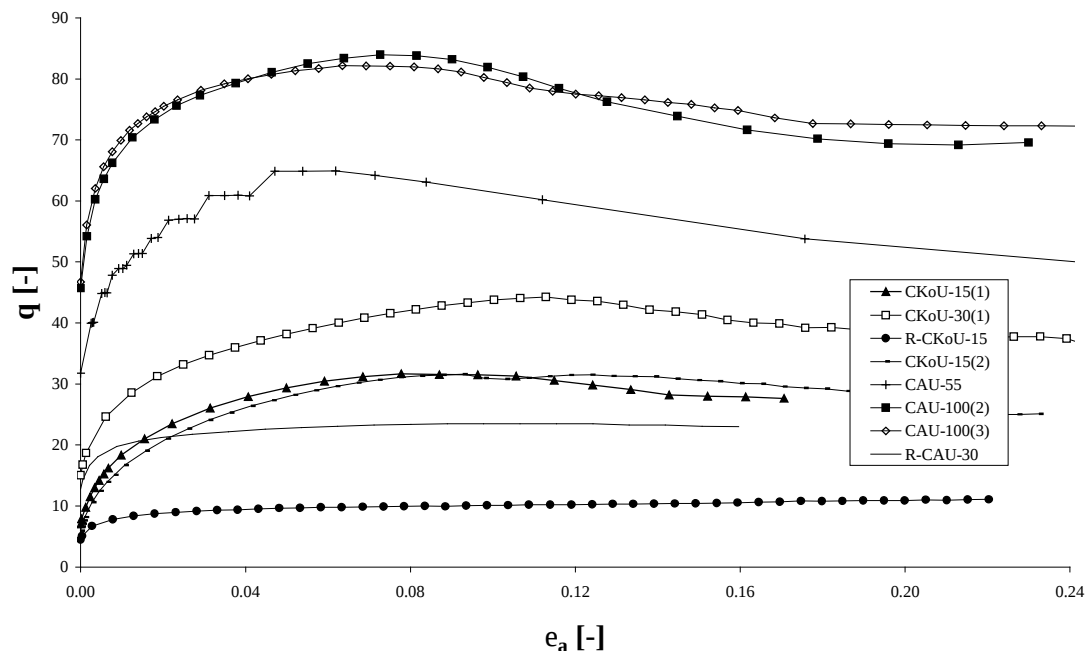
waarin:

$\delta\epsilon_s$	=	incremente verandering van de invariant van de schuifrek	[-]
G	=	Schuifmodulus	[kPa]
δq	=	incremente verandering van de invariant van de deviatorspanning	[kPa]

Aangenomen dat de afschuiffase ongedraineerd is, dan geldt $\delta\epsilon_s = \delta\epsilon_a$ en:

$$G = \frac{dq}{3e_a}$$

Indien lineair elastisch materiaal op een soortgelijke wijze wordt belast, ligt het ESP vanaf het begin van belasten verticaal. Vooral bij de proeven met een hoge consolidatiespanning is dit niet het geval. Voor een exacte bepaling van G (en de koppeltermen) moet δq of p' constant gehouden worden (gedraineerde proef). De exacte bepaling van deze waarden was niet het belangrijkste doel van dit onderzoek. Voor de beschouwing wordt wel lineair isotroop gedrag verondersteld.



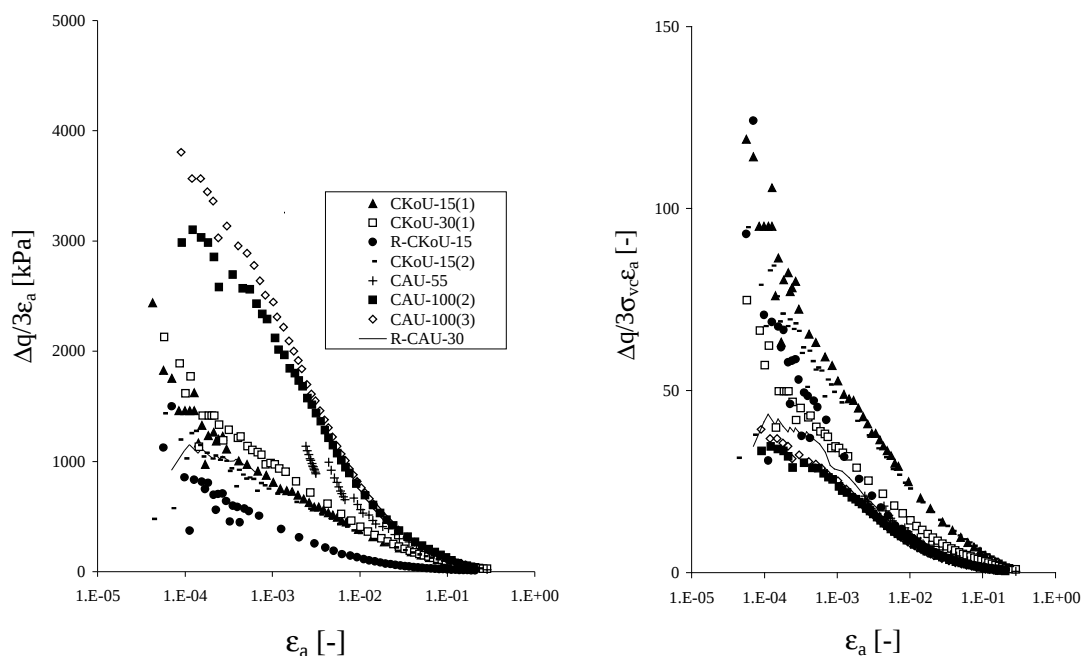
Figuur 5.14 q-e_a diagram

In Figuur 5.15 is de secant waarde van de stijfheid G_{sec} (of $\delta q/3\epsilon_a$) uitgezet tegen ϵ_a op logaritmische schaal. Hierbij is alleen data gepresenteerd behorend bij een rekniveau $>10^{-4}$. Omdat meting van de rek met de lokale rekopnemers niet altijd een succes is geweest, is de rek bepaald uit het signaal van de stappen motor. Deze stappen motor drijft de plunjer aan. Hierbij worden stapjes van 1 μm opgelegd. Als gevolg van beddingfouten, kan de waargenomen stijfheid kleiner zijn. Het meten van de stijfheid

met de Hall Effect Opnemers (HET's) leidt tot een toename van de stijfheid in de orde van grootte van 10-20%.

De meetresultaten gepresenteerd in Figuur 5.15 laten een sterke niet lineaire stijfheid zien. Hierbij is de stijfheid bij kleine rekken groot. De secant stijfheid is in Tabel 5-7 weergegeven. Het monster geconsolideerd bij 88 kPa laat de grootste stijfheid zien (3.1 MPa). Het gereconstitueerde monster heeft de kleinste stijfheid (0.85 MPa). Dit is consistent met de resultaten van de bendermetingen.

Om de invloed van de consolidatiespanning weg te delen is de stijfheid genormaliseerd met de effectieve verticale consolidatiespanning. Het resultaat is ook in Figuur 5.15 weergegeven. De figuur laat zien dat monsters geconsolideerd bij 15 kPa en het 30 kPa monster een relatief grote genormaliseerde stijfheid hebben, respectievelijk 95 en 58, in tegenstelling tot het normaalgeconsolideerde monster. Dit monster heeft een genormaliseerde stijfheid van 35. De ratio behorend bij het gereconstitueerde monster is relatief hoog en bedraagt 69. Deze relatief hoge waarde wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de spanningsgeschiedenis. Dit monster is voorgeconsolideerd bij ongeveer 10 kPa. De effectieve verticale consolidatiespanning van 12 kPa ligt hier slechts weinig boven. Opmerkelijk genoeg komt dit niet tot uiting in de ligging van het effectief spanningspad. Het was de verwachting dat de genormaliseerde stijfheid van het gereconstitueerde monster en het normaalgeconsolideerde monster gelijk zou zijn omdat consolidatie voorbij de grensspanning vaak een volledige destructurisatie tot gevolg heeft.

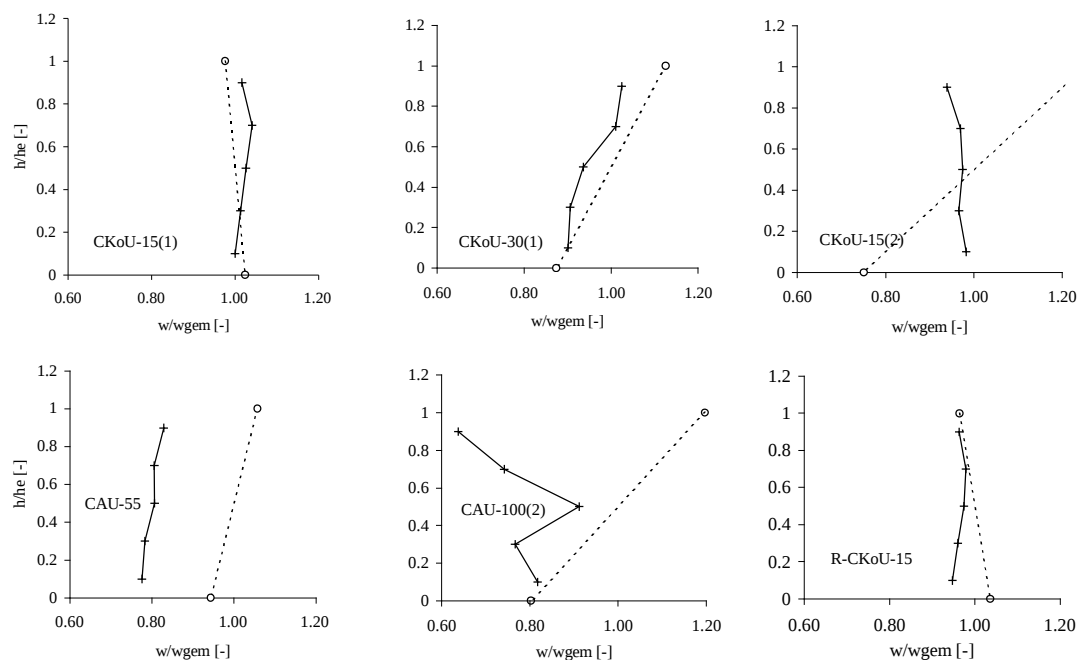


Figuur 5.15 Verloop stijfheid - ϵ_a en genormaliseerde stijfheid

Uniformiteit monster

Na de uitgevoerde triaxiaalproeven zijn de monsters opgedeeld in 8 taartpunten. 4 taartpunten zijn opgedeeld in 5 gelijke delen. Van deze 5 delen zijn watergehalte en soortelijke massa bepaald. Het verloop van het watergehalte en het specifiek volume over de hoogte geeft informatie over de uniformiteit van het monster en kan een indicatie worden verkregen van de invloed van de randvoorwaarden van de triaxiaalproef zoals bijvoorbeeld wrijving langs eindvlakken.

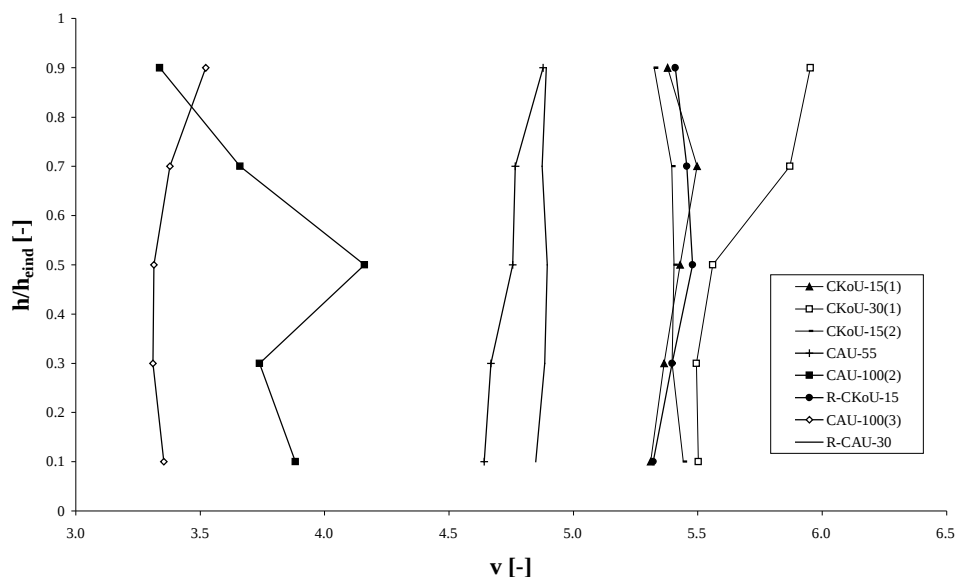
In Figuur 5.16 is de genormaliseerde hoogte uitgezet tegen het genormaliseerde watergehalte. Omdat de monsterhoogte na de proef verschilt is de verticale positie van het gedeelte van de taartpunt genormaliseerd met de hoogte van het monster na de proef. Het watergehalte is genormaliseerd met het gemiddelde watergehalte voor de proef. Ook is, ter vergelijking, het genormaliseerde watergehalte voor de proef aan boven- en onderzijde gepresenteerd (2 metingen, $h/h_{\text{gem}}=0$ en 1). Dit geeft een indicatie van de natuurlijke variabiliteit.



Figuur 5.16 Verloop h/h_{eind} vs. $w/w_{\text{gem,voor}}$

Uit de figuur volgt dat na verzadiging, consolidatie en afschuiven het watergehalte na de proef min of meer dezelfde lijn lijkt te volgen als het watergehalte vòòr de proef. Uitzondering hierop vormen de monsters CK₀U-15(2) en CAU-100(2). De meest waarschijnlijke oorzaak hiervoor is het verwisselen van de watergehaltemetingen boven en onder.

In Figuur 5.17 is het verloop van het specifiek volume (na de proef) over de hoogte van het monster weergegeven. Terwijl het verloop van het genormaliseerd watergehalte dit al suggereerde bevestigen deze data dat van enige randinvloeden geen sprake lijkt te zijn. In ieder geval komt dit niet in het poriënvolume tot uitdrukking.



Figuur 5.17 Verloop specifiek volume na de proef

5.3.6 Conclusies en bevindingen beproeving organische klei; triaxiaalproeven

Uit de resultaten van de serie triaxiaalproeven kan het volgende worden geconcludeerd:

- de waargenomen grensspanning in de triaxiaalproeven ligt 20% lager dan die waargenomen in de K_0 CRS proeven. Dit wordt mogelijk veroorzaakt door verschillen in reksnelheid of spanningsgeschiedenis (dessicatie).
- de simulatie van het verloop en de grootte van K_0 in de spanningsgestuurde anisotrope consolidatie heeft geleid tot kleine radiale rekken. Een complexe, risicovolle, rekgestuurde consolidatie kan zo worden vermeden.
- de waargenomen K_0 in de triaxiaalproef is hoger dan die in de K_0 -CRS proef. Of dit wordt veroorzaakt door verschillen tussen monsters onderling of dat dit apparaatafhankelijk is, is nog onduidelijk. De triaxiaalmonsters hebben een hoger initieel volume dan de monsters voor de K_0 -CRS proef. Het is wel de verwachting dat de randvoorwaarden van de K_0 CRS proef dusdanig zijn dat er 1-D geconsolideerd wordt. In de GDS opstelling daarentegen wordt op één hoogte de diameter constant gehouden; het monster heeft meer vrijheid;
- gereconstitueerde monsters hebben een hogere K_0 dan natuurlijke monsters;
- de gehanteerde of opgetreden reksnelheden tijdens consolidatie leidden niet tot noemenswaardige opbouw van wateroverspanning. Als er grote waterspanningen optreden, is dit bij grotere rekken. Dit komt overeen met de bevindingen in de K_0 CRS proeven.
- de stijfheid van natuurlijke monsters bij zeer kleine rekken, bepaald met bendermetingen, is groter dan die van gereconstitueerde monsters. Dit wordt toegeschreven aan de structuur en de spanningsgeschiedenis van natuurlijke monsters.
- alle monsters lijken tijdens ongedraineerd afschuiven te bezwijken op de tension cut-off. Dit vlak in de spanningsruimte scheidt druk- en trekspanningen en kan worden geassocieerd met een ϕ' van 90° . Dit impliceert niet dat de ϕ' gelijk is aan 90° graden. Wellicht hebben de monsters een zekere capaciteit om trek op te nemen (cohesie) en is ϕ' iets lager. Na het bereiken van dit vlak hebben de monsters bij relatief lage spanningen ($OCR > 1$) laten zien nog te beschikken over een extra sterkte. Dit uit zich in toenemende waarden van de deviator- en effectieve isotrope spanning (verhouding 3:1). Bij doorgaand vervormen wordt niet meer voldaan aan 'the undrained condition'. Op de tension cut-off laten normaalgeconsolideerde monsters juist afnemende waarden van de deviator- en effectieve isotrope spanning zien (verhouding 3:1); er is sprake van een duidelijke 'failure' toestand. In ieder geval is dit geschetste gedrag voor klei bijzonder. Bij beproeving van veen wordt dit vaker waargenomen.
- het gedrag van de normaalgeconsolideerde monsters lijkt normaliseerbaar. De genormaliseerde ongedraineerde schuifsterkte, C_u/σ_v' , van normaalgeconsolideerde monsters bedraagt ongeveer 0.45. Deze waarde ligt onder de Skempton relatie. De overgeconsolideerde monsters zijn relatief sterk en liggen boven de Skempton relatie.
- De bepaalde secant schuifmodulus en de tangent schuifmodulus laten zien dat de stijfheid sterk niet lineair is; bij kleine rekken is de stijfheid groot. De genormaliseerde stijfheid van de overgeconsolideerde monsters is veel groter dan die van normaalgeconsolideerde monsters. Dit wordt toegeschreven aan de spanningsgeschiedenis en de aanwezigheid van structuur.
- het gereconstitueerde monster laat een sterke opbouw van de wateroverspanning zien tijdens de ongedraineerde afschuif fase vergelijkbaar, in verloop, met het normaalgeconsolideerde natuurlijke monster. De bij de monsters horende effectieve spanningspaden lijken normaliseerbaar met het effectief verticaal spanningsniveau. Ook de genormaliseerde sterkte heeft dezelfde orde van grootte.
- verzadiging, anisotrope consolidatie en afschuiven lijkt niet tot grote niet uniformiteit te leiden. Het verloop van het watergehalte na de proef volgt min of meer dezelfde lijn als voor de proef. Van enige randinvloeden tijdens de proef lijkt geen sprake.

