



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Milieu

Deltares
Enabling Delta Life 

Protocol laboratoriumproeven voor grondonderzoek aan waterkeringen



Protocol laboratoriumproeven voor grondonderzoek aan waterkeringen

dr. G. Greeuw
drs. H.M. van Essen
ing. T.A. van Duinen

1230090-019

Titel

Protocol laboratoriumproeven voor grondonderzoek aan waterkeringen

Opdrachtgever

Rijkswaterstaat Water,
Verkeer en Leefomgeving

Project

1230090-019

Kenmerk

1230090-019-GEO-0002-
gbh

Pagina's





26

Trefwoorden

Klei, veen, triaxiaalproef, direct simple shear proef, classificatie, compressieproef

Samenvatting

Dit rapport bevat een protocol voor het uitvoeren van de meest gangbare laboratoriumproeven ten behoeve van grondonderzoek aan waterkeringen.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
03	mei 2016	dr. G. Greeuw		dr.ir. C. Zwanenburg		ir. L. Voogt	
		ing. T.A. van Duinen					

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
2 Monsterbehandeling	5
3 Triaxiaalproeven	7
3.1 Dimensies proefstuk en verzadiging	7
3.2 Consolidatiefase	7
3.3 Keuze van K_0 voor anisotrope consolidatie	8
3.4 Keuze spanningsniveaus	9
3.5 Uitvoering afschuiffase	11
3.6 Correctie voor weerstand van membraan en drainage strips	12
4 Direct simple shearproeven	13
4.1 Verzadiging	13
4.2 Consolidatiefase	13
4.3 Keuze spanningsniveaus	13
4.4 Uitvoering	13
4.5 Uitvoering bij lage spanning en membraancorrectie	15
5 Samendrukkingsproeven	17
6 Constant rate of strain (CRS)-proeven	19
7 Classificatie klei en veen	21
8 Ontwikkelingen op termijn	23
9 Referenties	25

1 Inleiding

In dit protocol worden aanbevelingen gegeven voor het uitvoeren van ongedraineerde anisotroop geconsolideerde triaxiaalproeven (CAU), direct simple shear proeven (DSS), constant rate of strain proeven (CRS), samendrukkingsproeven en classificatieproeven. Dit protocol is gebaseerd op de eerste versie van mei 2011, maar is grondig herzien op basis van commentaar van diverse partijen en recent uitgevoerd onderzoek.

Dit protocol is opgesteld in opdracht van Rijkswaterstaat in samenwerking met de belangrijkste geotechnische laboratoria van Nederland. De voorgaande versie van mei 2011 staat ook wel bekend als het STOWA protocol.

Voor de meest gangbare geotechnische laboratoriumproeven zijn in Nederland normen en richtlijnen beschikbaar. Deze bestaande normen en richtlijnen bevatten echter witte vlekken. Daarnaast zijn deze normen en richtlijnen niet altijd aangepast aan de actuele internationale geotechnische inzichten. Voor de CRS-proef en de direct simple shear proef zijn geen Nederlandse normen of richtlijnen voorhanden. Dit protocol is een invulling van deze lacunes.

Dit protocol gaat onder meer in op:

- Procedure voor de verzadiging van grondmonsters voor het uitvoeren van triaxiaalproeven.
- Keuze van de spanningsniveaus bij samendrukkingsproeven, constant rate of strain proeven, triaxiaalproeven en direct simple shear proeven.
- Aanwijzingen voor de keuze van de parameter K_0 voor het uitvoeren van anisotrope consolidatie bij triaxiaalproeven.
- Duur van de consolidatiefase bij triaxiaal- en direct simple shear proeven.
- Snelheid en duur van de afschuiffase bij triaxiaal- en direct simple shear proeven.
- Aanwijzingen voor de uitvoeringswijze van constant rate of strain proeven, triaxiaalproeven en direct simple shear proeven.
- Aanwijzingen voor het uitvoeren van bepalingen van de vloeigrens met de valconus of met het toestel van Casagrande.

Dit protocol is een aanvulling op de bestaande normen en richtlijnen. Deze aanbevelingen dienen te worden toegepast naast de vigerende normen en richtlijnen. De aanbevelingen in dit document dienen te worden gevolgd en voor andere zaken, die niet in dit document worden behandeld, dienen de vigerende normen en richtlijnen te worden toegepast.

Dit protocol is met name gericht op het uitvoeren van laboratoriumonderzoek voor het beoordelen van de macrostabiliteit van dijken (voor toetsen en ontwerpen). Met het WTI 2017 is de overstap gemaakt naar het Critical State Soil Model (CSSM) en de ongedraineerde schuifsterkte voor slecht doorlatende grondlagen voor de beoordeling van taludstabiliteit. Stabiliteitsanalyses met ongedraineerde schuifsterkte vereisen het uitvoeren van triaxiaalproeven volgens een daarvoor geschikte proefprocedure. Daarnaast is voor het beproeven van veen het toepassen van de direct simple shear proef noodzakelijk. De grensspanning of overconsolidatiegraad speelt bij de ongedraineerde schuifsterkte ook een belangrijke rol. Voor het bepalen hiervan kan de constant rate of strain proef of de samendrukkingsproef worden uitgevoerd. Dit protocol is opgesteld om eenduidigheid en betrouwbaarheid bij het uitvoeren van de genoemde proeven te bevorderen.

Er is nog een aantal zaken die verdere studie vereisen, zie hoofdstuk 8 Ontwikkeling op termijn. Dit betreft enkele onderwerpen, waarop het protocol op termijn wellicht wordt aangepast om de kwaliteit van de beproevingsmethode verder te verbeteren. Dit zal leiden tot een vermindering van monsterverstoring en een scherpere bepaling van de grondmechanische parameters. In projecten die daarvoor de ruimte hebben, kunnen deze inzichten desgewenst al worden toegepast.

Vigerende normen en aanbevelingen

In Tabel 1.1 zijn enkele belangrijke Nederlandse vigerende normen en aanbevelingen voor het uitvoeren van geotechnische laboratoriumproeven weergegeven. Tevens zijn in het overzicht enkele relevante internationale documenten opgenomen.

De vigerende Nederlandse normen in het overzicht zijn gedateerd. De meer actuele Europese conceptnormen voor geotechnische laboratoriumproeven hebben in Nederland nog niet de status van norm en de bijbehorende nationale bijlagen van de Europese normen zijn nog niet beschikbaar. De genoemde Europese conceptnormen kunnen als richtlijnen worden gehanteerd, met het huidige protocol als verbetering of aanvulling.

NEN 5104 is de vigerende norm voor classificatie van grond. Deze norm zal echter binnen afzienbare tijd vervangen worden door NEN-EN-ISO 14688. Vooralsnog wordt NEN 5104 toegepast.

De monstername moet voldoen aan Eurocode 7 en aan de norm NEN-EN-ISO 22475-1 (zie ook Hoofdstuk 2). Handboringen ten behoeve van monstername voor laboratoriumproeven op ongestoorde grondmonsters zijn uitgesloten.

