


# POVM Vacuumconsolidatie

Hoofdrapport

**POVM Vacuumconsolidatie**

POV

MACRO  
STABILITEIT



Auteur: M. Visschedijk

Datum: augustus 2017

Versie: 2

**Titel**

POVM Vacuumconsolidatie

**Project**

1220719-000

**Kenmerk**

1220719-000-GEO-0010

**Pagina's**

67

**Trefwoorden**

Vacuumconsolidatie, dijkversterking, HWBP, POV Macro stabiliteit

**Samenvatting**

Het voorliggende rapport doet verslag van een onderzoek naar de blijvende invloed van vacuümconsolidatie op de ongedraineerde sterkte van cohesieve grond. Vacuümconsolidatie kan zowel worden uitgevoerd met het traditionele Menard systeem als met het alternatieve Beaudrain-S systeem. Bij voldoende verhoging van de effectieve verticale spanning tijdens de vacuümperiode resulteert in theorie een blijvende verhoging van de grensspanning. Daarmee resulteert dan in theorie ook een blijvende verhoging van de ongedraineerde schuifsterkte. Ter validatie van de blijvende verhoging zijn veldproeven uitgevoerd op de locaties Bleskensgraaf (alleen Menard) en Schardam (zowel Menard als Beaudrain-S). Voorafgaand aan de vacuümperiode en na afloop daarvan zijn boringen en sonderingen uitgevoerd. De blijvende toename van grensspanning en van ongedraineerde sterkte is primair aangetoond door middel van laboratoriumproeven op grondmonsters die uit de boringen zijn genomen. Aanvullend bewijs is verkregen door het relateren van grensspanning en veldspanning aan de ongedraineerde sterkte met hulp van het SHANSEP rekenmodel. Aanvullend bewijs is ook verkregen door gebruik te maken van een lineaire correlatie tussen de ongedraineerde sterkte en de netto sondeerweerstand. De langs verschillende wegen gevonden bewijzen komen kwantitatief grofweg met elkaar overeen. De gemeten waterspanningen laten zien dat het effect van vacuümconsolidatie midden tussen de verticale drains in de siltige kleilaag bij Schardam bij benadering gelijk is aan de gemeten drukverlaging ter plaatse van de drains. De effectiviteit in veenlagen is echter minder groot. De mogelijke oorzaak is de aanwezigheid van gas, of een grote lek lengte. Om tussen de drains in veen binnen een redelijke tijd voldoende waterdrukverlaging te bereiken kan daarom een fijner stramien van verticale drains nodig zijn dan in klei het geval is. Vanwege de aangetoonde effectiviteit in deze praktijkproef en in eerdere praktijkproeven wordt de methode in principe aanbevolen voor praktijktoepassing. Voorafgaand dient wel nader onderzoek plaats te vinden naar de voorspelbaarheid van het effect in klei en veen. Dit om in ontwerpsituaties op betrouwbare wijze een optimale drainafstand te kunnen bepalen. Verder dient in het praktijkontwerp voldoende aandacht te worden geschonken aan de mogelijke invloed van verticale drains op het stationaire stijghoogteverloop. Ten slotte wordt aanbevolen om bij praktijktoepassingen uitgebreid te blijven meten en om na afloop een bepaling van grondsterkte uit te voeren, ter controle van de in praktijk bereikte verbetering.

**Titel**  
POVM Vacuumconsolidatie

**Project** 1220719-000      **Kenmerk** 1220719-000-GEO-0010      **Pagina's** 67

**Referenties**

- Rivierenland opdracht 201505418/319368
- Deltares offerte 1220719-000-GEO-0001-ydh

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	mrt. 2017	ir. M.A.T. Visschedijk		dr.ir. C. Zwanenburg		ir. L. Voogt	
		ing. P. Kraaijenbrink					
		ing. H.T.J. De Bruijn					
		M. Konstantinou					
2	aug. 2017	ir. M.A.T. Visschedijk	<i>CV</i>	dr.ir. C. Zwanenburg	<i>CV</i>	ir. L. Voogt	<i>CV</i>
		ing. P. Kraaijenbrink	<i>R</i>				
		ing. H.T.J. De Bruijn	<i>P</i>				
		M. Konstantinou	<i>MK</i>				

**Status**  
definitief

## Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1	Kader POV	1
1.2	Doelstelling en afbakening	2
1.3	Aanpak	2
1.4	Leeswijzer	3
<b>2</b>	<b>Principes</b>	<b>4</b>
2.1	Introductie	4
2.2	Vacuümconsolidatie	4
2.3	Ongedraineerde sterkte	6
2.3.1	Relatie met grensspanning	6
2.3.2	Correlatie met sondeerweerstand	9
<b>3</b>	<b>Proefvelden</b>	<b>11</b>
3.1	Introductie	11
3.2	Bleskensgraaf	11
3.2.1	Locatie	11
3.2.2	Beschrijving grondopbouw en waterspanningen	12
3.2.3	Aanleg proefvak	13
3.2.4	Vacuümperiode	16
<b>4</b>	<b>Overzicht uitgevoerd onderzoek</b>	<b>24</b>
4.1	Algemeen	24
4.1.1	Grond- en laboratoriumonderzoek	24
4.2	Bleskensgraaf	26
4.2.1	Inleiding	26
4.2.2	Fasering en pompdruk	26
4.2.3	Grondonderzoek	27
4.2.4	Laboratoriumonderzoek	30
4.2.5	Zettingen	32
4.2.6	Waterspanningen	32
4.2.7	Hellingmetingen	36
4.3	Schardam	37
4.3.1	Inleiding	37
4.3.2	Fasering en pompdruk	38
4.3.3	Grondonderzoek	39
4.3.4	Laboratoriumonderzoek	41
4.3.5	Zettingen	41
4.3.7	Hellingmetingen	46
<b>5</b>	<b>Grensspanning en ongedraineerde sterkte</b>	<b>49</b>
5.2	Grensspanning	49
5.2.1	Algemeen	49
5.2.2	Bleskensgraaf	51
5.2.3	Schardam	53
5.3	Ongedraineerde sterkte	57

5.3.1	Algemeen	57
5.3.2	Bleskensgraaf	57
5.3.3	Schardam	59
<b>6</b>	<b>Samenvatting, conclusies en aanbevelingen</b>	<b>62</b>
6.1	Samenvatting van het uitgevoerde onderzoek	62
6.1.1	Inleiding	62
6.1.2	Grensspanning	62
6.1.3	Ongedraineerde sterkte	64
6.2	Conclusies	65
6.3	Aanbevelingen	65
6.4	Aanbevelingen vanuit ENW techniek en de evaluatiecommissie	66
<b>Appendices</b>		
<b>A</b>	<b>PvA Beudrain vak Schardam (Cofra)</b>	<b>A-1</b>
<b>B</b>	<b>Grondonderzoek en monitoring Schardam</b>	<b>B-1</b>
B.1	Handboringen (Fugro)	B-1
B.2	Boringen en Sonderingen (Fugro)	B-2
B.3	Monitoringverslag (Deltares)	B-3
<b>C</b>	<b>Grondonderzoek en monitoring Bleskensgraaf</b>	<b>C-1</b>
C.1	Feitelijke rapportage (Inpijn-Blokpoel)	C-1
C.2	Monitoring verslag (Deltares)	C-2
<b>D</b>	<b>Laboratoriumonderzoek Bleskensgraaf (Deltares)</b>	<b>D-1</b>
D.1	K0CRS proeven	D-1
D.2	DSS proeven	D-2
D.3	Triaxiaalproeven	D-3
D.4	Classificatieproeven	D-4
<b>E</b>	<b>Laboratoriumonderzoek Schardam</b>	<b>E-1</b>
E.1	Fase 1 (Fugro)	E-1
E.2	Fase 2 (Fugro)	E-2
E.3	Fase 1 (Deltares)	E-3
<b>F</b>	<b>Interpretation of lab results</b>	<b>F-1</b>
F.1.3	Ko-CRS tests	F-6
F.2	In-situ stresses at different stages	F-7
F.3	Classification parameters	F-13
F.4	SHANSEP parameter S	F-17
F.5	SHANSEP parameter m	F-20
<b>G</b>	<b>Correlation between CPT data and undrained strength</b>	<b>G-1</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Kader POV

De primaire waterkeringen in Nederland moeten voldoen aan de vereiste veiligheidsnorm. Daartoe voeren waterschappen, hoogheemraadschappen en het ministerie van Infrastructuur en Milieu in alliantievorm maatregelen uit, binnen het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP). Dat doen ze op basis van afspraken die zijn vastgelegd in het Bestuursakkoord Water van mei 2011. De huidige versterkingsronde van het HWBP wordt bepaald door de primaire waterkeringen die zijn afgekeurd in de laatste (verlengde) derde toetsronde. Deze keringen zijn eind 2013 vastgelegd in de Landelijke Rapportage Toetsing (LRT3+). Het HWBP heeft zich tot doel gesteld om de huidige ronde van versterkingsmaatregelen ruim 2 keer sneller en goedkoper uit te voeren dan de vorige ronde. De gereedheidskist van de dijkversterker moet daarvoor worden gevuld met nieuwe technieken, rekenmethodieken, procedures etc. Om de daarvoor benodigde innovaties te ondersteunen heeft het HWBP een aantal zogenaamde Project Overstijgende Verkenningen (POV's) gestart. Binnen de POV's worden kansrijke ideeën tot toepasbare technieken uitgewerkt. Een van deze POV's is de POV Macrostabiliteit (POV|M).

Waterkeringbeheerders, bedrijfsleven en kennisinstellingen werken binnen de POV|M samen aan het realiseren van versnellende, kostenbesparende en praktisch toepasbare kennis- en productinnovaties, zonder kwaliteitsverlies. Dit inclusief de bijbehorende technieken, rekenmethodieken en procesverbeteringen. De belangrijkste resultaten moeten uiterlijk 2018 in de toekomstige dijkversterkingsprojecten van het HWBP kunnen worden geïmplementeerd.

Volgens het Plan van aanpak (Waterschap Rivierenland, 2015) is de POV|M opgedeeld in de volgende vier clusters:

- Innovatie en techniek.
- Rekentechnieken.
- Monitoring.
- Proces.

Binnen het cluster Innovatie en Techniek is een praktijkonderzoek geprogrammeerd, dat zich richt op de verhoging van de schuifsterkte van de ondergrond door vacuümconsolidatie.

Vacuümconsolidatie wordt bij ophoging op slappe grond al ruim 30 jaar toegepast als een zettingsversnellende maatregel die laterale deformatie beperkt. De versnelde zettingen treden op als gevolg van een tijdelijke onderdruk, in combinatie met drainage. De tijdelijke onderdruk werkt als voorbelasting. Bij voldoende voorbelasting neemt de preconsolidatiespanning (ook genoemd grensspanning) toe en daarmee ook de schuifsterkte. Door de sterktoename kunnen stabiliteitsbermen aan binnenzijde lager blijven (beter inpasbaar) en kunnen ze onder afschot worden gelegd. De benodigde veiligheidsnorm kan dus met minder grondverzet worden gehaald. Toepassing van de techniek draagt daarom op twee fronten bij aan de HWBP doelstelling “sneller, beter en goedkoper”. Het innovatieve karakter van het hierna gerapporteerde onderzoek betreft het vaststellen van de invloed van vacuümconsolidatie op de grensspanning.

## 1.2 Doelstelling en afbakening

Doorgaans wordt vacuümconsolidatie gebruikt om restzettingen als gevolg van ophoging te reduceren en om omgevingsinvloeden te beperken. De voorliggende rapportage doet verslag van onderzoek naar de blijvende invloed van vacuümconsolidatie op de ongedraineerde sterkte van cohesieve grond. Hoofddoelstelling van dit onderzoek is het toetsen van de volgende hypothese.

*Na verwijderen van de vacuümdruk is een blijvende verhoging van de grensspanning gerealiseerd. Als gevolg daarvan is ook de ongedraineerde schuifsterkte blijvend verhoogd.*

Om deze hypothese te toetsen wordt de invloed van vacuümconsolidatie op grensspanning en schuifsterkte beschouwd. Dat gebeurt met hulp van gemeten waterspanningen, laboratoriumproeven en sonderingen. Het effect van het tijdelijk verhogen van de horizontale spanning wordt hierbij impliciet meegenomen. Indien de toetsing positief uitvalt, is het vervolgdoel om een werkwijze op te stellen die de sterkte-toename in rekening brengt bij het bermontwerp.

Het doel is niet om de algemene werking en toepasbaarheid van vacuümconsolidatie ter discussie te stellen of om daarvoor richtlijnen op te stellen. Dat is eerder al gebeurd (Dienst Weg- en waterbouwkunde, 2004; CUR, 2005). Impliciet wordt wel getoetst of de rekenwaarde voor de voorbelasting door vacuümdruk in praktijk wordt gerealiseerd. Ook de validiteit van het breed toegepaste SHANSEP<sup>1</sup> model voor ongedraineerde sterkte (Ladd & Foott, 1974; Deltares, 2014a) staat in het onderhavige rapport niet ter discussie. De SHANSEP relatie wordt in dit rapport wel gebruikt om de ontwikkeling van de ongedraineerde sterkte te relateren aan de ontwikkeling van veldspanning en grensspanning. Ten slotte wordt ook de gebruikelijke lineaire correlatie tussen de ongedraineerde sterkte en de netto sondeerweerstand (Lunne, Robertson, & Powell, 1997; Deltares, 2014b) niet expliciet gevalideerd. Deze correlatie wordt in het voorliggende rapport wel gebruikt om de relatieve aanpassing van de ongedraineerde sterkte te volgen, op verschillende tijdstippen van sonderen.

## 1.3 Aanpak

Om de onderzoekshypothese te valideren zijn vacuümconsolidatieproeven uitgevoerd in het veld. De sterkte voor - en na het vacuüm is gemeten met hulp van veldsondemetingen en laboratoriumonderzoek.

Oorspronkelijk was alleen een enkele veldproef voorzien van circa 400 m<sup>2</sup> (20\*20). Dit veld met conventionele Menard vacuümconsolidatie is uiteindelijk ook zo aangelegd in Bleskensgraaf. Vanuit de alliantie Markermeerdijk is eveneens een locatie bij Schardam beschikbaar gesteld. Op deze locatie is naast de Menard techniek ook de Beaudrain-S techniek toegepast, in proefvelden van 17,5 bij 17,5 m. De keuze voor de afmetingen van de proefvelden sluit aan op de beoogde toepassing onder (binnen)bermen van dijken, met 20 m als een reële breedtemaat. Zie hoofdstuk 3 voor een nadere beschrijving.

De grensspanning en sterkte van de grond zijn direct bepaald in het laboratorium, op monsters uit boringen die zijn uitgevoerd voorafgaand aan de vacuümperiode en uit boringen die binnen 7 dagen na afloop zijn uitgevoerd. Aanvullende veldsondemetingen voor en na de vacuümconsolidatie zijn gebruikt om de relatieve toename van de ongedraineerde

---

<sup>1</sup> Stress History And Normalized Soil Engineering Properties

schuifsterkte in te schatten. Het verloop van de waterspanning in de tijd is gemeten tijdens de vacuümconsolidatieperiode en in de periode daarna. Daarnaast is ook het verloop van de vervormingen in de tijd gemeten. Met het waterspanningsverloop en de (gezette) locatie is vervolgens het verloop van de effectieve spanning in de tijd geschat, en de daaruit volgende aanpassing van de grensspanning. De metingen van de waterspanningen geven impliciet ook een indruk van de efficiëntie van de methode. Samenvattend is de aanpassing van ongedraineerde sterkte en van grensspanning dus zowel direct gemeten (via laboratoriumproeven) als ook indirect (sterkte via veldsondemetingen en grensspanning via waterspanningsmetingen).

Achtereenvolgens zijn de volgende stappen doorlopen:

- Locatiebepaling.
- Veldonderzoek voor aanvang van de proef.
- Ondersteunend laboratorium onderzoek voor aanvang van de proef.
- Ontwerp, draaiboek en inrichten van de in-situ vacuüm consolidatie proef.
- Uitvoeren van de in-situ proef inclusief de monitoring.
- Veld- en ondersteunend laboratorium onderzoek na uitvoering proef.
- Afwerken en opruimen van de proeflocatie.
- Analyse en rapportage van de resultaten.

#### 1.4 Leeswijzer

Voor een snel overzicht volstaat het lezen van hoofdstuk 1 en hoofdstuk 6. Het laatste hoofdstuk beschrijft kort de globale aanpak, de globale resultaten en de uiteindelijke conclusies en aanbevelingen.

- Hoofdstuk 2 geeft een nadere toelichting op de principes van vacuümconsolidatie en op de relatie tussen de ongedraineerde sterkte en de grensspanning.
- Hoofdstuk 3 beschrijft een aantal uitvoeringsaspecten van de veldproeven.
- Hoofdstuk 4 geeft een overzicht van het uitgevoerde grond- en laboratoriumonderzoek, als ook het resultaat van de tijdens uitvoering gemeten vervormingen en waterspanningen.
- Hoofdstuk 5 beschrijft de langs verschillende wegen bepaalde grensspanningen en ongedraineerde sterktes. Dit in combinatie met een indicatie en duiding van de daarbij gevonden overeenkomsten en verschillen.

Bovengenoemde hoofdstukken verwijzen door naar de diverse bijlagen. In deze bijlagen zijn feitelijke rapportages van het veldwerk en laboratoriumwerk opgenomen, als ook een gedetailleerde interpretatie van het laboratoriumwerk.



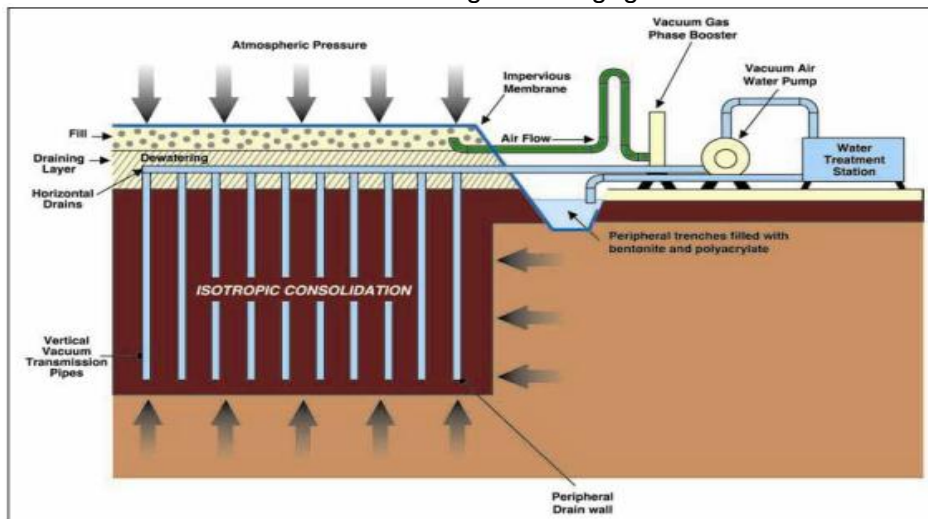
## 2 Principes

### 2.1 Introductie

In het voorliggende hoofdstuk wordt eerst het principe van vacuümconsolidatie besproken (§ 2.2). Daarna wordt ingegaan op het effect van grensspanningsverhoging op de ongedraineerde sterkte (§ 2.3).

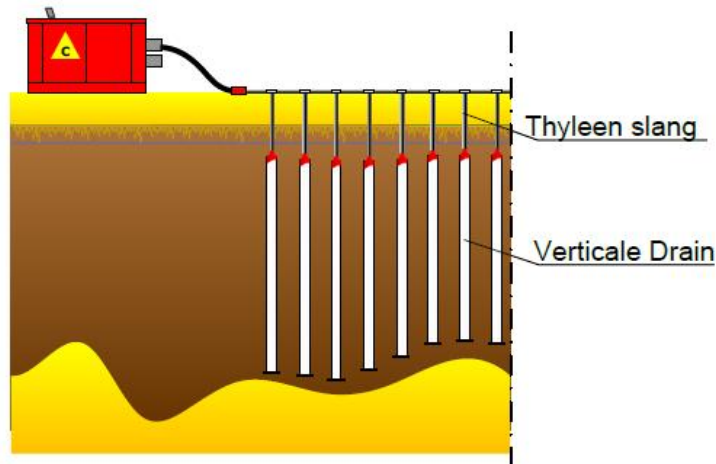
### 2.2 Vacuümconsolidatie

Bij de conventionele Menard methode wordt via een vacuümpomp en horizontale drains een onderdruk gecreëerd in een met folie afgedekte topzandlaag. Op de horizontale drains sluiten verticale drains aan. Het effect van de gerealiseerde onderdruk ten opzichte van de atmosferische druk is deels vergelijkbaar met het effect van een bovenbelasting. De onderdruk door vacuümconsolidatie is echter alleen aanwezig tussen de drains en niet daaronder. De onderdruk werkt bovendien alzijdig, dus ook in horizontale richting. Schematisch is dat in onderstaande figuur weergegeven.



Figuur 2.1 Principe schets Menard vacuümconsolidatie

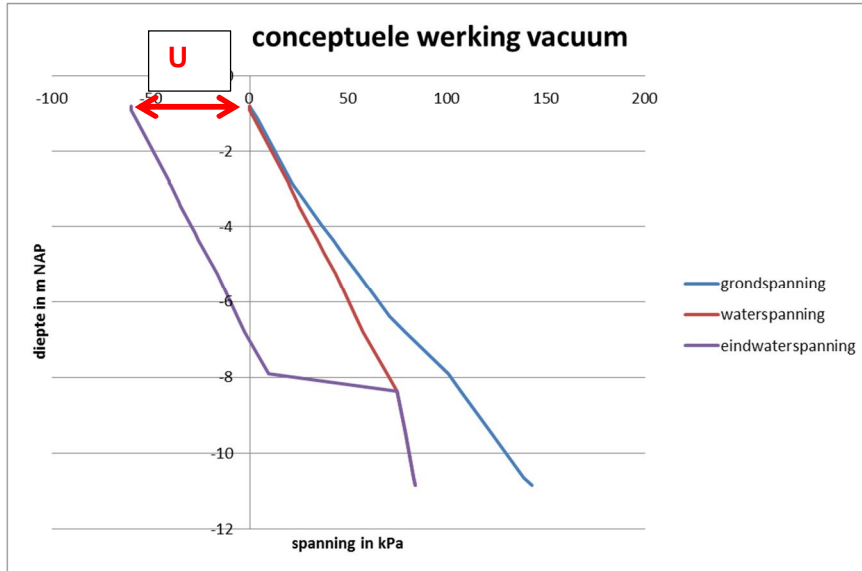
Bij de Beaudrain-S techniek (Figuur 2.2) wordt geen folie toegepast om het vak luchtdicht af te sluiten. In plaats daarvan wordt gebruik gemaakt van de beperkte doorlatendheid van de verzadigde grond zelf. De verticale drains gaan daartoe over in thyleen slangen, op een diepte van ongeveer 1,5 meter onder het maaiveld. De thyleen slangen worden doorgevoerd tot boven het maaiveld en daar gekoppeld aan een horizontaal slangensysteem. Dat systeem wordt weer aangesloten op de vacuümpomp. Het patent voor deze techniek ligt bij Boskalis/Cofra.



Figuur 2.2 Vereenvoudigde weergave van het Beaudrain-S principe (overgenomen uit Bijlage A)

Vacuümconsolidatie is in het verleden regelmatig toegepast als maatregel om de consolidatie als gevolg van ophoging te versnellen en om de restzetting te beperken. In het buitenland wordt de techniek vooral toegepast op ondergrond met klei, maar er zijn ook succesvolle veldproeven uitgevoerd op veengrond (Hayashi, Nishikawa, Nishimoto , & Sawai, 2003; Griffin & O'Kelly, 2014). Op diepte wordt de invloed van de verticale drain op de waterdruk in de tussenliggende grond bepaald door de consolidatie coëfficiënt en de leklengte (Sellmeijer, Visschedijk, & Weinberg, 2004). De invloed van de drains neemt toe naarmate de initiële consolidatiecoëfficiënt groter is en naarmate de leklengte kleiner is. De leklengte neemt af bij afnemende afstand tussen de drains. De leklengte neemt ook af wanneer de verhouding tussen de horizontale en verticale doorlatendheid toeneemt. De verhouding tussen de horizontale en verticale doorlatendheid verschilt per grondsoort, evenals de consolidatiecoëfficiënt. De verhouding in veen neemt bovendien sterk toe door samendrukking. De effectiviteit van de drains kan daarom ook per grondsoort verschillen. De versnelde consolidatie leidt tot kortere ophogtijd, tot meer tijd om zettingen in de bouwfase te laten optreden en tot het sneller bereiken van de eindstabiliteit. Tijdens de gebruiksfase resulteert dan minder verschildeformatie en daarmee minder onderhoud in de gebruiksfase. Dergelijke effecten kunnen ook worden bereikt met hulp van een tijdelijke voorbelasting door grond, in combinatie met verticale drains. Ten opzichte van het laatstgenoemde alternatief reduceert vacuümconsolidatie bij een ophoging echter ook de horizontale deformaties aan de randen van de ophoging. Daarmee is vacuümconsolidatie geschikt als alternatieve mitigerende maatregel voor het reduceren van omgevingsbeïnvloeding, in plaats van beschermende constructies.

In Figuur 2.3 wordt indicatief het effect van vacuümconsolidatie op de waterspanning weergegeven. De rode lijn stelt de oorspronkelijke waterspanningen voor. De paarse lijn stelt de waterspanning voor die zich instelt tijdens de vacuümperiode, na de (door de verticale drains) versnelde consolidatie. Het verschil tussen de oorspronkelijke waterdruk en de ingestelde waterdruk is gelijk aan de aangebrachte vacuümdruk. Zie ook (Dienst Weg- en waterbouwkunde, 2004).



Figuur 2.3 Conceptuele werking van vacuüm consolidatie. De rode lijn is de initiële waterspanning. De paarse lijn is de waterspanning die zich (na consolidatie) instelt tijdens de vacuümperiode. U stelt de hoeveelheid onderdruk voor, in dit geval 60 kPa of 60 % vacuüm

De verlaging van de waterspanning leidt tot verhoging van de effectieve spanning. Deze effectieve spanningsverhoging leidt bij matig overgeconsolideerde grond tot zetting en tot het verhogen van de grensspanning. Wanneer de vacuümconsolidatie wordt gestopt zullen de effectieve spanningen langzaam weer terugkomen op het oude niveau. De zetting is voor een zeer groot deel blijvend. De grensspanning is permanent verhoogd.

## 2.3 Ongedraineerde sterkte

### 2.3.1 Relatie met grensspanning

Een hogere grensspanning leidt volgens de SHANSEP relatie tot een hogere ongedraineerde schuifsterkte. De SHANSEP relatie is van oorsprong empirisch (Ladd & Foott, 1974), maar kan ook worden afgeleid uit de Critical State Soil Mechanics (CSSM) theorie (Schofield & Wroth, 1986). Gebruik van de SHANSEP relatie is conform het *Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium WBI* (Deltares, 2014a).

Het SHANSEP model gaat uit van een unieke waarde voor de ongedraineerde schuifsterkte ratio voor normaal geconsolideerde condities.

$$S = \frac{s_u}{\sigma'_v} \Big|_{\sigma'_v = \sigma'_{v,y}} \quad (2.1)$$

$S$  = schuifsterkte ratio

$s_u$  = ongedraineerde schuifsterkte gemeten bij de grensspanning in kPa

$\sigma'_v$  = effectieve verticale spanning in kPa

$\sigma'_{v,y}$  = grensspanning (ook genoemd preconsolidatiespanning of *yield stress*) in kPa. Ook wel aangeduid met het symbool  $p_c$

De grond is normaal geconsolideerd wanneer de grensspanning gelijk is aan de verticale effectieve spanning ( $\sigma'_v = \sigma'_{v,y}$ ).