5.4 Direct Simple Shear proeven

5.4.1 Inleiding

Op de gestoken klei is een serie direct simple shear (DSS) constant volume testen uitgevoerd. Deze proeven vormen onderdeel van het proefprogramma constitutief gedrag organische klei.

In deze proef wordt een monster ($\phi 63$ mm, $h = 20$ mm) K_0 geconsolideerd in een met constantaan verstevigd membraan. Vervolgens wordt het monster, in dit geval, ongedraineerd afgeschoven door de hoogte en daarmee het volume constant te houden. Deze voorwaarden leiden tot de aanname dat er tijdens afschuiven geen wateroverspanningen optreden. Het afschuiven vindt plaats door boven- en ondervlak van het monster relatief te verschuiven loodrecht op de lengte-as van het monster met een constante snelheid. Dit afschuiven vindt plaats onder plane strain condities.

Tijdens de uitvoering van de proeven wordt de verticale – en horizontale kracht op de bovenplaat en de verticale – en horizontale verplaatsing van de bovenplaat geregistreerd. De onderplaat is gefixeerd.

Met deze waarnemingen kunnen de verticale totaalspanning op het bovenvlak (σ_v), de schuifspanning op het bovenvlak (τ_h) en de hoekverdraaiing (γ) (engineering strain) worden bepaald. Het betreft gemiddelde waarden van de spanningen en rekken. Met de gedane aanname dat er tijdens afschuiven geen wateroverspanning optreedt, betekent dit dat effectieve spanningen gelijk zijn aan de totaalspanningen.

Door de mogelijke afwezigheid van complementaire schuifspanningen op de verticale vlakken van het monster tijdens afschuiven, kan een excentriciteit van de verticale normaalkrachten op het monster ontstaan. Dit heeft spanningsextremen aan de randen van het monster tot gevolg en leidt tot een niet uniforme, onbekende, spannings- en rektoestand. Uit de literatuur is bekend dat de mate van niet uniformiteit afhankelijk is van de hoogte/diameterverhouding van het monster, de stijfheid van het membraan en het gedrag van de grond. Daarentegen heeft de proef een praktische waarde.

Bij de verwerking van de meetgegevens is de horizontale kracht gecorrigeerd voor de wrijvingsverliezen van de plunjer, de slede en de schuifweerstand van het membraan.

Oorspronkelijk was de opzet van het proefprogramma zodanig dat monsters bij in-situ temperatuur zouden worden beproefd. Het betrof alle in dit rapport vermelde proeftypen. Dit bleek praktisch gezien niet haalbaar voor het hele proefprogramma. Desondanks zijn de classificatieproeven en de direct simple shear proeven wel bij een in-situ temperatuur van ongeveer 11 °C beproefd. Ter indicatie is ook een monster bij 18 °C beproefd.

5.4.2 Monsters

De proeven zijn uitgevoerd op Laval monsters uit Boring 3 (L3), monster 35. Dit Laval blok ($\phi 22$ cm x 25 cm; ;MV-2.15m tot MV-2.40m) is opgedeeld in 5 taartpunten (A t/m E). Uit deze taartpunten zijn de monsters geselecteerd. In monster 35 zijn dunne siltlagen aangetroffen. Hiermee is rekening gehouden bij de monsterkeuze.

Voor het begin van de proef is het watergehalte van afsnijdsels aan bovenzijde van het monster bepaald. Dit geeft een indicatie van het watergehalte van het monster. Door gebruik te maken van de data van de indexproeven is de specifieke massa van de monsters geschat. Met deze waarde en het

watergehalte van het afsnijdsel is het initiële specifieke volume, uit $v_0 = 1 + w_0 G_s$, berekend. Zie Tabel 5-8.

Tabel 5-8 Monstergegevens DSS; monster 35 (L3); voor de proef

deelmonster	diepte			γ_n	w^{*1}	G_s^{*2}	v_0^{*2}	γ_n^{*3}	$\sigma'_{v;c}$	$\gamma_n^{\dot{z}}$
[-]	[MV..m]			[kN/m ³]	[-]	[-]	[-]	[kN/m ³]	[kPa]	10 ⁻⁶ [1/s]
A2	2.20	-	2.25	12.2	1.86	2.30	5.28	12.23	23	1.30
A3	2.25	-	2.30	12.1	1.74	2.33	5.05	12.39	24	1.28
B2	2.20	-	2.25	11.7	1.98	2.27	5.49	12.08	55	1.44
B3	2.25	-	2.30	12.6	1.73	2.33	5.03	12.40	113	1.60
C1	2.15	-	2.20	12.4	1.83	2.31	5.23	12.27	100	1.54

*1) bepaald met afsnijdsels

*2) met correlaties. Zie 4.9.

*3) met correlaties watergehalte voor de proef (afsnijdsels)

Uit Tabel 5-8 volgt dat het volumiek gewicht van de monsters maximaal 0.9 kN/m³ verschilt. Dit grote verschil heeft deels te maken met de onnauwkeurigheid van het bepalen van het initiële volume van het monster in de DSS proef. Door gebruik te maken van eerder afgeleide correlaties tussen w en γ_n kan worden afgeleid dat het maximale verschil in volumiek gewicht mogelijk kleiner is: 0.3 kN/m³. Zie Tabel 5-8. Ondanks de verschillen in volumiek gewicht kan worden gesteld dat de verschillen tussen de monsters onderling vrij klein zijn. Alleen monster B2 is aan de lichte kant. Dit uit zich ook in een hoger watergehalte.

5.4.3 Procedure

Na het op temperatuur laten komen van het monster in de klimaatstaat zijn de monsters getrimd en ingebouwd. Vervolgens zijn de monsters in één belastingsstap geconsolideerd gedurende minimaal 24 uur.. De belasting is krachtgestuurd aangebracht. In de afschuif fase is een constante reksnelheid, $\gamma_n^{\dot{z}}$, van $1.3 - 1.6 \times 10^{-6}$ [1/s] opgelegd tot een rek (γ) van minimaal 0.3 [-]. De consolidatiespanning en de aangehouden reksnelheid zijn weergegeven in Tabel 5-8.

De proeven op deelmonsters A en B zijn uitgevoerd bij een constante temperatuur van 11 °C. Monster C1 is beproefd bij 18 °C.

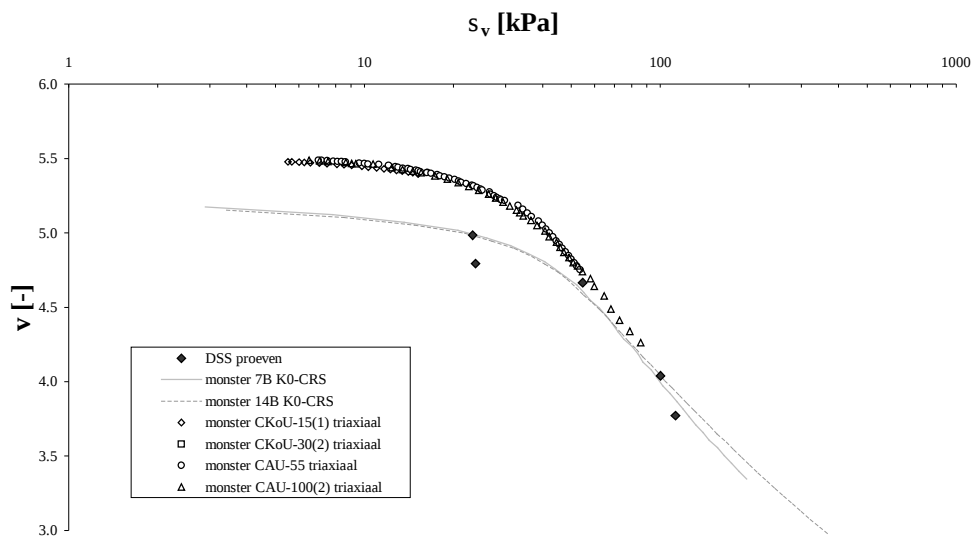
5.4.4 Resultaten; consolidatie

In Tabel 5-9 is de volumieke rek gepresenteerd, waargenomen tijdens consolidatie. Er zijn slechts twee proeven uitgevoerd bij gelijke consolidatiespanning en temperatuur (A2 en A3). De bereikte maximale axiale (of volumieke) rek is vergelijkbaar. De volumieke rek waargenomen in proef C1, uitgevoerd bij 18 °C in plaats van 11 °C, is kleiner dan waargenomen in proef B3. Dit zal waarschijnlijk te wijten zijn aan het lagere spanningsniveau. Omtrent de invloed van de temperatuur kan, gezien het geringe aantal proeven, geen duidelijke conclusie worden getrokken. Het resultaat van proef C1 ligt in de lijn der verwachting. Normaliter zorgt een (gedraineerde) verlaging van de temperatuur tot een verstijving van het korrelskelet [Tigheelaar, 2000].

Met de volumieke rekken en het initiële specifiek volume (Tabel 5-8) is het specifiek volume aan het einde van consolidatie berekend. Het resultaat is weergegeven in Figuur 5.18. Tevens zijn, ter vergelijking, de resultaten van de K₀-CRS proeven en enkele triaxiaalproeven ingetekend.

monster	$\sigma'_{v;c}$	e_v
[-]	[kPa]	[-]
A2	23	0.06
A3	24	0.05
B2	55	0.15
B3	113	0.25
C1	100	0.23

Tabel 5-9 Proefresultaten consolidatiefase



Figuur 5.18 s_v - v diagram DSS proeven

Uit Figuur 5.18 volgt dat de resultaten van de DSS - en de K_0 -CRS proeven zeer vergelijkbaar zijn. De monsters zijn afkomstig van min of meer gelijke diepte. De triaxiaalmonsters hebben initieel een hoger specifiek volume. Deze monsters komen van een grotere diepte met een iets hoger watergehalte. Bij hogere spanning en rek wordt een unieke curve gevonden.

De goede overeenstemming in dit geval betekent echter niet dat de DSS ook als oedometer gebruikt kan worden. In het verleden zijn grotere afwijkingen gevonden, die worden toegeschreven aan de laterale vervorming ten gevolge van het niet geheel stijve gewapende membraan.

Uit het verloop van de volumieke rek tegen de tijd is geen c_v - waarde afgeleid. Dit houdt verband met het geleidelijk aanbrengen van de verticale consolidatiespanning.

5.4.5 Resultaten; afschuifase

In Tabel 5-10 zijn de proefresultaten van de afschuifase gepresenteerd. Ten behoeve van de presentatie zijn de data bewerkt. De meetwaarden zijn enkele malen uitgemiddeld waarna een gedeelte van de data is geselecteerd. Dit is de data gepresenteerd in Figuur 5.19, Figuur 5.20 en Figuur 5.21.

Tabel 5-10 Proefresultaten constant volume DSS proeven

Monster	w	$(\tau_h/\sigma_v)_e$	C_u/s_v'	I_p^{*1}
[-]	[%]	[-]	[-]	[%]
A2	161	0.95	0.49	161
A3	176	0.92	0.43	154
B2	167	0.60	0.29	167
B3	112	0.51	0.25	154
C1	108	0.54	0.29	159

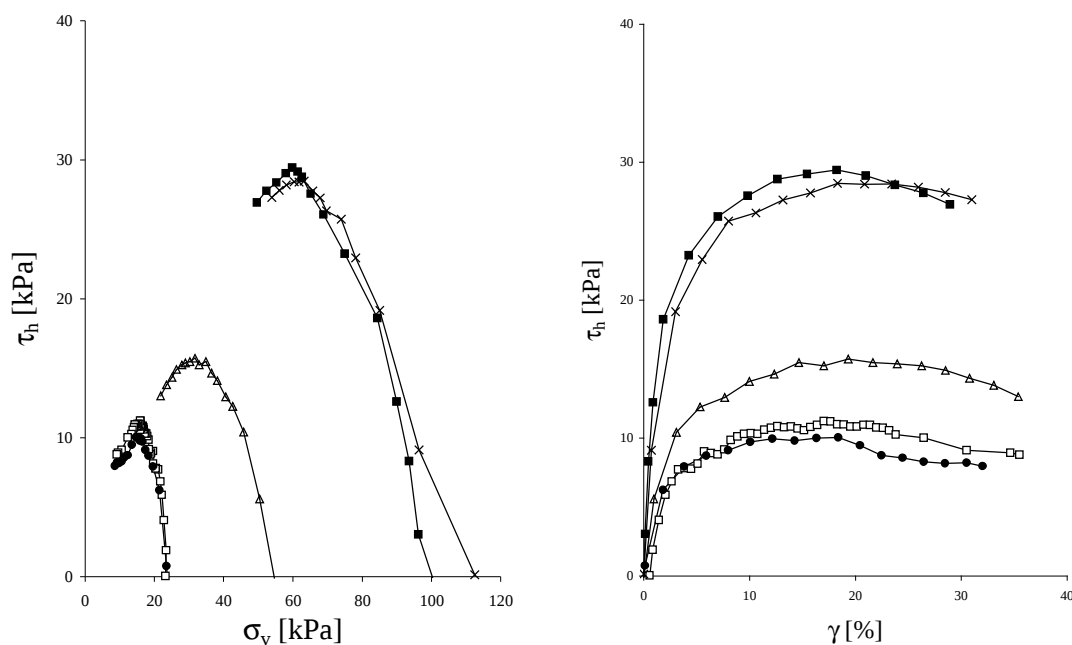
*1) uit correlaties bepaald

waarin:

w	=	Gemiddeld watergehalte van het monster na de proef	[-]
$(\tau_h/\sigma_v)_e$	=	Verhouding schuifspanning en verticale totaalspanning aan het einde van de proef	[-]
C_u/s_v'	=	Verhouding ongedraineerde schuifsterkte en effectieve verticale consolidatiespanning	[-]
I_p	=	Plasticiteitsindex	[-]

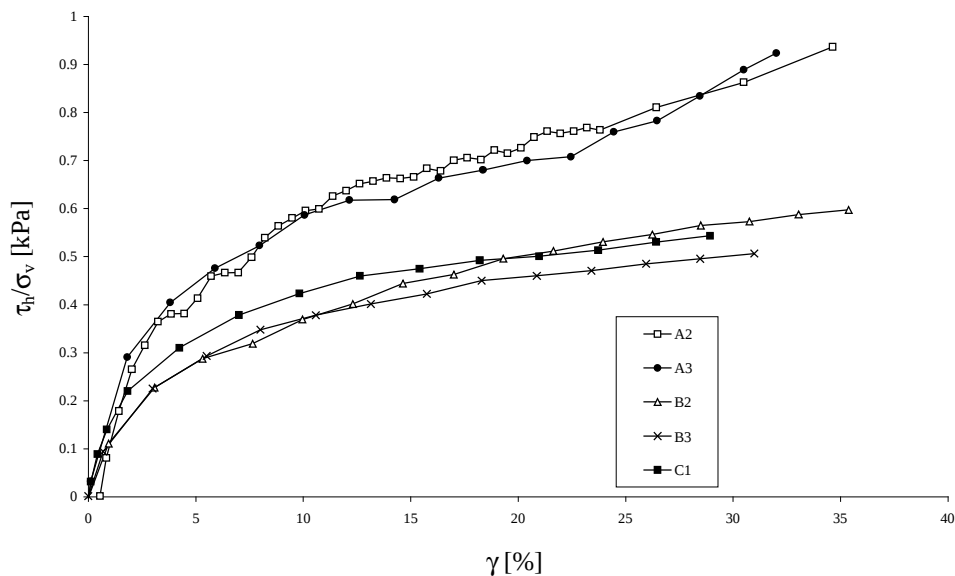
Verloop t_h-s_v en $g-t_h$

In Figuur 5.19 zijn het τ_h-s_v diagram en het $\gamma-\tau_h$ diagram weergegeven.