Proef	Vigerende Nederlandse normen en aanbevelingen en enkele relevante internationale documenten
Boren en monster-behandeling	Geotechnisch onderzoek en beproeving – Monsterneming met behulp van boren en ontgraving en grondwatermeting – Deel 1: Technische grondslagen voor het uitvoeren. NEN-EN-ISO 22475-1
Triaxiaalproef	Bepaling van schuifweerstand- en vervormingsparameters van grond – Triaxiaalproef. Nederlandse norm NEN 5117, 1 ^e druk, december 1991. Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil – Part 9: Consolidated triaxial compression tests on water-saturated soil. Technical Specification. CEN ISO/TS 17892-9. First edition 2004-10-15.
Direct simple shear proef	Standard Test Method for Consolidated Undrained Direct Simple Shear Testing of Cohesive Soils. ASTM D 6528-07. American Society for the Testing of Materials. NORSOK standard G-0001, Annex D: Laboratory testing, Rev.2, October 2004.
Constant rate of strain proef	Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Controlled-Strain Loading. ASTM D 4186 – 06. American Society for the Testing of Materials.
Samendrukkingsproef	Bepaling van de een-dimensionale samendrukkingseigenschappen van de grond. Nederlandse norm NEN 5118, 1 ^e druk, december 1991. Uitvoering en interpretatie samendrukkingsproef. CUR-aanbeveling 101, 2005. Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil – Part 5: Incremental loading oedometer test. Technical Specification. CEN ISO/TS 17892-5. First edition 2004-10-15.
Classificatieproeven	NEN 5104 Geotechniek - Classificatie van onverharde grondmonsters, 1989. NEN-EN-ISO 14688: Geotechnisch onderzoek en beproeving - Identificatie en classificatie van grond: Deel 1: Identificatie en beschrijving Deel 2: Grondslagen voor classificatie TR16 Technisch Rapport Geotechnische classificatie van veen. TAW, 1996. Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil – Part 12: Determination of the Atterberg limits. Technical Specification. CEN ISO/TS 17892-12. First edition 2004-10-15. Plasticiteit van grond. Proef 14. Standaard RAW Bepalingen 2015. CROW Ede. Organische-stofgehalte en CaCO ₃ -gehalte. Proef 28. Standaard RAW Bepalingen 2015. CROW Ede.

Tabel 1.1 Vigerende Nederlandse normen en aanbevelingen en enkele relevante internationale documenten

2 Monsterbehandeling

Het transport en de opslag dienen gecontroleerd en met zorg plaats te vinden. De temperatuur van de opslag dient 10 ± 2 graden Celsius te zijn. De relatieve luchtvochtigheid van de opslag dient 85 tot 100% te zijn. De kwaliteit (ongeroerdheid) van de grondmonsters is van groot belang voor een goed proefresultaat. De norm NEN-EN-ISO-22475-1 geldt hierbij als uitgangspunt.

Transport en opslag

Met betrekking tot de monsterbussen: de lege ruimten van monsterbussen dienen te worden opgevuld. Met de meeste grondsoorten is hierbij zakjes gevuld met zand een goede oplossing gebleken, in het geval van veen dient hiervoor een lichter opvulmateriaal te worden gebruikt. De bussen dienen luchtdicht te worden afgesloten en rechtstandig en geveerd te worden vervoerd.

In het geval van uitvoering van de laboratoriumwerkzaamheden door buitenlandse partijen, dient met het volgende rekening te worden gehouden: de bussen mogen niet door de lucht vervoerd worden in verband met monsterverstoring door grote temperatuur- en luchtdrukvariaties. Daarbij mag het vervoer niet door een standaard pakketpostdienst worden uitgevoerd, maar zijn extra maatregelen nodig om verstoring tegen te gaan. De getroffen maatregelen dienen in overleg met de klant te zijn genomen.

Behandeling in het laboratorium

Het uitdrukken van bussen dient horizontaal te worden uitgevoerd, waarbij het materiaal direct uit de bus in een goot met een gelijke of iets grotere binnendiameter als de diameter van het gestoken materiaal wordt overgedrukt. Bij voorkeur worden alleen bussen uitgedrukt waarvan het materiaal beproefd wordt en worden de overige bussen in de opslag gehouden. Het uitgedrukte materiaal wordt zo snel mogelijk met plastic afgedekt en ingepakt om verdamping te voorkomen.

Proeven op ongestoord materiaal

Monsters dienen tot het moment van beproeving te allen tijde te worden ondersteund door bijvoorbeeld een goot met een gelijke diameter.

Trimmen van monsters

De laborant dient op basis van zijn ervaring met het materiaal de verstoring bij de monsterpreparatie zoveel mogelijk te beperken.

Indien trimmen van monsters nodig is, dienen triaxiaalmonsters in trimtoestellen te worden getrimd met staaldraad of mes.

In het geval van DSS-proeven dienen de monsters veelal op maat te worden gemaakt. De uitvoering met een scherpe steekring en het voorzichtig wegsnijden van het materiaal net voor de steekmond, levert hierbij goede resultaten. De steekring dient hierbij geleid te worden, waarbij de steekrand altijd precies horizontaal georiënteerd blijft.

Voor het trimmen dienen de kopse kanten van de te trimmen monsters in ieder geval haaks op de steekrichting te worden afgesneden.

In het geval van veen moet men voorkomen dat wortels of stevige gedeeltes meegetrokken worden bij het trimmen. Dit soort delen moeten voorzichtig met scherpe mesjes worden afgesneden. De messen dienen regelmatig geslepen te worden.

De tijd tussen bemonsteren en beproeving dient zo kort mogelijk te worden gehouden. Eén tot maximaal enkele dagen geldt hierbij als praktische richtlijn.

Rapportage algemeen

Bij alle sterkteproeven zal een foto worden gemaakt van het monster na uitbouw in een door midden gebroken toestand; dit ter controle op inhomogeniteiten.

Bij de triaxiaalproef wordt ook een foto gemaakt van het proefstuk na afschuiven, direct na het verwijderen van de celwand.

Bij samendrukkingsproeven wordt een foto gemaakt van het doormidden gebroken monster als er aanwijzingen zijn dat het monster inhomogeniteiten bevat, of als de uitkomst van de proef verdacht is.

3 Triaxiaalproeven

3.1 Dimensies proefstuk en verzadiging

Voor de proefstukken wordt een hoogte/diameterverhouding van minimaal 1.8 en maximaal 2.2 aangehouden.

Het is belangrijk om een zo groot mogelijk proefstuk te beproeven. Bij een groter proefstuk is de invloed van de eindvlakken en de buitenrand kleiner. Daarnaast doet een groter proefstuk meer recht aan de structuur en de heterogeniteit van het proefstuk. De minimale diameter bedraagt 50 mm. Deze ondergrens zal naar verwachting opschuiven naar 65 mm, als tussentijds onderzoek heeft bevestigd dat er een significant effect op de grondparameters bestaat.

Om bij de triaxiaalproeven een goede verzadiging te bereiken zijn de volgende zaken van belang:

- Tijdens de monsterverzadiging mag de effectieve druk in het monster niet boven de uiteindelijke consolidatiedruk uitkomen. Hiermee wordt een ongewenste voorbelasting in het monster voorkomen. Men kan optioneel de celdruk en de monsterdruk tegelijk langzaam laten toenemen met de drainagekraan open, of de NEN 5117 procedure volgen.
- De B-factor bij 300 kPa (of hogere) backpressure moet minimaal 0,96 zijn. Bij stijve kleimonsters kan deze eis problemen geven. Het laboratorium moet aantoonbaar inspanning leveren om de gevraagde B-factor te bereiken. Men kan hierbij werken met hogere backpressure en langere verzadigingsduur (maximaal 24 uur). In het uiterste geval mag men de B-factor bepalen nadat de consolidatiedruk is aangebracht.
- De bepaling van de B-factor gebeurt door meting van poriedruktoename bij een kortdurende celdruktoename van minstens 25 kPa (of maximaal de consolidatiedruk als deze lager is dan 25 kPa).