De grond is overgeconsolideerd wanneer de grensspanning groter is dan de verticale effectieve spanning. Dat is bijvoorbeeld het geval tijdens de toetsituatie. De grensspanning neemt toe door belasten en door veroudering. In de overgeconsolideerde situatie geldt volgens SHANSEP de volgende uitdrukking voor de ongedraineerde schuifsterkte.

$$s_u = S \cdot \sigma'_v \cdot (OCR)^m \quad (2.2)$$

$$OCR = \frac{\sigma'_{v,y}}{\sigma'_v} \quad (2.3)$$

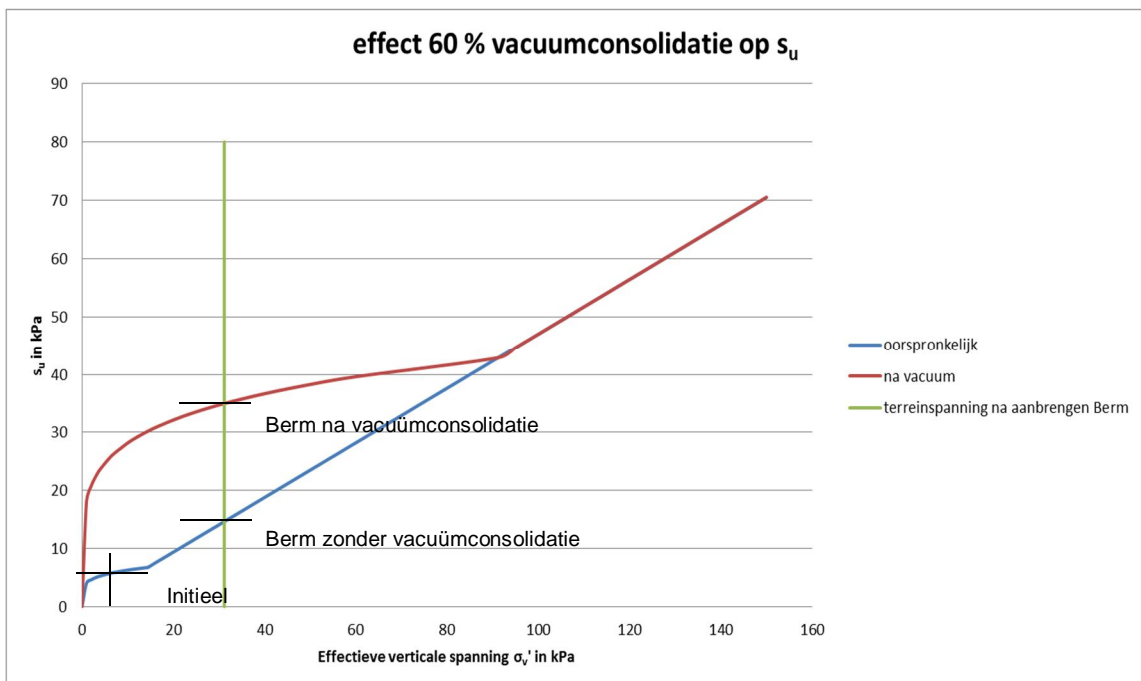
OCR staat voor de *Over Consolidatie Ratio*, die de verhouding tussen de grensspanning en de terreinspanning geeft. De OCR wordt verlaagd door een permanente ophoging (grotere effectieve verticale spanning). De OCR kan worden verhoogd door vacuumbelasting of een andere tijdelijke voorbelasting, leidend tot grotere grensspanning. De parameter  $m$  is de zogenaamde *strength gain factor*. Volgens de CCSM theorie (Schofield & Wroth, 1986) kan deze parameter worden bepaald uit de samendrukkingsparameters voor belasten en ontlasten/herbelasten.

$$m = \frac{C_c - C_s}{C_c} \quad (2.4)$$

Hierin is  $C_c$  de compressie-index en  $C_s$  de zwelling-index.

Volgens de SHANSEP relatie is de ongedraineerde schuifsterkte in de overgeconsolideerde toestand afhankelijk van de OCR en daarmee van de verhouding tussen de grensspanning en de effectieve verticale terreinspanning. Hoe hoger de grensspanning ten opzichte van de terreinspanning, hoe hoger de ongedraineerde schuifspanning. Figuur 2.4 toont een voorbeeld van dit verband, dat ook de invloed van ophoging en vacuümconsolidatie illustreert. Het betreft een veenachtige grond met een ongedraineerde schuifsterkte ratio  $S$  van 0.47, een initiële OCR van 2, een sterkte toename factor ( $m$ ) van 0,81 en een initiële effectieve spanning van 7,2 kPa. Het (ongunstige) effect van blijvende zetting op de effectieve spanning is voor de eenvoud overigens niet in onderstaande beschouwing betrokken.

- In de grafiek is met de blauwe lijn de relatie tussen  $s_u$  en  $\sigma'_v$  weergegeven voor de oorspronkelijke situatie. Bij de initiële effectieve spanning van 7,2 kPa is de ongedraineerde schuifsterkte gelijk aan circa 6 kPa. Tot een effectieve spanning van 14,4 kPa (de initiële grensspanning) reageert de grond overgeconsolideerd.
- Wanneer op deze grond direct een berm van klei wordt aangebracht met een gemiddelde dikte van 1,5 m, dan neemt de effectieve spanning in de grond toe van 7,2 kPa naar 31,2 kPa (weergegeven met de verticale groene lijn). Vanaf de initiële grensspanning reageert de grond normaal geconsolideerd (rechte lijn met helling  $S$ ). Bij normaal geconsolideerde grond is de grensspanning gelijk aan de effectieve spanning. De ongedraineerde schuifsterkte  $s_u$  na ophoging is dan 14,6 kPa.
- Wanneer tijdens het aanbrengen van de berm een additionele vacuümconsolidatie wordt toegepast met een theoretisch maximaal rendement van 60 % (0,6 bar vacuüm), dan wordt de effectieve spanning (tijdelijk) verhoogd naar 91,2 kPa (bij verwaarlozing van de invloed van zetting). De grensspanning wordt dan blijvend verhoogd tot 91,2 kPa. Nadat de vacuümconsolidatie is gestopt, zakt de effectieve spanning terug naar de effectieve spanning bij bermniveau van circa 31,2 kPa. Daardoor ontstaat een aanzienlijke overconsolidatie ( $OCR = \frac{91,2}{31,2}$ ). De ongedraineerde schuifsterkte na ophoging en vacuümconsolidatie is circa 35 kPa (de kruising van de rode lijn en de groene lijn). De extra schuifsterkte als gevolg van vacuümconsolidatie heeft een positieve invloed op de sterkte van de waterkering. Door zettingen tijdens de vacuümperiode (als gevolg van zowel bermgewicht als vacuümconsolidatie) is de effectieve spanning tijdens en na de consolidatieperiode overigens minder groot dan hierboven aangenomen. De winst zal in praktijk daarom ook minder groot zijn.



Figuur 2.4 Voorbeeld van het effect van vacuümconsolidatie en bermaanleg op de ongedraineerde schuifsterkte. Zonder vacuümconsolidatie resulteert na het aanbrengen van de berm een ongedraineerde schuifsterkte van 14,6 kPa. In combinatie met 0,6 bar tijdelijke vacuümonderdruk resulteert na het aanbrengen van de berm een ongedraineerde schuifsterkte van circa 35 kPa

Voor de verhouding tussen de ongedraineerde sterktes bij aanpassing van effectieve spanning in het overgeconsolideerde gebied geldt volgens de SHANSEP relatie:

$$\begin{aligned} \frac{s_{u,1}}{s_{u,0}} &= \frac{\sigma'_{v,1}}{\sigma_{v,0}} \cdot \left( \frac{OCR_{v,1}}{OCR_{v,0}} \right)^m = \frac{\sigma'_{v,1}}{\sigma'_{v,0}} \cdot \left( \frac{\sigma'_{v,y,1} / \sigma'_{v,1}}{\sigma'_{v,y,0} / \sigma'_{v,0}} \right)^m \\ &= \left( \frac{\sigma'_{v,1}}{\sigma'_{v,0}} \right)^{1-m} \cdot \left( \frac{\sigma'_{v,y,1}}{\sigma'_{v,y,0}} \right)^m \end{aligned} \quad (2.5)$$

Waarin:

- $s_{u,0}$  De ongedraineerde schuifweerstand voor aanpassing van de effectieve spanning [kPa].
- $s_{u,1}$  De ongedraineerde schuifweerstand na aanpassing van de effectieve spanning [kPa].
- $\sigma'_{v,0}$  Verticale effectieve spanning voor spanningsverandering [kPa].
- $\sigma'_{v,1}$  Verticale effectieve spanning na spanningsverandering [kPa].
- $\sigma'_{v,y,0}$  Grensspanning voor spanningsverandering [kPa].
- $\sigma'_{v,y,1}$  Grensspanning na spanningsverandering  $p_{c,1} = \max(p_{c,0}, \sigma'_{v,1})$  [kPa].

Bij spanningsvermindering ( $\sigma'_{v,1} < \sigma'_{v,0}$ ) blijft de grensspanning gelijk en geldt  $\left( \frac{\sigma'_{v,y,1}}{\sigma'_{v,y,0}} \right)^m = 1$ . In dat geval vereenvoudigt vergelijking (2.5) tot:

$$\sigma'_{v,1} < \sigma'_{v,0} : \frac{s_{u,1}}{s_{u,0}} = \left( \frac{\sigma'_{v,1}}{\sigma'_{v,0}} \right)^{1-m} \quad (2.6)$$

### 2.3.2 Correlatie met sondeerweerstand

Binnen het project *Dijken op Veen* (Deltares, 2014d) is een werkwijze opgesteld voor de Markermeerdijken waarbij de ongedraineerde schuifsterkte wordt bepaald door correlaties met sondeerweerstand. Deze correlaties worden locatiespecifiek bepaald met hulp van laboratoriumtesten. De toegepaste relatie tussen de ongedraineerde schuifweerstand en de conusweerstand is (Lunne, Robertson, & Powell, 1997):

$$s_u = \frac{q_{net}}{N_{kt}} \quad , \quad q_{net} = q_t - \sigma_v \quad , \quad q_t = q_c + (1 - a)u_2 \quad (2.7)$$

Waarin:

- $a$  Conusfactor afhankelijk van gebruikte sonde [-].
- $N_{kt}$  Correlatiefactor tussen  $q_{net}$  en  $s_u$  [-].
- $q_c$  Conusweerstand [MPa].
- $q_{net}$  Netto conusweerstand, dat wil zeggen gecorrigeerd voor gemeten waterspanning en verticale spanning [MPa].
- $q_t$  Conusweerstand gecorrigeerd voor gemeten waterspanning [MPa].
- $u_2$  waterspanning gemeten direct boven de conus [MPa].

De relatie tussen de ongedraineerde schuifweerstand en de bolsondemeting is:

$$s_u = \frac{q_{ball}}{N_b} \quad (2.8)$$

Waarin:

$q_{ball}$  Weerstand gemeten met de bolsonde [MPa].

$N_b$  Correlatiefactor tussen  $q_{ball}$  en  $s_u$  [-].

Bij een bolsonde wordt doorgaans niet gecorrigeerd op de verticale effectieve spanning.

### 3 Proefvelden

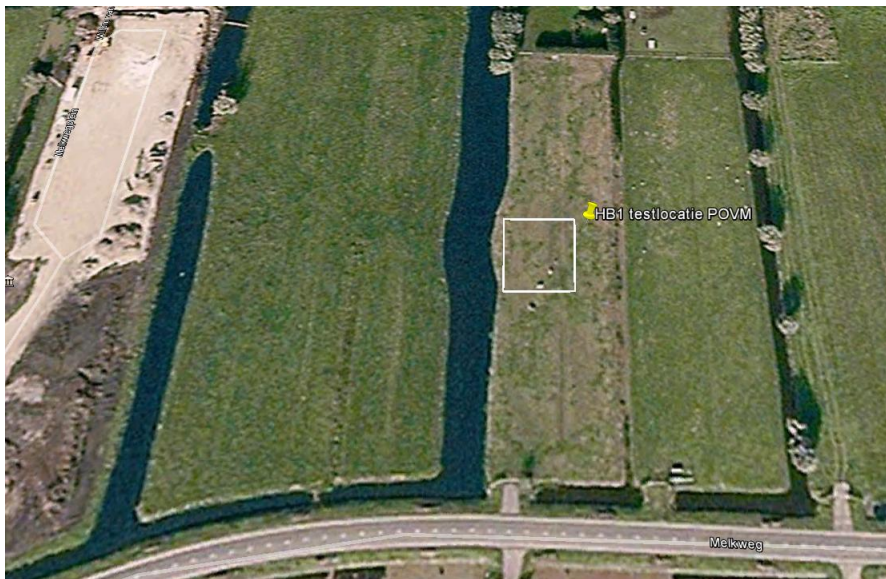
#### 3.1 Introductie

In dit hoofdstuk worden de locaties en de uitvoeringsaspecten beschreven van de veldproeven in Bleskensgraaf (§ 3.2) en in Schardam (§ 3.3).

#### 3.2 Bleskensgraaf

##### 3.2.1 Locatie

Het door de gemeente Molenwaard beschikbaar gestelde perceel bij Bleskensgraaf ligt aan de noordzijde van de Melkweg, ongeveer tegenover nummer 17. Hier is een proefveld aangelegd ter grootte van circa 20x20 m. De locatie is weergegeven in Figuur 3.1 en Figuur 3.2. Op deze locatie is alleen de conventionele vacuümconsolidatietechniek toegepast. De sloot aan de westzijde van het perceel is al in een eerder stadium gedempt.



Figuur 3.1 Overzicht proeflocatie Bleskensgraaf





Figuur 3.2 Proeflocatie Bleskensgraaf

### 3.2.2 Beschrijving grondopbouw en waterspanningen

Het maaiveld is oorspronkelijk gelegen op circa NAP-1,60 m. De grondopbouw varieert binnen het gebied van 20 x 20 m. Op een aantal locaties is bijvoorbeeld een tussenzandlaag aangetroffen. Ook variëren de klei en veenlagen in dikte. Het pleistocene zand begint op circa NAP-11,6 m à NAP-12,0 m. De bodemopbouw conform sondering DKP-02 en boring MB-03 is in Tabel 3.1 weergegeven.

Onderzijde laag [m .. NAP]	Grondsoort
-1,60	Maaiveld
-2,80	Kleiige toplaag, klei, klei weinig Antropogeen / Formatie van Echteld
-4,80	Veen, soms (m.n. onderin) kleiig Formatie van Nieuwkoop
-6,60	Klei*, zwak – sterk humeus, Komklei Formatie van Echteld
-8,80	Klei, zwak siltig; Klei en Komklei, Formatie van Echteld
-10,70	Tussenzandlaag, Formatie van Echteld
-11,80	Klei, zwak – sterk humeus, soms ook matig zandig. Formatie van Echteld
> -11,80	Zand, pleistoceen Formatie van Echteld/Boxtel
* Tijdens de latere classificatie is deze laag als veen beschouwd	

Tabel 3.1 Bodemopbouw proefvak Bleskensgraaf, sondering DKP-02 en boring MB-03

In een aantal boringen is de veenlaag aanwezig tot NAP-6,20 m. Bij de boringen waar geen tussenzandlaag zit zijn voornamelijk humeuze klei- en soms ook veenlagen aanwezig. Uit een aantal sonderingen lijkt het, op basis van het wrijvingsgetal, of er op het pleistocene zand een veenlaag (voormalig basisveen) aanwezig is. Dit blijkt echter niet altijd uit de boringen.

Het polderpeil lag aan het begin van de proef op NAP-2,40 m. De grondwaterstand zoals gemeten in de handboringen en in de mechanische boringen was circa NAP-2,0 m. In het Pleistocene zand is een stijghoogte van NAP-1,90 m gemeten.

Op 4 dieptes in het slappe-lagenpakket waterspanningsmeters zijn geplaatst, te weten: MV - 1,5 m, -3,0 m, -4,5 m en -6,0 m. De twee waterspanningsmeters in het veen laten een hydrostatisch verloop zien. In de onderliggende (humeuze) kleilaag wordt in de twee waterspanningsmeters een klein verloop gemeten, naar een circa 0,2 m lagere stijghoogte van circa NAP-2,2 m. In de laag tussen MV -6,0 m en het pleistocene zand zijn geen waterspanningen gemeten, maar wordt aangenomen dat de waterspanning verloopt van circa NAP-2,2 m naar NAP-1,9 m.

### 3.2.3 Aanleg proefvak

Na het grondonderzoek (week 10/11-2016) en het aanbrengen van de hellingmeetbuizen en waterspanningsmeters (Inpijn en Blokpoel), is er door de aannemer Martens en van Oord in week 13 begonnen met het aanbrengen van de vacuümconsolidatievoorzieningen. Om het consolidatie- en drainagewater af te kunnen voeren is begonnen met het aanbrengen van een laag drainagezand van 0,5 m dik. In Figuur 3.3 is dat weergegeven. Nadat de drainzandlaag is aangebracht is de sloot rondom het vak gegraven (Figuur 3.4). Op verzoek van de aannemer is deze sloot breder dan die bij het proefveld Schardam, om zo ook de mogelijkheid van het betreden van het proefveld en het eventueel vernielen van de folieafdichting te beperken.



Figuur 3.3 Aanbrengen drainagezand



Figuur 3.4 Gegraven sloten rond het proefvak



*Figuur 3.5 De waterspanningsmeters tussen het drainagezand*

De verticale drains zijn aangebracht met een hydraulische kraan met makelaar (zie Figuur 3.6 en Figuur 3.7). Omdat onder het proefveld een wisselende bodemopbouw is aangetroffen, zijn de verticale drains niet over het gehele slappe lagenpakket doorgezet, zoals wel is gebeurd in de vakken bij Schardam.

Aan de noordzijde van het proefvak is in de sonderingen 02 en 04 een zandlaag aangetroffen op circa NAP-8,3 m. Deze zandlaag is verder zuidelijk in het proefvak niet zichtbaar in sondering DKP-01 en DKP-03. Wel is in boring MB01 (ter plaatse van sondering DKP-01) op hetzelfde niveau een tussenzandlaag aangetroffen met een dikte van meer dan 1 m. Als gevolg van deze heterogeniteit zijn de verticale drains hier doorgezet tot circa NAP-7,0 m, ruim 1,0 m boven de tussenzandlaag. Het Pleistocene zand bevindt zich op NAP-11,6 à tot NAP-12,0 m.



*Figuur 3.6 Verticale drains geplaatst (Linten)*



Figuur 3.7 De rupskraan waarmee de verticale drains worden aangebracht

Tijdens het aanbrengen van de verticale drains is voorzichtig gewerkt en stond de rupskraan op draglineschotten (6,00 m x 1,00 m) om de belasting zoveel mogelijk te spreiden. De schotten werden door een kleinere rupskraan verlegd. Na aanbrengen zijn de verticale drains gekoppeld aan horizontale drainagebuizen, op dezelfde of praktisch gelijke wijze als in Schardam. Daarna is het vak afgedekt met folie (Figuur 3.8). Hierna is de pomp aangesloten en is de proef in week 16-2016 gestart.



Figuur 3.8 Het proefveld ingepakt in de folie met hellingmeetbuizen (rode kokers)



Figuur 3.9 De vacuümconsolidatieproef in uitvoering

De gebruikte pomp kan zowel vacuümdruk als water verwerken.



Figuur 3.10 De vacuümdruk wordt digitaal uitgelezen



Figuur 3.11 Het water uit het slappe lagen pakket wordt op het proefvak geloosd

### 3.2.4 Vacuümperiode

Tabel 3.2 toont de uitvoeringskalender voor Bleskensgraaf, met de datum van het aanbrengen en stoppen van de vacuümperiode. In het vak is er na het aanzetten van de pompen nog een korte periode geweest waarin lekkages en dergelijke zijn verholpen om het vak luchtdicht te maken. De in de tabel genoemde datum voor het aanbrengen betreft de start van het effectieve vacuüm, dus na het herstellen van eventuele lekkages.

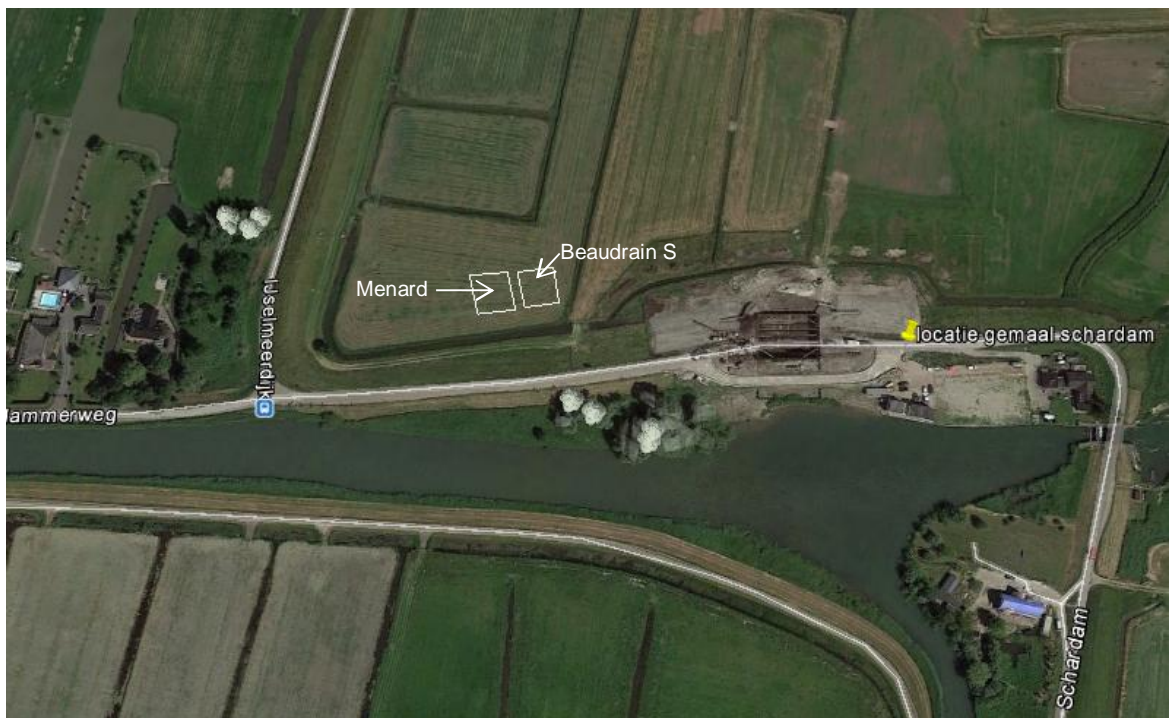
Proefvak	Aanleg proefveld	Aanbrengen Vacuüm	Afzetten vacuüm	Diepte verticale drains
	[Datum klaar]	[Datum]	[datum]	[m..NAP]
Bleskensgraaf	01-04-2016 <sup>(1)</sup>	25-04-2016	23-08-2016 <sup>(2)</sup>	-7.0
1)	Installatie verticale drainage is als tijdstip gekozen omdat vanaf dat moment de consolidatie op gaat treden.			
2)	Proef is afgesloten op 22 augustus. In de periode vanaf 20 juli tot 2 augustus is de vacuümdruk om verschillende redenen weggevallen			

Tabel 3.2 Uitvoeringskalender voor proefvakken Bleskensgraaf

### 3.3 Schardam

#### 3.3.1 Locatie

De proeflocatie Schardam is gelegen nabij het gemaal Schardam. De locatie is weergegeven in Figuur 3.12.



Figuur 3.12 : Proeflocatie Schardam. De twee vierkantjes geven de proeflocatie aan, het linker vierkantje is het Menard proefvak, het rechter vierkantje het Beudrain S proefvak

Het proefvak Schardam bestaat uit twee vakken. In vak 2 is de conventionele Menard techniek toegepast (links op de figuur) en in vak 1 de Beaudrain-S techniek (rechts). De vakken zijn circa 17,5x17,5 m groot. De vakken liggen buitendijks van de primaire kering in het voorland. Het maaiveld ligt op een hoogte van circa NAP-0,80 m.

### 3.3.2 Beschrijving grondopbouw en waterspanningen

De opbouw van de ondergrond ter plaatse is weergegeven in Tabel 3.3.

Onderzijde laag	Grondsoort
[m..NAP]	[-]
-0.80	Maaiveld
-1,00	Kleiige toplaag
-3,50	Veenlaag
-6,20	Klei van calais zwak siltig
-8.25	Klei van calais, wisselend zandlaagjes (wadzand)
-10,35	Klei van calais zwak siltig
	Pleistoceen zand

Tabel 3.3: Bodemopbouw Schardam

De oorspronkelijke freatische lijn in het vak ligt dicht tegen maaiveld, op circa NAP-0,9 m. De stijghoogte in het Pleistoceen is vastgesteld op NAP-2,35 m. De gemeten waterspanning verloopt hydrostatisch over de veenlaag. Aan bovenzijde van de wadzandlaag correspondeert de stijghoogte met de freatische lijn. Aan onderzijde van de wadzandlaag is de stijghoogte gelijk aan de stijghoogte de in de Pleistocene zandlaag is gemeten.

### 3.3.3 Aanleg proefvakken

In de week van 7 maart 2016 is Cofra gestart met de feitelijke aanleg van het proefveld. Voorafgaand was al grondonderzoek uitgevoerd en was de monitoringapparatuur al geïnstalleerd. Zie Bijlage A voor het gedetailleerde plan van aanpak door Cofra. Hierna volgt alleen een korte samenvatting, met indicatie van een enkele afwijking tijdens uitvoering en inclusief een illustratie met foto's.

Zoals gezegd is zowel de conventionele Menard vacuümconsolidatie als de BeauDrain-S techniek toegepast. Het type verticale drain is in beide gevallen gelijk. Vanwege de zeer slechte terreingesteldheid is er in beide gevallen voor gekozen om de oorspronkelijk geplande drainzandlaag van 1,0 m dikte te vervangen door een flugsandlaag van ca 0,5 m dikte. Dit om het risico op wegpersingen zo goed als mogelijk te beheersen. Op onderstaande foto is deze drainzandlaag van flugsand zichtbaar. De verticale drains zijn aangebracht door een hydraulische kraan met makelaar. De drains zijn doorgezet tot 2.0 m boven het Pleistoceen zand (tot NAP-8,7 m).



Figuur 3.13 Verticale drains worden ingebracht. De drains zijn weggedrukt tot NAP-8,7. De locaties zijn ingemeten in RD-coördinaten

### **Conventionele Menard vacuümconsolidatie**

Figuur 2.3 toont het principe van de conventionele Menard vacuümconsolidatie. De overlengte van de verticale drains wordt afgeknipt, vervolgens om de horizontale drains gevouwen en daarna vastgeniet. Dit is op onderstaande foto weergegeven.



Figuur 3.14 Detail van de aansluiting van de verticale drainstrips op de horizontale drainage

De horizontale drains zijn in de vorm van lussen tussen de verticale drains gelegd en deels ingegraven. Daarbij is elke strip aan de horizontale drains gemonteerd.





Figuur 3.15 Overzicht van de verticale en horizontale drainage in het Menard vacuümvak

Op de drainagelaag is eerst een geotextiel gelegd (grond dicht waterdoorlatend doek). Daarna is het vak ingepakt in luchtdicht folie en voorzien van zogenaamde watersloten rondom. Om het risico voor lekkage te beperken is de monitoring niet door de folie heen gevoerd, maar onder de folie afgewerkt. De monitoring en de aanzuigleiding zijn onder het waterslot doorgevoerd. Op onderstaande foto is dit zichtbaar. De foto is genomen een week nadat de vacuümproof is gestart. Als gevolg van de geforceerde zetting ligt de flugsand ophoging al onder de ligging van het oorspronkelijk maaiveld. De standpijpen naast het vak zijn van de hellingmeetbuizen.



Figuur 3.16 Foto genomen op 13 april Rechts is de folie zichtbaar waarmee het vacuümvak is ingepakt

Om de folie goed en luchtdicht aan te sluiten wordt langs de zijanten van het vacuümvak gebruik gemaakt van watersloten. Hierbij wordt een greppel gegraven tot onder de grondwaterstand. De folie wordt doorgelegd tot op de bodem van de greppel en daarna wordt water in de greppels gepompt. De monitoringskabels zijn op een centraal punt onder de folie geleid, over de greppelbodem. Deze aansluiting bleek luchtdicht.

### **BeauDrain-S**

Figuur 2.2 toont het principe van Beaudrain-S techniek. In het Beaudrain-S vak is geen folie of waterslot noodzakelijk. De monitoring kan gewoon door het vak heen worden gevoerd. De drains worden vooraf in de fabriek op lengte gemaakt. Aan de bovenzijde van de drain wordt een gesloten HDPE leiding gemonteerd. Figuur 3.17 toont de rollen, waarop de geprefabriceerde drainage zichtbaar is met aan de bovenzijde de thyleen leidingen.



*Figuur 3.17 Geprefabriceerde BeauDrain-S drains met aan de bovenzijde de thyleen leidingen*

De drains worden op dezelfde wijze geïnstalleerd als de normale verticale drains. Alleen zitten de drains niet op een rol, maar worden ze in de makelaar getrokken en daarna op diepte weggedrukt, zie Figuur 3.18.