Figuur 5.19 t_h-s_v diagram

Uit de resultaten volgt dat de op te nemen schuifspanning in sterke mate wordt bepaald door het effectief verticale spanningsniveau dat tijdens consolidatie is opgelegd. De vorm van de effectieve spanningspaden behorend bij de proeven uitgevoerd bij de lagere consolidatiespanningen, 23 kPa en 24 kPa, is anders dan die behorend bij de hogere spanningen. Dit wordt veroorzaakt door overconsolidatie. De grensspanning volgend uit de K_0 -CRS samendrukkingsproeven en triaxiaalproeven van monsters bedroegen respectievelijk 37 kPa en 29.5 kPa. Dit betekent dat de overconsolidatiegraad van de monsters geconsolideerd bij terreinspanning gelijk is aan ongeveer 1.6.



Figuur 5.20 Verloop τ_h/σ_v met γ

In Figuur 5.20 is de verhouding τ_h/σ_v uitgezet tegen de rek. Gedurende de afschuiffase neemt de verticale spanning af; het monster heeft de neiging te compacteren. Door het handhaven van de constante hoogte neemt de verticale spanning af. Tijdens dit proces neemt de schuifspanning toe. Dit heeft tot gevolg dat de verhouding τ_h/σ_v toeneemt tot een eindwaarde $(\tau_h/\sigma_v)_e$. Zie Tabel 5-10. Naarmate de consolidatiespanning hoger is, neemt de maximale waarde van $(\tau_h/\sigma_v)_e$ af. Dit is de invloed van overconsolidatie. Ook verloopt de ratio glooiender. Wellicht spelen invloeden vanuit het monster of membraan dan een kleinere rol.

Hoek van inwendige wrijving j'

Voor de bepaling van de hoek van inwendige wrijving, ϕ' , wordt uitgegaan van co-axiaal gedrag zonder dilatantie [Teunissen, 1991]. In dat geval is bij grote vervormingen σ_v' gelijk aan σ_h' en kan ϕ' worden bepaald met:

$$\sin j' = \tan \left(\frac{t_{h;2} - t_{h;1}}{s_{v;2} - s_{v;1}} \right)$$

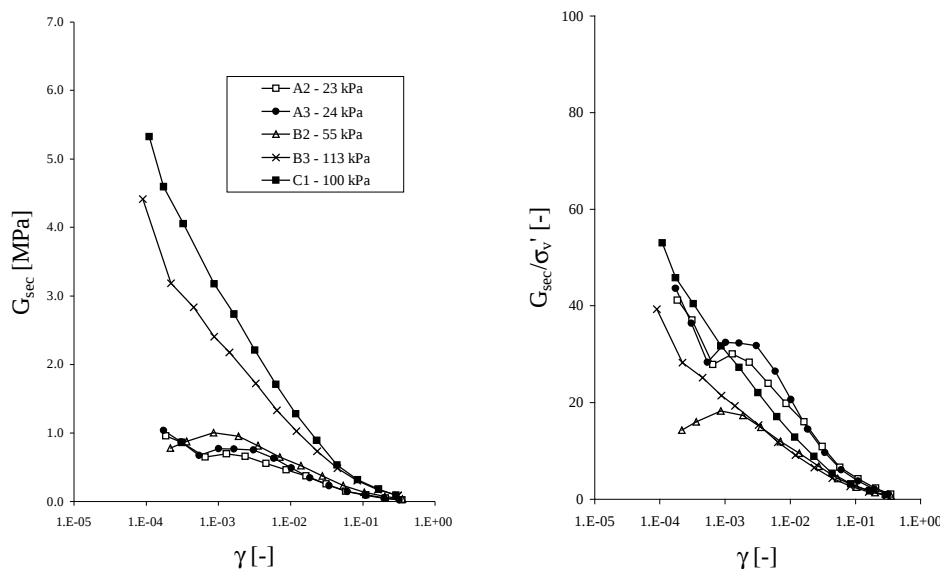
waarin:

ϕ'	=	hoek van inwendige wrijving	[°]
$\tau_{h,I}$	=	schuifspanning bij spanningsniveau I	[kPa]
$\sigma_{v,I}$	=	normaalspanning bij spanningsniveau I	[kPa]

De hoek van inwendige wrijving en cohesie zijn gelijk aan respectievelijk 27.7° en 3.3 kPa. Bij de bepaling zijn alleen de proefresultaten van de hogere spanningsniveaus (55 kPa en 100 kPa) gebruikt. Hier wordt benadrukt dat de keuze van interpretatiemethode sterk van invloed is op de waarde van ϕ' .

Secant stijfheid G_{sec}

Uit de het verloop van τ_h met γ kan de secant schuifmodulus (G_{sec}) worden bepaald uit $\gamma = G_{sec} \tau$. Zie Figuur 5.21. Deze stijfheid kan mogelijk niet 1:1 worden vergeleken met G_{sec} uit triaxiaalproeven als gevolg van de invloed van invloed anisotropie; de monsters worden op andere wijze belast.



Figuur 5.21 Verloop G_{sec} - g en genormaliseerde stijfheid $G_{sec}/s_{v'}$ - g

De secant stijfheid bij een rekniveau van 10^{-4} van de monsters geconsolideerd bij 23 kPa bedraagt ongeveer 1.0 MPa. De stijfheid van de monsters geconsolideerd bij het vijfmaal hogere spanningsniveau is gelijk aan ongeveer 5.0 MPa. Het monster geconsolideerd bij 55 kPa wijkt hiervan af. De stijfheid genormaliseerd met de effectieve verticale consolidatiespanning van de monsters ligt rond de 40. Wat betreft deze verhouding is er weinig verschil tussen de normaal- en overgeconsolideerde monsters.

Bij de presentatie van de (genormaliseerde) stijfheid zijn de gevonden waarden gemeten bij een zeer klein rekniveau ($<10^{-4}$) weggelaten. Bij dat rekniveau is de invloed van beddingfouten groot waardoor de gemeten stijfheid kleiner wordt. Uit de literatuur is bekend dat de stijfheid bij kleine rekken juist hoger is.

De secant stijfheid uit de DSS proef kan mogelijk niet één op één worden vergeleken met de secant schuifmodulus uit triaxiaalproeven als gevolg van de invloed van anisotropie; de monsters worden op andere wijze belast. De bendermeting uit de triaxiaalproef hebben wel een soortgelijke vervormingstoestand maar geven een tangent schuifmodulus. Het is de verwachting dat bij zeer lage rekniveaus de secant modulus de tangent modulus benadert. Uit vergelijking van de metingen volgt dat de genormaliseerde tangent schuifmodulus uit de bendermetingen, respectievelijk 23, 25 en 29, goed overeenkomen met de gemiddelde genormaliseerde secant schuifmodulus van de normaalgeconsolideerde DSS monsters. De genormaliseerde stijfheid van overgeconsolideerde DSS monsters (lagere spanningsniveaus) is moeilijker te vergelijken; de overconsolidatiegraad van de DSS monsters is kleiner dan de triaxiaalmonsters. Dit uit zich in een lagere genormaliseerde stijfheid.

Genormaliseerde sterkteverhouding C_u/s_v'

De ongedraineerde schuifsterkte is gelijk aan de maximale waarde van τ_h en kan worden genormaliseerd met de effectieve verticale consolidatiespanning. Zie Tabel 5-10. De plasticiteitsindex van de monsters is geschat op basis van de eerder bepaalde correlaties. De resultaten van de naar verwachting normaalgeconsolideerde monsters ($\sigma_v' = 55$ kPa, 100 kPa en 113 kPa) zijn in Figuur 4.11 weergegeven. Hieruit blijkt dat de proefresultaten onder de Skempton relatie liggen.

5.4.6 Conclusies en bevindingen beproeving organische klei; direct simple shear proeven

Uit de resultaten van de serie constant volume direct simple shearproeven kan het volgende worden geconcludeerd:

- de genormaliseerde ongedraineerde schuifsterkte (normaalgeconsolideerd), C_u/σ_v' bedraagt ongeveer 0.3. Deze waarde ligt onder de Skempton relatie. De hoek van inwendige wrijving ϕ' en cohesie bedragen respectievelijk 27.7° en 3.3 kPa;
- het aantal proeven waarbij de temperatuur is gevarieerd is te gering om een duidelijke conclusie te kunnen trekken betreffende de invloed van de temperatuur;
- bij de laagst aangebrachte consolidatiespanning reageren monsters anders dan bij de hogere spanningen. Dit wordt toegewezen aan de overconsolidatie. Dit uit zich in kleine rekken bij herbelasten tot de terreinspanning en een steiler verloop van het ESP in het τ_h - σ_v' vlak. Omdat de laagst gekozen spanning ongeveer gelijk is aan de verwachte terreinspanning, betekent dit dat monsters onder in situ spanningscondities overgeconsolideerd reageren;
- het v - σ_v' gedrag vergelijkt goed met de resultaten van de K_0 -CRS proeven. De triaxiaalproefresultaten vergelijken minder goed. De overeenkomst in de DSS en K_0 -CRS proefresultaten betekent niet dat de DSS proef als oedometer gebruikt kan worden. Een niet volledig stijf membraan kan de oorzaak zijn van radiale rekken;
- de genormaliseerde tangent schuifmodulus uit bendermetingen uitgevoerd tijdens de triaxiaalproef en de genormaliseerde secant schuifmodulus bij zeer kleine rekken gemeten in de direct simple shearproef komen goed overeen in geval van normaalgeconsolideerde monsters.

6 Conclusies en bevindingen

Dit hoofdstuk bevat de belangrijkste conclusies en bevindingen betreffende het constitutieve gedrag van organische klei van de Oostvaardersplassen site.

Classificatie- en indextesten

In de plasticity chart liggen de proefresultaten in het verlengde van de A-lijn. Organische materialen zouden volgens de literatuur juist beneden deze lijn moeten liggen. Hierin wijkt de organische klei uit het Oostvaardersplassengebied af.

De specifieke massa's van de organische- en minerale component van organische klei verschillen per onderzoekslokatie. Daarom wordt aangeraden om voor een groot project proefverzamelingen aan te leggen. Hierbij moet het gloeiverlies een belangrijke rol spelen. Het gloeiverlies correleert sterk met de uitrolgrens, de vloeigrens en de specifieke massa. Voor speurwerk is meer informatie nodig. Per monster is kennis van het watergehalte, volumiek gewicht en de specifieke massa wenselijk.

De genormaliseerde sterkte van organische klei is relatief laag in vergelijking met de bekende Skempton relatie. Deze relatie is dus niet bruikbaar voor deze kleisoort.

De variatie van het watergehalte en volumiek gewicht met de diepte is aanzienlijk. Daarom wordt aangeraden om voor amorfe klei met een groter aantal kleinere (in ieder geval lagere) monsters werken. Dit zal de representativiteit van de proefresultaten verhogen. Voor organische klei met plantenresten (stengels e.d.) zijn kleine monsters niet haalbaar.

K₀ CRS proeven

De K₀ CRS proef heeft ondanks het geringe aantal proeven bijzonder veel informatie opgeleverd. Zo lieten de organische kleimonsters een K₀ van rond de 0.34 zien. Dit was tegen de verwachting in gezien de vermoedelijk zeer hoge ϕ' waargenomen in triaxiaalproeven en de vaak gebruikte Jaky relatie van $K_0 = 1 - \sin \phi'$.

Triaxiaalproeven

Het belangrijkste resultaat uit de anisotroop geconsolideerde ongedraineerd afgeschoven triaxiaalmonsters is het bezwijken van monsters op de tension cut-off. Dit kan geassocieerd worden met ϕ' van 90°. De sterke neiging tot opbouw van wateroverspanningen leidt ertoe dat er niet meer wordt voldaan aan ongedraineerd gedrag; het monster kan verder compacteren. Wellicht heeft organische klei de capaciteit om een behoorlijke trekspanning op te nemen (cohesie). Dit impliceert niet dat ϕ' gangbare waarden aan zal nemen.

Spanningsgeschiedenis en de mate van structuurontwikkeling heeft een grote rol gespeeld bij de ligging van het effectief spanningspad in de ongedraineerde fase. Na de opbouw van wateroverspanning en het bereiken van de tension cut-off trad bij overgeconsolideerde monsters versteviging op terwijl bij normaalgeconsolideerde monsters juist een afname van sterkte zichtbaar was. Het normaalgeconsolideerde gedrag lijkt normaliseerbaar. De genormaliseerde ongedraineerde schuifsterkte ligt onder de Skempton relatie.

De waargenomen K₀ (ongeveer 0.5) in de triaxiaalproeven is hoger dan in de K₀ CRS proeven. Het is onduidelijk of dit een materiaalafhankelijke oorzaak heeft of dat dit wordt bepaald door het apparaat. Bekend is wel dat het initiële specifiek volume van de triaxiaalmonsters hoger is. Gereconstitueerde monsters bezitten een hogere K₀ (ongeveer 0.6) als het natuurlijk materiaal.

Direct Simple Shearproeven

In deze proef zijn uit de resultaten van de normaalgeconsolideerde monsters de hoek van inwendige wrijving en de cohesie bepaald en bedragen respectievelijk 27.7° en 3.3 kPa. De genormaliseerde ongedraineerde schuifsterkte van normaal geconsolideerde monsters ligt evenals de triaxiaalproefresultaten onder de Skempton relatie. De spanningsgeschiedenis en structuurontwikkeling van de natuurlijke monsters zorgen ervoor dat monsters relatief sterk zijn. Dit is consistent met eerdere bevindingen.

De organische klei zoals beproefd komt voor in grote delen van het land, nabij waterkeringen. Om de betrouwbaarheid van waterkeringen beter te kunnen inschatten is dus zaak het gedrag van de kleisoorten goed af te tasten. Dit onderzoek vormt slechts het begin.

Referenties

- Bakker, H. de, Edelman-Vlam, A.W. (1976). "De Nederlandse bodem in kleur", STIBOKA.
- Bizzarri, A., Allersma, H.G.B. "Creep tests on reconstructed soft clay, performed by means of a biaxial device", problematic soils, Yanagisawa, Moroto, Mitachi (eds), pp. 645 – 648.
- BSI, BS 1377 (1975). "Methods of test for soil for civil engineering purposes".
- CUR B76 (1999). "Ringonderzoek naar de triaxiaalproef".
- Duncan, J.M., Seed, H.B. (1967). "Corrections for strength test data", Journal of the soil mechanics and foundation division, pp.121-137.
- Greeuw, G., Adel, H. den, Schapers, A.L., Haan, E.J. den. (2000). "Reduction of axial resistance due to membrane and side drains in the triaxial test", ASCE Geotechnical Special Publication No.112, ed. Hanson, J.L., Termaat, R.J., pp.30-42.
- Greeuw, G. (1999). "Benderelementen in de GDS-opstelling", CO-378510/57.
- Haan, E.J. den (1995a). "Theme report on Special Problem Soils and Soft rocks, Part I Peats and organic soils", XI ECSMFE Kopenhagen, 9:139-156.
- Haan, E.J. den (1995b). "Veen (en organische klei), een grondmechanisch probleem", KIVI open sprekersdag 20 juni 1995.
- Haan, E.J. den (1999). "Celproef of triaxiaalproef ?", geotechniek, jaargang 3, nummer 1, pp. 5-11.
- Haan, E.J. den (2001). "Sample disturbance of a soft organic dutch clay", CO-710203/20.
- Head, K.H. (1992). "manual of soil laboratory testing", vol. 1, Pentech Press, London, sec.ed.
- Larsson, R, Farrell, E, Foged, N. (1998). "Laboratory method for determination of undrained shear strength: Fall-cone test", document number ETC5-E1.97.
- Leroueil, S.,Kabbaj, M., Tavenas, F. (1988). "Study of the validity of a σ'_v - ϵ_v - ϵ_a model in-situ conditions", Soils and foundations, Vol. 28, No.3, pp. 13-25.
- Lo Presti, D.C.F., Pallara, O., Jamiolkowski, M., Cavallaro, A (1999). "Anisotropy of small strain stiffness of undisturbed and reconstituted clays", proc. IS Torino, vol.1, Torino, pp.3-10.
- Rijniersce, K. (1983). "Een model voor de simulatie van het fysische rijpingsproces van gronden in de IJsselmeerpolders", Rapporten van zee tot land 52.