3.2 Consolidatiefase

De uitvoering en duur van de consolidatiefase bij triaxiaalproeven is een belangrijk aandachtspunt. Bij sommige monsters kan de benodigde duur van de consolidatiefase langer dan 24 uur zijn

De norm NEN 5117 voor het uitvoeren van triaxiaalproeven zegt niets over de gewenste duur van de consolidatiefase. Een kleimonster zou moeten consolideren, totdat de vervormingssnelheid laag is ten opzichte van de afschuifsnelheid. Een probleem hierbij is de kruipgevoeligheid van Nederlandse grond. Daarom wordt uitgegaan van een praktische consolidatieduur van maximaal drie dagen, zonder dat alle kruipvervorming voltooid hoeft te zijn. Als controle kan men de drainagekranen tijdelijk sluiten. Als de waterspanning niet meer dan 1 kPa oploopt in 10 minuten dan mag men uitgaan van voltooide consolidatie.

De anisotrope consolidatiefase wordt volgens een spanningsgestuurde tweetrapsprocedure uitgevoerd. Men start met isotrope consolidatie tot de gewenste horizontale spanning is bereikt, waarna de verticale spanning (en daarmee ook de deviatorspanning) wordt opgevoerd tot de gewenste K_0 -verhouding.

Deze werkwijze was tot voor kort de enige wijze die alle laboratoria in Nederland uit konden voeren. Deze tweetraps methode is robuust; er kan weinig mis gaan. Inmiddels zijn de

mogelijkheden van de apparatuur en software toegenomen en kan een deel van de laboratoria ook andere methoden uitvoeren. Twee andere mogelijke werkwijzen worden beschreven in hoofdstuk 8.

Het is niet toegestaan om een triaxiaalmonster te consolideren in een cel, terwijl de afschuif fase in een andere cel plaats vindt, waardoor het monster moet worden uitgebouwd en overgezet.

Bij het overzetten van een cel met monster onder consolidatiedruk naar een drukpers mag er geen druk- en volumeverandering in de cel optreden.

Scheefstand van het monster is niet toegestaan. De axiale as van het monster dient tijdens de hele proef loodrecht onder het drukpunt van de plunjer te blijven. Daarnaast mag scheefstand van de kopplaat niet voorkomen.

De poreuze eindplaten van de opstelling zijn vlak en hebben een diameter die gelijk is aan of maximaal 5 mm groter dan de monsterdiameter.

De snelheid van verhogen van de deviatorspanning is een punt van aandacht. Bij te snelle verhoging zal de waterspanning in het monster teveel oplopen en kan het monster bezwijken. Het blijkt dat de Nederlandse laboratoria twee verschillende methoden gebruiken:

- Opvoeren van de verticale druk met een constante toename in de tijd tot de gewenste eindwaarde, bijvoorbeeld met 6 kPa/uur.
- Opvoeren van de verticale rek met een constante toename in de tijd totdat de deviatordruk de gewenste waarde heeft bereikt, bijvoorbeeld met 0.1 %/uur. Als men een t100 waarde (zie NEN5117) beschikbaar heeft kan men de bijbehorende snelheid van een gedraineerde afschuiving aanhouden.

Beide methoden zijn toegestaan, waarbij aanbevolen wordt om bovengenoemde waarden niet zonder meer te overschrijden. Het laboratorium dient er zorg voor te dragen dat het monster niet voortijdig bezwijkt en mogelijk moet hiervoor een lagere snelheid worden aangehouden dan hierboven genoemd.

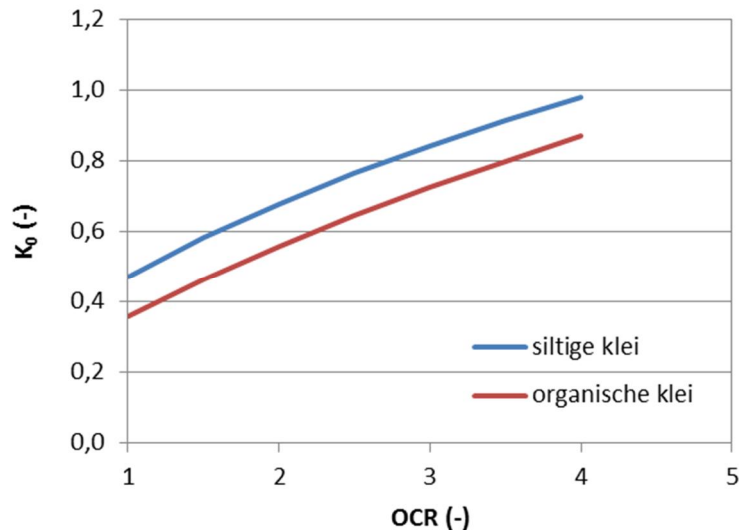
3.3 Keuze van K_0 voor anisotrope consolidatie

Voor de anisotrope consolidatie kan de K_0 -waarde ($K_0 = \sigma'_h / \sigma'_v$) worden bepaald uit een K_0 CRS-proef, uit literatuurdata of uit database-gegevens. Als richtwaarden voor de anisotrope consolidatie kunnen de volgende K_0 waarden worden gehanteerd (geldend voor OCR=1):

- $K_0 = 0,35$ voor organische klei met een volumegewicht lager dan 14 kN/m^3 .
- $K_0 = 0,45$ voor siltige klei met een volumegewicht hoger dan 14 kN/m^3 .

Bezwijken van het monster in de consolidatiefase kan bij lage K_0 waarden optreden omdat het effectieve spanningspad te dicht bij de bezwijklijn kan uitkomen. Men zal moeten zorgen voor geringe opbouw van de waterspanning, zie ook de vorige paragraaf.

Bij een hogere overconsolidatiegraad wordt de K_0 -waarde eveneens hoger (bij OCR waarden van 2 tot 4 wordt K_0 circa 0,6 tot 0,9, zie fig. 3.1).



Figuur 3.1 Verband tussen OCR en de K₀-factor

Desgewenst kan de K_0 worden bepaald met K_0 CRS-proeven of met samendrukkingsproeven met K_0 meting. De OCR-waarde volgt uit de verhouding tussen grensspanning σ'_{vy} en effectieve in-situ verticale druk σ'_{vi} :

$$OCR = \sigma'_{vy} / \sigma'_{vi}$$

3.4 Keuze spanningsniveaus

De keuze van de consolidatiespanning is bepalend voor de schuifsterkte en de ontwikkeling van de waterspanning. Het gewenste niveau van verticale en horizontale spanning zal uiteraard afhangen van de geotechnische vraagstelling. Wanneer de consolidatiespanning lager wordt gekozen dan de grensspanning leidt dit tot overgeconsolideerd gedrag van de grond. De grond vertoont dan dilatantie, met name bij een grotere mate van overconsolidatie. Bij dilatantie wordt tijdens afschuiven wateronderspanning in de grond gegenereerd, wat een schijnbare extra sterkte van de grond geeft. Wanneer de grootte van de overconsolidatiegraad (OCR) bekend is, kan de gevonden schuifsterkte hiermee worden omgerekend naar een normaal-geconsolideerde waarde van de schuifsterkte.

Een consolidatiespanning gelijk aan of hoger dan de grensspanning geeft normaal geconsolideerd gedrag van de grond. De grond vertoont dan contractant gedrag. Er wordt dan bij het afschuiven van de grond wateroverspanning gegenereerd.

De spanningstoestand van de grond in het terrein is zodanig dat de grond bij afschuiven altijd in meer of mindere mate overgeconsolideerd gedrag zal vertonen. Deze spanningstoestand is het gevolg van bodemvormende processen, polderpeilfluctuaties en dergelijke. De mate van overconsolidatie kan in het terrein sterk variëren.