*Figuur 3.18 De geprefabriceerde drains worden in de makelaar getrokken en daarna op diepte weggedrukt*

Nadat de drains zijn weggedrukt worden de thyleen leidingen aan bovenzijde met knelkoppelingen aan een horizontale thyleen leiding gekoppeld en worden de horizontale leidingen op de pomp aangesloten.



Figuur 3.19 Overzicht van de gekoppelde drainagebuizen (foto gemaakt na afloop van de proef)

### 3.3.4 Vacuümperiode

Tabel 3.4 toont de uitvoeringskalender voor beide vacuümvakken, met de datum van het aanbrengen en stoppen van de vacuümperiode. In beide vakken is er na het aanzetten van de pompen nog een korte periode geweest waarin lekkages etc. zijn verholpen om het vak luchtdicht te maken. De in de tabel genoemde datum voor het aanbrengen betreft de start van het effectieve vacuüm, dus na het herstellen van eventuele lekkages.

Proefvak	Aanleg proefveld	Aanbrengen Vacuüm	Afzetten vacuüm	Diepte verticale drains
	[Datum klaar]	[Datum]	[datum]	[m..NAP]
<b>Schardam conv.</b>	14-03-2016 <sup>(1)</sup>	5-04-2016	4-07-2016	-8.7
<b>Schardam Beaudrain</b>	15-03-2016 <sup>(1)</sup>	29-03-2016	4-07-2016	-8.7
1) Installatie verticale drainage is als tijdstip gekozen omdat vanaf dat moment de consolidatie op gaat treden.				

Tabel 3.4 Uitvoeringskalender voor proefvakken Schardam

## 4 Overzicht uitgevoerd onderzoek

### 4.1 Algemeen

#### 4.1.1 Grond- en laboratoriumonderzoek

Om aan de in § 1.2 gestelde doelen te kunnen beantwoorden is het volgende grond- en labonderzoek uitgevoerd.

##### Fase 0

Er is gestart met 5 meter diepe handboringen, om de geschiktheid van de locatie voor de proef te bepalen. Zie (Deltares, 2016a) en Bijlage B.1B.1.

##### Fase 1 (T=0)

Voorafgaand aan de proef zijn diepe boringen genomen en zijn sonderingen uitgevoerd. Dit moment in de tijd wordt in het vervolg aangeduid als T=0. De boringen en sonderingen zijn gebruikt voor grondsoortclassificatie en bepaling van laagliggingen. Met hulp daarvan is ook de toe te passen diepte van de verticale drains vastgesteld en de toe te passen diepte van de waterspanningsmeters. De sonderingen zijn ten slotte ook gebruikt voor correlatie met de initiële ongedraineerde schuifsterkte.

Monsters uit de boringen zijn gebruikt voor het bepalen van de volgende parameters van de twee belangrijkste grondlagen (klei en veen).

- Uit samendrukkingsproeven:
  - Consolidatiecoëfficiënten.
  - De initiële grensspanning en de daarmee bepaalde OCR-waarde.
  - De uit samendrukkingsparameters bepaalde SHANSEP parameter  $m$ .
- Uit DSS (*Direct Simple Shear*) proeven en triaxiaalproeven:
  - De SHANSEP parameter  $S$ .
  - De initiële ongedraineerde schuifsterkte  $s_u$  bij de terreinspanning.
  - Het in het laboratorium nagebootste effect van de vacuümdruk op de ongedraineerde schuifsterkte.

##### Fase 2 (T=7)

Binnen zeven dagen na het beëindigen van het vacuüm zijn wederom boringen en sonderingen uitgevoerd. Dit moment in de tijd wordt hierna aangeduid met T=7. De sonderingen zijn weer gebruikt voor correlatie met de aangepaste ongedraineerde schuifsterkte.

Monsters uit de boringen zijn gebruikt voor het opnieuw bepalen van de volgende parameters.

- Uit samendrukkingsproeven:
  - De aangepaste grensspanning en de daarmee bepaalde OCR-waarde.
  - De uit samendrukkingsparameters bepaalde SHANSEP parameter  $m$ .
- Uit DSS proeven en triaxiaalproeven:
  - De aangepaste ongedraineerde schuifsterkte  $s_u$  bij de terreinspanning.

Naast DSS en triaxiaal proeven waarbij is gereconsolideerd tot de (geschatte) initiële spanningen bij het nemen van de boringen in fase 2 zijn ook enkele proeven uitgevoerd waarbij is gereconsolideerd tot de initiële veldspanning in fase 3 (zie hierna).

#### Fase 3 (T=100)

Honderd dagen na het beëindigen van het vacuüm zijn ten derde male sonderingen uitgevoerd. Dit moment in de tijd wordt hierna aangeduid met T=100. De sonderingen zijn gebruikt voor correlatie met de verder aangepaste ongedraineerde schuifsterkte.

In fase 2 en 3 zijn de boringen en sonderingen midden in de driehoek van de omringende verticale drains uitgevoerd, omdat de invloed van de verticale drains en van vacuümomdruk daar het meest beperkt is. Het is dus in principe conservatief om conclusies over door vacuümconsolidatie opgebouwde ongedraineerde sterkte op dit grondonderzoek te baseren. De coördinaten van de verschillende waterspanningsmeters, van de boringen en van de sonderingen verschillen onderling echter. Omdat de boringen en sonderingen enkele meters buiten het midden van het veld zijn geplaatst moet er bij de interpretatie bovendien rekening mee worden gehouden dat de drains over de diepte door de vacuümconsolidatie horizontaal verschillend zullen zijn verplaatst en dat de boringen en sonderingen nooit precies verticaal zullen worden uitgevoerd. Op diepte zullen de boringen en sonderingen zich dus niet meer exact midden tussen de verticale drains bevinden. Deze verschillen beperken op voorhand de mogelijkheid voor het nauwkeurig relateren van de in het veld gemeten waterspanningsverschillen aan de via laboratoriumproeven en sonderingen gemeten grensspanningswinst. Dit geldt in extra mate indien er tussen de drains tijdens de vacuümconsolidatie een groot waterspanningsgradiënt is opgetreden.

Feitelijke rapportages van het laboratoriumonderzoek zijn opgenomen in Bijlagen DD (Bleskensgraaf) en E (Schardam).

#### 4.1.2 Metingen waterspanningen en vervormingen

Monitoring van waterspanningen en vervormingen heeft plaatsgevonden om de voortgang van de proef te controleren en om de proef naderhand te kunnen analyseren.

Om het tijdsafhankelijke verloop van de effectieve spanningen voor en na de vacuümperiode te kunnen uitrekenen zijn waterspanningsmeters geïnstumenteed met continue registratie. Deze meters hebben de mogelijkheid om zowel positieve als negatieve drukken te meten. De waterspanningsmeters staan verdeeld over de dikte van het slappe-lagenpakket. Één waterspanningsmeter is geplaatst in de watervoerende zandlaag onder het slecht doorlatende pakket. Deze meter dient als referentie en ter controle op de omgevingsbeïnvloeding. Daarnaast zijn in de Schardam-proefvelden nog twee waterspanningsmeters geïnstalleerd aan de onderzijde van de verticale drains. In het Bleskensgraaf-proefveld zijn geen waterspanningsmeters geïnstalleerd aan de onderzijde van de verticale drains. Hier zijn wel op verschillende posities in het vak luchtdrukmeters op de horizontale drains geplaatst.

Naast waterdrukken zijn ook de zettingen gemeten op verschillende locaties in de vakken (5 locaties in Bleskensgraaf en 2 in Schardam). De zettingen zijn gemeten met zettingsmeetinstrumenten die werken op basis van waterdrukken in een referentievat. De zetting is een belangrijke maat voor de consolidatiegraad van de ondergrond en tevens ook een indicator voor de werkelijke grondstijfheid in het veld.



*Figuur 4.1 Zettingsmeetinstrument. Het afgesloten vierkante aluminium bakje wordt gevuld via de twee kunststof leidingen. Het bakje is gekoppeld aan een referentiebak met een constante waterdruk. De waterspanningsmeter op het bakje (tussen de slangen) is aangesloten op een loggerkast en kan online worden uitgelezen*

Met hellingmeetbuizen zijn de opgetreden (horizontale) deformaties naast de vacuümvakken gemeten, zowel tijdens de proef als enige tijd daarna. Als gevolg van de vacuümvacuümconsolidatie zal de vervorming naast het vacuümvak naar het vak toe zijn gericht. Bij conventionele voorbelasting door ophoging zal de deformatie juist van het vak af zijn gericht.

Rapportages van de gemeten waterspanningen en vervormingen zijn opgenomen in Bijlage B.3 (Schardam) en Bijlage C (Bleskensgraaf).

## **4.2 Bleskensgraaf**

### **4.2.1 Inleiding**

Hierna volgt een overzicht van het uitgevoerde onderzoek en de uitgevoerde monitoring voor Bleskensgraaf, inclusief de relevante resultaten. Zie Bijlage C voor de feitelijke rapportage van grondonderzoek en monitoringresultaten. Zie Bijlage D voor de feitelijke rapportage van het laboratoriumonderzoek.

### **4.2.2 Fasering en pompdruk**

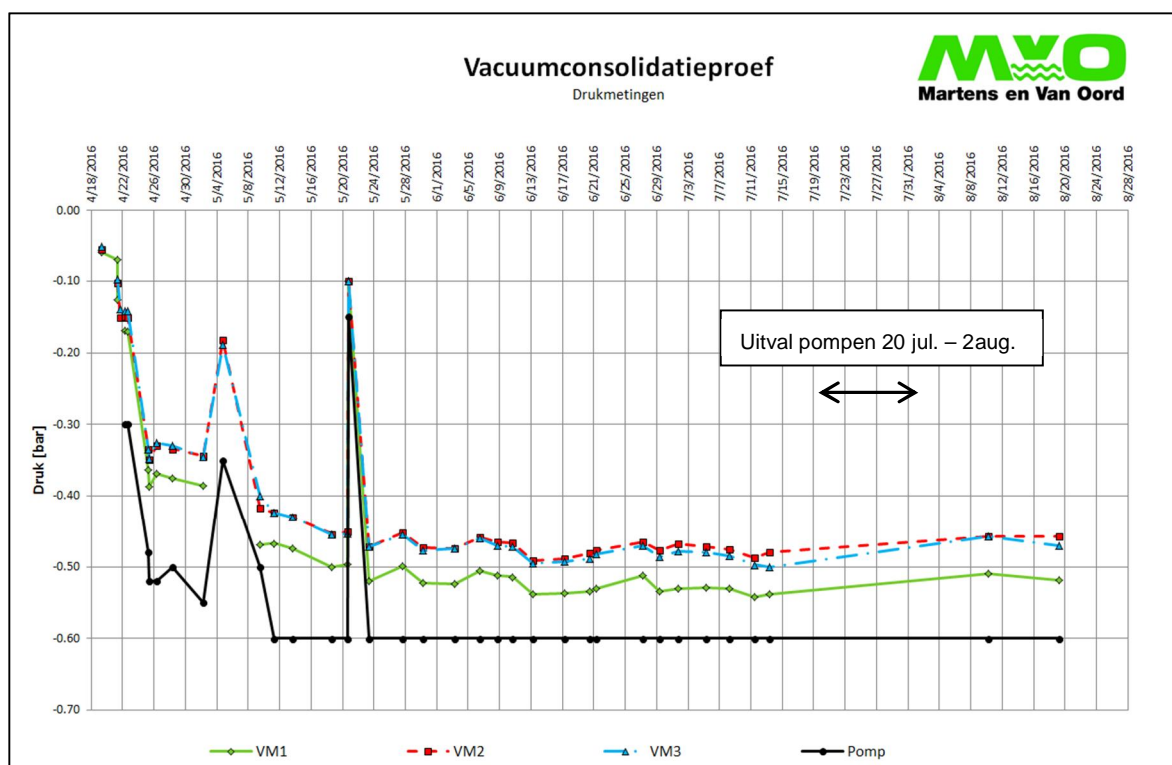
In § 3.2 is al een beschrijving van de proeflocatie gegeven. Hierna volgt nog een overzicht van de fasering en van gemeten pompdruk in de tijd.

- In december 2015 zijn reeds een aantal verkennende grondboringen verricht. Deze bevonden zich ten noorden van het uiteindelijk ingerichte vacuümvak.
- Het definitieve grondonderzoek, voorafgaand aan de proef, en de plaatsing van de hellingmeetbuizen en waterspanningsmeters is uitgevoerd door Inpijn en Blokpoel van 8 tot en met 18 maart 2016. Dit heeft bestaan uit 5 handboringen, 4 sonderingen, 7

mechanische boringen (4 t.b.v. monsternamen), 4 hellingmeetbuizen en 5 waterspanningsmeters.

- Vervolgens heeft Martens en van Oord het vacuümvak verder ingericht. Daarbij zijn door Deltares ook 5 zettingsmeetplaatjes geïnstalleerd.
- Op 18 april is gestart met de vacuümbemaling. Na 4 maanden is, op 23 augustus 2016, gestopt met de vacuümbemaling.
- Vervolgens zijn op 24-08-2016 vier nieuwe sonderingen gemaakt en op 25 en 26-08-2016 twee mechanische boringen. Circa 100 dagen na beëindiging van het vacuüm zijn op 29 en 30 november 2016 nog 4 sonderingen gemaakt.

Tijdens de proef zijn de vacuümpompen en de vacuümdruk, als gevolg van een technische storing, gedurende circa 2 weken uitgevallen (van 20 juli tot en met 2 augustus). Dit was mede een aanleiding om de proef iets langer door te zetten dan oorspronkelijk de bedoeling was. De behaalde vacuümdruk, gemeten bij de pomp bedroeg maximaal 0,6 bar. De 3 vacuümmeters in het vacuümvak hebben gemiddeld een onderdruk van circa 0,5 bar gemeten. De meters zijn op bepaalde tijdstippen handmatig uitgelezen. Van de storing (uitval pompen) tussen 20 juli en 20 augustus zijn geen metingen.



Figuur 4.2 Gemeten vacuümdrukken Bleskensgraaf. De zwarte lijn geeft de aan de pomp gemeten waarden. De gekleurde lijnen geven de gemeten drukken op drie plaatsen in het zandpakket. De drie meters zijn in één lijn schuin over het proefveld aangebracht. VM1 is dicht bij de pomp is geplaatst, VM2 halverwege en VM3 zover mogelijk van de pomp vandaan

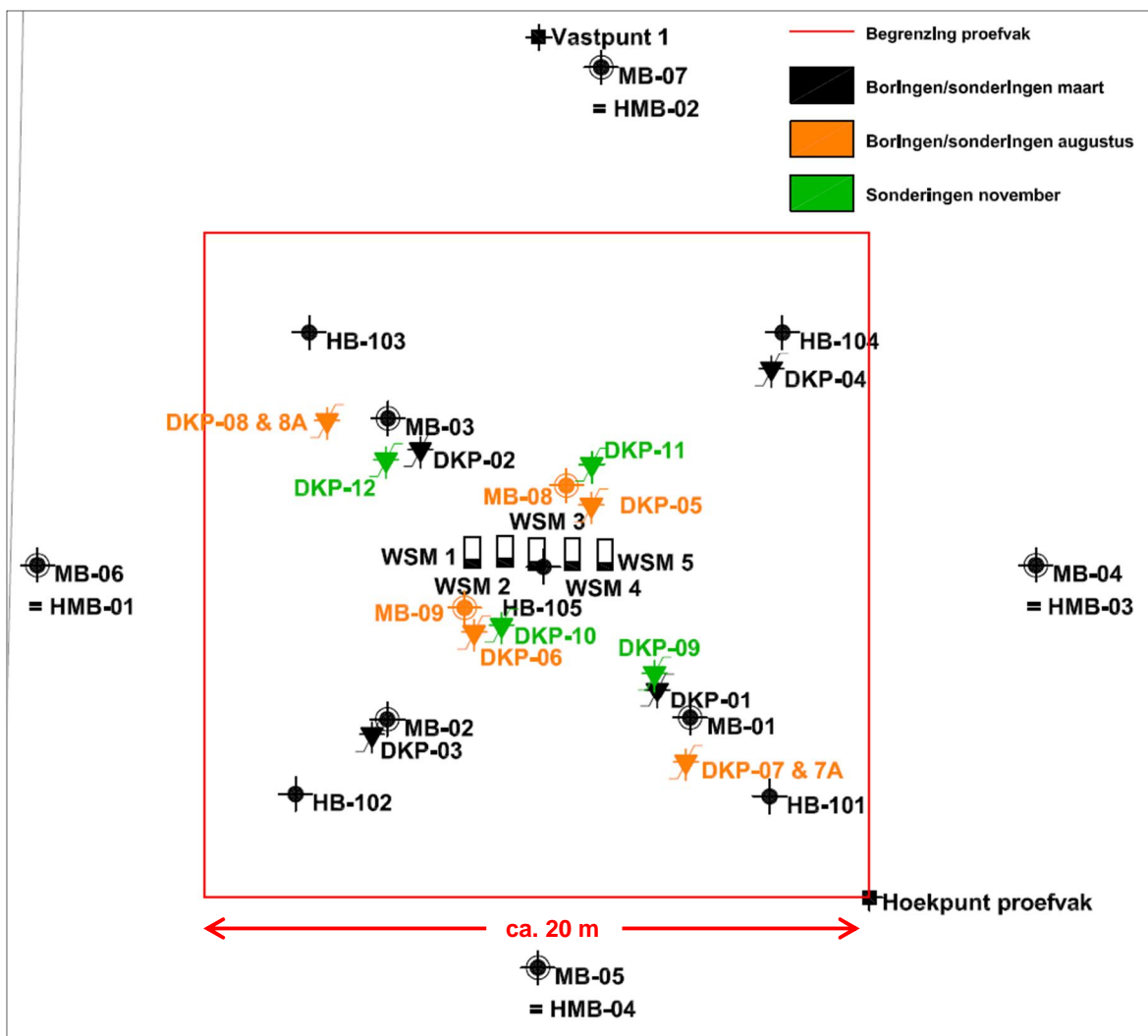
#### 4.2.3 Grondonderzoek

Het grondonderzoek is uitgevoerd door Ingenieursbureau Inpijn-Blokpoel. Het rapport is opgenomen in Bijlage B. Figuur 4.3 toont de locaties van boringen, sonderingen, waterspanningsmeters en hellingmeetbuizen. De boringen zijn uitgevoerd met continu gestoken (gedrukte) Ackermann bussen. De sonderingen zijn uitgevoerd als sondering



volgens NEN-EN-ISO 22476-1 klasse 1, waarbij een 10 cm<sup>2</sup> conus is gebruikt. Gebruik is gemaakt van het conustype S10-CFIP.1347-10 waarbij de waterspanningen zijn gemeten op U2.

In verband met de aangetroffen heterogeniteit in de samenstelling van de klei-zandlaag onder het veen zijn hier zowel op T=0, T=7 als T=100, telkens 4 sonderingen in het proefveld uitgevoerd. Oorspronkelijk waren per keer 2 sonderingen gepland. In Figuur 4.3 is een overzicht gegeven van het uitgevoerde grondonderzoek en de geplaatste monitoring.



Figuur 4.3: Proefveld (20m x 20m) met daarop ingetekend de meetlocaties van Inpijn-Blokpoeel voor alle fases. Hierin is: DKP-01 = sondering 01, klasse 1, MB-01 = mechanische boring 01, (Ackermann-pulsboring), HB-101 = handboring 101, HMB-01 = hellingmeetbuis 01, WSM 1 = waterspanningsmeter 1, Vastpunt = vaste buis tot in het pleistocene zand t.b.v. referentieniveau zettingsmeetplaatjes

Er zijn ook 5 zettingsmeetplaatjes geïnstalleerd. Deze zijn niet apart in Figuur 4.3 weergegeven. Ze bevinden zich in het midden van het vak, ongeveer ter plaatse van sondering DKP01, 02, 03 en 04.



*Figuur 4.4 Boorstelling bezig met het uitvoeren van een Ackermann puls boring. De Ackermann bussen worden gedrukt in het slappe lagen pakket (15-3-2016)*



*Figuur 4.5 De uitkomende grond wordt op een boorkleed per 20 cm uitgelegd*



Figuur 4.6 Steekapparaat waarmee de Ackermann busen hydraulisch gestoken worden

#### 4.2.4 Laboratoriumonderzoek

Het hierna gespecificeerde laboratoriumonderzoek is uitgevoerd door Deltares. Hiertoe zijn de monsterbussen van de boringen door Inpijn en blokpoel aangeleverd aan Deltares. De feitelijke rapportage is opgenomen in Bijlage DD.

Het laboratoriumonderzoek voor Bleskensgraaf was gericht op een aangenomen onderscheid tussen veen en een humeuze kleilaag onder het veen. Op grond van het vergelijkbare soortelijk gewicht is de humeuze kleilaag voor de parameterbepaling echter ook als veen beschouwd. Er is gebruik gemaakt van Ackermann boringen die zijn gestoken voor de start van de proef (Fase 1) en van boringen die zijn gestoken 3 à 4 dagen na beëindiging van de vacuümperiode (Fase 2).

##### Fase 1 (T=0)

- a) Per proefveld zijn in totaal 4 samendrukkingsproeven uitgevoerd ( 2 voor veen en 2 voor humeuze klei). Daarmee zijn de consolidatiecoëfficiënten, de initiële grensspanningen, de samendrukkingsparameters en de sterktoenamefactor  $m$  bepaald.
- b) Voor de initiële ongedraineerde schuifsterkte bij de terreinspanning zijn per proefveld 6 DSS proeven op veen uitgevoerd en 6 anisotroop geconsolideerde triaxiaalproeven op humeuze klei.
- c) Voor het bepalen van de SHANSEP parameter  $S$  zijn per proefveld 4 DSS proeven uitgevoerd op veen en 4 anisotroop geconsolideerde triaxiaalproeven op klei. De verticale consolidatiespanning is in duplo opgevoerd tot 1,5 en 2,0 keer de initiële grensspanning. De in duplo gebruikte monsters zijn gestoken binnen een afstand van 1 meter.
- d) Ter simulatie van de invloed van het vacuüm zijn 6 triaxiaalproeven op klei uitgevoerd. Dit is gebeurd in twee series van telkens 3 proeven (in duplo dus), waarbij een isotrope vacuümdruk is opgelegd van  $U = 30, 60$  en  $90$  kPa. Per proef zijn de volgende belastingstappen doorlopen.
  1. Anisotrope consolidatie tot de terreinspanning (K0 condities geschat).
  2. Toepassen van de isotrope vacuümdruk (deels direct door onderdruk in het monster, deels gesimuleerd door aanpassing van celdruk).

3. Vacuümdruk terug naar 0.
4. Ongedraineerd afschuiven bij terreinspanning.

**Fase 2 (T=7)**

- a) Per proefveld zijn in totaal 4 samendrukkingsproeven uitgevoerd ( 2 voor veen en 2 voor humeuze klei). Daarmee zijn de aangepaste grensspanningen, de samendrukkingsparameters en de sterktoenamefactor  $m$  bepaald.
- b) Voor de aangepaste ongedraineerde schuifsterkte bij de ruw geschatte terreinspanning tijdens de boring zijn per proefveld 6 DSS proeven op veen uitgevoerd en 6 anisotroop geconsolideerde triaxiaalproeven op humeuze klei.

Bij elke DSS proef zijn de volgende bepalingen uitgevoerd:

- Geologische beschrijving.
- Watergehalte voor en na de proef.
- Gloeiverlies.
- Droog en nat volume gewicht (over half monster over lengte as doorgesneden).
- Partical density.

Bij elke triaxiaalproef zijn de volgende bepalingen uitgevoerd:

- Gloeiverlies.
- Atterbergse grenzen.
- Watergehalte voor en na de proef.
- Droog en nat volume gewicht.
- Opatical density.

De aantallen uitgevoerde proeven en sonderingen zijn samengevat in Tabel 4.1.

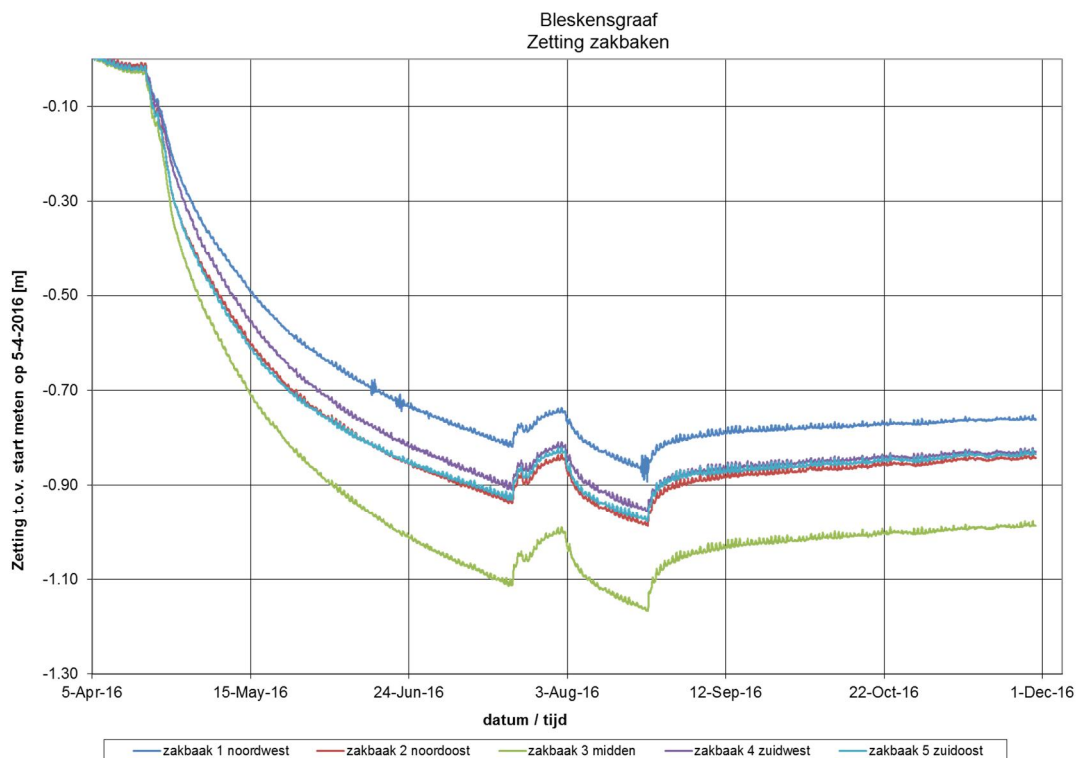
Fase	Sonderingen	Boringen	DSS	Anisotroop Triax	Triax - vacuüm	$K_0 - CRS$
1	4	7 (5 + 2) 1)				
1a	-		-	-		4
1b	-		6	6	-	-
1c	-		4 (2x2) 2)	4 (2x2) <sup>2)</sup>	-	-
1d	-				6	-
2	4	2	-	-	-	4
2a			-	-	-	-
2b			6	6	-	-
3	4				-	-
Total:	12		16	16	6	8

1): 5 boringen met ongeroerde monsters in bussen en 2 boringen alleen t.b.v. hellingmeetbuizen  
2): 2 proeven op veen en 2 proeven op humeuze klei

Tabel 4.1 Overzicht uitgevoerde sonderingen en laboratoriumproeven voor proefveld Bleskensgraaf

#### 4.2.5 Zettingen

Door Deltares zijn er zettingsmeetplaatsjes geïnstalleerd. Hiermee is online het zettingsgedrag gemeten tijdens de gehele proefuitvoering. Totaal zijn 5 platen geïnstalleerd; 1 plaat midden in het vak, bij WSM03 en de overige 4 platen ongeveer op de locaties van de eerste 4 sonderingen; DKP01 tot en met DKP04. In Figuur 4.2 is een afbeelding van een zettingsmeetplaat weergegeven. De meetlocaties worden getoond in Figuur 4.3.



Figuur 4.7 Bleskensgraaf: zettingen aan maaiveld [kPa]

#### 4.2.6 Waterspanningen

Er zijn door Inpijn en Blokpoel (I&P) 5 waterspanningsmeters geplaatst in het midden van het vacuüm vak. De gebruikte waterspanningsmeters hebben een bereik van 2 bar met een meetfout van 0,25% (0.5kPa). De waterspanningsmeters zijn afgewerkt met beschermkokers, die over de pvc-verlengbuizen van de waterspanningsmeters heen kunnen zakken. Hiermee kan de bovenkant van de verlengbuizen na afloop opnieuw worden ingemeten en kunnen de zettingen worden opgevangen, zonder dat waterspanningsmeters beschadigd raken.