Skempton, A.W., Petley, D.J. (1970). "Ignition loss and other properties of peats and clays from avonmouth, king's lynn and cranberry moss", *Géotechnique* 20, No. 4., pp. 343–356.

Teunissen, J.A.M. (1991). "Analysis of plasticity and non-coaxiality in geomaterials", PhD thesis Delft University of Technology.

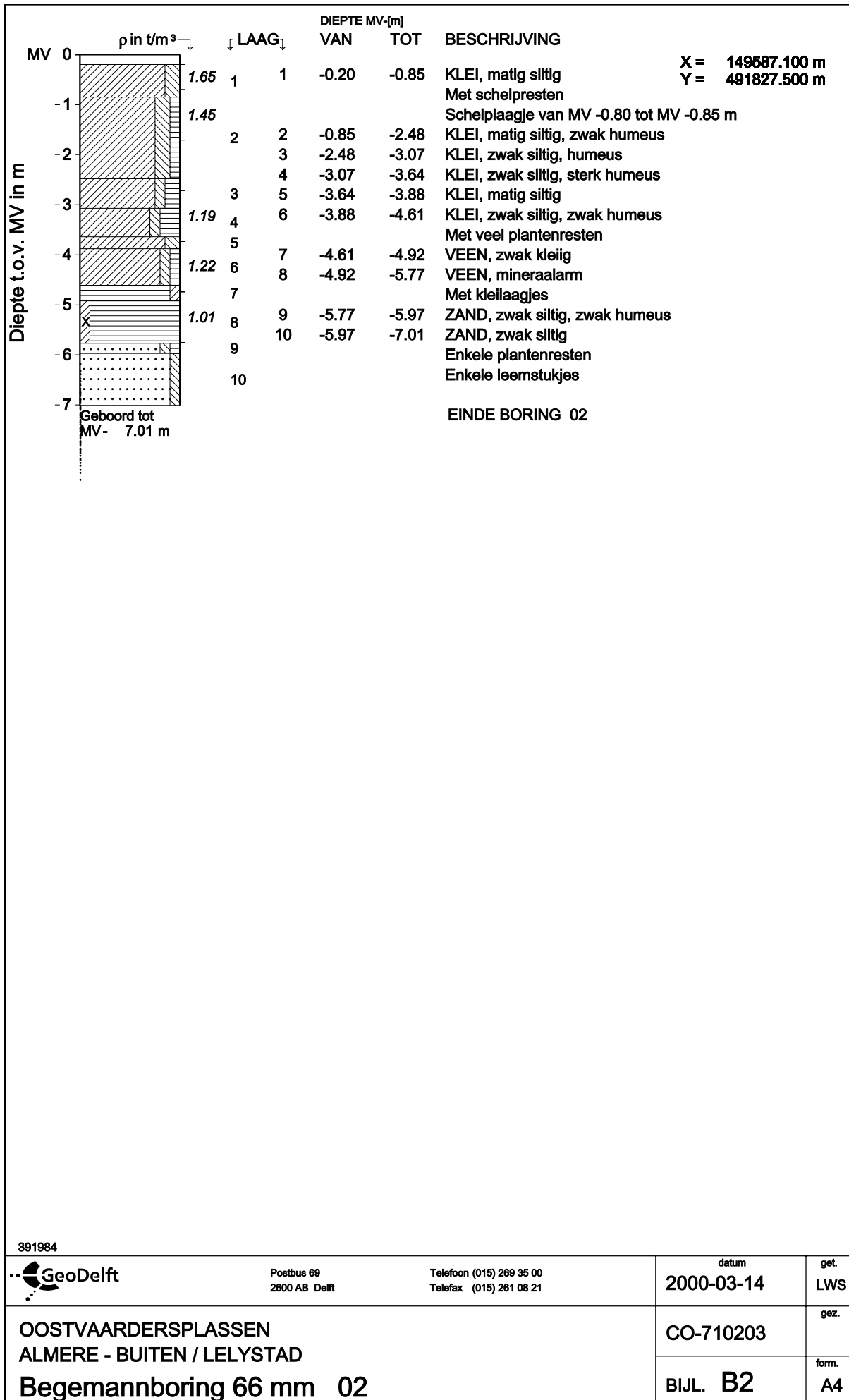
Tigchelaar, J., Feijter, J.W., Haan, E.J. den. (2000). "Shear tests on reconstituted Oostvaardersplassen clay", ASCE Geotechnical Special Publication No.112, ed. Hanson, J.L., Termaat, R.J., pp.67-81.

Tigchelaar, J. (2001). "Gedrag van organische klei, lokatie Bergambacht", concept, CO-710203/23.

BIJLAGEN

Bijlage 2-2 Boorbeschrijvingen

		DIEPTE MV-[m]							
		VAN	TOT	BESCHRIJVING					
Diepte t.o.v. MV in m	MONSTER ↓	↓ LAAG ↓							
	MV 0								
	-1	1	0.00	-1.35	KLEI, matig siltig Enkel zandlaagje Schelpstukjes				
	-2	2	-1.35	-2.50	KLEI, zwak siltig, humeus				
	-3	3	-2.50	-3.35	KLEI, zwak siltig, sterk humeus Met enkel veenlaagje				
			</						



391984



Postbus 69
2600 AB Delft

Telefoon (015) 269 35 00
Telefax (015) 261 08 21

datum
2000-03-14

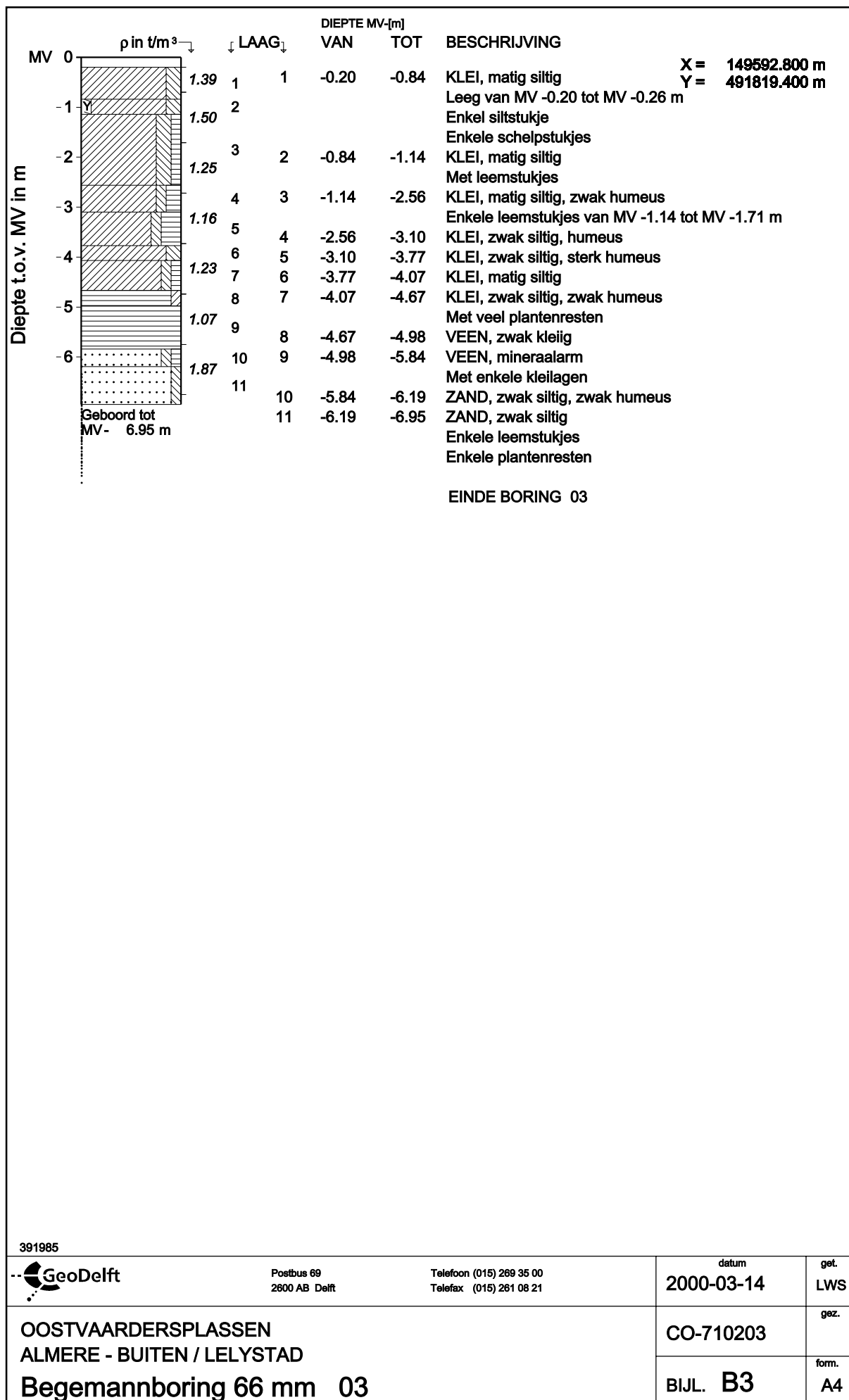
get.
LWS

OOSTVAARDERSPLASSEN
ALMERE - BUITEN / LELYSTAD
Begemannboring 66 mm 02

gez.
CO-710203

form.
BIJL. B2

form.
A4



391985



Postbus 69
2600 AB Delft

Telefoon (015) 269 35 00
Telefax (015) 261 08 21

datum
2000-03-14

get.
LWS

OOSTVAARDERSPLASSEN
ALMERE - BUITEN / LELYSTAD
Begemannboring 66 mm 03

gez.
CO-710203

form.
BIJL. B3

form.
A4

Evaluatie
Experimenteel onderzoek van het gedrag
van organische klei

CO-710203/26
November 2001

Evaluatie
Experimenteel onderzoek van het gedrag van
organische klei

CO-710203/26
November 2001

Opgesteld in opdracht van:
Dienst Weg- en Waterbouwkunde
Van der Burghweg 1
2600 GA Delft

AFDELING Verkenning
Projectleider : ir. J.Tigchelaar
Projectbegeleider: dr.ir.E.J. den Haan

GRONDMECHANICA DELFT
Stieltjesweg 2, 2628 CK DELFT
Postbus 69, 2600 AB DELFT

Telefoon (015) 269 35 00
Telefax (015) 261 08 21
Postbank 234342
Bank MeesPierson NV
Rek.nr. 25.92.35.911

rapportnr: CO-710203/26		datum rapport: November 2001			
titel en subtitel: Evaluatie Experimenteel onderzoek van het gedrag van organische klei		behandelende afdeling: Verkenning			
		projectnaam: DC Gedrag van klei en veen			
projectleider(s): ir. J.Tigchelaar		projectbegeleider(s): dr.ir.E.J. den Haan			
naam en adres opdrachtgever: Dienst Weg- en Waterbouwkunde Van der Burghweg 1 2600 GA Delft		referentie opdrachtgever: DWW-1753			
		verzenden in: 6-voud			
		type rapport: onderzoek			
samenvatting rapport: In deze eindrapportage zijn de bevindingen uit het proefprogramma constitutief gedrag van organische klei geëvalueerd. Op twee lokaties in Nederland zijn organische kleimonsters verzameld en in het laboratorium beproefd. Deze lokaties zijn: Bergambacht (proefproject actuele sterkte) en een lokatie in het Oostvaardersplassengebied. Op deze organische klei is een grote serie classificatie-, index-, K_0 -CRS-, triaxiaal- en direct simple shearproeven uitgevoerd. Doel van het onderzoek was om meer kennis van organische klei te genereren. Kennisleemte van het materiaal betreft met name de sterkte. Organische klei speelt een belangrijke rol bij de stabiliteit van dijken. De eigenschappen van de onderzochte organische klei variëren zeer sterk met de diepte. Dit geldt met name voor het watergehalte en volumiek gewicht van Bergambacht klei. De genormaliseerde sterkte van organische klei is veel lager dan die van niet organische klei met vergelijkbare plasticiteit. Bij de vergelijking is de Skempton relatie gebruikt. De vergelijking is niet helemaal correct omdat de Skempton relatie gebaseerd is op field vane testen terwijl de proefresultaten uit dit onderzoek gebaseerd zijn op triaxiaal- en direct simple shearproeven. Ook is de plasticiteit in de Skempton relatie meer afhankelijk van de mineralogie terwijl de plasticiteit van organische klei met name wordt bepaald door de hoeveelheid organisch materiaal. De K_0 van normaalgeconsolideerde organische klei bedraagt ongeveer 0.4. Deze waarde ligt tussen de K_0 van niet organisch klei en minder sterk gehumificeerd veen. Gereconstitueerde monsters hebben een hogere K_0 . Bij ontlasten neemt K_0 evenredig met de graad van overconsolidatie toe. De vaak aangehouden Jaky relatie $1 - \sin \phi'$ is niet bruikbaar indien de vermoedelijk zeer hoge ϕ' uit de triaxiaalproef wordt gebruikt. De grensspanning ligt ruim boven de terreinspanning. De bepaling van de grensspanning levert in de verschillende proeftypen niet dezelfde waarde op door monsterverstoring, verschillen in reksnelheid maar ook door verschillen tussen de eigenschappen van monsters onderling. De waargenomen grensspanning ligt 30% tot 90% boven de terreinspanning; de onderzochte klei reageert onder in situ spanningscondities overgeconsolideerd. Alle beproefde natuurlijke triaxiaalmonsters bezwijken op of nabij de tension cut-off; het vlak in de spanningsruimte dat trek- en drukspanningen scheidt. Dit vlak kan geassocieerd worden met een ϕ' van 90° . Dit impliceert niet dat ϕ' gelijk is aan 90° . Wellicht heeft het materiaal capaciteit om trekspanningen op te nemen (cohesie). De waarde van ϕ' is dan kleiner dan 90° . Invloeden van membraan- en side drains zijn naar verwachting te klein voor enige invloed van betekenis. De ϕ' uit de direct simple shearproef heeft een wat meer vertrouwde waarde: 38° (Bergambacht) en 28° (Oostvaardersplassen) en een kleine cohesie van enkele kPa's. Deze ϕ' is sterk afhankelijk van de interpretatiewijze van de proef. De organische klei heeft wel degelijk structuur. Met name de monsters die consolideerd zijn bij eenmaal en tweemaal de terreinspanning hebben een grotere genormaliseerde sterkte en – stijfheid. Dit heeft deels te maken met de spanningsgeschiedenis (overconsolidatie). Pas bij consolidatie ruim voorbij de grensspanning vertonen de monsters soortgelijk gedrag als gereconstitueerde monsters; de monsters waaruit de structuur is verwijderd. Normaalconsolidatie leidt dus tot verwijdering van structuur. Gereconstitueerde monsters zijn alleen in het triaxiaalapparaat beproefd. Ook direct simple shearproeven laten een geleidelijke verandering van structuur zien naarmate de consolidatiespanning hoger is.					
opmerkingen:					
trefwoorden: organische klei, lage spanningen, sterkte, classificatieproeven, indexproeven, variabiliteit, K_0 -CRS proef, triaxiaalproef, direct simple shearproef, structuur.		verspreiding: ir. H.L.Bakker (RWS-DWW), drs. A.Bizzarri (RWS-DWW), prof. dr.ir. A. Verruijt (TUD), dr.ir. E.J. den Haan (GeoDelft), ir. J.W. de Feijter (GeoDelft), dr.ir. M.A. Van (GeoDelft), ir.J.Tigchelaar (GeoDelft).			
opgeslagen op:					aantal blz.: 24
versie:	datum:	opgesteld door:	paraaf:	Gecontroleerd door:	paraaf:
	november 2001	ir. J.Tigchelaar		dr.ir. E.J. den Haan	

INHOUDSOPGAVE

Samenvatting

1	Inleiding	6
2	Evaluatie gedrag organische klei	7
2.1	Classificatie- en indexproeven	7
2.2	Consolidatie en samendrukking	10
2.3	Sterkte van organische klei	12
2.4	Structuur van organische klei	19
3	Conclusies en aanbevelingen	20
3.1	Conclusies	20
3.2	Aanbevelingen	21

Referenties

Bijlage I Verhouding membraancorrecties oedometercondities

Samenvatting

In deze eindrapportage zijn de bevindingen uit het proefprogramma constitutief gedrag van organische klei geëvalueerd. Op twee lokaties in Nederland zijn organische kleimonsters verzameld en in het laboratorium beproefd. Deze lokaties zijn: Bergambacht (proefproject actuele sterkte) en een lokatie in het Oostvaardersplassengebied. Op deze organische klei is een grote serie classificatie-, index-, K_0 -CRS-, triaxiaal- en direct simple shearproeven uitgevoerd. Doel van het onderzoek was om meer kennis van organische klei te genereren. Kennisleemte van het materiaal betreft met name de sterkte. Organische klei speelt een belangrijke rol bij de stabiliteit van dijken.