Een eenvoudige werkwijze voor het beoordelen van de taludstabiliteit van dijken is om uit te gaan van normaal geconsolideerd grondgedrag en daarvoor een procedure voor de triaxiaalproeven en direct simple shear proeven te volgen die meteen een normaal geconsolideerde waarde van de schuifsterkte geeft. Echter wanneer de ongedraineerde schuifsterkte in-situ wordt bepaald met sonderingen is het nodig om proeven te doen bij het in-situ spanningsniveau, zodat men verband kan leggen met de gemeten sondeerwaarden.

Samenvattend kan als volgt worden omgegaan met de keuze van de spanningsniveaus voor de consolidatiefase van de proeven:

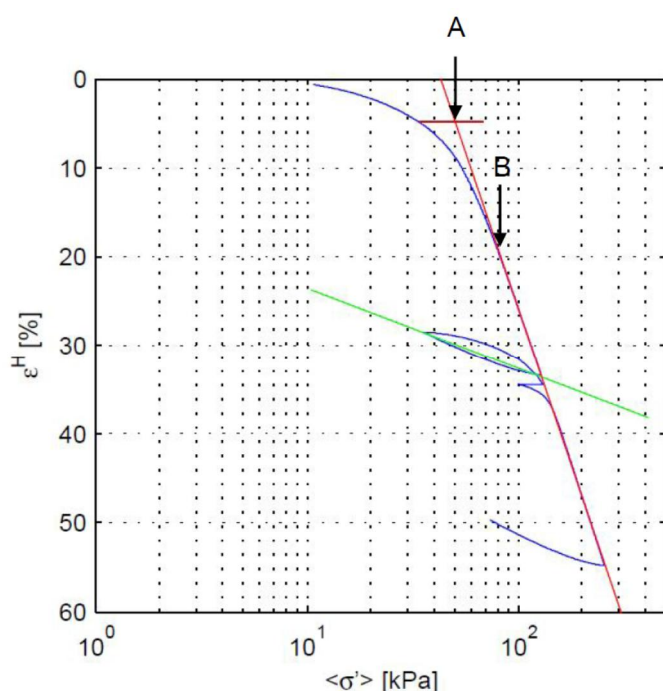
- Een deel van de proeven krijgt een spanningsniveau behorend bij de huidige in-situ druk.
- De resterende proeven krijgen een verticaal spanningsniveau gelijk aan de bovengrens van de grensspanning (punt B in Figuur 3.1) volgend uit de samendrukkingsproeven en de CRS-proeven. Wanneer een grote ophoging wordt aangelegd kan de consolidatiespanning daarop worden afgestemd.
- Doordat proefmonsters vanuit verschillende boringen, van verschillende dieptes en van herkomst onder de dijk en naast de dijk bij elkaar kunnen worden gevoegd in een proevenverzameling van proefmonsters van dezelfde grondsoort, worden min of meer vanzelf proeven met verschillende spanningsniveaus bij elkaar gevoegd.

Toelichting

Om normaal geconsolideerd gedrag te vinden in de triaxiaal- en direct simple shear proeven wordt voor de consolidatiespanning voor de normaal geconsolideerde proeven uit gegaan van punt B in de onderstaande Figuur 3.2. Dit is het punt waar de gemeten zettingslijn samen begint te vallen met de raaklijn. Dit punt B zou de bovengrens van de grensspanning kunnen worden genoemd. Punt A is de gebruikelijke definitie van de grensspanning (in een isotachen uitwerking in dit geval). Punt A wordt bereikt door op de meetcurve de in-situ verticale druk te selecteren en dan een horizontale lijn naar rechts te trekken; het snijpunt met de raaklijn is punt A. Bij spanningen boven punt B is het grondgedrag pas echt normaal geconsolideerd. Het gebied tussen punt A en punt B is een "overgangsgebied". Proeven die worden geconsolideerd bij spanningen in dit overgangsgebied tussen A en B zorgen bij de uitwerking voor onnodig veel spreiding in de proefresultaten. Het is niet nodig om nog verschillende belastingtrappen boven deze bovengrens van de grensspanning te kiezen. Voor alle normaal geconsolideerde proeven wordt uit gegaan van de bovengrens van de grensspanning (punt B) uit een representatieve CRS-proef. Als men alleen over standaard samendrukkingsproeven beschikt, kan een waarde van 1.5 tot 2 maal de grensspanning (punt A) gekozen worden.¹

Indien het gewenst is rekening te houden met het effect van overconsolidatie zijn twee werkwijzen mogelijk. Een mogelijkheid is om een proefstuk te consolideren bij een consolidatiespanning gelijk aan of hoger dan de grensspanning van het proefstuk en vervolgens een tweede consolidatiestap uit te voeren, waarin de consolidatiespanning wordt verlaagd naar het gewenste spanningsniveau of naar de gewenste overconsolidatiegraad (extra ontlaststap). Deze aanpak wordt de SHANSEP-methode genoemd, zie [Ladd e.a., 2004]. Deze methode is vooral geschikt voor proefstukken, waarvan de monsterkwaliteit laag is, bijvoorbeeld door monsterverstoring tijdens het boren.

Een andere mogelijkheid om rekening te houden met het effect van overconsolidatie is om een proefstuk te consolideren bij de spanning die het proefstuk in het veld heeft gehad (meestal lager dan de grensspanning). Deze aanpak is bekend als de *Norwegian style*, zie [Berre, 1982]. Bij deze tweede aanpak blijft de structuur van de grond zoveel mogelijk intact tot aan het begin van de afschuif fase van de proeven. Door het behoud van de structuur van het proefstuk leidt deze aanpak tot een hogere bezwijkwaarde van de schuifsterkte dan de eerder genoemde werkwijze. Deze aanpak is met name geschikt voor grondmonsters met weinig monsterverstoring.



Figuur 3.2 Rek versus verticale spanning in een CRS-proef, met de grensspanning volgens de gangbare definitie bij punt A en de bovengrens van de grensspanning bij punt B (zie Den Haan e.a. 2003)

Een belangrijk aandachtspunt is dat proeven met een verschillende overconsolidatiegraad niet zonder meer met elkaar kunnen worden gecombineerd om schuifsterkteparameters af te leiden. Wanneer proeven met een verschillende overconsolidatiegraad met elkaar worden gecombineerd, bijvoorbeeld voor een stabiliteitsberekening of voor een proevenverzameling, moet rekening worden gehouden met dit verschil in OCR.

3.5 Uitvoering afschuiffase

Het monster wordt afgeschoven in continue ongedraineerde compressie, na de anisotrope consolidatie. De proeven worden uitgevoerd volgens de eentrapsprocedure; dus 1 belastingtrap op 1 proefmonster. Hierbij dient te worden gewerkt conform NEN 5117. Voor de anisotrope consolidatie wordt verwezen naar CEN ISO/TS 17892-9 (zie Tabel 1.1) en de voorgaande tekst.

De maximale afschuifsnelheid volgt in principe uit het verloop van de consolidatiefase. Het is gewenst om de maximale afschuifsnelheid te beperken om de waterspanning in het monster te laten vereffenen. Verder is door meerdere onderzoekers aangetoond dat de schuifsterkte van klei licht toeneemt met de afschuifsnelheid. Het gaat hierbij om een effect van circa 10 tot 15% bij tienvoudige snelheidstoename. Om deze redenen is de toegestane afschuifsnelheid maximaal 1% per uur of langzamer indien dit volgt uit de t_{100} bepaling volgens NEN 5117.