Figuur 4.8: Waterspanningsmeters (op de linker foto met beschermkoker)

De waterspanningsmeters zijn midden tussen de verticale drains geplaatst. De locaties zijn in Figuur 4.3 weergegeven. In Tabel 4.2 en Tabel 4.3 zijn de plaatsingsdieptes en zakkingen van de waterspanningsmeters weergegeven. De liggingen voor en na de vacuümperiode zijn elk twee keer gemeten (I&P, Deltares).

Waterspanningsmeter	Diepte [m t.o.v. NAP]	
	I&P	Deltares
WSM01	-3,07	-2,98
WSM02	-4,58	-4,57
WSM03	-6,07	-6,03
WSM04	-7,55	-7,54
WSM05 (pleistoceen)	-13,54	-13,57

Tabel 4.2 Plaatsingsdieptes waterspanningsmeters Bleskensgraaf

Waterspanningsmeter	Diepte [m tov NAP]		Zakking* [m]	Verhouding met zakking maaiveld**
	I&P	Deltares		
<b>WSM01</b>	<b>-3.95</b>	<b>-4.06</b>	<b>0.98</b>	1.00
<b>WSM02</b>	<b>-5.21</b>	<b>-5.15</b>	<b>0.61</b>	0.62
<b>WSM03</b>	<b>-6.53</b>	<b>-6.51</b>	<b>0.47</b>	0.48
<b>WSM04</b>	<b>-8.08</b>	<b>-8.01</b>	<b>0.50</b>	0.51
<b>WSM05 (pleistoceen)</b>	<b>-13.54</b>	<b>-13.57</b>	<b>0.00</b>	0.00

\* De zakking van de waterspanningsmeters is berekend na middeling van de twee liggingsmetingen (I&P, Deltares) per tijdstip.

\*\*De zetting aan maaiveld, 100 dagen na het eind van de vacuümperiode, is 0.98m in het midden van het veld.

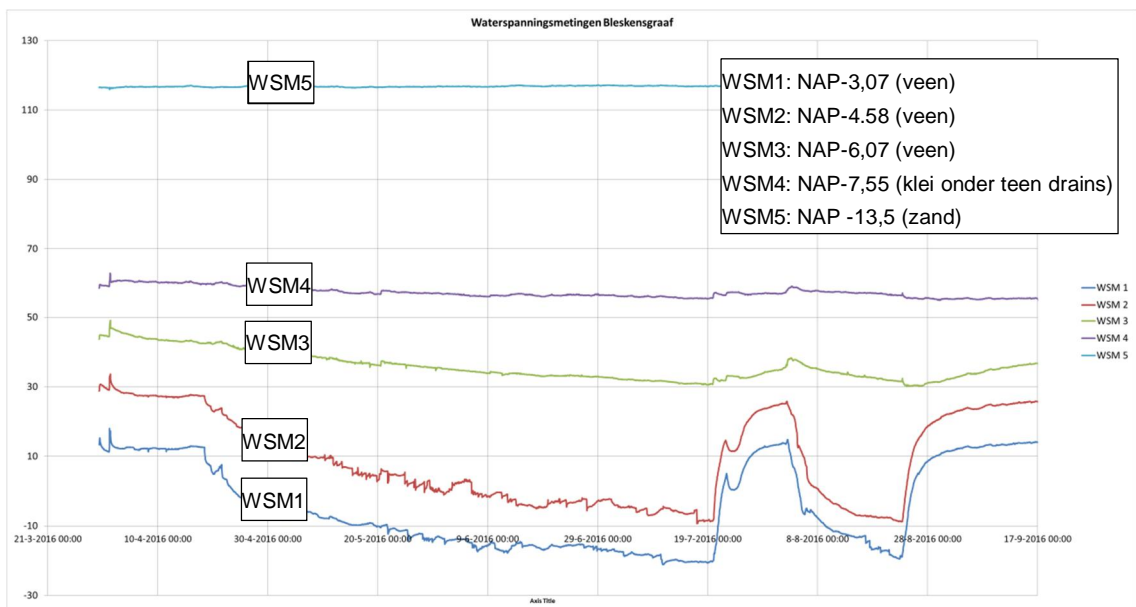
Tabel 4.3 Dieptes bij verwijderen waterspanningsmeters Bleskensgraaf

Vergelijking van de per tijdstip met GPS dubbel gemeten liggings van de waterspanningsmeters leert dat daarin afwijkingen tot ruim 0.1m optreden. De oorzaak daarvoor zou kunnen liggen in de onnauwkeurigheid van de meetmethode wanneer niet continu wordt gemeten. De teen van de verticale drains bevindt zich ongeveer op NAP-7,0 m. In dat verband is het opmerkelijk dat nog de helft van de maaiveldzakking wordt gemeten voor de zakking van meter WS04. Deze meter ligt op een initieel niveau van NAP-8.08 m, in de kleilaag onder de verticale drains. Wanneer de meting werkelijk de zetting beschrijft van een punt op die initiële diepte, dan zou dat betekenen dat de kleilaag onder de drains ook nog significant zou worden samengedrukt. Dat laatste is niet volgens verwachting en wordt ook tegengesproken door de zeer beperkte drukverlaging die tijdens de vacuümperiode in de meter wordt geregistreerd. De gemeten zakkingen van de waterspanningsmeters over de hoogte volgen ook niet het continue verloop per grondlaag, zoals dat in een enkele verticaal mag worden verwacht. Een waarschijnlijke verklaring voor deze observaties is een verschil tussen de verplaatsing van de meter en de van initieel de omringende grond. Dat laatste wordt misschien veroorzaakt door de interactie die de starre beschermhuis over de volle lengte heeft met de omringende bewegende grond en de interactie die de star bewegende beschermhuis weer heeft met de meter. Verder moet bij de interpretatie ook rekening worden gehouden met zettingsvariaties in horizontale richting (de waterspanningsmeters liggen niet in dezelfde verticaal).

De rapportage van de monitoring door Inpijn-Blokpoel en het verslag van de monitoring door Deltares zijn opgenomen in Bijlage C. Figuur 4.9 toont de gemeten waterspanningen en Figuur 4.10 toont de daaruit bepaalde stijghoogtes tot enkele weken na het einde van de vacuümperiode. De stijghoogtes zijn bepaald uit de gemeten waterspanningen met hulp van geschatte plaatshoogtes. Deze schatting vond plaats door de maaiveldzetting op elk moment te vermenigvuldigen met de verhouding volgens Tabel 4.3.

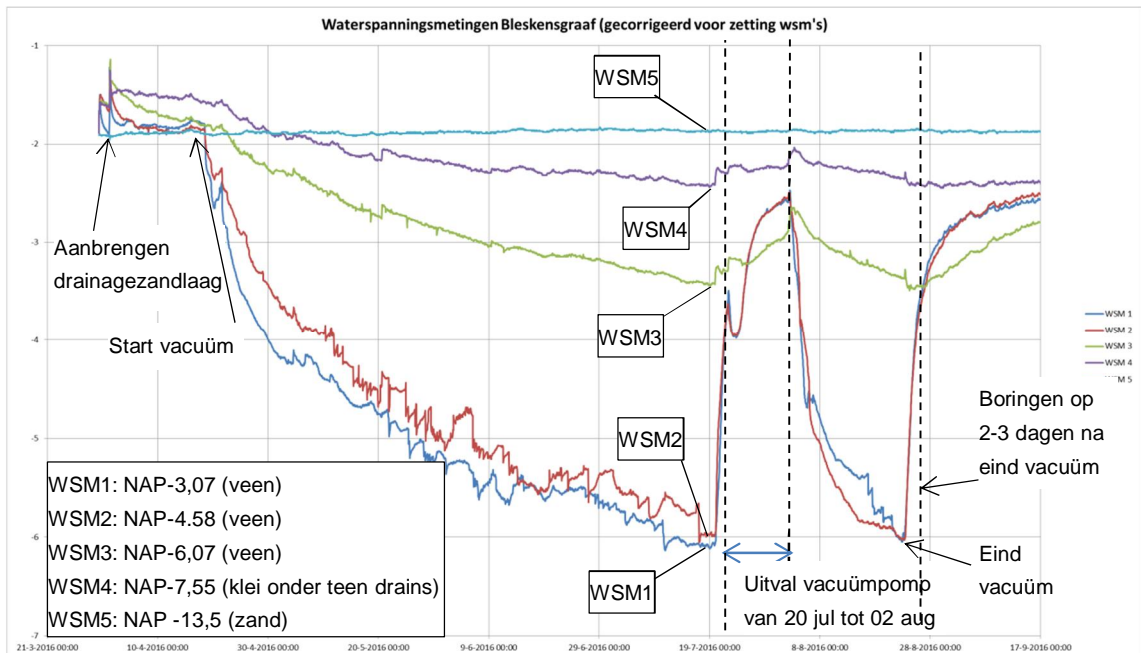
Onder stationaire omstandigheden is de stijghoogte in de cohesieve lagen ongeveer NAP-2m. Volgens de gemeten pompdruk is de te bereiken drukverlaging maximaal 60 kPa. De in het drainagezand bereikte drukverlaging ligt tussen de 46 en 52 kPa (§ 4.2.2). De maximaal gemeten drukverlaging in het veen tussen de drains varieert van ongeveer 40 kPa in WSM2 (veen op NAP-4,5m) tot ongeveer 15 kPa in WSM3 (veen op NAP-6m). Het is aannemelijk dat langer doorzetten van de vacuümconsolidatieperiode en het gebruik van een fijner stramien van verticale drains zal leiden tot meer onderdruk in het veen.

De twee boringen die het effect van vacuümconsolidatie moeten aantonen zijn genomen op 2 tot 3 dagen na het einde van de vacuümperiode. De figuren laten zien dat op dat moment slechts een beperkt deel van de aanpassing naar de stationaire eindomstandigheden is opgetreden.



Figuur 4.9 Bleskensgraaf: waterspanningen van start tot en met einde vacuüm [kPa]. In de periode van 20 juli tot 2 augustus was de vacuümpomp uitgevallen





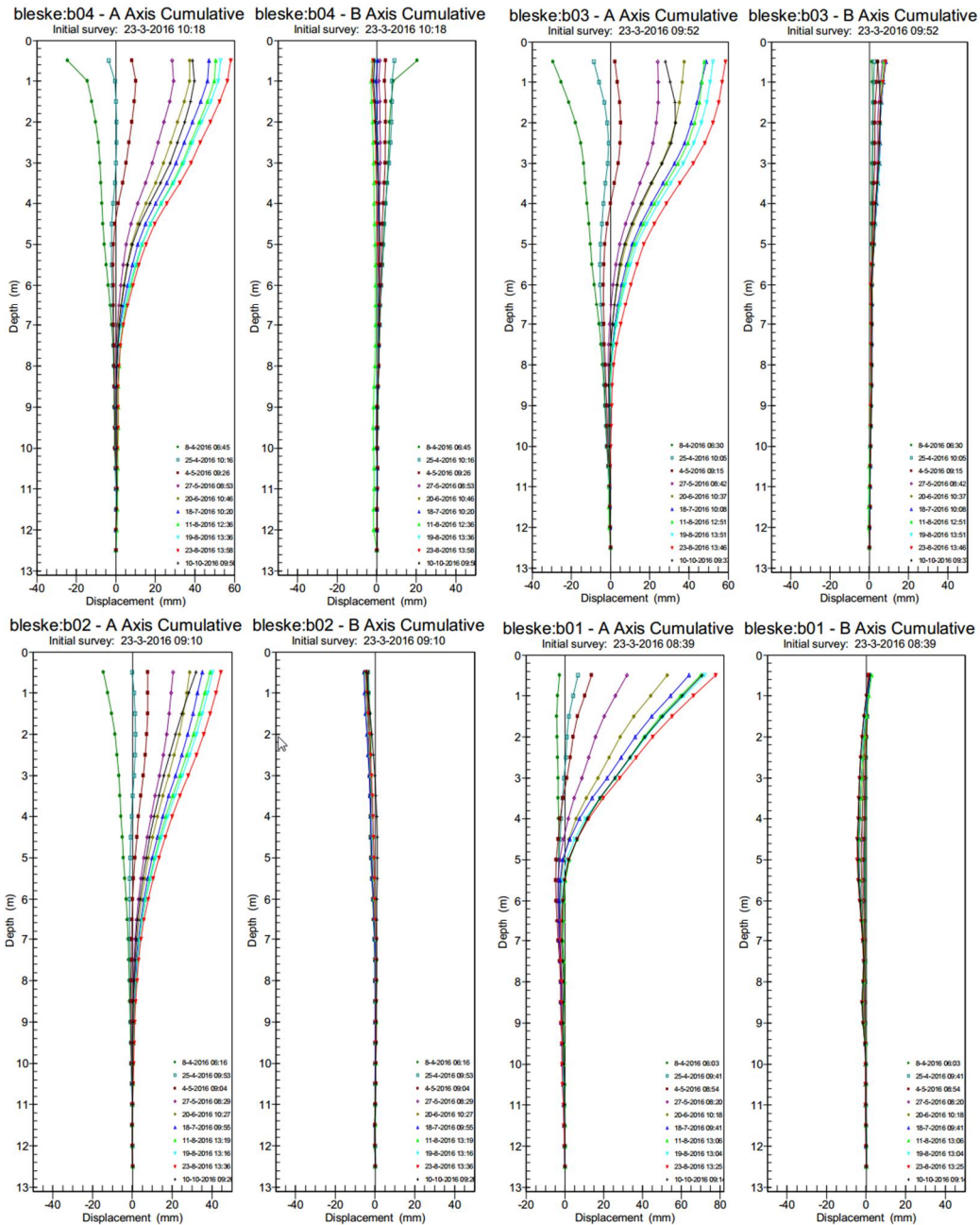
Figuur 4.10 Bleskensgraaf: stijghoogtes van start tot en met einde vacuüm [m]. In de periode van 20 juli tot 2 augustus was de vacuümpomp uitgevallen

#### 4.2.7 Hellingmetingen

Rondom het vak is in het midden van elke zijde een hellingmeetbuis geplaatst in een boorgat. Totaal zijn 4 hellingmeetbuizen geplaatst, op een afstand van circa 5 m uit de rand van het vak. De hellingmeetbuizen zijn vooraf, tijdens en na de proef diverse malen doorgemeten. De locaties van de hellingmeetbuizen aan de vier zijden van het proefveld zijn in Figuur 4.3 weergegeven. Figuur 4.12 toont de gemeten horizontale vervormingen. De naar binnen gerichte vervormingen bedragen tijdens vacuüm maximaal 0.08m. De terugvering na afloop van het vacuüm varieert van 0.01m tot 0.03m.



Figuur 4.11 Hellingmeetbuis en aansluitkast voor de waterspanningsmeters



Figuur 4.12 Gemeten horizontale vervormingen op verschillende tijdstippen. De hellingmeetbuizen staan ongeveer 5m uit de rand van het proefvak

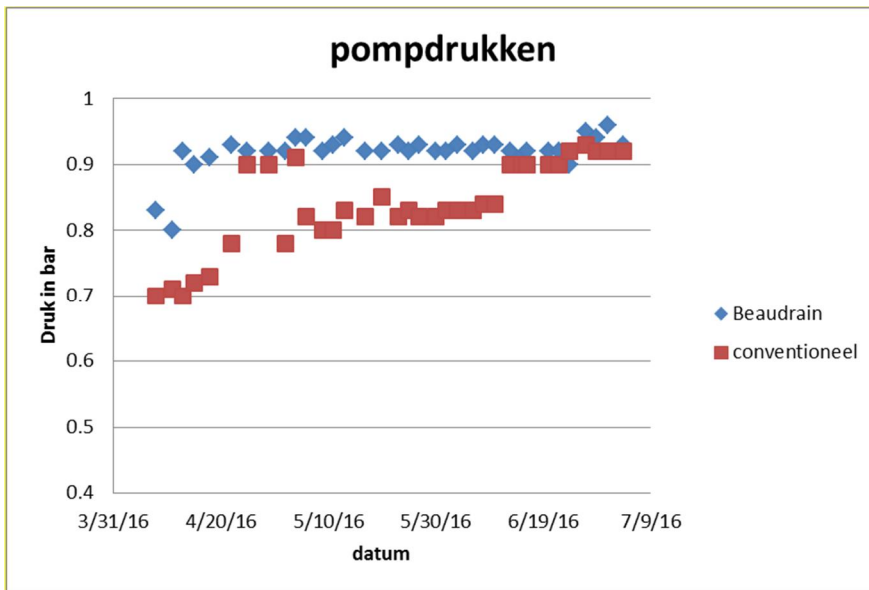
### 4.3 Schardam

#### 4.3.1 Inleiding

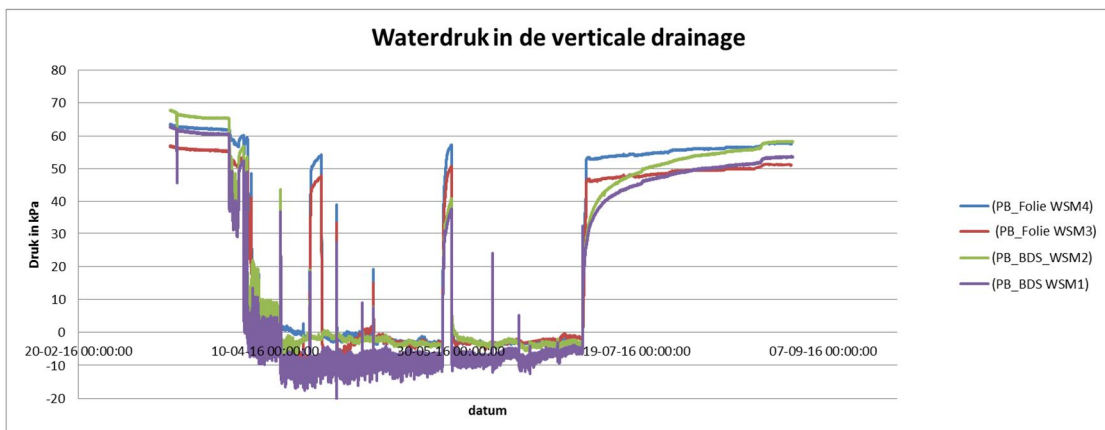
Hierna volgt een overzicht van het uitgevoerde onderzoek en de uitgevoerde monitoring, inclusief relevante resultaten. Zie Bijlage B voor een feitelijke rapportage van het grondonderzoek en de monitoring. Zie Bijlage E voor de feitelijke rapportage van het laboratoriumonderzoek.

#### 4.3.2 Fasering en pompdruk

Figuur 4.13 toont de aan de pomp afgelezen onderdruk. Er is globaal om de twee dagen afgelezen, vanaf 8 april tot 4 juli, het stilzetten van de pomp. De onderbrekingen in het vacuüm zijn niet zichtbaar, omdat de druk niet continu is geregistreerd. Wel is zichtbaar dat de vacuümdruk op de pomp in het Menard-vak minder snel opkomt dan in het Beudrain-vak. Figuur 4.14 toont de drukken in de verticale drains. De bereikte drukverlaging in de drains is tussen de 60 en 70 kPa.



Figuur 4.13 Onderdruk gemeten aan de pompen in Schardam



Figuur 4.14 Druk gemeten in de verticale drainage [kPa] "Folie"=Menard. "BDS"=Beudrain

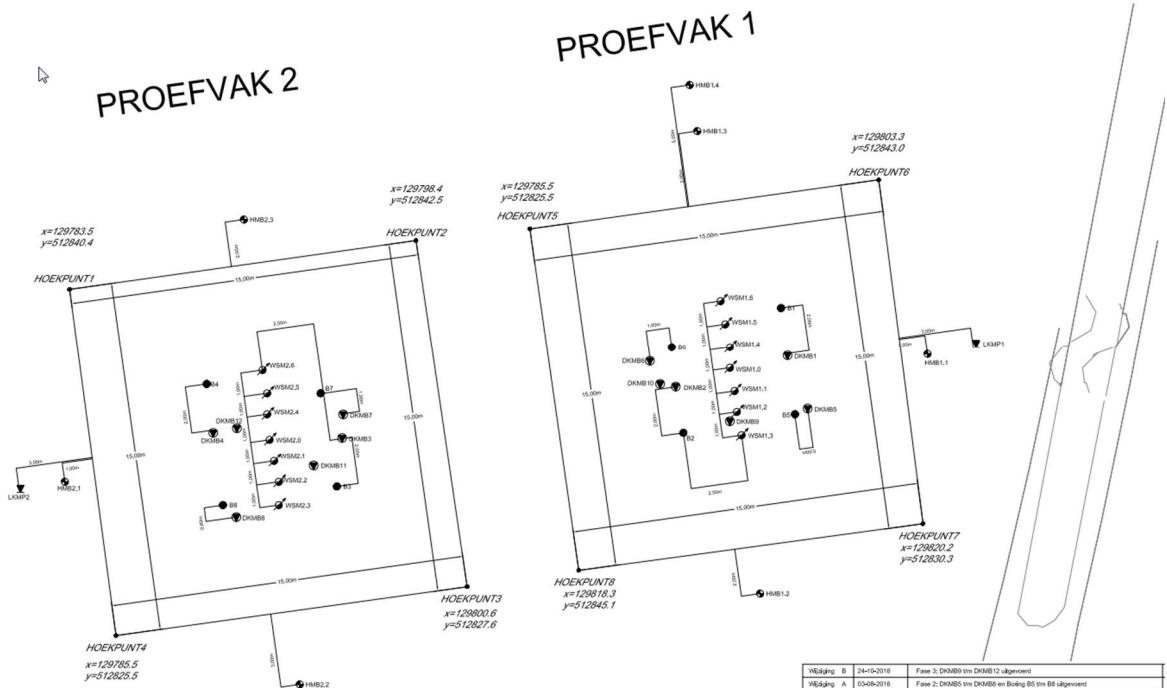
Tabel 4.4 toont het opgepompte watervolume voor beide vakken. De pompdebietmetingen zijn gestart op 11 april, terwijl de vacuümpomp al op 4 april is gestart. Op basis van het debiet bij de start van de meting wordt geschat dat in de voorgaande periode al ongeveer 70 m<sup>3</sup> water is opgepompt. Tijdens de meetperiode is in het Menard-vak bijna twee keer zo veel water onttrokken. Het meer opgepompte water in het Menard-vak is vermoedelijk afkomstig van het water dat na afpompen boven het folie retour is gebracht.

Datum	Debiet gemeten aan pomp in m <sup>3</sup>	
	Beaudrain	Menard
11-04-2016	1,1	1,4
13-04-2016	14	21
4-07-2016	116	222

Tabel 4.4 Pompedebiet gemeten in m<sup>3</sup>. De metingen zijn pas gestart na 11 april, daarvoor is al ruim 1 week gepompt. In het begin is respectievelijk 7 om 10 m<sup>3</sup> per dag onttrokken

#### 4.3.3 Grondonderzoek

Het door Fugro en Deltares uitgevoerde grondonderzoek is gerapporteerd in Bijlage B. De configuratie van het grondonderzoek is weergegeven in Figuur 4.15. Globaal zijn twee sonderingen buiten het proefveld uitgevoerd en 4 bolsonde metingen (2 per vak), alsmede 4 pistonsampler boringen binnen het proefveld.



Figuur 4.15 Overzichtstekening grondonderzoek en monitoring Schardam. Hierin is: DKM= sondering, B= piston sampler boring, HMB= hellingmeetbuis, WSM= waterspanningsmeter. Proefvak 1 is het Beaudrain-vak. Proefvak 2 is het Menard-vak. Elk van de vakken is circa 17,5x17,5 m groot

1220719-000-GEO-0010, Versie 2, 10 augustus 2017, definitief

Het perceel lag ten tijde van het grondonderzoek nauwelijks boven de grondwaterstand. Daarom moest het grondonderzoek met zeer licht materiaal worden uitgevoerd.



Figuur 4.16 Overzichtsfoto van het grondonderzoek

Er zijn zowel bolsondes als klasse 1 sonderingen uitgevoerd. Voor de bol is dezelfde sonde gebruikt als voor de Markermeerdijken (Deltares, 2014d). Deze sonde is op onderstaande foto weergegeven.



Figuur 4.17 Bolsonde, zoals gebruikt bij Schardam en bij de Markermeerdijken

De monsters zijn gestoken met een pistonsampler. De grote-diameterboring (diameter ongeveer 100 mm) geeft circa 0,9 m lange monsters die in het laboratorium uit de stalen steekbus zijn gedrukt. Bij dit uitdrukken is relatief veel water vrijgekomen. Dit is een indicatie voor het samendrukken van het monsters tijdens het uitdrukken en daarmee ook een indicatie voor significante monsterverstoring.

#### 4.3.4 Laboratoriumonderzoek

De per fase uitgevoerde proeven voor Schardam zijn vergelijkbaar met die voor Bleskensgraaf, zie § 4.2.4. Voor Schardam zijn nog wel 2 aanvullende DSS proeven op het veen uitgevoerd, waarbij is gereconsolideerd tot de initiële veldspanning op 100 dagen na het eind van vacuümconsolidatie (fase 2c). De feitelijke rapportage van het laboratoriumonderzoek is opgenomen in Bijlage E (Schardam). De aantallen voor de per vak uitgevoerde proeven en sonderingen zijn samengevat in Tabel 4.5.

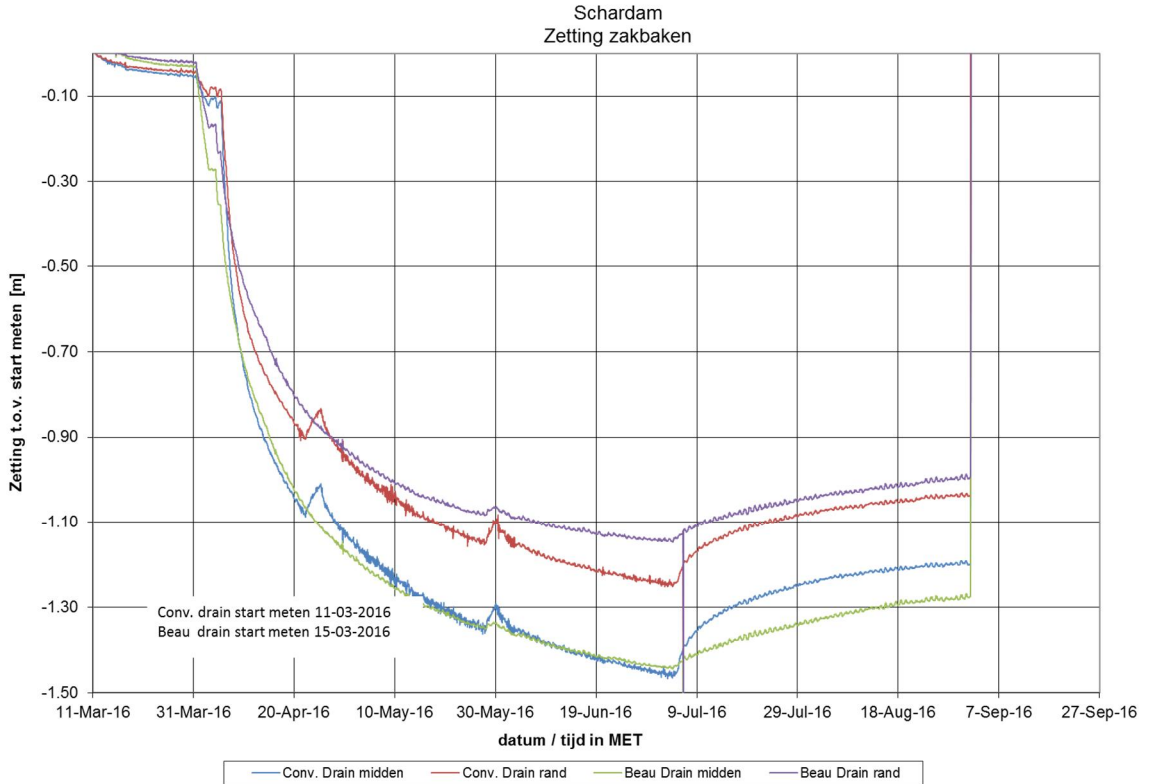
Fase	Sondering	DSS veen	Anisotroop Triax klei	Triax vacuüm klei	–	Oedometer
1	4					
1a	-	-	-			4
1b	-	6	6	-		-
1c	-	4	4	-		-
1d	-			6		-
2	4	-	-	-		
2a		-	-	-		8
2b		6	6	-		-
2c*			2			
3	4			-		-
<b>totaal</b>	<b>12</b>	<b>16</b>	<b>18</b>	<b>6</b>		<b>12</b>

\* Alleen voor Schardam zijn nog 2 aanvullende DSS proeven op het veen uitgevoerd, waarbij is gereconsolideerd tot de initiële veldspanning op 100 dagen na het eind van vacuümconsolidatie.