De eigenschappen van de onderzochte organische klei variëren zeer sterk met de diepte. Dit geldt met name voor het watergehalte en volumiek gewicht van Bergambacht klei.

De genormaliseerde sterkte van organische klei is veel lager dan die van niet organische klei met vergelijkbare plasticiteit. Bij de vergelijking is de Skempton relatie gebruikt. De vergelijking is niet helemaal correct omdat de Skempton relatie gebaseerd is op field vane testen terwijl de proefresultaten uit dit onderzoek gebaseerd zijn op triaxiaal- en direct simple shearproeven. Ook is de plasticiteit in de Skempton relatie meer afhankelijk van de mineralogie terwijl de plasticiteit van organische klei met name wordt bepaald door de hoeveelheid organisch materiaal.

De K_0 van normaalgeconsolideerde organische klei bedraagt ongeveer 0.4. Deze waarde ligt tussen de K_0 van niet organisch klei en minder sterk gehumificeerd veen. Gereconstitueerde monsters hebben een hogere K_0 . Bij ontlasten neemt K_0 evenredig met de graad van overconsolidatie toe. De vaak aangehouden Jaky relatie $1 - \sin \phi'$ is niet bruikbaar indien de vermoedelijk zeer hoge ϕ' uit de triaxiaalproef wordt gebruikt.

De grensspanning ligt ruim boven de terreinspanning. De bepaling van de grensspanning levert in de verschillende proeftypen niet dezelfde waarde op door monsterverstoring, verschillen in reksnelheid maar ook door verschillen tussen de eigenschappen van monsters onderling. De waargenomen grensspanning ligt 30% tot 90% boven de terreinspanning; de onderzochte klei reageert onder in situ spanningscondities overgeconsolideerd.

Alle beproefde natuurlijke triaxiaalmonsters bezwijken op of nabij de tension cut-off; het vlak in de spanningsruimte dat trek- en drukspanningen scheidt. Dit vlak kan geassocieerd worden met een ϕ' van 90° . Dit impliceert niet dat ϕ' gelijk is aan 90° . Wellicht heeft het materiaal capaciteit om trekspanningen op te nemen (cohesie). De waarde van ϕ' is dan kleiner dan 90° . Invloeden van membraan- en side drains zijn naar verwachting te klein voor enige invloed van betekenis. De ϕ' uit de direct simple shearproef heeft een wat meer vertrouwde waarde: 38° (Bergambacht) en 28° (Oostvaardersplassen) en een kleine cohesie van enkele kPa's. Deze ϕ' is sterk afhankelijk van de interpretatiewijze van de proef.

De organische klei heeft wel degelijk structuur. Met name de monsters die consolideerd zijn bij eenmaal en tweemaal de terreinspanning hebben een grotere genormaliseerde sterkte en – stijfheid. Dit heeft deels te maken met de spanningsgeschiedenis (overconsolidatie). Pas bij consolidatie ruim voorbij de grensspanning vertonen de monsters soortgelijk gedrag als gereconstitueerde monsters; de monsters waaruit de structuur is verwijderd. Normaalconsolidatie leidt dus tot verwijdering van structuur. Gereconstitueerde monsters zijn alleen in het triaxiaalapparaat beproefd. Ook direct simple shearproeven laten een geleidelijke verandering van structuur zien naarmate de consolidatiespanning hoger is.

1 Inleiding

In het Delft Cluster project Gedrag van klei en veen, onderdeel van het basisproject Materiaal- en Ontwerpmoedellen, thema 1 Grond en constructie, wordt onderzoek verricht naar het mechanisch gedrag van klei en veen. Binnen het project zijn een aantal subprojecten gedefinieerd. Eén daarvan is het lage spanningsonderzoek, voorheen ondergebracht in een VOP project: “Fundamenteel gedrag van de ondergrond”. In het lage spanningsonderzoek wordt het mechanisch gedrag van organische kleisoorten bij lage axiaal symmetrische effectieve spanningsniveaus (15 – 40 kPa) bestudeerd.

Eén van de belangrijkste doelen van dit onderzoek is het verhogen van het kennisniveau van organische kleisoorten. Het betreft dan met name organische klei met een volumiek gewicht van ongeveer 12.5 kN/m³. In het verleden is gebleken dat die organische kleisoort afwijkend gedrag vertoont in vergelijking met niet organische kleisoorten met een groter volumiek gewicht. Kennisleemte van de organische klei betreft met name de sterkte van klei uitgedrukt in bijvoorbeeld de ongedraineerde schuifsterkte of, gebruik makend van effectieve parameters, van de hoek van inwendige wrijving ϕ' en de cohesie c' . In het verleden zijn regelmatig zeer hoge waarden van ϕ' waargenomen [den Haan, 1995]. De zogenaamde komkleien behoren tot de geschetste groep kleisoorten. Zij zullen een belangrijk aandeel hebben aan de stabiliteit van een groot aantal dijken.

Voor het lage spanningsonderzoek is organische klei, afkomstig van twee verschillende lokaties, beproefd in het laboratorium. Beide kleisoorten worden representatief geacht voor in de Nederlandse Delta voorkomende organische klei.

De eerste lokatie ligt in de gemeente Bergambacht, op het Delft Cluster proefvak Bergambacht (project Actuele sterkte). Deze site is gekozen vanwege de representativiteit van deze kleisoorten voor de Krimpenerwaard en het feit dat ter plaatse grootschalig onderzoek wordt gedaan naar de stabiliteit van dijken. Het project actuele sterkte vormt zo een referentieproject. De proefresultaten van de proeven op organische klei uit Bergambacht worden gepresenteerd in het rapport: “Gedrag van organische klei, lokatie Bergambacht” [Tigchelaar, 2001a].

De tweede lokatie ligt in het Oostvaardersplassengebied, gemeente Lelystad, nabij de gemeentegrens met Almere-buiten. In het verleden zijn hier vaker monsters gestoken voor onderzoek. De proefresultaten van de proeven op organische klei uit het Oostvaardersplassengebied worden gepresenteerd in het rapport: “Gedrag van organische klei, lokatie Oostvaardersplassen” [Tigchelaar, 2001b].

Bij het onderzoek is gebruik gemaakt van een K_0 -oedometer Constant Rate of Strain -, een state-of-the-art triaxiaal- en een direct simple shear opstelling. Met name zijn de triaxiaalproeven bijzonder. Unieke mogelijkheden van het triaxiaalapparaat zijn gecombineerd met bijzondere proefprocedures. Naast deze proeven zijn ook index - en classificatie proeven uitgevoerd. Het uitgevoerde werk maakt onderdeel uit van de overeenkomst DWW-1753.

Het lage spanningsonderzoek maakt onderdeel uit van een promotieonderzoek. De, bij deze opdracht horende, proefresultaten zullen worden gebruikt voor het proefschrift van J.Tigchelaar. Deze evaluatie moet als voorlopig worden beschouwd. Nieuwe inzichten en een meer uitgebreidere toetsing aan de literatuur zullen in het proefschrift worden gepresenteerd.

In dit rapport wordt het gedrag van organische klei geëvalueerd aan de hand van de proefresultaten van beide onderzoekslokaties.

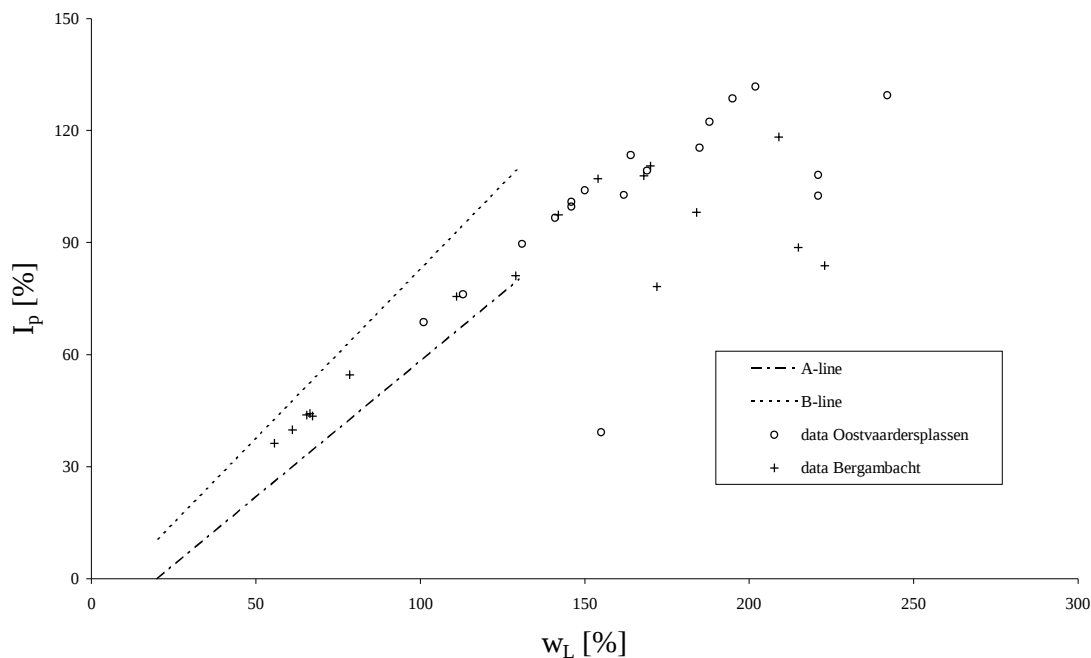
2 Evaluatie gedrag organische klei

De evaluatie is opgesplitst in een aantal onderwerpen. In 2.1 wordt ingegaan op de resultaten van de classificatie- en indexproeven. Paragraaf 2.2 behandelt de waarnemingen rond de consolidatie en samendrukking van de klei in de verschillende proeftypen. In paragraaf 2.3 wordt de sterkte van de klei beschreven. Tenslotte wordt structuur van organische klei behandeld in 2.4.

2.1 Classificatie- en indexproeven

“Extended A-line Chart”

Voor de classificatie van klei wordt vaak gebruik gemaakt van de plasticiteitsgrafiek (“A-line chart”). In die grafiek worden combinaties van de vloeigrens (w_L) en de plasticiteitsindex (I_p) weergegeven. Bekende relaties tussen de vloeigrens en de plasticiteitsindex zijn de A- en B-lijn. Volgens de literatuur scheidt de A-lijn siltige en organische kleisoorten van de niet organische kleisoorten. De B-lijn vormt een soort bovengrens. De proefresultaten van klei uit Bergambacht en het Oostvaardersplassengebied zijn in een “extended A-line chart” weergegeven. Zie Figuur 2.2.



Figuur 2.1 Extended A-line chart

Voor het bepalen van de vloeigrens is het Casagrande apparaat gebruikt. Omdat het Casagrande (BS1977) apparaat, volgens de literatuur, bij hoge vloeigrens te kampen heeft met dynamische effecten is de data gecorrigeerd.

Op beide sites zijn ook minder organische kleisoorten beproefd. Deze resultaten liggen in Figuur 2.1 tussen de A- en B-lijn en vertonen weinig afwijkingen ten opzichte van het verwachte gedrag. Volgens literatuur liggen organische kleimonsters beneden de A-lijn. Verder volgt uit de figuur dat de sterk organische kleisoorten beneden de A-lijn liggen. Dit is ook wat de literatuur aangeeft. Met name liggen de proefresultaten van organische kleimonsters met een vloeigrens $>160\%$ onder de A-lijn. Een

vloeigrens van 160% kan voor de onderzochte materialen worden geassocieerd met een gloeiverlies van ongeveer 10%. Wellicht is dit een omslagpunt naar een ander materiaalgedrag.

Soortelijke massa korrelmateriaal

Voor beide sites is de soortelijke massa van het korrelmateriaal bepaald. Hieruit zijn specifieke massa's van het organische – en het niet organische deel van het korrelmateriaal bepaald. Uit vergelijking van deze waarden met waarden de literatuur volgt dat de specifieke massa lokatieafhankelijk is. Ook zijn er verschillen tussen de proefresultaten van klei afkomstig van Nederlandse lokaties. Hierbij verschilt met name de waarde van de specifieke massa van het organisch materiaal. Tabel 2-1. Dit kan te maken hebben met de oorsprong van het organisch materiaal en de vormingsgeschiedenis. De variatie in de waarde van het minerale deel is kleiner.

Lokatie	G_o	G_m
	[-]	[-]
Bergambacht	1.390	2.732
Oostvaardersplassen	1.336	2.731

Tabel 2-1 Specifieke massa onderzochte organische klei

waarin:

G_o = specifieke massa organische bestanddelen [-]
 G_m = specifieke massa minerale bestanddelen [-]

Gloeiverlies

Het gloeiverlies is een hele belangrijke parameter. Het gloeiverlies correleert niet alleen sterk met de inverse van de soortelijke massa maar ook met de uitrol- en vloeigrens. De vloe- en uitrolgrens van de Oostvaardersplassenklei is minder sterk afhankelijk van het gloeiverlies dan de klei uit Bergambacht. Voor correlaties wordt verwezen naar [Tigchelaar, 2001a] en [Tigchelaar, 2001b].

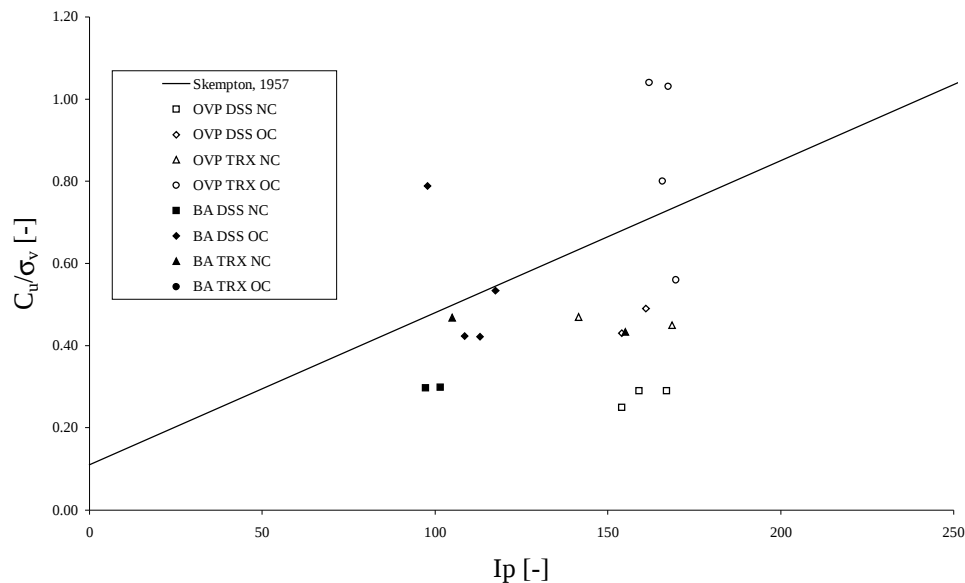
Variabiliteit eigenschappen

Diepteprofielen van watergehalte en volumieke gewichten laten een sterke variatie van de eigenschappen zien. Met name is de variabiliteit van de Bergambacht klei groot; op 10 cm afstand kan het watergehalte 50% verschillen. Dit is een grote spreiding gezien het gemiddelde watergehalte van 175%. Oostvaardersplassenklei varieert minder sterk. Het is de verwachting dat variatie van de eigenschappen met de diepte zeer veel groter is dan de laterale variatie. Deze variaties kunnen gevolgen hebben voor de keuze van de monsterhoogte voor bijvoorbeeld de triaxiaalproef.