Als t_{100} niet bepaald kan worden uit de consolidatiefase, omdat een isotrope fase niet toegepast wordt, zijn er drie mogelijkheden. Als eerste kan men per grondlaag twee of meer extra proeven doen met een isotrope fase om de hieruit de t_{100} te bepalen. Hieruit volgt dan de maximale afschuifsnelheid voor alle proeven uit de betreffende grondlaag. Als tweede optie kan men een veilige, lage snelheidswaarde, gebaseerd op eerdere ervaring kiezen. In de rapportage zal een keuze boven 0.5%/uur met goede argumenten onderbouwd moeten worden als geen t_{100} bepaling is uitgevoerd.

Als derde mogelijkheid kan men de t_{100} berekenen uit de c_v -waarde van een samendrukkingsproef op een vergelijkbaar monster met de volgende omrekenformule (zie Bishop & Gibson 1965), geldig voor tweezijdige drainage met drainage strips (50% tot 100% bedekking):

$$t_{100} = 7.9 \cdot 10^{-3} \times H^2/c_v$$

met:

- c_v = consolidatie coëfficiënt bepaald bij een druk die aansluit bij de consolidatiedruk.
- H = hoogte van het triaxiaalmonster.

De afschuiffase moet men doorzetten tot minimaal 25% axiale rek is bereikt. Daarmee wordt een schuifsterkte van de grond gemeten, die de zogenaamde *critical state* sterkte zo goed mogelijk benadert (NB: dit is niet de reststerkte van de grond). De gemeten schuifsterkte bij 25% axiale rek dient te worden gerapporteerd.

Kantelen van de kopplaat tijdens de afschuiffase is niet toegestaan.

3.6 Correctie voor weerstand van membraan en drainage strips

De schuifsterktebepaling wordt beïnvloed door de weerstand die het latex membraan biedt bij het vervormen van het proefstuk. Bij kleiproeven worden meestal drainage strips gebruikt ter versnelling van de consolidatie en ook deze bieden weerstand, zie [Greeuw e.a 2001].

Correctie voor beide zaken is nodig; dit geldt vooral voor proeven op monsters met lage sterkte.

De NEN 5117 en de CEN ISO/TS 17892-9 geven formules voor deze correcties, maar de ervaring leert dat de berekende waarden hoog uitvallen bij grotere rekpercentages. Recent onderzoek bij Deltares geeft aan dat zowel voor het membraan als voor drainage strips de correcties bij rekpercentages tot circa 25% praktisch altijd tussen 1 en 2 kPa deviatorspanning liggen. De formules in NEN 5117 leiden door de hoge correcties tot een te lage schuifsterkte. Het is daarom nodig zelf de correcties te bepalen. Dit kan met bijvoorbeeld een gelatine monster, zie [Greeuw e.a. 2001]. Belangrijk hierbij is dat de correcties worden bepaald tot aan of voorbij de maximale vervorming die bij de uitvoering van de triaxiaalproeven wordt aangehouden. Bij de rapportage dient de toegepaste correctie te worden vermeld.

Aanbevolen wordt om bij elke proef de dikte van het membraan te meten. Daarnaast moet men jaarlijks de stijfheidsmodulus van een aantal gebruikte latex membranen (steekproef) bepalen en vastleggen.

4 Direct simple shearproeven

4.1 Verzadiging

Bij inbouw van het proefstuk worden vochtige filterstenen gebruikt om te voorkomen dat er water aan het monster onttrokken wordt. Als het risico van zwel bestaat, moet men droge stenen gebruiken en het monster zal dan voorbelast moeten worden, voordat water wordt toegevoegd. In het vervolg wordt uitgegaan van niet-zwellende grond.

Het protocol gaat net als ASTM D6528 uit van verzadigde monsters, tenzij uitdrukkelijk anders is opgedragen door de opdrachtgever.

Om te verzadigen wordt water toegelaten tot het monster door de top- en bodem platen te verzadigen via een in- en uitstroomkanaal. Enkele minuten doorstromen van de stenen zal normaliter voldoende zijn.

Als na de proef blijkt dat het monster duidelijk niet verzadigd is, moet dit vermeld worden; sterk aanbevolen wordt om de proef dan te herhalen op een beter verzadigd monster.

4.2 Consolidatiefase

Bij de direct simple shear proef volgt de consolidatieduur uit het verloop van zetting tegen de tijd. Omdat het monster slechts circa 20 mm hoog is en tweezijdig gedraineerd wordt, zal de consolidatiefase korter zijn dan bij de triaxiaalproef. Meestal zal 16 uur consolidatie ruim voldoende zijn.

Consolideren van het proefstuk buiten de meetcel wordt afgeraden, maar is bij uitzondering toegestaan tot 25% van de gevraagde consolidatiespanning. Een uitzondering is bijvoorbeeld erg mineraalarm veen met een hoog watergehalte. Bij directe consolidatie in het DSS apparaat resteert dan soms te weinig monsterhoogte. De monsterhoogte bij het begin en bij het overzetten dienen gerapporteerd te worden.

De monsterhoogte na inbouw, dus voor de consolidatie begint, moet altijd gerapporteerd worden.

4.3 Keuze spanningsniveaus

Hiervoor gelden dezelfde overwegingen als bij de triaxiaalproef, zie sectie 3.4.

4.4 Uitvoering

Voor het uitvoeren van direct simple shear proeven bestaat geen Nederlandse norm en ook geen CEN/ISO norm. Daarom wordt de ASTM D6528-07 gevolgd en zijn enkele aanwijzingen bijgevoegd voor het uitvoeren en uitwerken van de proef. Bij geotechnisch onderzoek voor offshore constructies wordt meestal verwezen naar de NORSOK-richtlijnen, zie Tabel 1.1.

De zijkant van het grondmonster wordt in de DSS-proef gesteund door een ringenstapel rond een dun membraan of door een verstevigd membraan, zodat de diameter van het monster min of meer constant blijft. Een belangrijk verschil met de directe schuifproef is dat de afschuiving niet opgelegd wordt in het horizontale vlak; het monster kiest in de direct simple shear proef zelf een bezwijkvlak. Het verstevigde membraan of de ringenstapel geeft het monster hiervoor voldoende vrijheid. De membraanweerstand of de schuifweerstand van de ringenstapel met membraan dient bekend te zijn en de proefresultaten moeten hiervoor worden gecorrigeerd. Vooral bij slappe grondsoorten en proeven bij lagere spanningsniveaus is deze correctie relevant.

Bij de uitvoering van de afschuiffase is vereist dat de boven- en bodemplaat van het simple shear-apparaat horizontaal blijven.

De afschuiffase van de proef kan worden uitgevoerd met *constante hoogte* of met *constante bovenbelasting*. Uitvoering met *constante hoogte* wordt in dit protocol als standaard beschouwd en staat ook als zodanig in de norm ASTM D 6528 – 07. Met *constante hoogte* reageert het monster in feite ongedraineerd (met een constant volume), hoewel de eindvlakken kunnen draineren. De verticale belastingsvariatie moet worden gemeten en daaruit kan de waterspanningsverandering worden afgeleid, zie [DeGroot e.a., 1992]. Meting van de waterspanning gebeurt standaard niet, maar kan een nuttige aanvulling op de resultaten zijn.

Bij een gedraineerde afschuiffase (met *constante belasting*) wordt verticale verplaatsing van de bovenzijde van het monster toegelaten. De variatie in de hoogte wordt in dat geval geregistreerd en gerapporteerd.