Tabel 4.5 Overzicht uitgevoerde sonderingen en laboratoriumproeven voor proefvelden Schardam. Zie § 4.2.4 voor de betekenis van de fase-codering

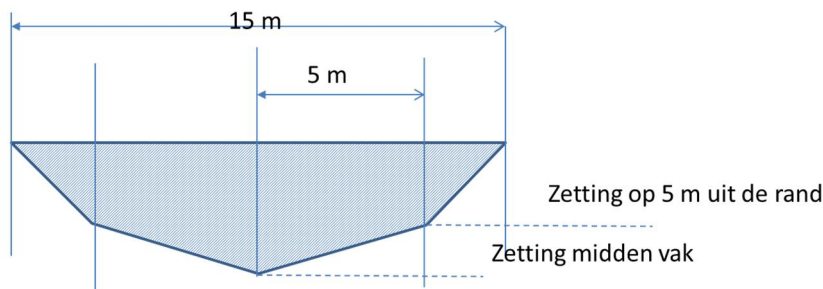
#### 4.3.5 Zettingen

In totaal zijn 4 zettingsmeetplaatjes geïnstalleerd, 2 in het conventionele vak en 2 in het Beaudrain-S vak. De meetinstrumenten liggen exact in het midden van het vak (metingen met extensie “midden”) en 5 m uit het midden (extensie “rand”). Figuur 4.18 toont de gemeten zettingen als functie van tijd. De zettingen in het midden tijdens vacuüm zijn maximaal 1,47 m. In de 100 dagen na afloop van de vacuümperiode treedt een opvering op van ongeveer 0,2 m.



Figuur 4.18 Schardam: zettingen aan maaiveld [kPa]. Conv=Menard vak

Op basis van de gemeten zettingen kan de volumeverandering door samendrukking van de grond in het proefveld ruwweg worden geschat, zie Figuur 4.19.



Figuur 4.19 Volumeverandering in proefvelden als gevolg van samendrukking

De ruwweg geschatte totale volumeverandering is  $210 \text{ m}^3$  in het Beaudrain-vak en ruim  $200 \text{ m}^3$  in het Menard-vak. De volumeverandering in de grond definieert het daarvoor minimaal op te pompen watervolume. In § 4.3.2 is al gerapporteerd dat het vanaf 11 april opgepompte watervolume in het Beaudrain vak  $116 \text{ m}^3$  is en in het Menard-vak  $222 \text{ m}^3$ . De vacuümpomp is gestart op 4 april, dus het in totaal opgepompte watervolume is groter. Daarom is het mogelijk dat het totale volume opgepompt water in het Beaudrain vak toch bij benadering gelijk is aan de ruwe schatting voor de volumeverandering in de grond.

#### 4.3.6 Waterspanningen

Tabel 4.6 geeft een overzicht van de dieptes van de geïnstalleerde waterspanningsmeters. In totaal zijn in elk vak 6 waterspanningsmeters geplaatst. Vak 1 is het Beaudrain-vak en vak 2 het Menard-vak.

<b>Waterspanningsmeter</b>	<b>Filterdiepte</b>	<b>Waterspanningsmeter</b>	<b>Filterdiepte</b>
<b>Vak 2 (Menard)</b>	<b>[m—NAP]</b>	<b>Vak 1 (Beaudrain S)</b>	<b>[m—NAP]</b>
Wsm 2.1	-9,02	Wsm 1.1	-9.44
Wsm 2.2	-6.72	Wsm 1.2	-6,8
Wsm 2,3	-3.42	Wsm 1.3	-3.37
Wsm 2,4	-7.97	Wsm 1.4	-8.36
Wsm 2,5	-4.89	Wsm 1.5	-5.26
Wsm 2,6	-2,83	Wsm 1.6	-2,80
Wsm 2,0	-11,01	Wsm 1,0	-10.85
Wsm 3,0 (in drain)	-6,40	Wsm BDS 1,0 (in drain)	-5.90
Wsm 4,0 (in drain)	-6,90	Wsm BDS 2,0 (in drain)	-6,70

Tabel 4.6 Overzicht van de waterspanningsmeters in Schardam. De meters 1.0 en 2.0 staan in het diepe zand

Het eerdere voortgangsverslag is opgenomen in Bijlage B.3. De daarin gerapporteerde waterspanningsverlopen worden ook getoond in Figuur 4.20 (waterspanning Menard-vak), Figuur 4.21 (stijghoogte Menard-vak), Figuur 4.22 (waterspanning Beaudrain-vak) en Figuur 4.23 (stijghoogte Beaudrain-vak).

Uit de getoonde figuren blijkt dat de pompdruk in het Menard-vak tijdens de vacuümperiode twee keer is weggevallen en in het Beaudrain-vak één keer. Verder blijkt dat drie waterspanningsmeters in het Menard-vak (WSM2,4, WSM2.3 en WSM2.2) na verloop van tijd niet meer correct registreren en dat de registratie van één waterspanningsmeter in het Menard-vak (WS2.5) vanaf het begin onbetrouwbaar lijkt omdat deze nauwelijks invloed laat zien van het vacuüm.

De initiële stijghoogte in het pleistocene zand (dat begint op NAP-10.35 m) is NAP-2,35 m, en de initiële freatische lijn ligt op circa NAP-0,9 m. De teen van de verticale drains ligt op een diepte van NAP-8.75m, in de relatief goed doorlatende klei van Calais. Figuur 4.21 en Figuur 4.23 laten zien dat de uiteindelijke stijghoogte in de cohesieve lagen door de installatie van de verticale drains blijvend lijkt te worden verlaagd tot een waarde die iets boven de waarde in het pleistocene zand ligt.

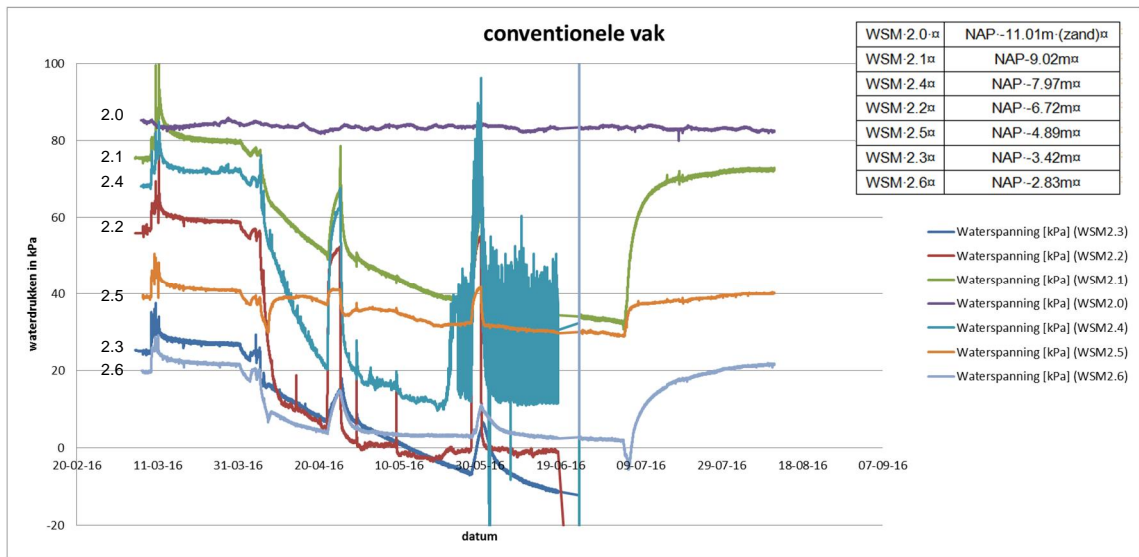
Uit het voldoende betrouwbare deel van de meetresultaten blijkt verder dat in de zwak siltige klei van het Menard-vak ongeveer 60 kPa effectieve drukverlaging wordt opgebouwd (WSM2.4, WSM2.2) en in het daarboven liggende veen een drukverlaging van ongeveer 20 kPa (WSM2.3, WS2.6). In de zwak siltige klei van het Beaudrain-vak wordt tussen de 60 en 70 kPa drukverlaging opgebouwd (WSM1.4, WSM1.5) en in het daarboven liggende veen een drukverlaging van ongeveer 35 kPa (WSM1.6, WSM1.3). In de klei wordt dus in beide vakken dus significant meer waterdrukverlaging bereikt dan in het veen. De bereikte waterdrukverlaging is in het Beaudrain-vak wat groter dan in het Menard-vak. Dat komt wellicht door het feit dat de onderdruk bij de pomp in het Menard-vak langzamer opbouwt (§ 4.3.2) en omdat in het Menard-vak twee keer een pompuitval heeft plaatsgevonden.



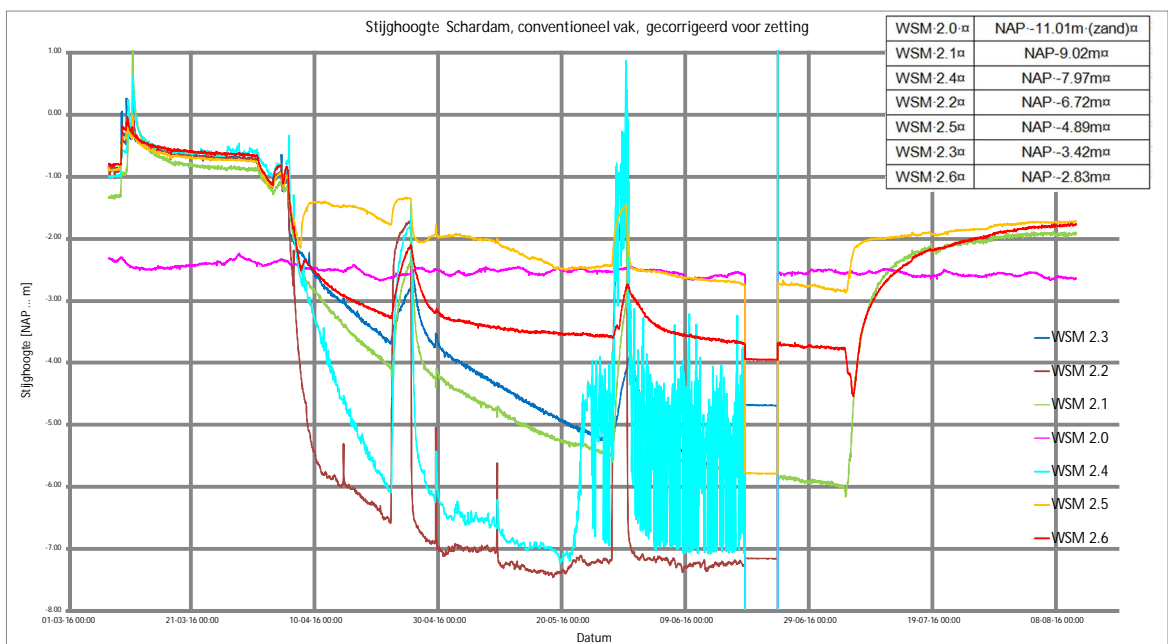
Waterspanningsmeters	Filterdiepte [m tov NAP]		Zetting [m]	Verhouding zetting tov maaiveld*
	bij plaatsing	bij verwijderen		
<b>Menard vacuümvak</b>				
WSM 2.1	-9.02	-9.33	0.31	0.25
WSM 2.2	-6.72	-7.19	0.47	0.39
WSM 2.3	-3.42	-4.74	1.32	1.08
WSM 2.4	-7.97	-8.28	0.31	0.25
WSM 2.5	-4.89	-5.83	0.94	0.77
WSM 2.6	-2.83	-4.00	1.17	0.96
WSM 2.0 (pleistoceen)	-11.01	-11.07	0.06	0.05
<b>Beaudrain vacuümvak</b>				
WSM 1.1	-9.44	-9.76	0.32	0.25
WSM 1.2	-6.80	-7.24	0.44	0.35
WSM 1.3	-3.37	-4.89	1.52 *	1.2
WSM 1.4	-8.36	-8.70	0.34	0.27
WSM 1.5	-5.26	-6.16	0.90	0.71
WSM 1.6	-2.80	-4.12	1.32	1.04
WSM 1.0 (pleistoceen)	-10.85	-10.95	0.10	0.08
*De zetting aan maaiveld, 100 dagen na het eind van de vacuümperiode, is 1.27m in het midden van het beaudrain vak en 1.22 in het midden van het Menard vak.				

Tabel 4.7 Schardam: plaatsingsdieptes en dieptes bij verwijderen waterspanningsmeters

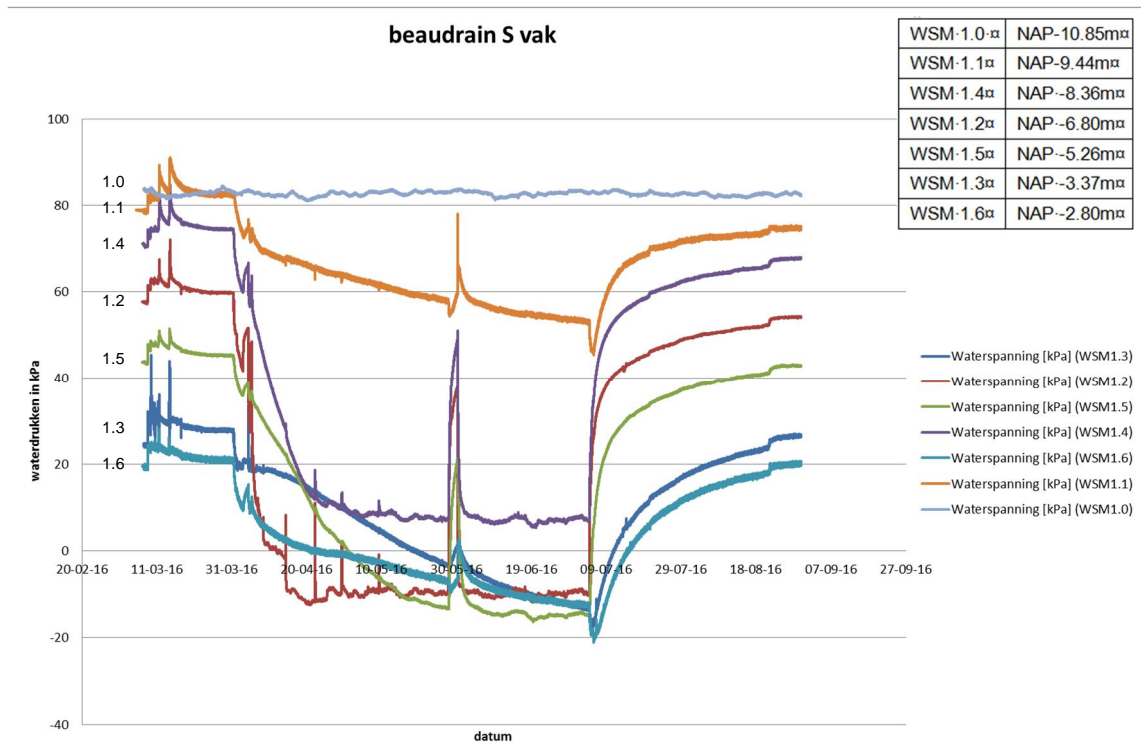
1220719-000-GEO-0010, Versie 2, 10 augustus 2017, definitief



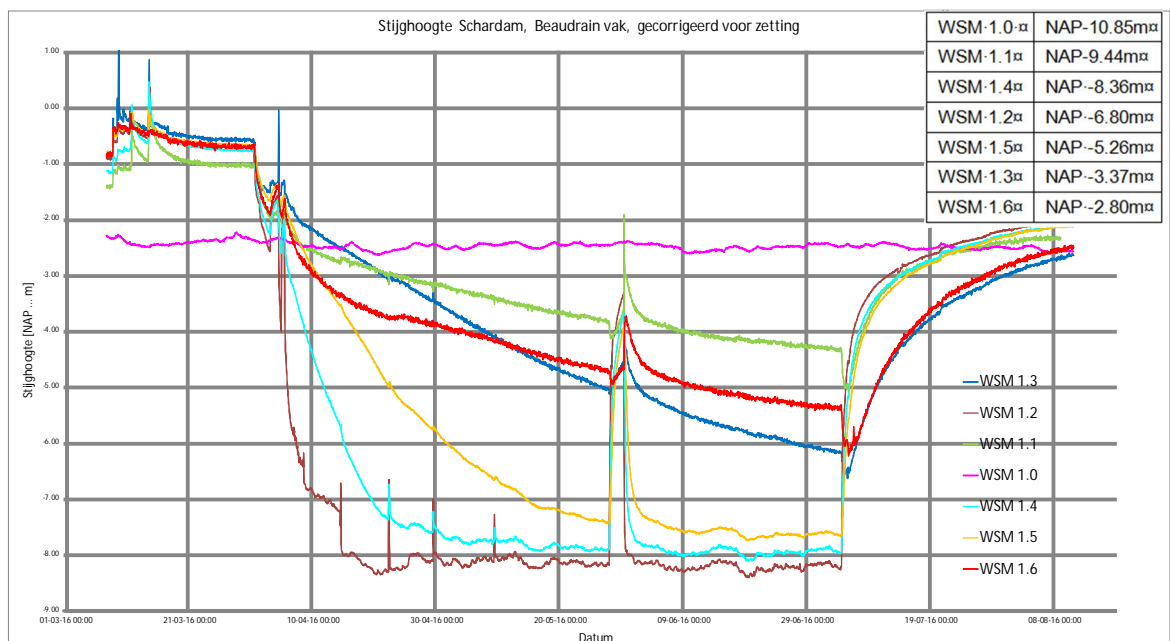
Figuur 4.20 Schardam-Menard: waterspanningen [kPa]



Figuur 4.21 Schardam-Menard: stijghoogtes [m]



Figuur 4.22 Schardam-Beaudrain: waterspanningen [kPa]



Figuur 4.23 Schardam-Beaudrain: stijghoogtes [kPa]

#### 4.3.7 Hellingmetingen

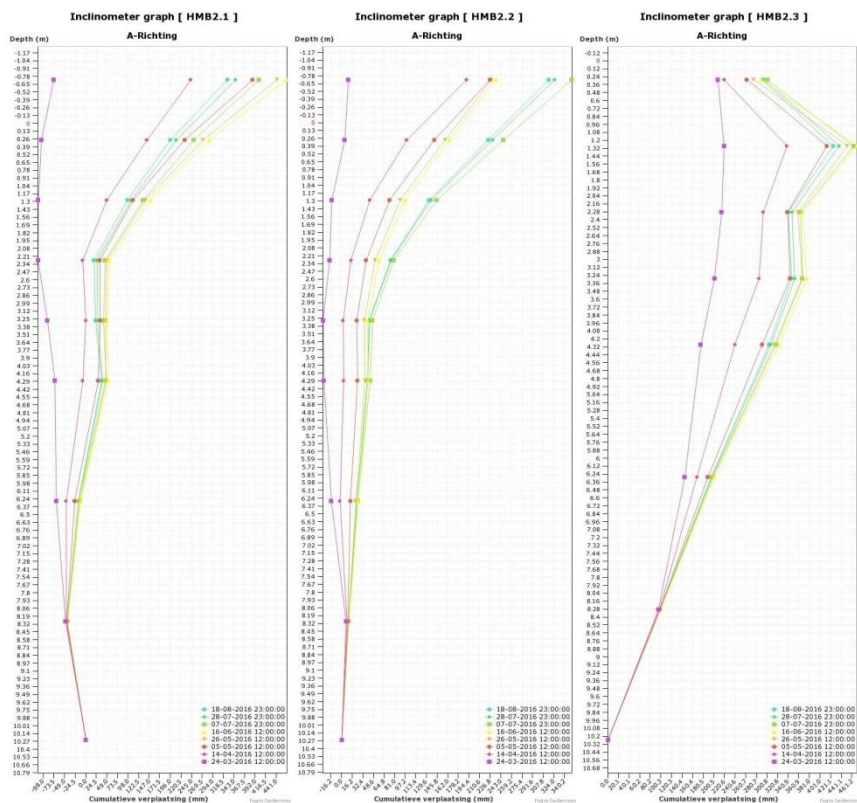
Bij het proefveld Schardam zijn in totaal 7 hellingmeetbuizen geplaatst. In Tabel 4.8 is voor elke van de hellingmeetbuizen de afstand aangegeven tot de rand van het proefveld. Figuur 4.24 en Figuur 4.25 tonen de gemeten horizontale vervormingen voor respectievelijk het

1220719-000-GEO-0010, Versie 2, 10 augustus 2017, definitief

Menard veld en het Beaudrain veld. Voor meetlocaties dicht bij de rand van het veld kan de horizontale vervorming aan maaiveld oplopen tot ongeveer 0,6 m.

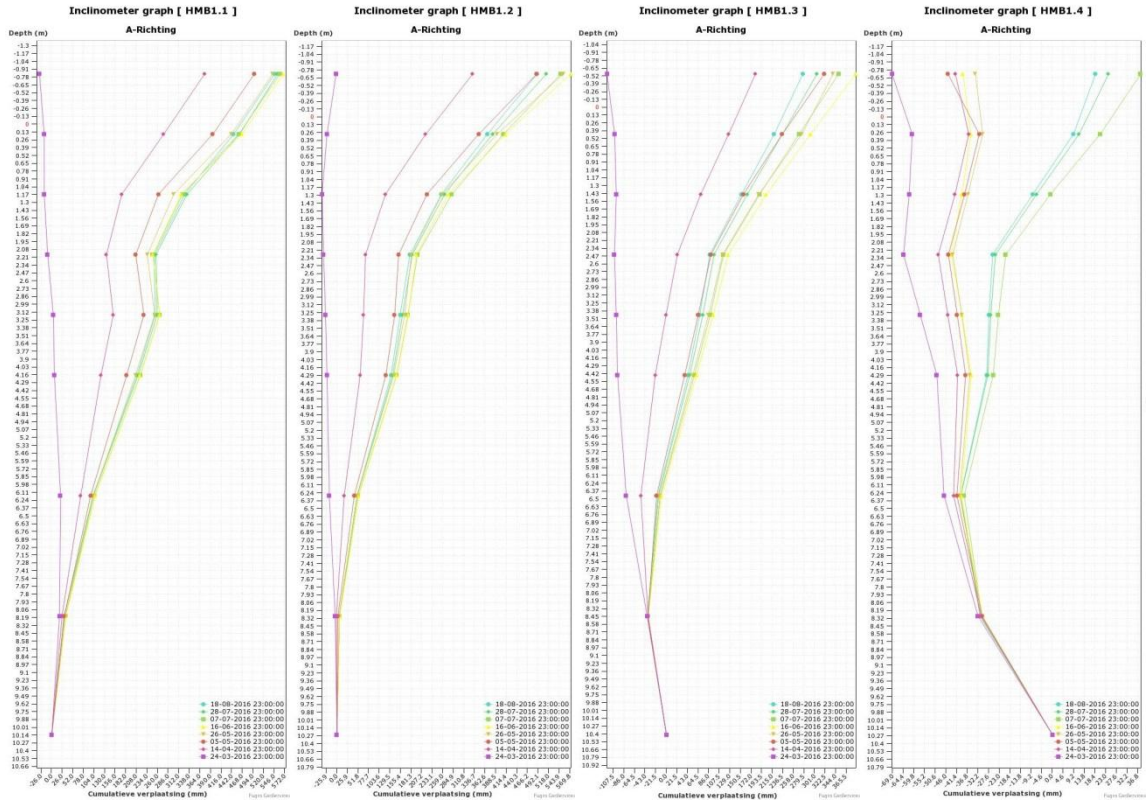
Hellingmeetbuis	Afstand tot rand	Hellingmeetbuis	Afstand tot rand
<b>Vak 2 (Menard)</b>	<b>[m]</b>	<b>Vak 1 (Beaudrain S)</b>	<b>[m]</b>
<b>2.1</b>	<b>1.0</b>	<b>1.1</b>	<b>1.0</b>
<b>2.2</b>	<b>3.0</b>	<b>1.2</b>	<b>2.0</b>
<b>2.3</b>	<b>2.0</b>	<b>1.3</b>	<b>3.0</b>
		<b>1.4</b>	<b>8.0</b>

Tabel 4.8 Hellingmeetbuizen Schardam en afstand tot de rand



Figuur 4.24 Schardam – Menard: horizontale vervormingen op verschillende tijdstippen

1220719-000-GEO-0010, Versie 2, 10 augustus 2017, definitief



Figuur 4.25 Schardam – Beaudrain: horizontale vervormingen op verschillende tijdstippen

## 5 Grensspanning en ongedraineerde sterkte

### 5.1 SHANSEP parameters

Tabel 5.1 toont de dimensieloze SHANSEP parameters, zoals statistisch bepaald uit de resultaten van het laboratoriumonderzoek. De initieel als humeuze klei beoordeelde laag bij Bleskensgraaf (§ 3.2.2) is uiteindelijk ook geclassificeerd als veen, op grond van het lage soortelijk gewicht. Zie Bijlage F.4 en Bijlage F.5 voor details. De  $S$  waarde voor het veen bij Schardam is significant hoger dan de waarde die doorgaans wordt gevonden uit DSS proeven op veen. De voor Schardam gevonden  $S$  waarde is bepaald uit proeven op 4 monsters, die zijn gehaald uit 0,5m lengte van boring B3, in het Menard-vak. Daarin bevond zich sterk vezelrijk veen, met een hoog watergehalte. De aldus lokaal bepaalde  $S$  waarde is atypisch hoog voor een DSS proef. De atypische waarde is daarom mogelijk niet representatief voor het verdere veen ter plaatse van Schardam.

Locatie	Grondsoort	Test	verwachtingswaarde	standaardafwijking
Bleskensgraaf	veen	DSS	0.44	0.016
Bleskensgraaf	veen	CAU	0.44	0.032
Schardam	veen	DSS	0.6	0.05
Schardam	klei	CAU	0.31	0.035

Tabel 5.1 SHANSEP parameter  $S$ . DSS=Direct Simple Shear. CAU=Triaxiaal, Anisotroop geconsolideerd, ongedraineerd

Grondsoort	verwachtingswaarde	standaardafwijking
veen	0.887	0.031
klei	0.909	0.036

Tabel 5.2 SHANSEP parameter  $m$ , zoals bepaald uit samendrukkingsproeven

### 5.2 Grensspanning

#### 5.2.1 Algemeen

De grensspanning van grondmonsters is direct gemeten met hulp van samendrukkingsproeven (deels K0CRS, deels oedometerproeven). Daarnaast is de grensspanning ook indirect bepaald met hulp van de sondeerweerstand. Bij de indirecte bepaling is gebruik gemaakt van de correlatie tussen de ongedraineerde sterkte  $s_u$  en de sondeerweerstand (zie § 2.3.2) en van vergelijking (5.1). De laatste vergelijking volgt uit de eerder al gegeven SHANSEP vergelijkingen (2.2) en (2.3). Bij de correlatie wordt dus ook gebruik gemaakt van de SHANSEP parameters.

$$\sigma'_{v,y} = \left( \frac{s_u \cdot \sigma_v'^m}{\sigma_v' \cdot S} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (5.1)$$

Als correlatieconstante voor de bolsonde is gebruik gemaakt van  $N_{b,DSS} = 19.5$  voor veen en  $N_{b,CAU} = 15.2$  voor klei. Als correlatieconstante voor de conussonde is gebruik gemaakt van  $N_{k,DSS} = 20,7$  voor veen en  $N_{b,CAU} = 16.5$  voor klei (Fugro, 2015). Zie verder Bijlage G.

De effectieve verticale spanning  $\sigma'_v$  is bij de indirecte bepaling geschat met hulp van de gemeten waterspanningen, zoals nader wordt uitgewerkt in § 5.2.2 (Bleskensgraaf) en § 5.2.3 (Schardam).

De direct en indirect bepaalde toename van de grensspanning wordt in § 5.2.2 en § 5.2.3 vergeleken met de toename door een tijdelijke drukverlaging in een (meebewegend) materieel punt. Door deze tijdelijke drukverlaging neemt de grensspanning in het materiële punt toe van  $\sigma_{vy,0}$  naar  $\sigma_{vy,1}$ .