Genormaliseerde sterkte

De genormaliseerde ongedraineerde schuifsterkte C_u/σ_v' is in Figuur 2.2 uitgezet tegen de plasticiteits index. De C_u waarde is bepaald van normaal- (NC) en overgeconsolideerde monsters (OC) in direct simple shear- (DSS) en triaxiaalproeven (TRX). De plasticiteitsindex is geschat op basis van het initiële watergehalte.

In Figuur 2.2 is de Skempton relatie ingetekend. De Skempton relatie geldt voor normaalgeconsolideerde klei en is afgeleid aan de hand van vane testen. De vergelijking van deze relatie met de proefdata is niet helemaal correct. In de Skempton relatie weerspiegelt het verloop van de plasticiteitsindex het verloop van de mineralogische samenstelling terwijl het verloop van de plasticiteit van organische kleisoorten, zoals in dit project zijn bepaald, vermoedelijk meer afhankelijk is van het organisch gehalte en minder van de variatie van de mineralogische samenstelling. Bovendien is de correlatie gebaseerd op proefresultaten uit field vane testen. Dit kan zorgen voor verschil in ongedraineerde schuifsterkte als gevolg van een andere vervormingstoestand bij bezwijken in vergelijking met de triaxiaal- of direct simple shearproef. Tussen laatstgenoemde proeftypen kunnen hierdoor ook verschillen in ongedraineerde schuifsterkte optreden.



Figuur 2.2 Genormaliseerde sterkte vs. Plasticiteitsindex

Uit de figuur volgt dat de Skempton relatie niet past bij de data. De Bergambacht data (BA) vertoont de kleinste afwijking. Mogelijk is de Skempton relatie niet bruikbaar voor deze kleisoorten of zijn de proeven zodanig anders uitgevoerd of geïnterpreteerd dan de proeven waarop de correlatie van Skempton is gebaseerd dat er een significante afwijking is. Uit de literatuur is bekend dat de genormaliseerde ongedraineerde schuifsterkte van organische grondsoorten afhankelijk is van de duur van consolidatie. Het materiaal is reksnelheidsafhankelijk. Ook neemt ϕ' af naarmate de duur van de consolidatie groter is. Beide effecten zijn sterker naarmate de klei meer organisch materiaal bevat.

Onlangs zijn in het kader van monsterverstoringsonderzoek een groot aantal CAU triaxiaalproeven uitgevoerd op OVP klei [den Haan, 2001]. De genormaliseerde sterkte in die proevenserie lag hoger dan die in dit onderzoek gemeten waarden. De grootste verschillen tussen beide proevenseries betroffen de consolidatieduur en de dimensies en randvoorwaarden (ruwheid eindvlakken) van de monsters. Met name vormen de laatstgenoemde invloeden nog onderwerp van studie.

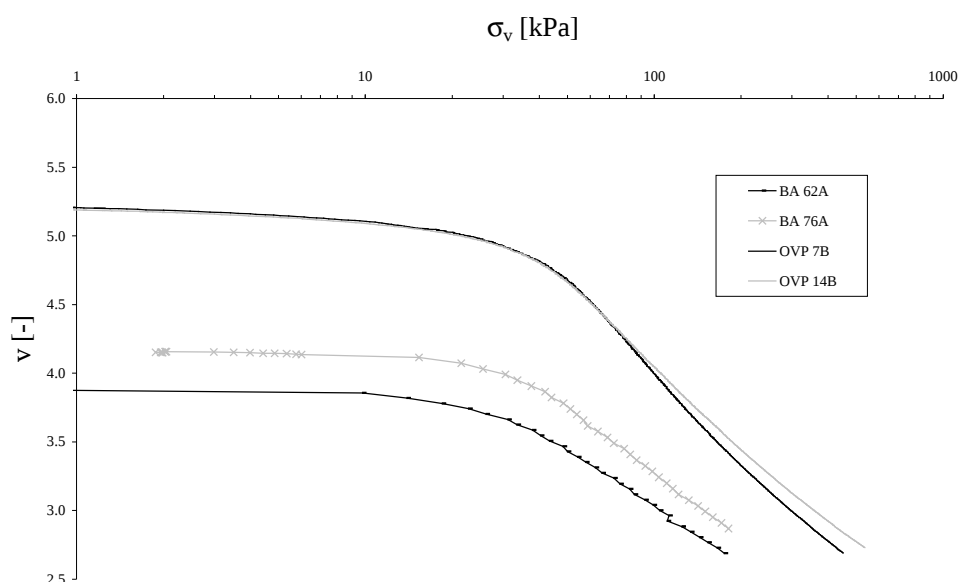
Uit de proefdata blijkt dat de in het triaxiaalapparaat beproefde OVP klei lichter is dan de klei uit Bergambacht. Dit betekent dat de duur van consolidatie een grotere invloed kan hebben op de verhouding C_u/σ'_v . Wellicht dat daarom de afwijking van BA klei ten opzichte van de Skempton relatie kleiner is.

2.2 Consolidatie en samendrukking

Uit de consolidatie – en samendrukkingsfasen van de verschillende proeftypen is een groot aantal eigenschappen afgeleid. Die eigenschappen worden in deze paragraaf beschreven.

Grensspanning

Uit 1-D samendrukking van de organische klei volgt duidelijk een relatief grote stijfheid bij kleine - en een relatief kleine stijfheid bij grote rekken; er is sprake van een grensspanning (vloeispanning). Dit is geen scherpe overgang. In Figuur 2.3 is het verloop van het specifiek volume tijdens de belastfasen van de K_0 -CRS proef weergegeven.



Figuur 2.3 v tegen σ_v K_0 -CRS proeven

In de Bergambacht klei ligt de triaxiaalgrensspanning 40% boven de K_0 -CRS grensspanning. Dit wordt mogelijk veroorzaakt door monsterverstoring. Voor deze site ligt de grensspanning ongeveer 30% tot 90% boven de verwachte terreinspanning. De overconsolidatiegraad van de grond in situ ligt dus tussen 1.3 en 1.9.

In de Oostvaardersplassen klei ligt de grensspanning waargenomen in de triaxiaalproef 20% lager dan die waargenomen in de K_0 -CRS proeven. Dit verschil wordt veroorzaakt door verschillen in reknelheid of voorbelasting van de K_0 -CRS monsters door dehydratie van de ondieper gelegen K_0 -CRS monsters. Voor deze site ligt de grensspanning 50% tot 90% boven de terreinspanning. Dit betekent dat de overconsolidatiegraad van de grond in situ ligt tussen 1.5 en 1.9.

Verloop - en waarde van K_0

In de verschillende proeftypen is organische klei samengedrukt zonder dat radiale rek mogelijk is; oedometercondities. Ieder proeftype heeft een bepaalde tolerantie wat betreft de radiale rek. Het is de verwachting dat de toleranties in het K_0 -CRS apparaat het kleinst zijn.

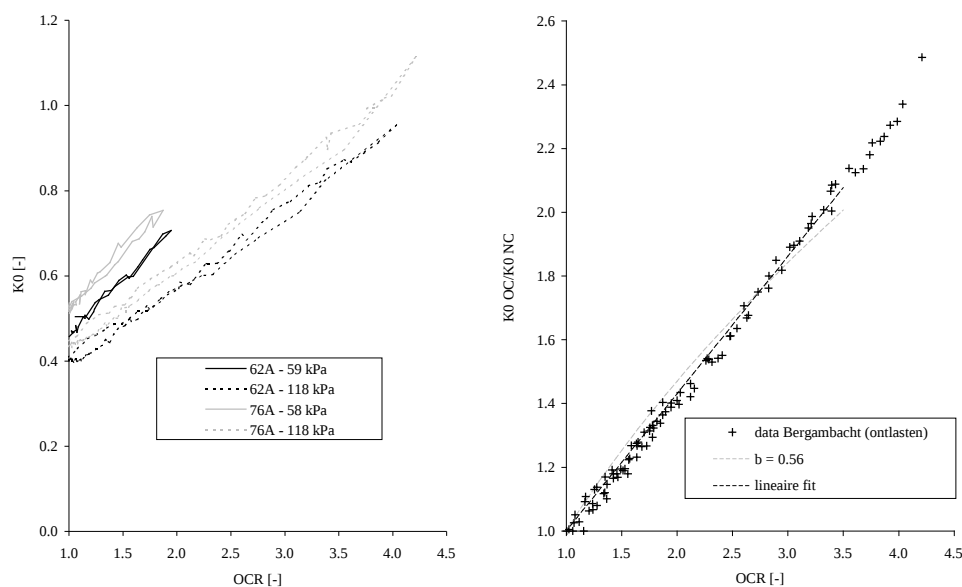
De K_0 waargenomen in de K_0 -CRS proeven van klei afkomstig van beide locaties is redelijk hoog. De verwachting was dat door de aanwezigheid van een grote hoeveelheid organisch materiaal K_0 veel lager zou kunnen zijn. Bergambacht klei heeft een K_0 van 0.41 terwijl Oostvaardersplassenklei een K_0

heeft van 0.33. Wellicht betekent dit dat de structuur van de organische bestanddelen van beide sites verschilt.

De waargenomen ϕ' in triaxiaalproeven in dit soort kleisoorten is relatief hoog. Gecombineerd met deze waarden van K_0 betekent dat de vaak gebruikte Jâky relatie: $K_0 = 1 - \sin \phi'$ voor deze grondsoorten mogelijk niet opgaat.

De in de triaxiaalproef waargenomen K_0 van Oostvaardersplassenklei is hoger dan de K_0 waargenomen in het K_0 -CRS apparaat. Of dit wordt veroorzaakt door de randvoorwaarden van beide proeftypen of dat dit door de monsters wordt veroorzaakt is nog niet duidelijk. Het is wel de verwachting dat de randvoorwaarden van het K_0 -CRS apparaat dusdanig zijn dat het volledige monster geen radiale rekken ondergaat. Voor de klei afkomstig van de Bergambacht site is de gemiddelde waarde van K_0 gemeten in het K_0 -CRS en het triaxiaalapparaat wel gelijk maar zijn de verschillen tussen de K_0 waarden van de beproefde monsters in het triaxiaalapparaat onderling wel veel groter.

In het K_0 -CRS apparaat is organische klei uit Bergambacht niet alleen belast maar ook ontlast tot een overconsolidatiegraad van 4. Bij het ontlasten is een toename van K_0 waargenomen. Opvallend is de lineaire relatie tussen de overconsolidatiegraad (OCR) en de verhouding van K_0 in overgeconsolideerde en normaalgeconsolideerde toestand. In Figuur 2.4 is het verloop van K_0 weergegeven. De literatuur geeft aan dat er tussen de genoemde verhouding en OCR vaak een machtsrelatie bestaat. De machtsrelatie geeft voor dit materiaal niet de beste fit.



Figuur 2.4 Verloop K_0 bij ontlasten; Bergambacht klei

Samendrukkingsconstanten

De samendrukkingsconstanten a en b van het a - b - c isotachen model zijn bepaald uit de proefresultaten van de K_0 -CRS proeven op Bergambachtklei. De Oostvaardersplassenklei is in het K_0 -CRS apparaat niet ontlast. Daarom kon de parameter a niet worden bepaald. Voor beide kleisoorten is het specifiek volume bij de referentiedruk van 1 kPa bepaald. Zie Tabel 2-2. Hieruit volgt een grotere samendrukbaarheid van de kleimonsters uit het Oostvaardersplassengebied. Ook is het initiële specifieke volume veel groter. Dit komt tot uitdrukking in de hogere waarde van v_1 .

	v_1	a	b
	[-]	[-]	[-]
BA	7.78	0.011	0.21
	8.98	0.011	0.22
OVP	13.58	-	0.27
	11.62	-	0.23

Tabel 2-2 Samendrukkingsparameters

waarin:

v_1	=	specifiek volume bij een effectieve verticale spanning van 1 kPa	[-]
a	=	ontlast/herbelast parameter abc model	[-]
b	=	parameter voor de maagdelijke samendrukking abc model	[-]

Doorlatendheid, samendrukbaarheid en consolidatiecoëfficiënt

Uit het verloop van de uitgevoerde K_0 -CRS proeven zijn de initiële waarden van de doorlatendheid (k_0), samendrukbaarheid (m_{v0}) en consolidatiecoëfficiënt (c_{v0}) bepaald. Zie Tabel 2-3. Ook is de afhankelijkheid van deze parameters met het poriëngetal bepaald. Zie [Tigchelaar, 2001a en 2001b].

	Bergambacht		Oostvaardersplassen		
monster	62A	76A	7B	14B	
k_0	2.2×10^{-8}	3.0×10^{-9}	1.0×10^{-9}	3.4×10^{-9}	[m/s]
m_{v0}	7.14×10^{-3}	1.21×10^{-2}	1.38×10^{-2}	1.34×10^{-2}	[m ² /kN]
c_{v0}	7.91×10^{-7}	2.03×10^{-6}	1.46×10^{-8}	1.46×10^{-8}	[m ² /s]

Tabel 2-3 Initiële waarden k , m_v en c_v organische kleimonsters

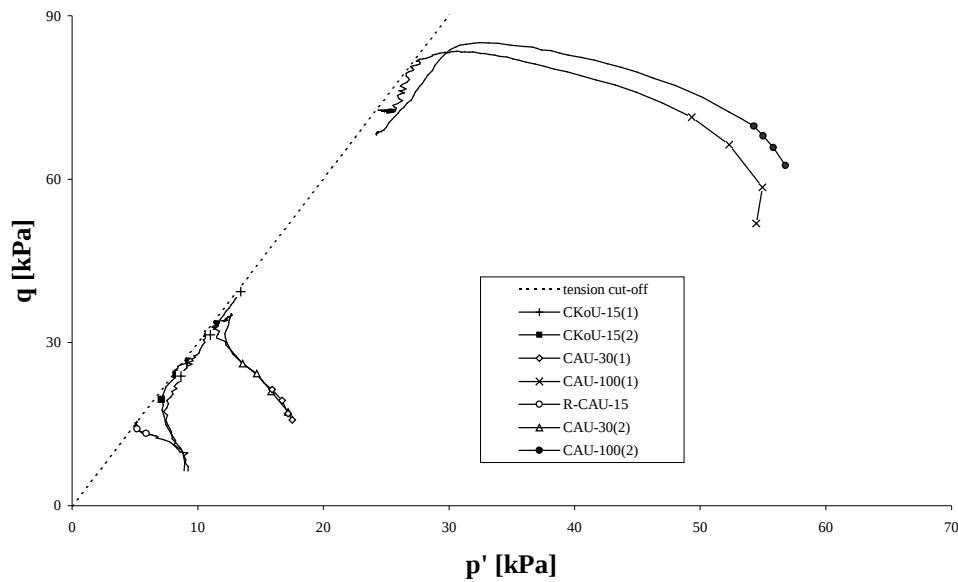
Uit de tabel volgt dat de monsters afkomstig uit het Oostvaardersplassengebied minder doorlatend en meer samendrukbaar zijn en een kleinere consolidatiecoëfficiënt hebben.