De afschuifsnelheid moet worden vastgesteld conform ASTM D 6528 – 07 en volgt uit de tijd tot einde consolidatie. Voor de verwachte rek bij de piekspanning kan 15 à 20% worden aangehouden. De consolidatietijd kan worden afgeleid uit de curve van de zetting van het monster tijdens de consolidatiefase tegen de tijd. Een afschuifsnelheid uitgedrukt in de hoekverdraaiing per uur van circa 5%/uur is gebruikelijk. De maximale afschuifsnelheid is 8%/uur. Dit komt neer op een horizontale vervormingssnelheid in de orde van 1,6 mm/uur.

In de afschuiffase moet men doorschuiven tot minimaal 40% schuifrek is bereikt. Daarmee wordt een schuifsterkte van de grond gemeten, die de zogenaamde *critical state* sterkte zo goed mogelijk benadert. De gemeten schuifsterkte bij 40% schuifrek dient te worden gerapporteerd.

Bij uitwerking van de proefresultaten levert de direct simple shear proef een piekwaarde van de horizontale schuifspanning τ_p bij een effectieve bovenbelasting σ_{vp}' en een eindwaarde (40% rek) van de horizontale schuifspanning τ_e bij een effectieve bovenbelasting σ_{ve}' . Beide waarden moeten worden gerapporteerd met de bijbehorende schuifrek.

De maximale schuifspanning is een nuttige, maar incomplete maat voor de schuifsterkte van het materiaal. Er wordt namelijk bij de DSS-proef geen radiale spanning of verticale schuifspanning gemeten.

Verskil tussen ringen met membraan en versterkt membraan

De keuze voor een bepaald type membraan ligt bij het laboratorium. Het laboratorium dient zelf de membraancorrectie te bepalen. De toegepaste correctie dient te worden gerapporteerd.

Gebruik van pinnen in de eindplaten

De overgangen tussen filterstenen en grondmonster zijn essentieel voor het overbrengen van de schuifkracht tijdens de afschuiffase [Greeuw 2015]. Het is van belang dat het monster in de afschuiffase niet slipt langs de beide eindvlakken. Het gevolg van het slippen van het monster over de eindplaten is een te lage schuifkracht bij de meting. Hiervoor zijn diverse typen eindplaten in gebruik, zoals platen met dunne pinnen (circa 2 mm hoog) of kegelvormige pinnen, vlakke (licht ruwe) platen, soms met ribbels, of een vlak profiel met ondiepe geulen. Een vlak profiel brengt het risico van slip met zich mee. Voor alle grondsoorten en alle spanningsniveaus moeten daarom pinnen in de eindplaten worden toegepast. Om een te kleine hoogte van het monster (tussen de pinnen of ribbels aan boven- en onderzijde) in de afschuiffase te voorkomen, dient de proef te worden gestart met een monster van voldoende hoogte. De minimale monsterhoogte tijdens de afschuiffase dient 10 mm te zijn, gemeten tussen de pinnen of ribbels. De hoogte van het proefstuk wordt

gecorrigeerd voor de pinhoogte in de uitwerking. Hierbij wordt 2 maal 2/3 van de pinhoogte afgetrokken van de gemeten monsterhoogte.

De direct simple shear proeven moeten als eentrapsproeven worden uitgevoerd, geplot en gerapporteerd. In de rapportage moeten waarnemingen zoals uitdroging, verweking van een eindvlak, onregelmatige afschuiving en dergelijke, worden opgenomen.

4.5 Uitvoering bij lage spanning en membraancorrectie

Bij DSS-metingen met een consolidatiedruk lager dan circa 20 kPa zal extra aandacht aan de nauwkeurigheid en aan mogelijke meetfouten moeten worden besteed. Het laboratorium moet aangeven welke nauwkeurigheid wordt gehaald met de gebruikte krachtopnemers in verticale en horizontale richting en wat dit betekent voor de gemeten spanningen. Het is gewenst, dat de absolute meetfout in verticale druk en in de schuifspanning minder dan 0,5 kPa bedraagt. Om dit te bereiken is een krachtopnemer nodig met een nauwkeurigheid beter dan 1.5 N, uitgaande van de conventionele monsterdiameter van 50 tot 70 mm.

Verder moet membraan/ringencorrectie worden toegepast, met de herkomst van de gebruikte waarden. Nodig is een eigen kalibratie op een zeer slap materiaal, zoals het in het rapport [Greeuw 2014] toegepaste Agar. Een ijkmeting met een opgesloten watermonster is ook een mogelijkheid, zie ASTM D6528-07. Het is vereist om eenmaal per jaar een ijking te verrichten naar de weerstand van membraan, ringen en de schuiftafel. Bij een verschil groter dan 30% met de voorgaande ijking dient het membraan en eventueel de ringen vervangen te worden. De membraan- en sledecorrectie M_c wordt uitgedrukt in de volgende vorm:

$$M_c = b + a \times d \quad \dots \text{ (kPa)}$$

Waarbij de parameters **b** (in kPa) en **a** (in kPa/mm) volgen uit lineaire regressie van de schuifweerstand tegen de verplaatsing **d** van de slede in mm.

Het ijkrapport moet bij navraag inzichtelijk zijn voor de opdrachtgever.

Tijdens de consolidatiefase kan er een schuifspanning ontstaan in het monster; deze spanning is reëel en mag niet genuld worden tijdens de proef en niet in de verwerkingssoftware.

5 Samendrukkingsproeven

Bij het uitvoeren van samendrukkingsproeven voor het bepalen van zettingsparameters en de grensspanning worden spanningstappen conform Tabel 5.1 gehanteerd. Afwijken hiervan is toegestaan als hier goede redenen voor zijn. In deze tabel zijn de factoren weergegeven, waarmee de effectieve terreinspanning σ'_{vi} moet worden vermenigvuldigd. Alle stappen duren minimaal 24 uur.

σ'_{vi} [kPa]	Belastingstap								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<50	0,25	0,5	1	2	4	2	4	8	16
>50	0,25	0,5	1	2	4	2	4	10	

Tabel 5.5.1 Spanningsniveaus per belastingstap, genormeerd op de effectieve terreinspanning σ'_{vi} .

Bij alle belastingstappen vanaf stap 2 (dus niet bij ontlasten/herbelasten) wordt de c_v -waarde bepaald, indien mogelijk. Daarbij is het noodzakelijk dat er in de zetting-log(t) Casagrandeplot een duidelijke rechte kruiptak te constateren is. Indien de kruiptak niet zichtbaar is, moet de betreffende stap tot 48 uur worden doorgezet. Indien de kruiptak na 48 uur nog niet zichtbaar is, mag de volgende stap worden gestart. Er moet dus tijdens de proef een figuur van de zetting tegen log(t) worden bijgehouden. De zetting na 24 uur moet altijd worden gerapporteerd. Tijdens weekenden zijn stappen van 72 uur toegestaan.

N.B.: alleen betrouwbare c_v -waarden (met goede fitlijnen aan de zettingscurve) mogen worden gerapporteerd. Dit houdt onder meer in dat bij de Taylor (\sqrt{t} methode) interpretatie alleen gefit mag worden aan een recht deel van de curve en bij de Casagrande methode er sprake moet zijn van een duidelijke S-vorm van de consolidatiecurve. De kruipparameter moet gefit worden aan een duidelijke rechte aan het eind van de log(t)-consolidatiecurve.