De  $\sigma_{vy,0}$  waarde wordt bepaald door de initiële waarde van de *Pre Overburden Pressure*  $POP_0$ .

$$\sigma_{vy,0} = \sigma'_{v,0} + POP_0 \quad (5.2)$$

$$\sigma_{vy,1} = \max(\sigma'_{vy,0}, \sigma'_{v,max}) \quad (5.3)$$

De maximale effectieve spanning  $\sigma'_{v,max}$  van het meebewegende punt tijdens de vacuümperiode is gelijk aan de som van:

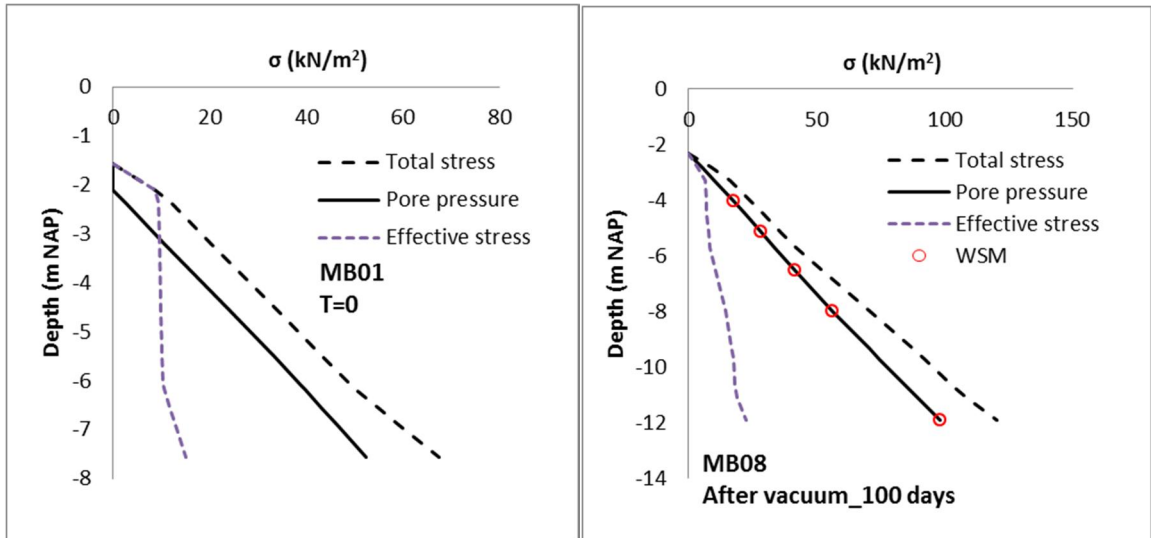
- de initiële effectieve spanning  $\sigma'_{v,0}$ ;
- het gewicht van het tijdens de vacuümconsolidatie ondergedompelde ophoogzand ( $\Delta\sigma'_{v,ophoogzand}$ , ongeveer 4 kPa bij een laagdikte van 0,5m);
- Het verschil tussen de initiële waterdruk  $p_0$  en de minimale waterdruk gedurende de vacuüm periode  $p_{min}$ .

$$\sigma'_{v,max} = \sigma'_{v,0} + \Delta\sigma'_{v,ophoogzand} + p_0 - p_{min} \quad (5.4)$$

Zoals al opgemerkt in § 4.1.1 verschillen de coördinaten van de verschillende waterspanningsmeters, sonderingen en boringen. Zoals daar eveneens opgemerkt liggen de boringen en sonderingen na afloop van de vacuümperiode op diepte bovendien niet precies in het midden van de driehoek van (horizontaal vervormde) verticale drains. Tussen de op verschillende posities bepaalde waarden van grensspanning zijn dus significante verschillen mogelijk, zeker wanneer tijdens het vacuüm tussen de drains een gradiënt in de waterdrukken optrad. Dat laatste was vooral het geval in het veen. Verschillen in grensspanning leiden weer tot verschillen in ongedraineerde sterkte.

### 5.2.2 Bleskensgraaf

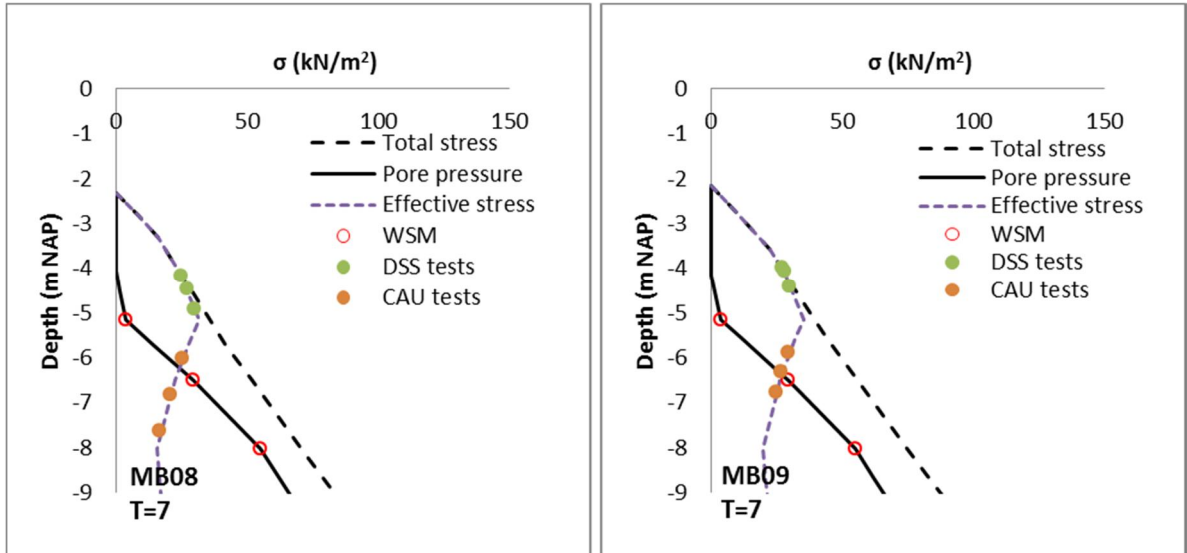
Figuur 5.1 illustreert het verloop van de totale spanning en effectieve spanning voorafgaand aan de vacuümconsolidatie en op 100 dagen na de vacuümperiode. De effectieve spanning op een vaste hoogte is in het bovenste deel afgenomen. Dat komt door vacuümconsolidatie geforceerde zetting. Deze zetting bedraagt aan maaiveld ongeveer een meter.



Figuur 5.1: Bleskensgraaf: typisch verloop van waterspanningen en effectieve spanningen voorafgaand aan de start van het vacuüm (T=0) en 100 dagen na het eind van de vacuümperiode (T=100). De invloed van de op T=100 opgetreden zetting is duidelijk zichtbaar

Om het effect van de voorbelasting op grensspanning en ongedraineerde sterkte te controleren zijn de boringen MB08 en MB09 uitgevoerd, op 2 en 3 dagen na het einde van de vacuümperiode (hierna aangeduid met T=7). Figuur 5.2 toont het aangenomen verloop van de effectieve spanningen tijdens het uitvoeren van deze boringen. Dit verloop is bepaald op basis van interpolatie van de op hetzelfde moment (maar op een andere horizontale locatie) gemeten waterspanningen. De zetting van de waterspanningsmeters is op benaderende wijze meegenomen in de aangenomen verticale ligging op T=7 en T=100.

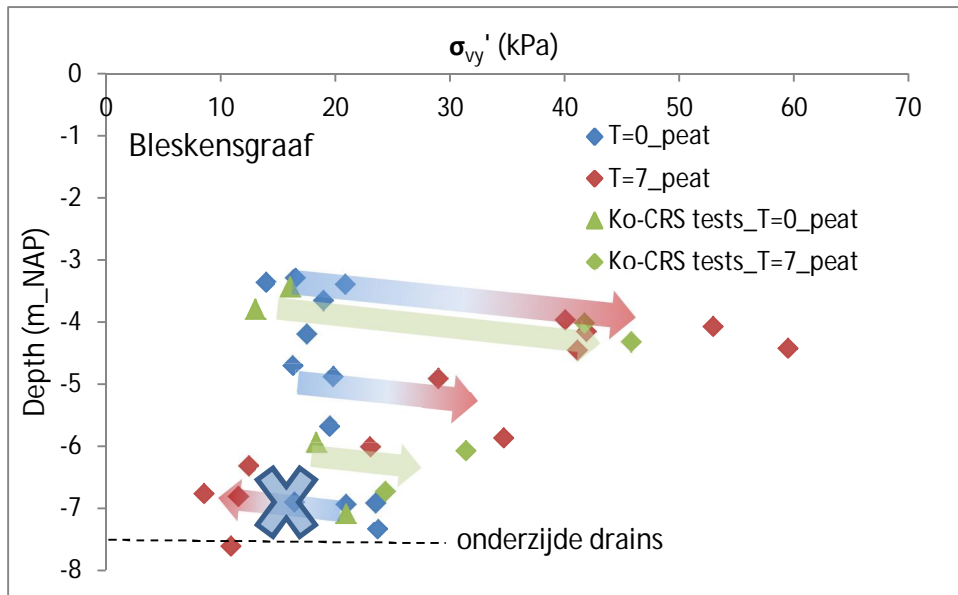




Figuur 5.2: Bleskensgraaf: met hulp van waterspanningsmetingen geïnterpoleerd verloop van waterspanningen en effectieve spanningen op het moment dat de boring is gestoken, kort na het eind van vacuüm. In de figuur zijn ook de posities aangegeven van de monsters waarop DSS of CAU proeven zijn uitgevoerd. Tevens zijn de posities aangegeven van de waterspanningsmeters die zijn gebruikt om de effectieve spanning op het moment van steken te schatten

Beschouwing van Figuur 4.10 in § 4.2.6 leert dat de tijdens de vacuümperiode maximaal bereikte drukverlaging tussen de drains varieert van ongeveer 40 kPa in WSM2 (veen, initieel op NAP-4,5 m) tot ongeveer 15 kPa in WSM3 (veen, initieel op NAP-6 m). Voor de maximaal bereikte effectieve spanning komt daar dan nog het ondergedompeld gewicht van het opgebrachte zand bovenop (ongeveer 4 kPa).

Combineren van informatie uit Figuur 5.1 (initiële effectieve spanning op T=0) en Figuur 5.3 (grensspanningen op T=0) levert voor het veen een geschatte  $POP_0$  waarde op van tussen de 5 kPa (bovenzijde) en 10 kPa (onderzijde). De effectieve voorbelasting  $\Delta\sigma'_{v,ophoogzand} + p_0 - p_{min}$  varieert tussen 44 kPa aan bovenzijde en 19 kPa aan onderzijde. Door combinatie van deze gegevens volgt dat de grensspanning door de vacuümdruk toeneemt met een waarde van ongeveer 40 kPa aan bovenzijde en met een waarde van ongeveer 10 kPa aan de onderzijde.



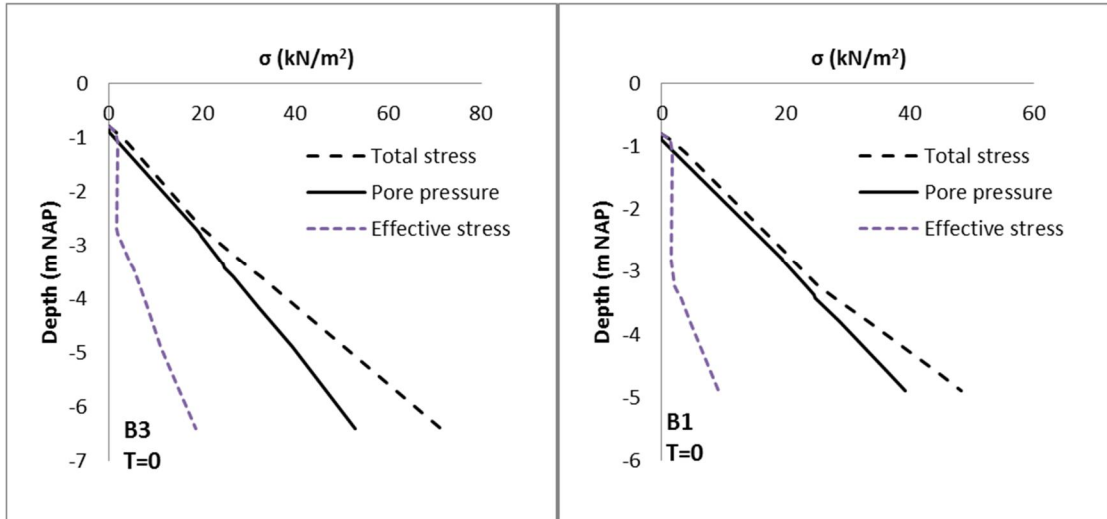
Figuur 5.3: Bleskensgraaf: Via directe en indirecte methode bepaalde grensspanning voor  $T=0$  (voor de start van vacuüm) en  $T=7$  (binnen 7 na het eind van vacuüm). De groene pijlen hebben betrekking op toename die volgt uit samendrukkingsproeven. De blauw/rode pijlen hebben betrekking op de toename die volgt uit correlaties met de sondeerweerstand. De effectiviteit van het vacuüm neemt af over de hoogte. Nabij de onderzijde van de drains wordt via de correlatiemethode een (fysisch onmogelijke) afname van de grensspanning gevonden

Figuur 5.3 laat met pijlen globaal de in het laboratorium gevonden toename van de grensspanning zien. De groene pijlen tonen de toename volgens de directe bepaling met samendrukkingsproeven. De blauw/rode pijlen tonen de indirect bepaalde toename volgens de correlaties met sondeerweerstand. De omvang van de uit de voorbelasting bepaalde grensspanningstoename correspondeert redelijk goed met de direct en indirect bepaalde toename.

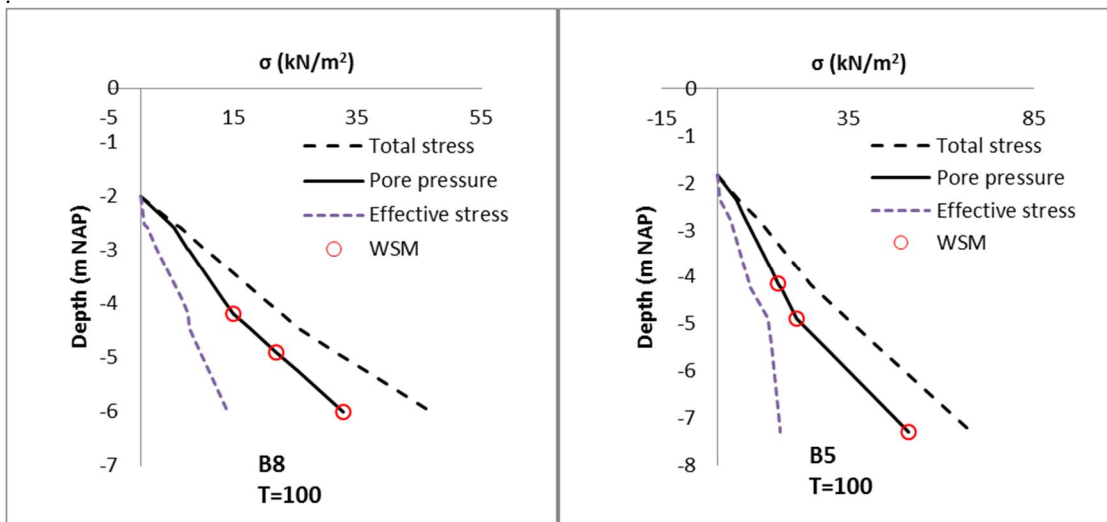
Via de correlatie met sondeerweerstand wordt aan onderzijde van de drains een afname van de grensspanning gevonden. Dat is fysisch onmogelijk. Een mogelijke verklaring voor deze fout is enerzijds de te grove verticale interpolatie van de effectieve spanning op  $T=7$ , op basis van het eveneens grove grid van waterspanningsmeters. Anderzijds ligt een mogelijke verklaring in het feit dat de coördinaten van de boringen, sonderingen en waterspanningsmeters verschillen. Het verloop van de stijghoogte in horizontale richting wordt dus verwaarloosd. In werkelijkheid is in horizontale richting zeker een significant verloop te verwachten tijdens de periode van vacuüm en de daarop volgende periode van aanpassing.

### 5.2.3 Schardam

Figuur 5.4 en Figuur 5.5 illustreren het verloop van de totale spanning en effectieve spanning voorafgaand aan de vacuümconsolidatie ( $T=0$ ) en op 100 dagen na de vacuümperiode ( $T=100$ ). De effectieve spanning op 100 dagen is, ondanks de door vacuümconsolidatie geforceerde zetting, nog hoger dan de initiële waarden. Dat komt vooral omdat ook de stationaire stijghoogte blijvend is verlaagd onder invloed van de verticale drains, zie § 4.3.6.

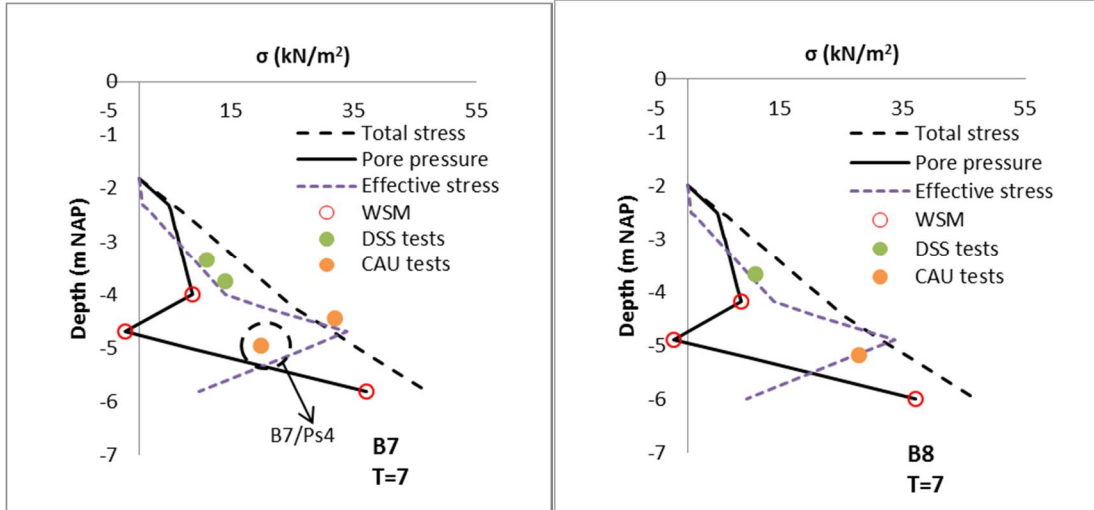


Figuur 5.4 Schardam: verloop van waterspanningen en effectieve spanningen voorafgaand aan de start van het vacuüm ( $T=0$ ), Boring B3 (links) ligt in het Menard vak. Boring B1 (rechts) ligt in het Beaudrain vak

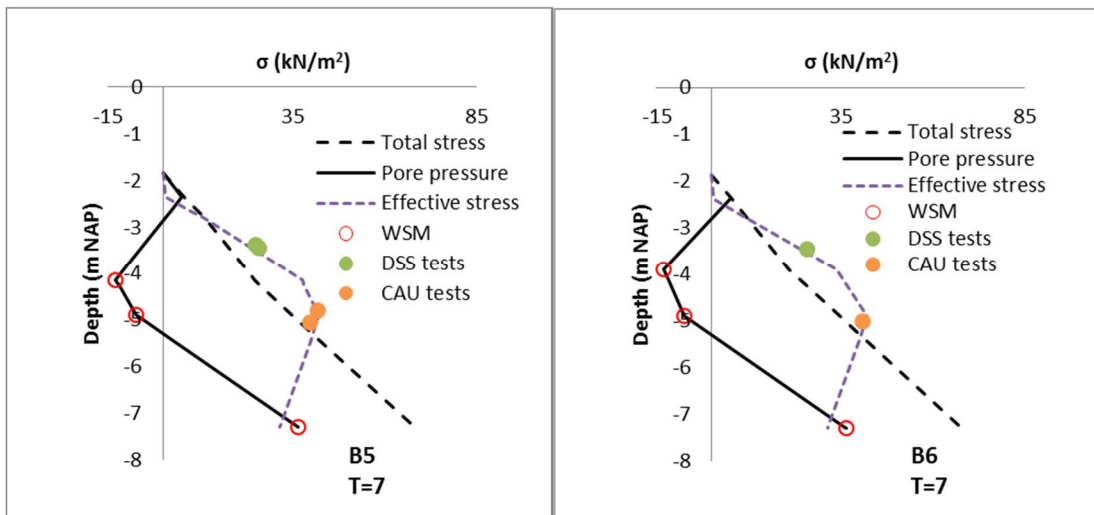


Figuur 5.5: Schardam: verloop van waterspanningen en effectieve spanningen 100 dagen na het eind van vacuüm ( $T=100$ ), Boring B8 (links) ligt in het Menard vak. Boring B5 (rechts) ligt in het Beaudrain vak

Om het effect van de voorbelasting op grensspanning en ongedraineerde sterkte te controleren zijn de boringen B5 en B6 (Beaudrain) en de boringen B7 en B8 (Menard vak) uitgevoerd binnen 7 dagen na het einde van de vacuümperiode (hierna aangeduid met  $T=7$ ). Figuur 5.6 en Figuur 5.7 tonen het aangenomen verloop van de effectieve spanningen in deze boringen op het moment van uitvoering. Dit verloop is bepaald op basis van interpolatie van de gemeten waterspanningen op hetzelfde moment. De zetting van de waterspanningsmeters is meegenomen in de aangenomen verticale ligging op  $T=7$  en  $T=100$ .



Figuur 5.6: Schardam Menard: met hulp van waterspanningsmetingen ruw geïnterpoleerd verloop van waterspanningen en effectieve spanningen op het moment dat de boring is uitgevoerd, kort na het eind van vacuüm (T=7). In de figuur zijn ook de posities aangegeven van de monsters waarop DSS of CAU proeven zijn uitgevoerd. Tevens zijn de posities aangegeven van de waterspanningsmeters die zijn gebruikt om de effectieve spanning op het moment van steken te schatten



Figuur 5.7: Schardam Beaudrain: met hulp van waterspanningsmetingen ruw geïnterpoleerd verloop van waterspanningen en effectieve spanningen op het moment dat de boring is uitgevoerd, kort na het eind van vacuüm (T=7). In de figuur zijn ook de posities aangegeven van de monsters waarop DSS of CAU proeven zijn uitgevoerd. Tevens zijn de posities aangegeven van de waterspanningsmeters die zijn gebruikt om de effectieve spanning op het moment van steken te schatten

Beschouwing van Figuur 4.22 in § 4.3.6 leert dat tijdens de vacuümperiode in het Beaudrain vak tussen de 60 en 70 kPa drukverlaging wordt opgebouwd in de zwak siltige klei en in het daarboven liggende veen een drukverlaging van ongeveer 35 kPa.

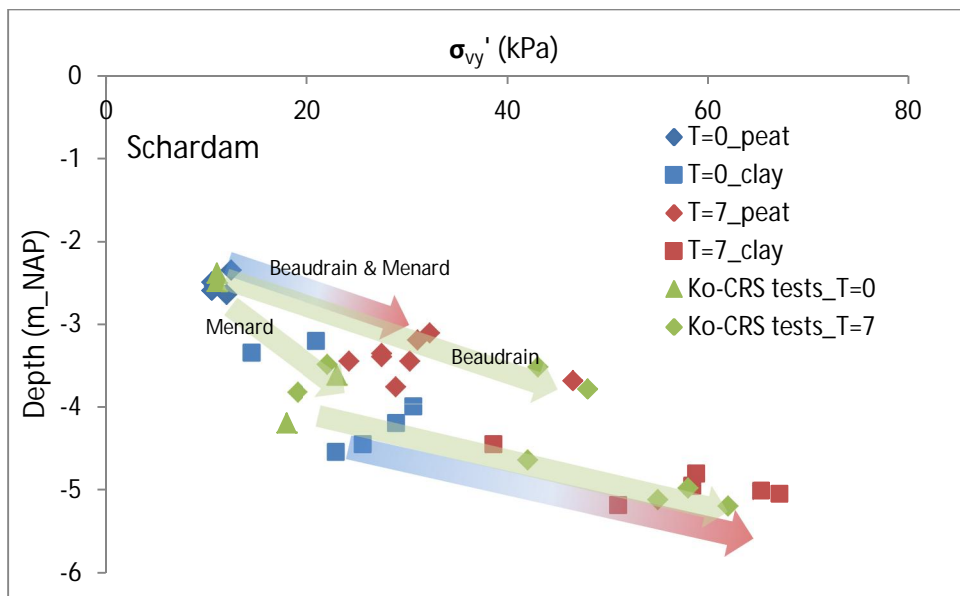
Volgens Figuur 4.20 wordt in het Menard-vak in de zwak siltige klei ongeveer 60 kPa effectieve drukverlaging opgebouwd en in het daarboven liggende veen een drukverlaging

van tussen de 20 en 35 kPa. Voor de maximaal bereikte effectieve spanning komt daar dan nog het ondergedompeld gewicht van het opgebrachte zand bovenop (ongeveer 4 kPa).

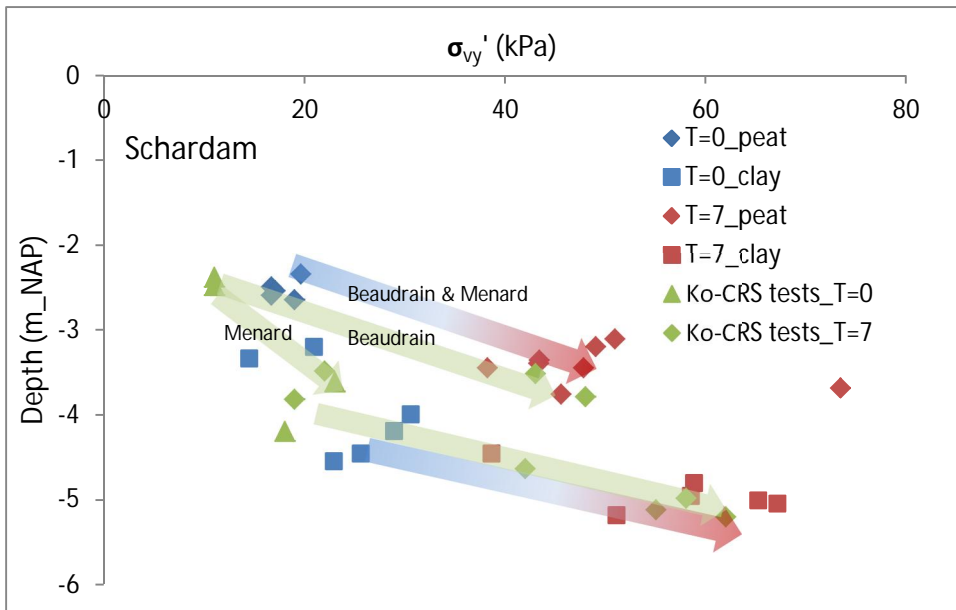
Combineren van informatie uit Figuur 5.4 (initiële effectieve spanning op T=0) en Figuur 5.9 (grensspanningen op T=0) levert voor het veen een geschatte  $POP_0$  waarde op van ongeveer 10 kPa en voor de siltige klei een geschatte  $POP_0$  waarde van ongeveer 15 kPa. Dit wil zeggen dat de grensspanning van het veen door de vacuümdruk toeneemt met een waarde van ongeveer 15 kPa (Menard) en 30 kPa (Beaudrain) en dat de grensspanning in de zwak siltige klei toeneemt met een waarde van ongeveer 50 kPa.

De toename voor zowel veen als klei correspondeert redelijk goed met de in het laboratorium gevonden toename, zie Figuur 5.8. De figuur laat zien dat de toename voor klei ook redelijk goed correspondeert met de toename die wordt gevonden via de correlatie met de sondeerweerstand. Voor het veen is de overeenkomst met de correlatie niet goed. Opmerkelijk is verder dat de sondeerwaarden in het Menard-vak direct na de vacuümperiode veel hoger zijn dan wordt verwacht op basis van de gemeten waterdrukverlaging en van de in het laboratorium gemeten grensspanning. Een mogelijke verklaring vormen de verschillende coördinaten van de sonderingen, in combinatie met de onzekere afstand van de sondering tot de verticale drains op diepte, op T=7.

Figuur 5.9 toont de resultaten wanneer voor de correlatie met de sondeerweerstand gebruik zou worden gemaakt van de SHANSEP parameter  $S = 0.4$  voor het veen. In dat geval wordt voor het Beaudrain vak een betere overeenkomst gevonden.