2.3 Sterkte van organische klei

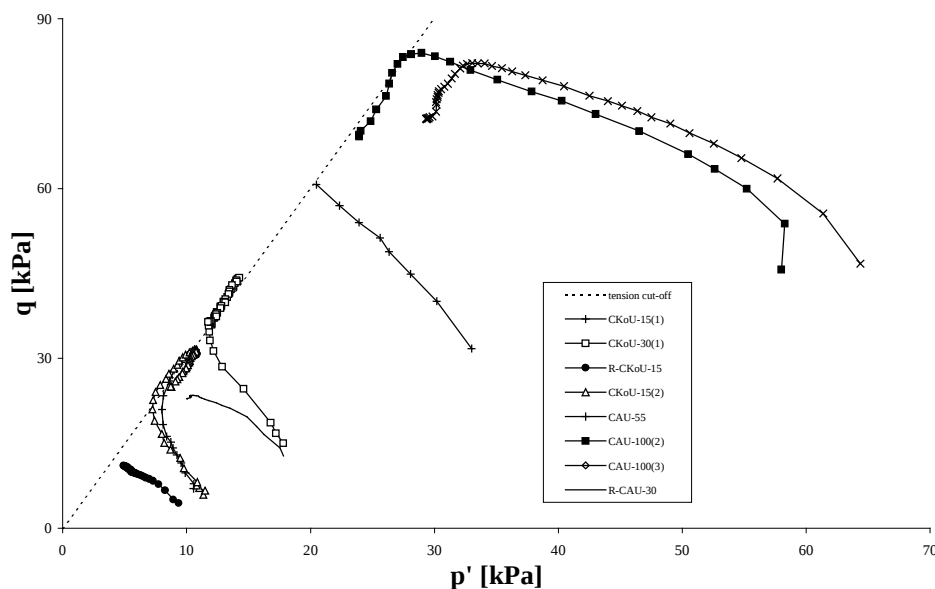
2.3.1 Triaxiaalsterkte

Het waargenomen gedrag tijdens de ongedraineerde afschuif fase van klei afkomstig van beide sites is min of meer gelijk. Direct na het sluiten van de drainagekranen en het starten van de afschuif fase valt de grote waterspanningsopbouw op. Voor (licht)overgeconsolideerde monsters is de waterspanningsopbouw per increment van de deviatorspanning min of meer gelijk. Dit betekent een constante Skempton A-factor bij kleine rekken. Normaalgeconsolideerde monsters (CAU-100-proeven) reageren bij kleine rekken anders; er treedt minder wateroverspanning op. Een mogelijke verklaring voor dit verschil is de reksnelheid aan het einde van de consolidatiefase. Naarmate die snelheid lager is, verstevigt het monster; dit heeft invloed op de stijfheid (kruipversteviging) en de neiging om waterspanningen te genereren.

In Figuur 2.5 en Figuur 2.6 zijn de effectieve spanningspaden van Bergambachtmonsters en Oostvaardersplassenmonsters gepresenteerd. Uit het monsternummer is af te leiden of een monster anisotroop spanningsgestuurd (CA) of anisotroop rekgestuurd (CK_0) is geconsolideerd en welk spanningsniveau voor de ongedraineerde afschuif fase (U) wenselijk was. De werkelijke consolidatiespanningen liggen iets lager. Als proeven duplo zijn uitgevoerd is het monsternummer voorzien van een volgnummer.



Figuur 2.5 Effectieve spanningspaden triaxiaalproeven Bergambacht



Figuur 2.6 Effectieve spanningspaden triaxiaalproeven Oostvaardersplassen

Bij doorgaand vervormen beweegt het spanningspunt in de spanningsruimte (q - p') ruimte naar de tension cut-off. Dit vlak in de spanningsruimte scheidt druk- en trekspanningen en kan worden geassocieerd met een ϕ' van 90° . Alle overgeconsolideerde monsters bezwijken op de tension cut-off. De normaalgeconsolideerde monsters (CAU-100) bezwijken nabij of op de tension cut-off.

Normaalgeconsolideerde gereconstitueerde OVP monsters zijn niet op de tension cut-off bezweken. De ϕ' van dit materiaal bedroeg 61° . Slechts één gereconstitueerd monster Bergambacht klei is afgeschoven. Dit monster bezweek wel op de tension cut-off.

Het bezwijken op de tension cut-off impliceert niet dat de ϕ' gelijk is aan 90° graden. Wellicht hebben de monsters een zekere capaciteit om trek op te nemen (cohesie) en is ϕ' iets lager.

Na het bereiken van dit vlak hebben de overgeconsolideerde monsters laten zien nog te beschikken over een extra sterkte. Dit uit zich in toenemende waarden van de deviator- en effectieve isotrope spanning (verhouding 3:1). Waargenomen is dat bij doorgaand vervormen er niet meer wordt voldaan aan 'the undrained condition'; er ontstaat ruimte tussen het monster en het membraan. Op de tension cut-off laten normaalgeconsolideerde monsters juist afnemende waarden van de deviator- en effectieve isotrope spanning zien (verhouding 3:1); er is sprake van een duidelijke 'failure' toestand. In ieder geval is dit geschetste gedrag voor klei bijzonder. Bij beproeving van veen wordt dit vaker waargenomen.

De genormaliseerde ongedraineerde schuifsterkte van klei afkomstig van beide sites bedraagt ongeveer 0.45. Zie Figuur 2.2.

2.3.2 Direct simple shear sterkte

De hoek van inwendige wrijving ϕ' en cohesie c' bepaald uit direct simple shearproeven zijn gepresenteerd in Tabel 2-4. Deze waarden zijn afhankelijk van de gedane aannames; vooral met betrekking tot de spanningstoestand bij bezwijken.

	ϕ'	c'
	[°]	[-]
BA	37.3	1.8
OVP	27.7	3.3

Tabel 2-4 Sterkte parameters uit DSS proeven

De beproefde Bergambacht monsters zijn sterker dan de OVP monsters. Dit komt tot uitdrukking in de hogere ϕ' maar ook in de hogere waarde van de genormaliseerde ongedraineerde schuifsterkte, respectievelijk 0.35 en 0.30. Zie Figuur 2.2.

2.3.3 Mogelijke invloeden waarnemingen

Het systematisch bezwijken van monsters op de tension cut-off is typerend voor de beproefde organische klei. In het bijzonder is het bezwijken van, bij gangbare spanningsniveaus (50 kPa-100 kPa), normaalgeconsolideerde monsters op de tension cut-off bijzonder. Er zijn verschillende factoren die het verloop van het effectief spanningspad en de sterkte van de klei kunnen beïnvloeden. De meest waarschijnlijke zijn:

- wrijving langs eindvlakken en dimensies monster;
- membraancorrectie;
- correctie side drains.

Wrijving langs eindvlakken en dimensies monsters

Het was de bedoeling om in de triaxiaalproef 'element'gedrag te onderzoeken. Daarom zijn gladde eindvlakken gebruikt en is de monsterhoogte beperkt tot eenmaal de diameter. Dit kan tot gevolg hebben dat schuifvlakken (lokalisaties) zich minder goed kunnen ontwikkelen waardoor monsters pas bij een hogere deviatorspanning bezwijken. Een slank monster met een hoogte/diameterverhouding van 2, belast op de traditionele wijze, met ruwe eindvlakken zou dan een geringere sterkte hebben, en dus een lagere ϕ' . Dit verschil is afhankelijk van het materiaal. Vertoont het materiaal softening dan kan het verschil groter zijn dan voor een plastisch klei. In de nabije toekomst zullen enkele proeven

worden uitgevoerd op vergelijkbare monsters met een hoogte/diameterverhouding van 2 en ruwe eindvlakken (standaard dimensies en drainagecondities).

Membraancorrecties

Al in het begin van het lage spanningsonderzoek is erkend dat het membraan en de side drains een aanzienlijke bijdrage aan de deviatorspanning zouden kunnen hebben. Daarom is onderzoek uitgevoerd naar die bijdragen van side drains en membraan aan de deviatorspanning [Greeuw et al., 2000]. Dit onderzoek bestond uit een serie triaxiale compressie- en extensie proeven op gelatinen monsters.

Dat onderzoek betrof enkel de bijdrage aan de deviator in de ongedraineerde afschuiffase (constant volume) en leverde een richtlijn op voor de aan te houden correcties. Omdat een triaxiaalproef niet alleen bestaat uit een ongedraineerde afschuiffase maar ook uit een consolidatiefase waarin axiale- en volumieke rekken beide optreden, is die correctie gecombineerd met een bekende correctie uit de literatuur [Duncan and Seed, 1967] welke is gebaseerd op compressie van een elastische cilinder waarbij axiale- en volumieke rekken mogelijk zijn. Hierbij wordt de invloed van plooivorming in de consolidatiefase genegeerd. Plooivorming zal met name bij hoge spanningsniveaus en grote rekken optreden.

De vergelijkingen voor de Duncan and Seed correcties luiden:

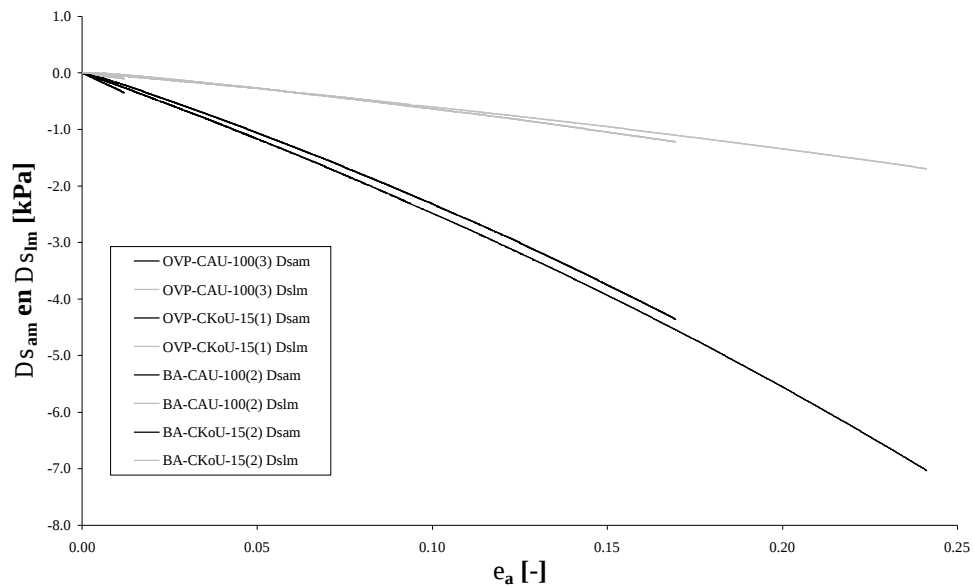
$$\Delta \sigma_{am} = -\frac{2E_m}{3} \left[1 + 2e_{at} - \sqrt{\frac{1-e_v}{1-e_{at}}} \right] \frac{A_{om}}{A_{os}(1-e_v)}$$

$$\Delta \sigma_{lm} = -\frac{2E_m}{3} \left[2 + e_{at} - 2\sqrt{\frac{1-e_v}{1-e_{at}}} \right] \frac{t_{om}}{r_{os}(1-e_v)}$$

waarin:

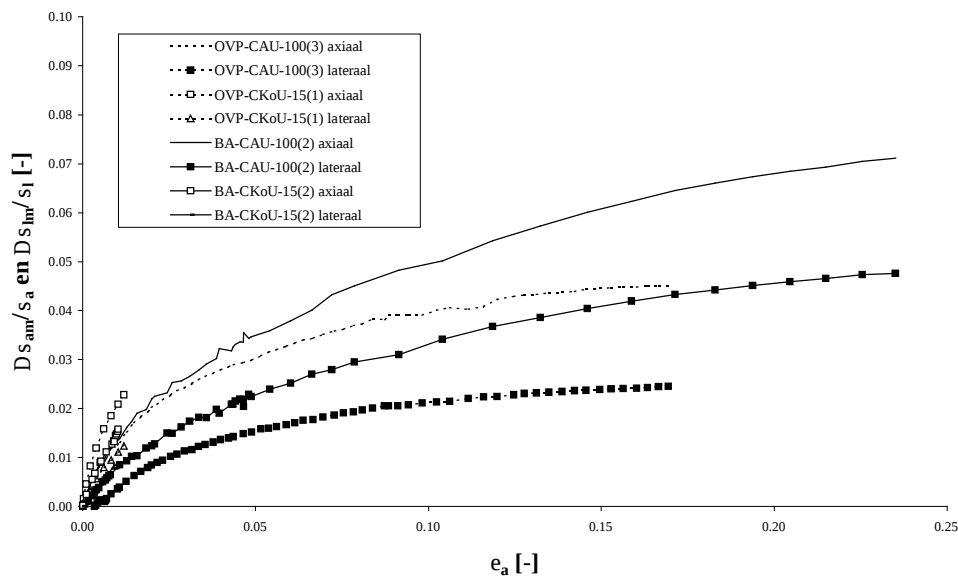
$\Delta \sigma_{am}$	=	correctie axiale spanning	[kPa]
$\Delta \sigma_{lm}$	=	correctie laterale spanning	[kPa]
E_m	=	Young's modulus	[kPa]
ϵ_{at}	=	axiale rek monster	[-]
ϵ_v	=	volumieke rek monster	[-]
A_{om}	=	initieel oppervlakte van het membraan	[m ²]
A_{os}	=	initieel oppervlakte van het monster	[m ²]
t_{om}	=	initiële dikte membraan	[m]
r_{os}	=	initiële straal monster	[m]

In Figuur 2.7 zijn de aangehouden correcties voor vier proeven weergegeven. Twee proeven op Bergambacht klei, bij 15 kPa en 100 kPa en twee proeven op Oostvaardersplassen klei bij 15 kPa en 100 kPa. Alle genoemde monsters zijn anisotroop geconsolideerd met een kleine optredende radiale rek; bij benadering oedometercondities.



Figuur 2.7 Membraancorrectie Duncan and Seed; consolidatiefase

Uit de figuur volgt dat de axiale correctie groter is dan de laterale correctie. De correcties voor de 15 kPa proeven zijn kleiner dan 0.5 kPa. Bij de hogere spanningen bedraagt de axiale - en laterale correctie respectievelijk ongeveer 6 kPa en 1.5 kPa. De eindwaarden van de bereikte axiale rek zijn niet gelijk. Dit wordt enerzijds veroorzaakt door verschillen in samendrukbaarheid van de monsters, anderzijds door het spanningniveau aan het einde van consolidatie. Om te laten zien wat de relatieve invloed is van de correcties aangehouden voor de consolidatiefase zijn de correcties genormaliseerd met de actuele effectieve spanning. Zie Figuur 2.8.



Figuur 2.8 Relatieve invloed membraancorrecties

Voor de 15 kPa proeven liggen de correcties in de buurt van 2% tot 3%. Voor de hogere spanningen neemt dit toe tot 6% à 7%, een niet te verwaarlozen invloed.

Figuur 2.7 lijkt een constante verhouding van de axiale- en laterale correcties aan te geven. Uit de Duncan and Seed correcties kan worden afgeleid dat deze verhouding gelijk is aan vier indien de verhouding van membraandikte en monsterdiameter zeer klein is. Zie appendix I. Gebruik makend van dezelfde aannames kan ook de axiale correctie worden vereenvoudigd tot:

$$\Delta s_{am} = -\frac{16E_m}{3} \frac{t_{om}}{D_i} \frac{e}{1-e}$$

De laterale correctie is dan gelijk aan $\Delta \sigma_{am}/4$.

Voor het corrigeren van de axiale- en radiale spanning in de afschuiffase is de correctie uit het lage spanningsonderzoek voor de ongedraineerde afschuiffase opgeteld bij de eindwaarden van de correcties aan het einde van consolidatie (superpositie). De correctie voor de membraanbijdrage luidt [Greeuw et al, 2000]:

$$\Delta q_m = a \frac{4Et}{D} e_a \quad \text{voor } e_a < 0.07$$

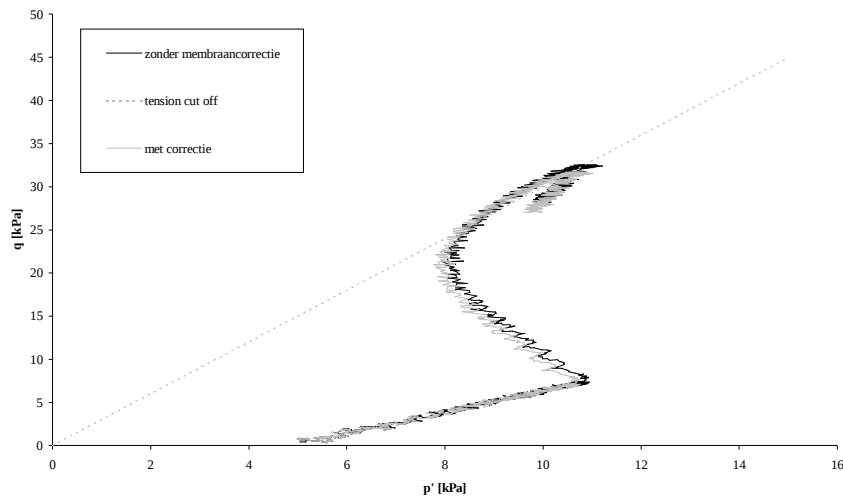
$$\Delta q_m = a \frac{0.28Et}{D} + b \frac{4Et}{D} (1 - e_a) \quad [kPa] \quad \text{voor } e_a \geq 0.07$$

waarin:

Δq_m	=	correctie deviator spanning	[kPa]
α, β	=	coëfficiënten	[-]
E	=	Young's modulus	[kPa]
T	=	dikte membraan	[m]
ε	=	axiale rek monster	[-]
D	=	diameter monster	[m]

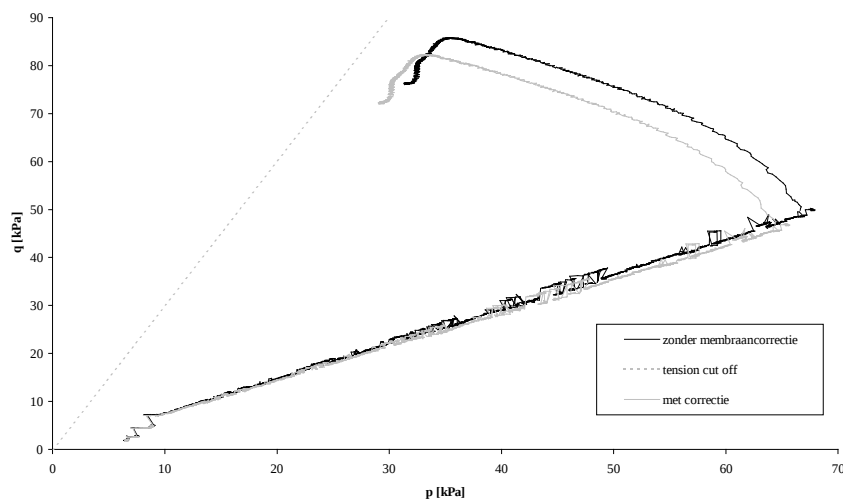
Voor beide coëfficiënten zijn waarden van respectievelijk 0.38 en 0.19 aangehouden.