De resultaten van de samendrukkingsproeven worden uitgewerkt volgens de methoden abc-Isotache (CUR Aanbeveling 101) en Bjerrum (CUR Aanbeveling 101, NEN 5118). Extra uitwerking volgens de Koppejan-methode is toegestaan, maar niet vereist. De Koppejan-methode is niet geschikt voor ontlast- en herbelaststappen.

6 Constant rate of strain (CRS)-proeven

De CRS-proef verdient de voorkeur boven de standaard samendrukkingsproef vanwege de meer nauwkeurige grensspanning bepaling en omdat deze proef kan worden gecombineerd met meting van de horizontale spanning (K_0 CRS-proef). Daarnaast biedt een CRS opstelling betere mogelijkheid tot volledige verzadiging van het monster.

Voor de CRS-proef wordt het volgende belastingschema voorgesteld:

1. Start bij een lage verticale spanning van circa 2 kPa. Verzadig het monster bij deze stap maar vermijdt zwel (door tijdige spanningsverhoging).
2. Belast tot $4 \sigma'_{vi}$.
3. Ontlast tot $2 \sigma'_{vi}$.
4. Herbelast naar $6 \sigma'_{vi}$.
5. Voor de bepaling van kruipparameters is een relaxatiefase nodig; dit houdt in dat de hoogte van het monster constant gehouden wordt en de verticale spanningsverandering wordt geregistreerd. Normaliter is 16 uur relaxatie voldoende.
6. Belast tot $10 \sigma'_{vi}$ à $16 \sigma'_{vi}$ (kies bij monsters met lage initiële spanning de hoge waarde).

Wanneer de proeven worden uitgevoerd ten behoeve van het ontwerp van een grote ophoging kunnen de genoemde factoren indien nodig worden verhoogd.

De opgelegde vervormingssnelheid hangt af van de grondeigenschappen; bij Nederlandse klei en veen is de range 0,1 tot 0,5 %/uur gebruikelijk. De snelheid moet worden verlaagd als de relatieve wateroverspanning R_u ($R_u = \text{wateroverspanning/verticale druk}$) 15% overschrijdt, omdat hogere waterspanning onwenselijk is gedurende een proef. De snelheid wordt alleen aangepast na afronding van een fase, zie ook ASTM D 4186 – 06 (zie Tabel 1.1).

De grensspanning, die volgt uit een CRS-proef, is enigszins afhankelijk van de vervormingssnelheid (hogere snelheid levert hogere grensspanning), en zal meestal licht afwijken van de waarde, die volgt uit de standaard samendrukkingsproef. Anderzijds is de grensspanning die volgt uit een CRS-proef niet afhankelijk van de keuze van de belastingsstappen, zoals bij de samendrukkingsproef het geval is (zie Den Haan e.a. 2003).

7 Classificatie klei en veen

NEN 5104 is de vigerende norm voor classificatie van grond. Zoals eerder al vermeld wordt deze norm binnen afzienbare tijd (waarschijnlijk nog in 2016) vervangen door NEN-EN-ISO 14688.

De grens tussen klei en veen is niet altijd eenvoudig te leggen. Aangenomen mag worden, dat verzadigde grond met volumegewicht lager dan 11 kN/m^3 altijd veen is en boven 13 kN/m^3 altijd klei.

In het tussengebied zal men het organische stof gehalte moeten bepalen en de grond visueel moeten classificeren. Een organisch stof gehalte van 30% of meer duidt op veen.

Classificatie van grond (ook visuele classificatie) wordt altijd in het laboratorium uitgevoerd.

Bij klei dienen een indicatieve c_u -waarde met de valconus en de Atterbergse grenzen bepaald te worden. Bij sterk siltige klei is een korrelverdeling gewenst. Een uitgebreide classificatie is nuttig bij het interpreteren van de sterkteproeven; zo kan een hoge siltfractie leiden tot dilatant gedrag en een hoge s_u -ratio.

Vloeigrensbepaling klei

Het beste kan hiervoor de valconus gebruikt worden met de 4-punts methode. Deze methode is praktischer en nauwkeuriger dan de bepaling van de vloeigrens met het toestel van Casagrande. In Europa wordt daarom in veel landen aan de valconus methode de voorkeur gegeven. De procedure en materiaaleisen zijn gegeven in CEN ISO/TS 17892-12 (zie Tabel 1.1). Bij lage vloeigrenswaarde zal de valconuswaarde iets onder de Casagrande-waarde uitkomen, bij hoge vloeigrenswaarde juist iets erboven.

De bepaling van de vloeigrens met het toestel van Casagrande is een aandachtspunt. Er zijn apparaten volgens de British Standard en apparaten volgens de ASTM. Door de verschillende stijfheid van het rubber blok bij beide typen apparaten (ASTM schrijft een stijver blok voor) wordt een andere vloeigrens bepaald. Resultaten van verschillende toestellen zijn derhalve niet zondermeer vergelijkbaar; de literatuur [Özer, 2009] noemt een verschil van circa 5%. Vrijwel alle laboratoria in Nederland beschikken over een toestel volgens de specificaties van de ASTM. Daarom is het wenselijk dit type toestel als het gangbare toestel aan te merken. Hierbij kan de bepalingsmethode volgens proef 14 van de Standaard RAW Bepalingen 2015 (zie Tabel 1.1) worden aangehouden.

Beschrijven veen

De volgende aspecten moeten worden vastgelegd:

- Kleiigheid.
- Volumegewicht en organische stof gehalte.
- Onderscheid tussen veen, detritus en gytija.
- Verweringsgraad (zwak, matig of sterk).
- Aanwezigheid van riet of vezels.

Gyttja en Detritus zijn grondsoorten die zich kenmerken door een hoog organisch gehalte, maar geologisch niet tot veen worden gerekend. In tegenstelling tot veen ontbreekt in de gytija- en detrituslagen een sterke doorworteling die het veen structuur geeft. In de geotechniek is het niet gebruikelijk om dit onderscheid te maken. Het hoge watergehalte en laag volumiek gewicht van de gytija- en detrituslagen leiden ertoe dat deze meestal worden samengevoegd met veen.

Voor het uitvoeren van een dergelijke beschrijving voor veenmonsters dient het *Technisch Rapport Geotechnische classificatie van veen (TR 16) van de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen* worden toegepast. Hierbij kan het rapport *Erkens et al (2013)* als hulpmiddel worden gebruikt.

8 Ontwikkelingen op termijn

Dit protocol gaat zo veel mogelijk uit van eenduidige procedures voor het uitvoeren van de proeven. Procedures met keuzemogelijkheden zijn daarom vermeden.

De procedures zijn opgesteld op basis van bestaande kennis en inzichten. Op sommige onderdelen zijn er mogelijkheden om proefprocedures verder te verbeteren. Vaak moet daarbij eerst meer kennis worden opgedaan voordat de procedures kunnen worden aangepast. Een overweging daarbij is ook dat in het protocol zo veel mogelijk rekening wordt gehouden met de faciliteiten die de Nederlandse laboratoria hebben.

In dit hoofdstuk worden enkele onderwerpen benoemd, waar het protocol op termijn wellicht wordt aangepast om de kwaliteit van de beproevingsmethode verder te verbeteren. Dit zal leiden tot een vermindering van monsterverstoring en een scherpere bepaling van de grondmechanische parameters. In projecten die daarvoor de ruimte hebben, kunnen deze inzichten desgewenst al worden toegepast. Het is bij duidelijk afwijkende proefresultaten aan te bevelen proeven ook uit te voeren volgens de gangbare procedures, zoals beschreven in de voorgaande hoofdstukken, om verschillen tussen proefprocedures te kunnen duiden.