Figuur 5.8: Schardam: Via directe (K0CRS) en indirecte bepaalde grensspanning voor T=0 (voor de start van vacuüm) en T=7 (binnen 7 dagen na het eind van vacuüm). De groene pijlen hebben betrekking op toename die volgt uit samendrukkingsproeven. De blauw/rode pijlen hebben betrekking op de toename die volgt uit correlaties met de sondeerweerstand. De effectiviteit van het vacuüm in de klei is groter dan de effectiviteit in het veen. Voor de via correlatie bepaalde waarde in het veen is de SHANSEP parameter  $S=0.6$  gebruikt



Figuur 5.9: Schardam: Via directe (K0CRS) en indirecte bepaalde grensspanning voor  $T=0$  (voor de start van vacuüm) en  $T=7$  (binnen 7 dagen na het eind van vacuüm). De effectiviteit van het vacuüm in de klei is groter dan de effectiviteit in het veen. Voor de via correlatie bepaalde waarde in het veen is de SHANSEP parameter  $S=0.4$  gebruikt (een meer gebruikelijke waarde voor veen)

### 5.3 Ongedraineerde sterkte

#### 5.3.1 Algemeen

In § 2.3 is beschreven hoe de ongedraineerde sterkte kan worden bepaald op basis van de SHANSEP parameters, of door middel van correlaties met de sondeerweerstand.

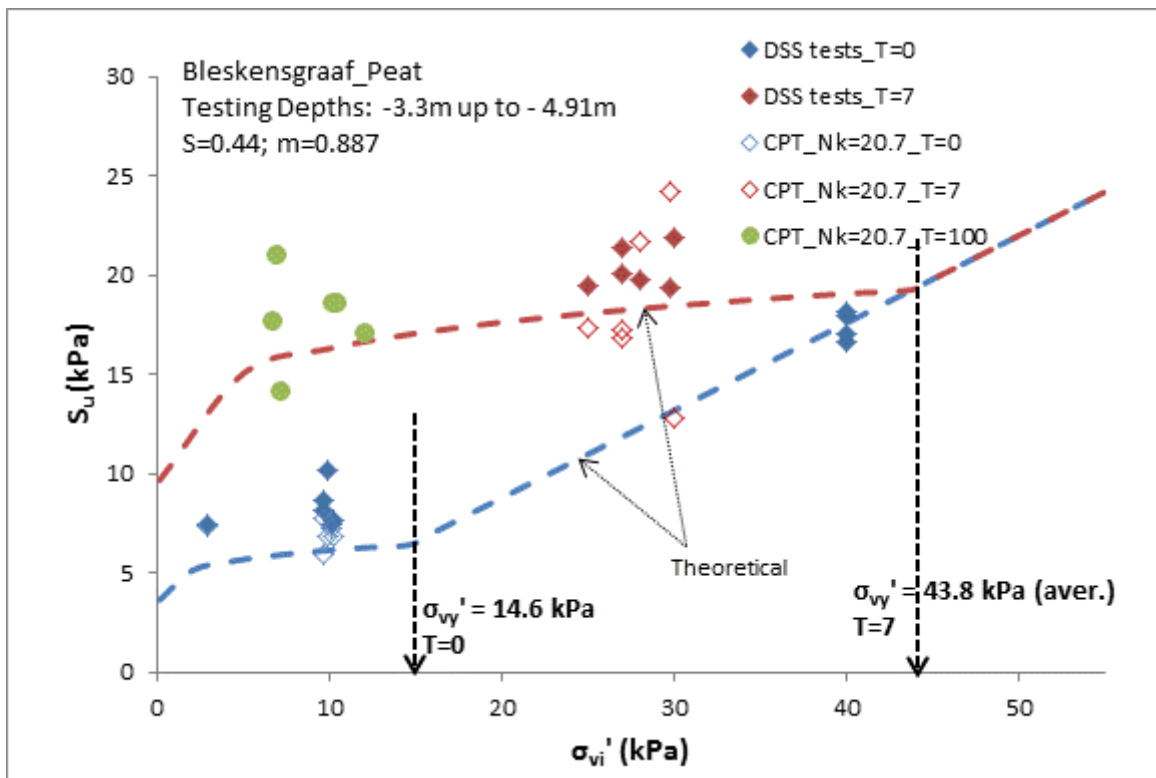
In § 5.3.2 (Bleskensgraaf) en § 5.3.3 (Schardam) worden de resultaten van beide bepalingmethoden vergeleken met elkaar en met bepalingen van de ongedraineerde sterkte in het laboratorium. Als correlatieconstante voor de bolsonde is weer gebruik gemaakt van  $N_{b,DSS} = 19.5$  voor veen en  $N_{b,CAU} = 15.2$  voor klei. Als coëfficiënt voor de conussonde is weer gebruik gemaakt van  $N_{k,DSS} = 20,7$  voor veen en  $N_{b,CAU} = 16.5$  voor klei (Fugro, 2015). Zie verder Bijlage G. Verder wordt hier opgemerkt dat de initiële waarde van de grensspanning voor de SHANSEP relatie is bepaald op basis van de gemiddelde waarde van de grensspanning uit samendrukkingsproeven op de relevante diepte.

Zoals al gemeld in § 5.2.1 is de onzekere afstand van de sondering of boring tot de verticale drains in het veen van invloed op de grensspanning, en daarmee ook op de ongedraineerde sterkte. Tussen de in praktijk op verschillende posities tussen de drains bepaalde waarden zijn in het veen dus significante verschillen mogelijk. Datzelfde geldt daarmee ook voor de ongedraineerde sterkte, die van de grensspanning afhankelijk is.

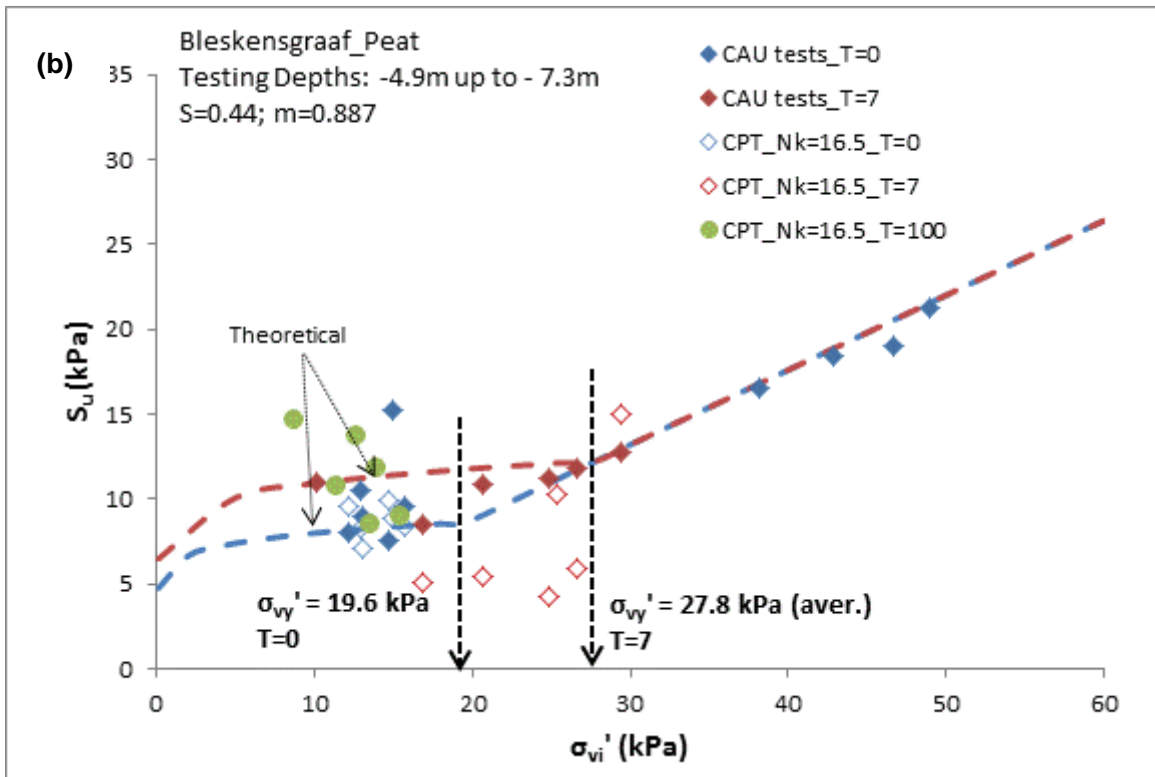
#### 5.3.2 Bleskensgraaf

Figuur 5.10 en Figuur 5.11 tonen de in het laboratorium gemeten ongedraineerde schuifsterktes als functie van de effectieve verticale spanning, alsmede de benaderende waarden die volgen uit correlatie met de sondeerweerstand. In de figuur is ook de theoretische SHANSEP relatie tussen ongedraineerde sterkte en verticale effectieve spanning geplot. De gestippelde blauwe lijn is gebaseerd op de aangenomen initiële

grensspanning en de gestippelde rode lijn is gebaseerd op een aanname voor de door vacuüm aangepaste grensspanning. Deze grensspanning is in praktijk niet gelijk voor verschillende locaties. De lijnen moeten daarom alleen worden beschouwd als indicatief. De in het laboratorium gevonden waarden voor het overgeconsolideerde geval liggen doorgaans iets boven de theoretische SHANSEP lijn. De correlaties met de sondeerweerstand laten zien dat de relatieve afname van T=7 naar T=100 in overeenstemming is met de relatieve afname die zou optreden volgens SHANSEP.



Figuur 5.10 Bleskensgraaf. Gemeten waarden van de ongedraineerde schuifsterkte van de veenlagen versus theoretisch bepaalde waarden, voor verschillende waarden van effectieve verticale spanning. T=0: voor de start van vacuüm. T=7: binnen 7 dagen na het eind van vacuüm. T=100: 100 dagen na het eind van vacuüm. Diepteniveau van NAP-3.3m tot NAP-4,9 m



Figuur 5.11 Bleskensgraaf location: Gemeten waarden van de ongedraineerde schuifsterkte van de veenlagen versus theoretisch bepaalde waarden, voor verschillende waarden van effectieve verticale spanning. T=0: voor de start van vacuüm. T=7: binnen 7 dagen na het eind van vacuüm. T=100: 100 dagen na het eind van vacuüm. Diepteniveau van NAP-4.9m tot NAP-7.3

### 5.3.3 Schardam

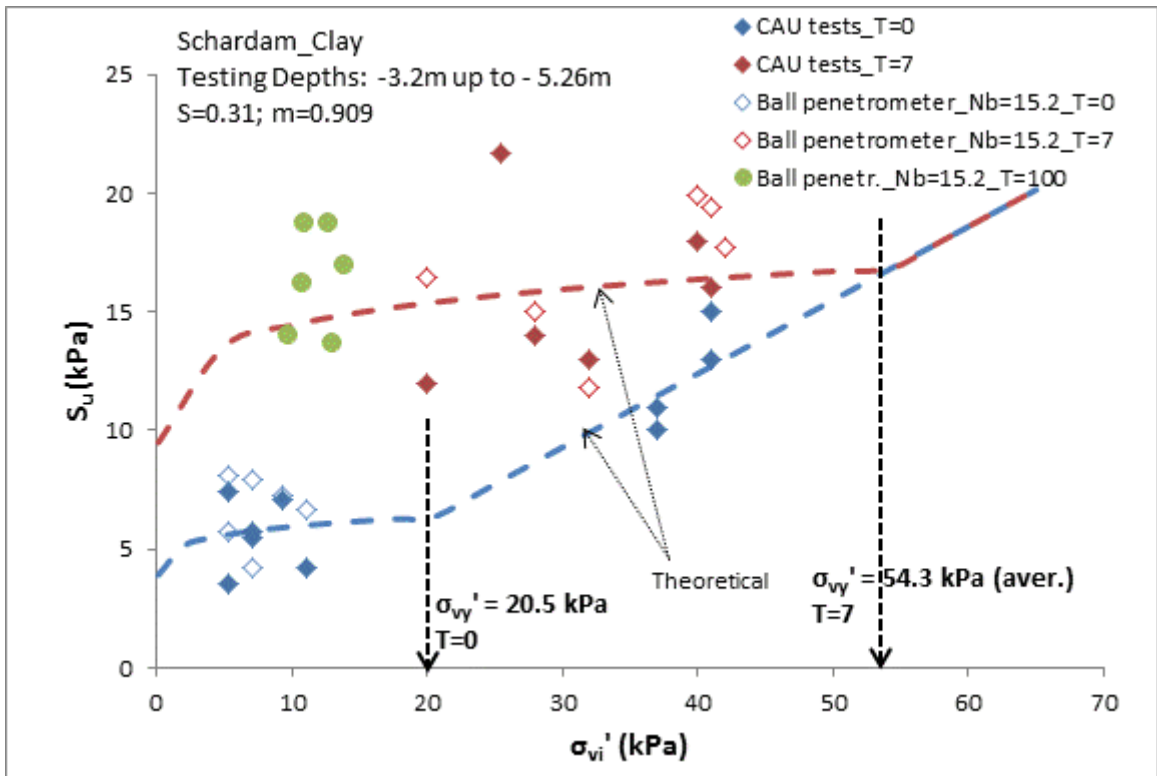
Figuur 5.12 (klei) en Figuur 5.13 (veen) tonen zowel de in het laboratorium gemeten ongedraineerde schuifsterktes als functie van de effectieve verticale spanning, als ook de benaderende waarden die volgen uit correlatie met de sondeerweerstand. In de figuren is ook weer de theoretische SHANSEP relatie tussen ongedraineerde sterkte en verticale effectieve spanning geplott. De gestippelde blauwe lijn is gebaseerd op de aangenomen initiële grensspanning en de gestippelde rode lijn is gebaseerd op een aanname voor de door vacuüm aangepaste grensspanning. Deze aangepaste grensspanning is in praktijk niet gelijk voor verschillende locaties. De lijnen moeten daarom alleen worden beschouwd als indicatief. De correlaties met de sondeerweerstand laten zien dat de relatieve afname van T=7 naar T=100 goed overeenkomt met de relatieve afname die zou optreden volgens SHANSEP.

Voor de klei tonen de drie methoden (laboratorium, SHANSEP, correlatie) een consistente winst in ongedraineerde schuifsterkte op het moment direct na afloop van de vacuümperiode (T=7). Door de daarna nog opgetreden aanpassing van de verticale spanningen neemt de schuifsterkte weer wat af. De correlaties met sonderingen op 100 dagen na einde van de vacuümperiode laten zien dat de met de correlatie gevonden afname consistent is met de afname die wordt voorspeld volgens de SHANSEP relatie.

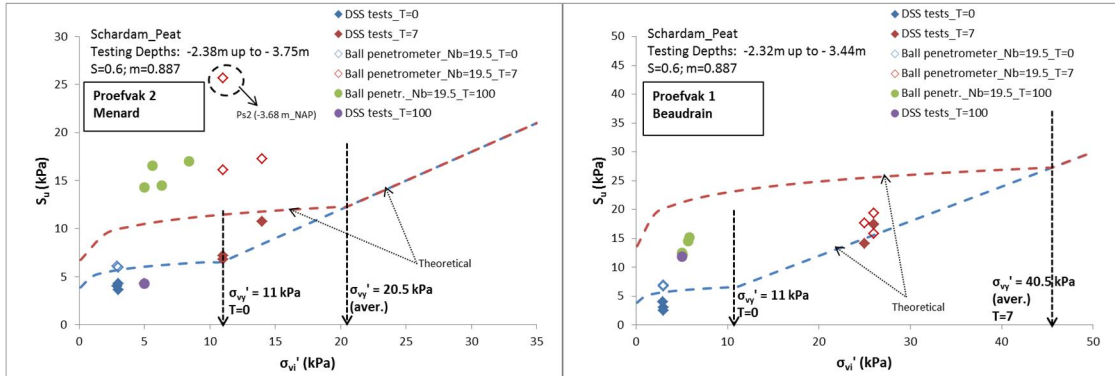
Voor het veen laten de laboratoriumresultaten en de correlaties met sondeerwaarden een winst in ongedraineerde schuifsterkte zien op het moment direct na afloop van de vacuümperiode. De na de vacuümperiode volgende beperkte afname van de sterkte wordt



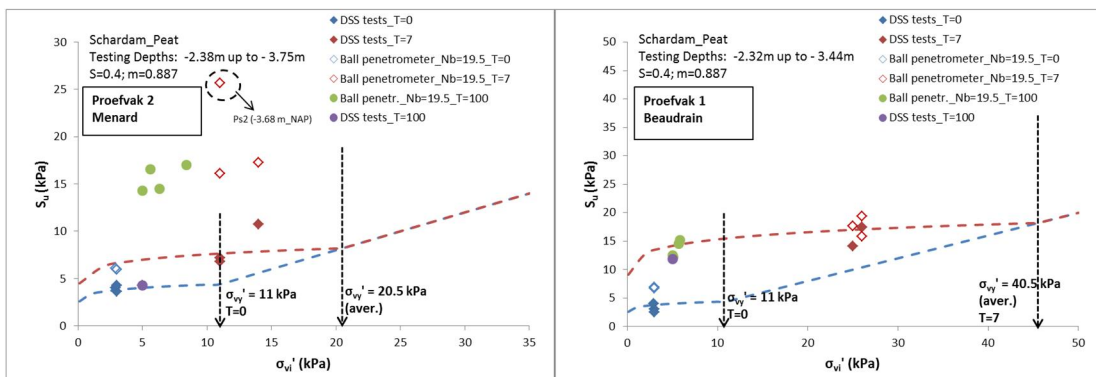
eveneens teruggevonden uit de met sondeercorrelaties bepaalde waarden op 100 dagen. De gevonden laboratoriumwaarden voor en na de vacuümperiode liggen echter onder de met SHANSEP gevonden waarden, zolang een waarde  $S = 0.6$  wordt aangenomen. *Figuur 5.14* laat zien dat een keuze voor  $S = 0.4$  een betere overeenkomst geeft tussen de laboratoriumresultaten en de met SHANSEP gevonden waarden. De via sondeercorrelaties gevonden waarden na de vacuümperiode komen dan voor het Beaudrain vak ook goed overeen met de via SHANSEP gevonden waarden. In het Menard veld liggen de via sondeercorrelaties gevonden waarden nog wel significant hoger. Dat komt omdat de sondeerweerstand in het Menard-vak onverwacht hoog zijn (zie § 5.2.3). Deze hoge waarden zijn niet consistent met de gemeten waterdrukverlaging en met de in het laboratorium gemeten grensspanning en ongedraineerde sterkte. Zoals al gemeld in § 5.2.3 ligt een mogelijke verklaring in de verschillende coördinaten van de sonderingen, in combinatie met de onzekere afstand van de sondering tot de verticale drains op diepte.



*Figuur 5.12 Schardam: Gemeten waarden van de ongedraineerde schuifsterkte van de klei versus theoretisch bepaalde waarden, voor verschillende waarden van effectieve verticale spanning*



Figuur 5.13 Schardam: Gemeten waarden van de ongedraineerde schuifsterkte van het veen versus theoretisch bepaalde waarden, voor verschillende waarden van effectieve verticale spanning.  $T=0$ : voor de start van vacuüm.  $T=7$ : binnen 7 dagen na het eind van vacuüm.  $T=100$ : 100 dagen na het eind van vacuüm. SHANSEP parameter  $S=0.6$  (bepaald uit 4 proeven uit 0.5m van 1 boring in het Menard veld)



Figuur 5.14 Schardam: Gemeten waarden van de ongedraineerde schuifsterkte van de klei versus theoretisch bepaalde waarden, voor verschillende waarden van effectieve verticale spanning.  $T=0$ : voor de start van vacuüm.  $T=7$ : binnen 7 dagen na het eind van vacuüm.  $T=100$ : 100 dagen na het eind van vacuüm. SHANSEP parameter  $S=0.4$  (een meer gebruikelijke waarde voor veen)

## 6 Samenvatting, conclusies en aanbevelingen

### 6.1 Samenvatting van het uitgevoerde onderzoek

#### 6.1.1 Inleiding

Het voorliggende rapport doet verslag van een onderzoek naar de blijvende invloed van vacuümconsolidatie op de ongedraineerde sterkte van cohesieve grond. Vacuümconsolidatie kan worden uitgevoerd met zowel het traditionele Menard systeem als met het alternatieve Beudrain-S systeem. In beide gevallen wordt de waterdruk in verticale drains tijdelijk verlaagd, door aansluiting op vacuümpompen. De waterdrukverlaging tijdens de pompperiode veroorzaakt een eveneens tijdelijke toename van de effectieve verticale spanning in de grond tussen de drains. Bij voldoende effect op de effectieve verticale spanning resulteert in theorie een blijvende verhoging van de grensspanning. Daarmee resulteert dan in theorie ook een blijvende verhoging van de ongedraineerde schuifsterkte. Door de versnelde vacuümconsolidatie treedt een horizontale grondverplaatsing op die tegengesteld is aan de horizontale grondverplaatsing door een gewichtsbelasting.

Ter validatie van de blijvende verhoging van de grensspanning en de ongedraineerde sterkte zijn veldproeven uitgevoerd op de locaties Bleskensgraaf (alleen Menard) en Schardam (zowel Menard als Beudrain-S). In alle proefvelden is een driehoekig stramien van verticale stripvormige drains toegepast, met de drains op een onderlinge afstand van 1m. In deze drains is door de vacuümpomp een tijdelijke waterdrukverlaging opgelegd van ongeveer 60 kPa. De midden tussen de drains resterende waterdrukverlaging is gemeten in de tijd. Daarnaast zijn ook de tijdsafhankelijke vervormingen gemeten, zowel horizontaal als verticaal.

Voorafgaand aan de vacuümperiode en na afloop daarvan zijn boringen en sonderingen uitgevoerd. De blijvende toename van grensspanning en van ongedraineerde sterkte is primair aangetoond door middel van laboratoriumproeven op grondmonsters die uit de boringen zijn genomen. Aanvullend bewijs is verkregen door het relateren van grensspanning en veldspanning aan de ongedraineerde sterkte met hulp van het SHANSEP model (Ladd & Foott, 1974; Deltares, 2014a). Aanvullend bewijs is ook verkregen door gebruik te maken van een lineaire correlatie tussen de ongedraineerde sterkte en de netto sondeerweerstand (Lunne, Robertson, & Powell, 1997; Deltares, 2014b). Het uitgevoerde onderzoek naar de blijvende verhoging van de grensspanning wordt samengevat in § 6.1.2. Het uitgevoerde onderzoek naar de blijvende verhoging van de ongedraineerde sterkte wordt samengevat in § 6.1.3.

#### 6.1.2 Grensspanning

##### Aanpak

- In het laboratorium is de initiële en aangepaste grensspanning bepaald, door proeven op grondmonsters uit boringen. Deze boringen zijn uitgevoerd voorafgaand aan de vacuümperiode en binnen 7 dagen na afloop daarvan. De na afloop uitgevoerde boringen zijn aan bovenzijde midden tussen de verticale drains geplaatst. Deze boringen zullen op diepte niet meer precies in het midden liggen, omdat de verticale drains door de vacuümconsolidatie horizontaal zullen zijn verplaatst.
- De initiële en aangepaste grensspanning is in het laboratorium direct gemeten met hulp van samendrukkingsproeven. Daarnaast is de grensspanning ook indirect bepaald, door

correlatie met sondeerweerstand. De indirecte bepaling is meer benaderend dan de directe methode.

- De direct en indirect bepaalde toename van de grensspanning is vervolgens globaal vergeleken met de berekende toename door de gemeten tijdelijke drukverlaging. Het samengevatte resultaat van de vergelijking per proefveld volgt hierna. Bij de vergelijking moet op voorhand rekening worden gehouden met significante afwijkingen. Deze worden onder andere veroorzaakt door de ruimtelijke variatie in grondeigenschappen en (water)spanningen, in combinatie met de verschillende coördinaten van de sonderingen en boringen en in combinatie met de onzekere afstand van de sondering en boring tot de verticale drains op diepte.

#### Resultaat Bleskensgraaf (§ 5.2.2)

- In het Bleskensgraaf proefveld (Menard) bevindt zich tussen de verticale drains alleen veen. Tijdens de (door 1 pompstoring onderbroken) vacuümperiode is in dit veen midden tussen de drains een maximale waterdrukverlaging bereikt van ongeveer 40 kPa (drukmeter initieel op NAP - 4,5 m) tot ongeveer 15 kPa (drukmeter initieel op NAP-6m). De in praktijk bereikte waterdrukverlagingen zijn in het veen dus minder groot dan de bovengrens die volgt uit de pompdruk.
- Door de effectieve waterdrukverlaging resulteert volgens berekening een toename van de initiële grensspanning met ongeveer 40 kPa aan bovenzijde (van ongeveer 15 kPa naar ongeveer 55 kPa) en met ongeveer 10 kPa aan de onderzijde (van ongeveer 20 kPa naar ongeveer 30 kPa). Deze berekende toename komt goed overeen met zowel de toename die is gemeten in het laboratorium als met de toename die volgt uit correlaties met sondeerweerstand.

#### Resultaat Schardam (§ 5.2.3)

- Op de Schardam locatie wordt initieel een aanzienlijk verticaal stijghoogtegradiënt gemeten. Dat wil zeggen een freatische lijn op NAP - 0,9 m en de stijghoogte in het pleistocene zand op NAP - 2,35 m. In de stationaire eindsituatie is de stijghoogte langs de verticaal ongeveer gelijk geworden aan de stijghoogte in het pleistocene zand. Deze blijvende stijghoogteverlaging wordt veroorzaakt door de verticale drains. Van de tijdens vacuümconsolidatie gemeten waterdrukverlaging is een deel dus van permanente aard.
- In de zwak siltige klei werd in het Beaudrain-vak tijdens de vacuümperiode ten opzichte van de initiële waterspanning maximaal 60 tot 70 kPa waterdrukverlaging opgebouwd. In het daarboven liggende veen werd een maximale waterdrukverlaging van ongeveer 35 kPa bereikt. Tijdens de vacuümperiode in het Beaudrain-vak vond 1 pompstoring plaats. In het Menard-vak werd in de zwak siltige klei maximaal ongeveer 60 kPa waterdrukverlaging opgebouwd. In het daarboven liggende veen werd een maximale waterdrukverlaging van 20 tot 35 kPa bereikt. Tijdens de vacuümperiode vonden 2 pompstoringsen plaats.
- Uit de waterdrukverlaging, de initiële veldspanning en de initiële grensspanning is de toename van de grensspanning berekend. Voor het veen in het Menard-vak neemt de aldus berekende grensspanning toe van 11 kPa naar ongeveer 25 kPa. De grensspanning van het veen in het Beaudrainvak neemt overeenkomstig toe van 11 kPa naar ongeveer 40 kPa. Voor de zwak siltige klei wordt in beide vakken ten slotte een toename berekend van 20 kPa naar 70 kPa. Alle berekende toenames komen goed overeen met de toenames die in het laboratorium zijn gemeten.
- De berekende en in het laboratorium bepaalde toenames zijn ook vergeleken met de toename die volgt uit correlaties met de sondeerweerstand. Voor de klei is de overeenkomst goed. Voor het veen in het Beaudrainvak is de overeenkomst ook goed,

mits voor de SHANSEP parameter  $S$  een waarde van 0.4 wordt gekozen. Deze voor veen gebruikelijke waarde wijkt af van de uit lokaal laboratoriumonderzoek gevonden waarde van 0.6. De laatste waarde resulteert uit 4 proeven op zeer dicht bij elkaar gelegen grondmonsters. De lokale waarde van 0.6 is vermoedelijk niet voldoende representatief voor het verdere veen te Schardam. Voor het veen in het Menard-vak zijn de sondeerweerstand na de vacuümperiode ten slotte aanzienlijk hoger dan mag worden verwacht op grond van de gemeten waterdrukverlaging en grensspanning.

### 6.1.3 Ongedraineerde sterkte

#### Aanpak

- De toename van de ongedraineerde sterkte in het laboratorium is bepaald met hulp van monsters uit boringen. De boringen zijn uitgevoerd voorafgaand aan de vacuümperiode en kort na afloop daarvan. De monsters zijn eerst anisotroop ge(re)consolideerd tot de aangenomen veldspanning. Daarna zijn er triaxiaalproeven en *Direct Simple Shear* (DSS) proeven op uitgevoerd. De in de laboratoriumproeven aangenomen veldspanning direct na afloop van de vacuümperiode is slechts benaderend. Dat komt vooral omdat op dat moment het waterspanningsverloop langs de boring niet nauwkeurig kan worden bepaald.
- Monsters uit de vooraf uitgevoerde boringen zijn verder ook gebruikt om de SHANSEP parameter  $S$  te bepalen, eveneens met hulp van triaxiaalproeven en *Direct Simple Shear* proeven. Deze monsters zijn eerst geconsolideerd tot een verticale spanning die ruimschoots groter is dan de initiële grensspanningswaarde.
- De sterkte-toename uit het laboratorium (bij de aangenomen verticale effectieve spanning) is vergeleken met de toename volgens SHANSEP (bij de aangenomen verticale effectieve spanning en de aangenomen grensspanning). De sterkte-toename is ook vergeleken met de toename die volgt uit correlaties met sondeerweerstand. De daarvoor gebruikte sonderingen zijn uitgevoerd voorafgaand aan de vacuümconsolidatieperiode en kort na afloop daarvan.