Om een indruk te geven van de invloed van de membraancorrecties op de ligging van de effectieve spanningspaden zijn in Figuur 2.9 en Figuur 2.10 de effectieve spanningspaden met en zonder membraancorrecties van de proeven CK₀U-15(1) en CAU-100(3) weergegeven. De presentatie betreft onbewerkte meetdata. Daarom zijn variaties in het effectief spanningspad zichtbaar als gevolg van bijvoorbeeld de invloed van temperatuurswisselingen op het poriëndrukmeetsysteem.



Figuur 2.9 Invloed membraancorrectie op verloop proef OVP CK₀U-15(1)

Uit Figuur 2.9 en Figuur 2.10 volgt dat de relatieve invloed van de membraancorrecties zeer gering. Hier was ook naar gestreefd door gebruik te maken van relatief dunne membranen (<0.2 mm) en een monsterdiameter van ongeveer 66 mm.



Figuur 2.10 Invloed membraancorrectie op verloop proef OVP CAU-100(3)

Correctie side drains

Eerder in VOP kader uitgevoerd onderzoek liet zien dat side drains die onder een hoek van 35 graden ten opzichte van de horizontaal zijn aangebracht, in een ongedraineerde afschuiffase, een verwaarloosbare bijdrage hebben aan de deviatorspanning [Greeuw et al, 2000]. Bij het aanbrengen van de side drains in dit experimentele onderzoek is hiermee rekening gehouden. Het is daarom de verwachting dat de bijdrage van de side drains aan de deviatorspanning nihil is.

2.4 Structuur van organische klei

In het proefprogramma is ook aandacht geweest voor de invloed van structuur; de oriëntatie van deeltjes (fabric) en de aanwezigheid van bindingen tussen deeltjes (bonding). Daartoe zijn ook gereconstitueerde monsters gefabriceerd en beproefd in het triaxiaalapparaat. Gereconstitueerde monsters zijn gemaakt door klei aan te mengen met water tot een watergehalte net boven de vloeigrens en vervolgens 1-D te consolideren. In het triaxiaalapparaat zijn de monsters opnieuw geconsolideerd bij spanningen voorbij de grensspanning. Niet alle proeven op gereconstitueerd materiaal zijn geslaagd.

Het eerste gereconstitueerde organische kleimonster gemaakt van Bergambacht klei liet bij consolidatie tot de terreinspanning (15 kPa) een veel geringere sterkte en stijfheid zien ten opzichte van de natuurlijke monsters. Dit verschil wordt veroorzaakt door structuur van de natuurlijke monsters; herconsolidatie van de natuurlijke monsters tot de terreinspanning leidt tot een overconsolidatiegraad van 1.3 tot 1.9. Dit leidt tot extra stijfheid en sterkte. Het gereconstitueerde monster reageerde normaalgeconsolideerd; de aangebrachte terreinspanning lag boven de consolidatiespanning tijdens fabricage (10 kPa). Blijkbaar was dit spanningsverschil groot genoeg voor het verkrijgen van normaalgeconsolideerd gedrag.

Het tweede gereconstitueerde monster reageerde bij hetzelfde spanningsniveau niet normaalgeconsolideerd. Tijdens fabricage van dat monster was 20 kPa opgelegd als consolidatiespanning. Blijkbaar was de grensspanning van de klei dusdanig hoog dat het materiaal bij dat spanningsniveau overgeconsolideerd reageerde. Dit gedrag volgde uit bendermetingen gedurende de consolidatiefase. Dit monster is voortijdig bezweken.

Opvallend is dat de natuurlijke monsters die normaalgeconsolideerd zijn dezelfde mate van waterspanningsopbouw tijdens de ongedraineerde afschuiffase laten zien. Ook is de genormaliseerde sterkte en stijfheid gelijk. Dit betekent dat normaal consolideren leidt tot het verwijderen van de aanwezige structuur. Ook het gereconstitueerde monster bezweek op de tension cut-off.

De genormaliseerde stijfheid en ongedraineerde schuifsterkte van normaalgeconsolideerde monsters bedraagt voor deze klei ongeveer respectievelijk 40 en 0.45. Indien het monster nog niet volledig verstoord is, dus nog structuur heeft nemen deze waarden toe. Dit volgt uit zowel triaxiaal- als direct simple shearproeven.

Van de Oostvaardersplassenklei zijn drie monsters beproefd waarvan twee ook daadwerkelijk zijn afgeschoven. De bevindingen uit de proeven op gereconstitueerd materiaal afkomstig van de Bergambacht site liggen in dezelfde lijn als die van de Oostvaardersplassen site. De genormaliseerde sterkte en stijfheid zijn in dit geval gelijk aan respectievelijk 0.45 en 35. Deze klei reageert dus iets minder stijf. Bovendien bezwijken beide gereconstitueerde monsters niet op de tension cut-off en hebben een ϕ' van ongeveer 61° .

3 Conclusies en aanbevelingen

3.1 Conclusies

Eén van de eerste verkennende onderzoeken naar het gedrag van organische klei is afgerond en het waargenomen gedrag is in kaart gebracht. De metingen volgend uit classificatie-, index, K_0 -CRS, triaxiaal- en direct simple shearproeven bevestigen het vermoeden dat het materiaalgedrag zeer opvallende kenmerken heeft. De belangrijkste conclusies uit het onderzoek zijn:

- organische klei met een vloeigrens van meer dan 160% (overeenkomend met een gloeiverlies van ongeveer 10%) liggen onder de bekende A-lijn in een extended plasticity chart. Klei met minder organisch materiaal ligt tussen de A- en B-lijn;
- er is een zeer grote variatie van het watergehalte en volumiek gewicht met de diepte. Dit geldt met name voor organische klei afkomstig uit Bergambacht;
- er is een grote afwijking tussen de genormaliseerde sterkte van organische klei en de genormaliseerde sterkte van niet organische klei vaak benaderd met de Skempton relatie. De genormaliseerde sterkte van organische klei is veel lager dan niet organische klei met vergelijkbare plasticiteit. De vergelijking is niet helemaal correct. De Skempton relatie is gebaseerd op field vane testen terwijl de proefresultaten uit dit onderzoek gebaseerd zijn op triaxiaal- en direct simple shearproeven. Ook is de plasticiteit in de Skempton relatie meer afhankelijk van de mineralogie terwijl de plasticiteit van organische klei met name wordt bepaald door de hoeveelheid organisch materiaal. De afwijking van klei uit het Oostvaardersplassengebied is groter dan de klei uit Bergambacht;
- het gloeiverlies is een belangrijke parameter en correleert sterk met de Atterbergse grenzen en de inverse van de soortelijke massa;
- de K_0 van normaalgeconsolideerde organische klei bedraagt ongeveer 0.4. Uit de literatuur volgt dat niet organische kleisoorten een K_0 hebben van 0.5-0.7. Veen waarin vezels voorkomen kunnen een waarde van K_0 hebben kleiner dan 0.3. De K_0 van organische klei ligt daartussen. Gereconstitueerde monsters hogere K_0 ;
- bij ontlasten neemt K_0 toe (binnen het onderzochte spanningsbereik), ongeveer evenredig met de graad van overconsolidatie;
- de vaak gebruikte Jaky relatie is niet bruikbaar indien de vermoedelijk zeer hoge ϕ' uit de triaxiaalproef wordt gebruikt;
- de grensspanning ligt boven de terreinspanning. De bepaling van de grensspanning levert in de verschillende proeftypen niet dezelfde waarde op door monsterverstoring, verschillen in reksnelheid maar ook verschillen tussen de eigenschappen van monsters onderling. De waargenomen grensspanning ligt 30% tot 90% boven de terreinspanning;
- alle beproefde natuurlijke monsters bezwijken op of nabij de tension cut-off. Het vlak in de spanningsruimte dat trek- en drukspanningen scheidt. Dit vlak kan geassocieerd worden met een ϕ' van 90° . Dit impliceert niet dat ϕ' gelijk is aan 90° . Wellicht heeft het materiaal capaciteit om trekspanningen op te nemen (cohesie). De waarde van ϕ' is dan kleiner dan 90° . De ϕ' uit de direct simple shearproef heeft een wat meer vertrouwde waarde: 38° (Bergambacht) en 28° (Oostvaardersplassen) en een kleine cohesie van enkele kPa's. Deze ϕ' is sterk afhankelijk van de wijze interpretatie van de proef;
- bezwijken op de tension cut-off betekent in de uitgevoerde triaxiaalproeven dat de effectieve horizontale spanning gelijk is aan 0 kPa. Bij doorgaand vervormen werd enkele malen het membraan weggedrukt vooral bij lage effectieve consolidatiespanning. Het monster kon dan doorgaand vervormen voordat het bezweek. Dit betekent dat niet meer voldaan wordt aan de 'undrained condition';

- invloeden van membraan- en side drains zijn naar verwachting te klein om voorgaande conclusies te beïnvloeden. Dit was ook de verwachting gezien het gebruik van zeer dunne membranen, relatief grote monsterdiameters en onder een hoek aangebrachte side drains. Alleen de dimensies van de monsters en wrijving langs eindvlakken blijven nog onderwerp van studie;
- de organische klei heeft wel degelijk structuur. Met name de monsters die consolideerd zijn bij 15 kPa en 30 kPa hebben een grotere genormaliseerde sterkte en – stijfheid. Dit heeft deels te maken met de spanningsgeschiedenis (overconsolidatie). Pas bij consolidatie ruim voorbij de grensspanning vertonen de monsters soortgelijk gedrag als gereconstitueerde monsters; de monsters waaruit de structuur is verwijderd. Normaalconsolidatie leidt dus tot verwijdering van structuur. Gereconstitueerde monsters zijn alleen in het triaxiaalapparaat beproefd. Ook direct simple shearproeven laten een geleidelijke verandering van structuur zien naarmate de consolidatiespanning hoger is.

3.2 Aanbevelingen

De experimentele kennis van organische klei bij lage spanningen is nog verre van compleet. Het is nodig om nog meer kleisoorten op gelijke wijze te beproeven. Hierbij moet het organisch gehalte de variabele zijn. Enkele onderzoeksthema's kunnen zijn:

- ligging van het vloeiooppervlak;
- reksnelheidsafhankelijkheid ligging vloeiooppervlak;
- capaciteit om trek op te nemen; bestaan cohesie;
- gedrag onder niet axiaal symmetrische spannings- en rekcondities.

Referenties

Duncan, J.M., Seed, H.B. (1967) "Corrections for strength test data", Journal of the soil mechanics and foundation division, pp.121-13

Greeuw, G., Adel, H. den, Schapers, A.L., Haan, E.J. den. (2000) "Reduction of axial resistance due to membrane and side drains in the triaxial test", ASCE Geotechnical Special Publication No.112, ed. Hanson, J.L., Termaat, R.J., pp.30-42.

Haan, E.J. den (1995). "Theme report on Special Problem Soils and Soft rocks, Part I Peats and organic soils", XI ECSMFE Kopenhagen, 9:139-156.

Haan, E.J. den (2001). "Sample disturbance of a soft organic dutch clay", CO-710203/20;

Tigchelaar, J. (2001). "Gedrag van organische klei; lokatie Bergambacht", CO-710203/26, augustus 2001;

Tigchelaar, J. (2001). "Gedrag van organische klei; lokatie Oostvaardersplassen", CO-710203/28, november 2001;

BIJLAGEN

Bijlage I Verhouding membraancorrecties oedometercondities

Voor oedometercondities ($\varepsilon_a = \varepsilon_v = \varepsilon$) kan de verhouding van de membraancorrecties volgens Duncan and Seed worden geschreven als:

$$\frac{\Delta s_{am}}{\Delta s_{lm}} = \frac{[1 + 2e - 1] \frac{A_{om}}{A_{os}(1-e)}}{[2 + e - 2] \frac{t_{om}}{r_{os}(1-e)}}$$

met:

$$A_{om} = p(t_{om} D_i + t_{om}^2)$$

$$A_{os} = \frac{p}{4} D_i^2$$

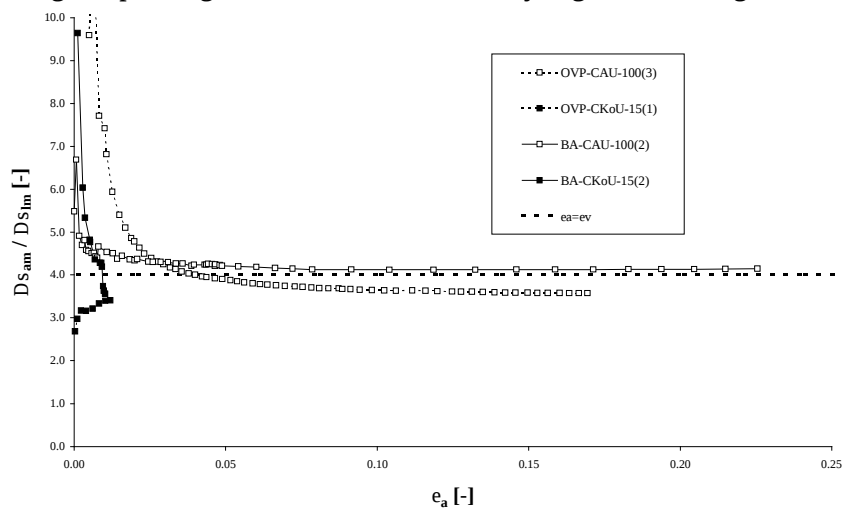
waarin:

D_i = initiële diameter monster [m]

Dit kan worden uitgewerkt tot:

$$\frac{\Delta s_{am}}{\Delta s_{lm}} = \frac{[1 + 2e - 1] \frac{p(t_{om} D_i + t_{om}^2)}{\frac{p}{4} D_i^2 (1-e)}}{[2 + e - 2] \frac{t_{om}}{\frac{D_i}{2} (1-e)}} = \frac{4[1 + 2e - 1] \left(\frac{t_{om}}{D_i} + \left(\frac{t_{om}}{D_i} \right)^2 \right)}{2[2 + e - 2] \frac{t_{om}}{D_i}} \underset{\text{met } \frac{t_{om}}{D_i} < 1}{\approx} \frac{8}{2} = 4$$

Hieruit volgt een constante verhouding van vier. In Figuur B-1 is deze verhouding weergegeven gebruik makend van de proefdata. Tijdens de proeven zijn er radiale rekken opgetreden, met name in het begin van de proef. Dit uit zich ook in de figuur door een grote afwijking ten opzichte van vier. Bij de hogere spannings- en rekniveaus is de afwijking kleiner en ligt de verhouding rond de vier.



Figuur B-1 Verloop verhouding axiale- en laterale membraancorrecties