Anisotrope consolidatie bij triaxiaalproeven

Het opleggen van de deviatorspanning bij de anisotrope consolidatiefase van triaxiaalproeven kan volgens verschillende procedures worden uitgevoerd. In hoofdstuk 3 wordt een spanningsgestuurde tweetrapsprocedure voorgeschreven, waarbij eerst een isotrope consolidatiefase wordt uitgevoerd tot de gewenste horizontale spanning is bereikt, waarna de verticale spanning (en daarmee ook de deviatorspanning) wordt opgevoerd tot de gewenste K_0 -verhouding. Er bestaan ook twee andere procedures waarmee de gewenste anisotrope spanningstoestand aan het begin van de afschuif fase bereikt kan worden, te weten:

1. Spanningsgestuurde drietrapsprocedure: isotrope consolidatie tot een geringe spanning, bijvoorbeeld 5 of 10 kPa, waarna de verticale spanning (en daarmee ook de deviatorspanning) wordt verhoogd tot de gewenste K_0 -verhouding. Vervolgens wordt deze verhouding aangehouden bij het gelijktijdig verhogen van de verticale en horizontale spanning tot de gewenste consolidatiespanning.
2. Vervormingsgestuurde procedure: isotrope consolidatie tot een geringe spanning, bijvoorbeeld 5 of 10 kPa. Vervolgens wordt horizontale spanning verhoogd, waarbij de deviatorspanning gelijktijdig wordt mee verhoogd, zodanig dat de diameter van het monster gelijk blijft. De standaardwijze waarop dit gebeurt gaat met het registreren van het uitgeperste watervolume en de gemeten hoogte-afname. Door gelijk houden van axiale rek en volumerek kan de diameter constant worden gehouden. Een exactere manier is mogelijk door het meten van de radiale rek op halve monsterhoogte met lokale rekopnemers.
Deze tweede methode – met of zonder lokale opnemers – wordt tot nu toe weinig toegepast vanwege de hogere kosten en complexiteit.

De verwachting is dat deze beide procedures leiden tot minder monsterverstoring in de consolidatiefase dan de spanningsgestuurde tweetrapsprocedure die is voorgeschreven in hoofdstuk 3. Het spanningspad in de consolidatiefase blijft bij de beide alternatieve procedures namelijk dicht bij de K_0 situatie.

De spanningsgestuurde tweetrapsprocedure die is voorgeschreven in hoofdstuk 3 was tot voor kort de enige methode die alle laboratoria in Nederland uit konden voeren. Inmiddels zijn de mogelijkheden van de apparatuur en software toegenomen en kan een deel van de laboratoria ook de andere methoden uitvoeren. Het huidige protocol staat alle drie methoden toe. Het proefrapport moet aangeven welke methode gebruikt is. Bovendien moet de bereikte eindwaarde van de K_0 -factor duidelijk gerapporteerd worden.

Onduidelijk is nog wat de invloed van de verschillende consolidatieprocedures bij de triaxiaalproef op het uiteindelijke resultaat van de proef is in termen van ontwikkeling van waterspanning, het verloop van het spanningspad en de schuifsterkte. Gericht onderzoek hiernaar op Nederlandse natuurklei zal hierover uitsluitsel moeten geven.

Afschuifsnelheid bij triaxiaalproeven

De afschuifsnelheid bij de triaxiaalproef is nu op maximaal 1%/uur gesteld. Nader onderzoek kan uitsluitsel geven of deze waarde een optimale begrenzing vormt.

Triaxiaal extensieproeven

Wanneer een ophoging wordt aangelegd, kan het uitvoeren van extensieproeven noodzakelijk zijn. CEN ISO/TS 17892-9 voorziet niet in richtlijnen voor het uitvoeren van extensieproeven. Extensieproeven kunnen echter wel naar analogie van deze CEN-standaard worden uitgevoerd ter aanvulling op de compressieproeven.

Diameter monster bij triaxiaalproeven

De diameter van het triaxiaalmonster is nu op minimaal 50 mm gesteld. Deze waarde is aan de lage kant en draagt niet bij aan de nauwkeurigheid van het proefresultaat. De verwachting is dat grotere monsters leiden tot een kleiner effect van monsterverstoring en membraancorrectie. Gericht onderzoek is gewenst om het effect van een grotere diameter, zoals 65 mm of 100 mm, in kaart te brengen.

Classificatie veen

Het classificeren van veen wordt op dit moment in het algemeen uitgevoerd volgens het Technisch Rapport Geotechnische classificatie van veen (TR16) van de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. Dit rapport is zeer uitgebreid en daarom tijdrovend voor grote hoeveelheden monsters. Het biedt daarnaast geen methode die in het veld bruikbaar is. Dit classificatiesysteem leunt sterk op een indeling naar botanische samenstelling. Recent is in het kader van het Dijken op Veen project een veenbeschrijvingsprotocol opgesteld (Erkens et al, 2013). Het Dijken op Veen veenbeschrijvingsprotocol beoogt een directere relatie te leggen tussen veeneigenschappen en de sterkte en stijfheid van het veen. Door het opbouwen van een database van sterkte- en stijfheidseigenschappen van veen gekoppeld aan structuur en andere eigenschappen van veen kan wellicht op termijn een beter inzicht in de sterkte- en stijfheidseigenschappen van veen worden verkregen.

9 Referenties

- Berre, T. 1982. Triaxial testing at the Norwegian Geotechnical Institute. *Geotechnical Testing Journal*, 5(1/2): 3–17. (Also published as Norwegian Geotechnical Institute, Publication 134.)
- Bishop, A.W., Gibson R.E. in *Laboratory Shear Testing of Soils*, ASTM STP 361, Philadelphia, ASTM, 1965, pp.435-461.
- De Groot, D.J., Ladd C.C., Germaine J.T. 1992. Direct simple shear testing of cohesive soils. MIT, Research Rapport R92-18, June 1992.
- Den Haan E.J, Kamao S. Obtaining isotache parameters from a CRS K_0 -Oedometer. *Soils And Foundations*, 43:4:203-214, Aug. 2003.
- Erkens G., de Vries S., Zwanenburg C., van der Kolk B.J., de Bruijn H.T.J. 2013 Dijken op Veen II, veenbeschrijvingsprotocol, Deltares rapportnr. 1208254-013-GEO-002.
- Greeuw, G.; Adel, H. den; Schapers, A.L.; Haan, E.J. den (2001). Reduction of Axial Resistance due to membrane and side drains in the triaxial test. In: J.L. Hanson and R.J. Termaat (eds), *Proceedings Soft Ground Technology Conference, Noordwijkerhout 2000*, ASCE Geotechnical Special Publication 112, ASCE, pp.30-42.
- Greeuw, G. 2014. Dijken op Veen II - Nauwkeurigheid DSS-proeven op veen bij lage spanning. Deltares rapport 1207808-007-GEO-0004, 11 april 2014.
- Greeuw, G, 2015. Vergelijking DSS-proeven bij vijf laboratoria. Deltares rapport 1209662-000-GEO-0006, april 2015.
- Ladd, Charles C., and Don J. DeGroot. 2004. Recommended Practice for Soft Ground Site Characterization: Arthur Casagrande Lecture. 12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. April 10, 2003. Revised: May 9, 2004.
- Özer, M. 2009. Comparison of liquid limit values determined using the hard and soft base Casagrande apparatus and the cone penetrometer. *Bull Eng Geol Environ* (2009) 68: 289-296.
- TR16. TECHNISCH RAPPORT GEOTECHNISCHE CLASSIFICATIE VAN VEEN. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. Delft, juni 1996.