#### Resultaat

- In het geval van Bleskengraaf (§ 5.3.2) is de berekende winst in ongedraineerde sterkte voor de klei volgens SHANSEP vergelijkbaar met de winst die volgt uit laboratoriumproeven en de winst die volgt uit correlaties met de sondeerweerstand. In het geval van Schardam (§ 5.3.3) geldt dezelfde conclusie in principe ook. Eerste kanttekening daarbij is dat de overeenkomst met de SHANSEP relatie voor het Schardam veen alleen goed is wanneer voor de SHANSEP parameter  $S$  een waarde van 0.4 wordt gebruikt. Tweede kanttekening daarbij is dat de sondeerweerstand van het veen in het Menard-vak na de vacuümperiode significant hoger is dan zou volgen uit de in het laboratorium gemeten ongedraineerde sterkte.

## 6.2 Conclusies

- Waterspanningsmetingen laten zien dat het effect van vacuümconsolidatie tussen de verticale drains in de siltige kleilaag bij Schardam grofweg gelijk is aan de gemeten drukverlaging ter plaatse van de drains (ongeveer 60 kPa). De effectiviteit in veenlagen blijkt echter minder groot. In het veen te Bleskensgraaf wordt midden tussen de verticale drains tussen de 40 en 15 kPa aan drukverlaging gemeten. In het veen te Schardam is de drukverlaging in het midden ongeveer 20 kPa. Een mogelijke oorzaak voor de mindere effectiviteit in veen is de aanwezigheid van gas in het veen. Een andere mogelijke oorzaak is een initieel kleinere verhouding tussen horizontale en verticale doorlatendheid, in combinatie met een andere consolidatiecoëfficiënt. Om tussen de drains binnen redelijke tijd voldoende waterdrukverlaging te bereiken kan daarom in veen een fijner stramen van verticale drains nodig zijn dan in klei het geval is.
- Uit de resultaten van de samendrukkingsproeven blijkt een blijvende toename van de grensspanning. Deze toename is kwantitatief vergelijkbaar met de uit de waterdrukverlaging berekende toename. Ook de correlaties met de sondeerweerstand resulteren in een toename die kwantitatief doorgaans vergelijkbaar is.
- De blijvende winst in ongedraineerde sterkte die wordt gemeten in het laboratorium is kwantitatief consistent met de volgens SHANSEP berekende winst op basis van de toename in de grensspanning. Ook de waarde van de sondeerweerstand in het veld neemt daarmee doorgaans consistent toe.
- De winst in grensspanning en ongedraineerde sterkte is in de klei groter dan in het veen. Dit is volledig consistent met de eerdere conclusie dat de vacuümdruk meer effect heeft gehad op de waterspanning in de klei dan op de waterspanning in het veen. De winst in de grensspanning en ongedraineerde sterkte wordt alleen gevonden in de grond tussen de drains. In de grond onder de drains wordt geen significant effect gevonden, zoals op voorhand ook was verwacht.

## 6.3 Aanbevelingen

- De in het voorliggende rapport gepresenteerde resultaten tonen langs verschillende wegen aan dat vacuümconsolidatie leidt tot significante verhoging van zowel de grensspanning als van de ongedraineerde sterkte. Zoals verwacht gaat dit gepaard met zettingen en met naar het midden van het veld gerichte horizontale vervormingen. Deze conclusie is in het buitenland ook al getrokken uit de metingen bij andere veldproeven (Griffin & O'Kelly, 2014). De conclusie geldt in principe voor zowel klei als veen. De methode kan vanwege de bewezen effectiviteit daarom worden aanbevolen voor praktijktoepassing.
- Voorafgaand aan een eventuele praktijktoepassing verdient het echter aanbeveling om de voorspelbaarheid van het effect van de verticale drains op de waterspanning in klei en veen beter te onderzoeken. Een voldoende betrouwbare voorspelling is nodig voor het ontwerpen van de drainconfiguratie en van de pompperiode. Dat kan bijvoorbeeld door voor Bleskensgraaf en Schardam eerst een voorspelling uit te voeren met een daarvoor geschikt rekenmodel (Sellmeijer, Visschedijk, & Weinberg, 2004). De gemeten zettingen en waterspanningen kunnen daarna worden gebruikt voor een fit van de rekenresultaten op de metingen. Daarbij kan ook worden gevarieerd met de verschillende verhouding tussen horizontale en verticale doorlatendheid in klei en veen.

- Verder verdient het aanbeveling om in ontwerpen voor praktijkgevallen voldoende aandacht te geven aan de mogelijke blijvende invloed van verticale drains op het stationaire stijghoogteverloop.
- Bij praktijktoepassing van vacuümconsolidatie met (berm)ophoging wordt aanbevolen om de ontwikkeling van de waterspanningen in de grond en de ontwikkeling van de vervormingen in de grond steeds voldoende uitgebreid te meten. Door middel van deze metingen kan vroegtijdig worden gecontroleerd in welke mate het vooraf voorspelde effect in praktijk ook wordt bereikt.
- Ten slotte wordt aanbevolen om de bij praktijktoepassing bereikte winst in ongedraineerde sterkte te blijven toetsen met hulp van sonderingen.

#### 6.4 Aanbevelingen vanuit ENW techniek en de evaluatiecommissie

In juni zijn de resultaten beschreven in dit rapport gepresenteerd aan de evaluatiecommissie Dijkversterking en ENW-techniek. Uit de evaluatiecommissie kwam naar voren dat de tijdspanne van 100 dagen tussen afsluiten vacuümconsolidatie en de laatste sterktemetingen in het veld gegeven de doorlooptijd van het project logisch is maar voor het meten van de langdurige sterkte kort is. De aanbeveling is gedaan om 3 jaar na dato van het uitzetten van het vacuüm (juli 2019 in Schardam en augustus 2019 in Bleskensgraaf) nogmaals een sondeerronde uit te voeren nabij de sonderingen uitgevoerd 100 dagen na het beëindigen van het vacuüm. Deze aanbeveling is gedeeld met het ENW.

Dit onderzoek zal niet meer uitgevoerd worden binnen deze opdracht. Teneinde het vergelijk goed te kunnen maken wordt aanbevolen om de zelfde conussen te gebruiken die ook voor dit onderzoek zijn gebruikt en de onderzoekslocaties te kiezen op een afstand van maximaal 0,75 m uit de T=100 dagen sonderingen.

## Literatuur

- CUR. (2005). *2005-1: Geforceerde consolidatie door het afpompen van water.*
- Deltares. (2014a). *1207808-001-GEO-0004, Versie 01, WTI2017 Beoordeling macrostabiliteit met ongedraineerd materiaalmodel definitief.*
- Deltares. (2014b). *1208254-032-GEO-0001 v1 - Dijken op Veen II; DoV werkwijze voor bepaling Macrostabiliteit.*
- Deltares. (2014d). *Dijken op Veen II - Eindrapport Heterogeniteit, rapport nr 1208254-019-GEO-000.*
- Deltares. (2016a). POV Macrostabiliteit; Vacuümconsolidatie Resultaat verkennende handboringen Bleskensgraaf, memo 1220719-000-GEO-0004.
- Deltares. (2016b). *Protocol laboratoriumproeven voor grondonderzoek aan waterkeringen, rapport nr. 1230090-019-GEO-0002, versie 3.*
- Dienst Weg- en waterbouwkunde. (1994). *Handleiding Wegenbouw Ontwerp onderbouw; Richtlijn Luchtdrukconsolidatie.*
- Dienst Weg- en waterbouwkunde. (2004). *Handleiding Wegenbouw - Ontwerp Onderbouw versie 2.0, productmethodeblad nr 6: Zandophoging op maaiveld met luchtdrukconsolidatie, Rapportnr. DWW-2004-067.*
- Fugro. (2015). *Versterking Markermeerdijken Hoorn-Amsterdam. Achtergrondrapport grondparameters DOV. Fugro rapport nr. 1214-0007-040-r24v02; Halter W.R.; Hinborch M.; Aparicio Saez A.O.*
- Griffin, H., & O'Kelly, B. (2014). Ground improvement by vacuum consolidation – a review. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement* 167:4, 274-290.
- Hayashi, H., Nishikawa, J., Nishimoto, S., & Sawai, K. (2003). Performance of Vacuum Consolidation Method in Peat Ground. *Int. Workshop on Geotechnics of Soft Soils-Theory and Practice.*
- Ladd, C., & Foott, R. (1974). New design procedure for stability of soft clays. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, pp. 100(7): 763-786.
- Lunne, T., Robertson, P., & Powell, J. (1997). *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice.*
- Mesri, G., & Khan, A. (2012). Ground Improvement Using Vacuum Loading. *JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING.*
- Schofield, A., & Wroth, P. (1986). *Critical State Soil Mechanics.*
- Sellmeijer, J., Visschedijk, M., & Weinberg, M. (2004). Rekenen met verticale drains. *Geotechniek.*
- Waterschap Rivierenland. (2015). *Plan van Aanpak Projectoverstijgende Verkenning Macrostabiliteit.*





*1220719-000-GEO-0010, Versie 2, 10 augustus 2017, definitief*

## **A PvA Beaudrain vak Schardam (Cofra)**

[.bijlagen\Bijlage A - PvA Vacuumconsolidatie \(15-0282-E-M-01-JVIN-rev1\).pdf](#)



*1220719-000-GEO-0010, Versie 2, 10 augustus 2017, definitief*

## **B Grondonderzoek en monitoring Schardam**

### **B.1 Handboringen (Fugro)**

[.bijlagen\Bijlage B1 - Handboringen Schardam.pdf](#)



*1220719-000-GEO-0010, Versie 2, 10 augustus 2017, definitief*

## **B.2 Boringen en Sonderingen (Fugro)**

[.\\bijlagen\\Bijlage B2 - Veldwerk Schardam \(1316-0080-000\\_21\\_KR03\).pdf](#)



*1220719-000-GEO-0010, Versie 2, 10 augustus 2017, definitief*

### **B.3 Monitoringverslag (Deltares)**

[.\\bijlagen\\Bijlage B3 - Monitoring Schardam.pdf](#)



1220719-000-GEO-0010, Versie 2, 10 augustus 2017, definitief

## **C Grondonderzoek en monitoring Bleskensgraaf**

### **C.1 Feitelijke rapportage (Inpijn-Blokpoel**

[.\bijlagen\Bijlage C1 - Grondonderzoek Bleskensgraaf \(02P007257-RG-02\).pdf](#)



*1220719-000-GEO-0010, Versie 2, 10 augustus 2017, definitief*

## **C.2 Monitoring verslag (Deltares)**

[.\\bijlagen\\Bijlage C2 - 1220719-001-GEO-0005 v01 - Voortgang vacuüm Bleskensgraaf \(4\), 18 november 2016.pdf](#)



*1220719-000-GEO-0010, Versie 2, 10 augustus 2017, definitief*

## **D Laboratoriumonderzoek Bleskensgraaf (Deltares)**

### **D.1 K0CRS proeven**

[.\bijlagen\Bijlage D1 - Lab Bleskensgraaf - K0CRS.pdf](#)



*1220719-000-GEO-0010, Versie 2, 10 augustus 2017, definitief*

## **D.2 DSS proeven**

[.\\bijlagen\\Bijlage D2 - Lab Bleskensgraaf -DSS.pdf](#)





*1220719-000-GEO-0010, Versie 2, 10 augustus 2017, definitief*

### **D.3 Triaxiaalproeven**

[.\bijlagen\Bijlage D3 - Lab Bleskensgraaf -TRIAX.pdf](#)



*1220719-000-GEO-0010, Versie 2, 10 augustus 2017, definitief*

#### **D.4 Classificatieproeven**

[.\bijlagen\Bijlage D4 - Lab Bleskensgraaf -TAB.pdf](#)



*1220719-000-GEO-0010, Versie 2, 10 augustus 2017, definitief*

## **E Laboratoriumonderzoek Schardam**

### **E.1 Fase 1 (Fugro)**

[.\bijlagen\Bijlage E1 - Lab Fugro Schardam \(1316-0080-171.R01\).pdf](#)



*1220719-000-GEO-0010, Versie 2, 10 augustus 2017, definitief*

## **E.2 Fase 2 (Fugro)**

[.\\bijlagen\\Bijlage E2 - Lab Fugro Schardam \(1316-0080-171.R02\).pdf](#)



*1220719-000-GEO-0010, Versie 2, 10 augustus 2017, definitief*

### **E.3 Fase 1 (Deltares)**

[.\\bijlagen\\Bijlage E3 - Lab Deltares Schardam \(1230694\).pdf](#)

## F Interpretation of lab results

### F.1 Overview of executed tests

In total 40 anisotropically consolidated undrained triaxial tests (CAU), 34 direct simple shear tests (DSS) and 19 constant rate of strain oedometer tests (Ko-CRS) have been performed, complemented with classification tests. The Schardam samples were tested partly in the Fugro laboratory and partly in the Deltares laboratory. All Bleskensgraaf samples were tested in the Deltares laboratory.

#### F.1.1 Static triaxial compression tests

Tests were conducted in accordance to CEN/ISO17892 Part 9. Samples for triaxial compression tests were taken from borings before vacuum (BV) and from borings taken 7 days after the end of vacuum (AV, T=7). These samples were anisotropically reconsolidated to the estimated in situ stress state. The tests on BV samples were performed both on samples tested at in situ stress test conditions and on normally consolidated samples (OCR=1). The computation of the vertical effective stress levels per boring and per sample basis are provided in Section F.2. ..The  $K_0$  conditions at the reconsolidated state and the  $K_{NC}$  conditions were both estimated as being equal 0,5. The OCR dependent  $K_0$  value according to the WBI protocol (Deltares, 2016b) has therefore not been used. Lab results show that the  $K_0$  value cannot be controlled exactly, especially for low confining pressures. The individual test results for all the CAU tests performed are presented in Appendix D and E.

- Tests on normally consolidated samples were performed under a ratio of the applied vertical effective stress to the pre-consolidation pressure of 2.0. The CAU test specifications per sample basis are summarized in Table F.1 for the tests performed before (BV, phase 1) and after the application of vacuum in the field (AV, phase 2).
- A limited amount of tests were performed in the lab on samples retrieved from the field before the application of vacuum but tested in the lab under conditions simulating the application of vacuum in the field. These tests can be classified in the following two categories:
  - A. Tests that were subjected to vacuum pressure prior to their shearing. Vacuum was applied to the samples after their anisotropic consolidation at in situ stress conditions under a zero back pressure. The degree of samples saturation was therefore not assessed. Samples with different levels of vacuum pressure were tested. Vacuum consolidation was terminated when the rate of the sample's volumetric change becomes minimal. The duration of the vacuum consolidation period depends on the properties of the tested material and for the samples of the current study was found to be approximately 3 to 5 days. This type of tests is herein referring to as the 'vacuum in the lab' tests and their test specifications are summarized in Tabel F.2.
  - B. Tests in which the application of a vacuum pressure was simulated via the increase and subsequent reduction of the cell pressure prior to the application of shearing of the samples. The vacuum simulation was applied to the samples via changes in the cell pressure after their anisotropic consolidation under in situ stress conditions. Samples were subjected to a back pressure of approximately 300 kPa and had a Skempton's B parameter >0.96. Tests with different levels of simulated vacuum pressure were performed. This type of tests is herein referring to as the 'vacuum simulation in the lab' tests and their test specifications are summarized in Tabel F.2.

- A special third category involves samples retrieved from the field directly after the end of vacuum but tested in the lab under in situ stress conditions that were estimated to occur in the field 100 days after the application of vacuum consolidation. This type of tests is herein referring to as the 'After vacuum\_100 days' tests and their test specifications are summarized in Tabel F.3.

a/a	Test ID	Sample Depth (m_NAP)	Boring	Location	$\gamma_{wet}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$P_c$ (kPa)	Testing Conditions	$\sigma_3'$ (kPa)	$\sigma_{vc}'$ (kPa)	$K_o$	$t_{peak}$	$\epsilon_{max}$ (%)	$t_{max}$ (kPa)	Type of Soil	Lab	Testing Stage
1	Ps3A	-3.21	B3	S	14.3	18 - 23	NC	20	41	0.5	15	25	13	C	F	BV
2	Ps3B	-3.41	B3	S	13.9	18 - 23	NC	10	41	0.5	12	25	15	C	F	BV
3	Ps4A	-3.95	B3	S	14.1	18 - 23	NC	18	37	0.5	13	25	11	C	F	BV
4	Ps4B	-4.24	B3	S	14	18 - 23	NC	18	37	0.5	13	25	10	C	F	BV
5	1	-3.34	B1	S	13.1	-	In situ	4.1	7.1	0.58	5.6	25	5.5	C	D	BV
6	2	-4.45	B1	S	13.8	-	In situ	5.4	9.3	0.58	8.3	25	7.1	C	D	BV
7	3	-3.2	B2	S	13.5	-	In situ	2.4	5.3	0.45	4.5	24.3	3.5	C	D	BV
8	4	-3.99	B2	S	14	-	In situ	2.4	5.3	0.45	8.5	25	7.4	C	D	BV
9	5	-4.19	B2	S	13.3	-	In situ	3.2	7.1	0.45	8.3	25	5.7	C	D	BV
10	6	-4.54	B2	S	13.5	-	In situ	5.5	11	0.5	7.2	24.3	4.2	C	D	BV
11	16	-6.91	MB-01	B	11.7	-	In situ	5.7	12.1	0.47	12	23.5	8	P	D	BV
12	17	-7.33	MB-01	B	11.9	-	In situ	7.2	14.7	0.49	12	23.2	7.5	P	D	BV
13	72	-5.79	MB-04	B	11.2	18.3 - 20.9	NC	19.6	38.2	0.51	19	17.5	16.5	P	D	BV
14	80	-6.94	MB-04	B	11.4	18.3 - 20.9	NC	23.4	46.7	0.50	26	20.4	19	P	D	BV
15	82	-7.29	MB-04	B	11.5	18.3 - 20.9	NC	25.7	49	0.52	25	21.7	21.2	P	D	BV
16	78	-6.59	MB-04	B	12.1	18.3 - 20.9	NC	22.8	42.9	0.53	23	20.5	18.4	P	D	BV
17	32	-6.9	MB-02	B	11.7	-	In situ	5.8	13	0.45	13	24.2	9	P	D	BV
18	43	-4.88	MB-03	B	10.9	-	In situ	6.3	12.9	0.49	11	13.8	10.5	P	D	BV
19	47	-5.68	MB-03	B	10.6	-	In situ	8.3	15	0.55	16	23.9	15.2	P	D	BV
20	51	-6.93	MB-03	B	12	-	In situ	7.7	15.7	0.49	13	21.4	9.6	P	D	BV
21	Ps4-1	-4.8	B5	S	15.1	58	In situ	21	42	0.50	24	25	22	C	F	AV
22	Ps4-2	-5.05	B5	S	14.6	58	In situ	20	40	0.50	22	25	18	C	F	AV
23	Ps4	-5.01	B6	S	14.6	62	In situ	21	41	0.51	20	25	16	C	F	AV
24	Ps3	-4.45	B7	S	14.2	-	In situ	16	32	0.50	16	25	13	C	F	AV
25	Ps4	-4.95	B7	S	14.4	42	In situ	10	20	0.50	15	25	12	C	F	AV
26	Ps4	-5.18	B8	S	14	55	In situ	14	28	0.50	18	25	14	C	F	AV
27	120	-6.01	MB-08	B	11.1	-	In situ	13	25.4	0.51	22	15.8	21.7	P	D	AV
28	122	-6.81	MB-08	B	11.4	-	In situ	11.3	20.6	0.55	12	12.5	10.8	P	D	AV
29	123	-7.61	MB-08	B	12	-	In situ	8.7	16.9	0.51	11	24	8.5	P	D	AV
30	131	-5.87	MB-09	B	11.3	24.3-31.4	In situ	15.1	29.4	0.51	25	18	12.7	P	D	AV
31	133	-6.32	MB-09	B	11.5	24.3-31.4	In situ	13.9	26.6	0.52	15	20.8	11.8	P	D	AV
32	135	-6.77	MB-09	B	11.9	24.3-31.4	In situ	12.8	24.8	0.52	15	13.3	11.2	P	D	AV

Tabel F.1 Summary of the CAU tests performed on samples retrieved from the field before and after the application of vacuum consolidation

Where:  $\gamma_{wet}$  is wet density;  $P_c$  is the pre-consolidation pressure as derived from Ko-CRS tests where these are available;  $\sigma_3'$  is the effective confining stress;  $\sigma_{vc}'$  is the vertical effective stress at the end of consolidation;  $t_{peak}$  is the peak shear stress;  $\epsilon_{max}$  is the maximum applied shear strain;  $t_{max}$  is the shear stress that corresponds to  $\epsilon_{max}$ ; P=Peat; C=Clay; F=Fugro; D=Deltares; BV=Before Vacuum and AV= directly after the end of vacuum

1220719-000-GEO-0010, Versie 2, 10 augustus 2017, definitief

a/a	Test ID	Sample Depth (m_NAP)	Boring Location	Location	$\gamma_{wet}$ (kN/m <sup>3</sup> )	Testing Conditions	$\sigma_3'$ (kPa)	$\sigma_{vc}'$ (kPa)	Vacuum pressure (kPa)	$K_0$	$t_{peak}$ (kPa)	$\epsilon_{max}$ (%)	$t_{max}$ (kPa)	Type of soil	Lab	Testing Stage
1	99	-6.1	MB-05	B	11	In situ	5.9	15.3	-30	0.39	25.9	25	25.6	P	D	Vacuum in the lab
2	104	-6.95	MB-05	B	11.5	In situ	6.6	16	-70	0.41	22	25	20.4	P	D	Vacuum in the lab
3	102	-6.6	MB-05	B	11.4	In situ	6.6	16.9	-50	0.39	23.3	23	19	P	D	Vacuum in the lab
4	111	-6.1	MB-02	B	11.4	In situ	6.1	12.2	-30	0.5	28	22	28	P	D	Simulation of vacuum in the lab
5	45	-5.28	MB-03	B	11.3	In situ	6.8	13.6	-50	0.5	28.5	16.6	27.4	P	D	Simulation of vacuum in the lab
6	48	-6.08	MB_03	B	11.2	In situ	6.9	13.8	-70	0.5	31	22.5	31	P	D	Simulation of vacuum in the lab

Table F.2 Summary of the CAU tests performed on samples subjected to vacuum consolidation in the laboratory

a/a	Test ID	Sample Depth (m_NAP)	Boring	Location	$\gamma_{wet}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$P_c$ (kPa)	Testing Conditions	$\sigma_3'$ (kPa)	$\sigma_{vc}'$ (kPa)	$K_0$	$t_{peak}$	$\epsilon_{max}$ (%)	$t_{max}$ (kPa)	Type of Soil	Lab	Testing Stage
1	15	-5.26	B6	S	14.1	62	In situ	5.1	10.1	0.50	14.70	25	11	C	D	AV_100 days
2	16	-4.7	B7	S	14.8	42	In situ	5	9.1	0.55	13.50	25	13.1	C	D	AV_100 days

Table F.3 Summary of the CAU tests performed on samples tested at stress conditions that would occur 100 days after the application of vacuum consolidation



#### F.1.2 Direct simple shear tests

The DSS tests were conducted in accordance to Standard Test Method for Consolidated Undrained Direct Simple Shear Testing of Cohesive Soils, ASTM D 6528-07 American Society for the Testing of Materials and NORSOK standard G-0001, Annex D: Laboratory testing, Rev.2, October 2004. Tests were performed on cylindrical samples trimmed with the help of a cutting ring to dimensions of approximately 20 mm height and 63 mm internal diameter. Lateral confinement of the samples was achieved via the use of a membrane surrounded by a stack of rigid low friction rings. Tests were performed both on normally consolidated samples (OCR=1) and on samples tested at in situ test conditions. Samples were sheared under constant height conditions with a shearing rate of 8% per hour.

The DSS test specifications per sample basis are summarized in Tabel F.4 for the tests performed before (BV) and directly after the end of vacuum in the field (AV). A limited amount of tests were performed on samples retrieved from the field after the end of vacuum but tested in the lab under in situ stress conditions that were estimated to occur in the field 100 days after the application of vacuum consolidation. This type of tests is herein referring to as the 'After vacuum\_100 days' tests and their test specifications are summarized in Tabel F.5. The individual test results for all the DSS tests performed are presented in Appendix D and E.

a/a	Test ID	Sample Depth (m NAP)	Boring Location	Location	$\gamma_{wet}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$P_c$ (kPa)	Testing Conditions	$\sigma_{vc}'$ (kPa)	$t_{peak}$ (kPa)	$t_{40\%}$ (kPa)	Type of soil	WC (%)	Lab	Testing Stage
1	8	-3.66	MB-01	B	9.8	-	In Situ	9.6	8.5	8.2	P	438.3	D	BV
2	6	-3.36	MB-01	B	9.8	-	In Situ	9.6	8.9	8.7	P	674.9	D	BV
3	27	-4.7	MB-02	B	10.8	-	In Situ	10.2	7.7	7.6	P	308.4	D	BV
4	24	-4.2	MB-02	B	9.8	-	In Situ	10.1	7.7	7.4	P	515.2	D	BV
5	22	-3.4	MB-02	B	9.8	-	In Situ	2.9	7.8	7.4	P	505.1	D	BV
6	21	-3.3	MB-02	B	9.8	-	In Situ	9.8	10.4	10.2	P	447.5	D	BV
7	58	-3.34	MB-04	B	9.8	13 - 16.1	NC	40	16.7	16.6	P	663.1	D	BV
8	60	-3.49	MB-04	B	9.8	13 - 16.1	NC	40	18.8	18.2	P	536.9	D	BV
9	62	-3.74	MB-04	B	9.8	13 - 16.1	NC	40	17.7	17	P	404.9	D	BV
10	64	-3.84	MB-04	B	9.8	13 - 16.1	NC	40	18	17.9	P	410.7	D	BV
11	7	-2.64	B2	S	8.8	-	In Situ	3	3.4	3	P	1181	D	BV
12	8	-2.32	B2	S	8.8	-	In Situ	2.9	4.2	4	P	1027	D	BV
13	9	-2.34	B2	S	8.8	-	In Situ	3	2.6	2.5	P	1004	D	BV
14	10	-2.49	B4	S	8.8	-	In Situ	3	3.8	3.6	P	1049	D	BV
15	11	-2.54	B4	S	8.8	-	In Situ	2.9	4.5	4	P	1123	D	BV
16	12	-2.59	B4	S	8.8	-	In Situ	3	4.4	4.3	P	1177	D	BV
17	Ps2A	-2.28	B3	S	10.1	11	NC	22	12.8	12.8	P	1028	F	BV
18	Ps2B	-2.33	B3	S	10.1	11	NC	22	12.6	12.1	P	1029	F	BV
19	Ps2C	-2.38	B3	S	9.2	11	NC	22	14.7	14.7	P	1090	F	BV
20	Ps2D	-2.53	B3	S	9.1	11	NC	22	18.2	17.5	P	1200	F	BV
21	Ps2-I	-3.39	B5	S	9.8	48	In Situ	25	14.3	14.2	P	571.8	F	AV
22	Ps2-II	-3.44	B5	S	9.4	48	In Situ	26	17.5	17.4	P	675.7	F	AV
23	Ps2	-3.44	B6	S	9.5	43	In Situ	26	17.4	17.4	P	565.3	F	AV
24	Ps2-I	-3.35	B7	S	9	22	In Situ	11	7.4	7.2	P	762.6	F	AV
25	Ps2-II	-3.75	B7	S	9.3	22	In Situ	14	10.8	10.7	P	642.5	F	AV
26	Ps2	-3.68	B8	S	12.7	19	In Situ	11	6.8	6.8	P	107.9	F	AV
27	114	-4.16	MB-08	B	9.8	-	In Situ	25	20.7	19.5	P	420.2	D	AV
28	116	-4.46	MB-08	B	9.8	-	In Situ	27	20.5	20.1	P	482.7	D	AV
29	118	-4.91	MB-08	B	10.8	-	In Situ	30	22.5	21.9	P	383.2	D	AV
30	125	-3.97	MB-09	B	9.8	41.7 - 45.8	In Situ	27	22	21.4	P	449.7	D	AV
31	127	-4.07	MB-09	B	9.8	41.7 - 45.8	In Situ	28	20.9	19.8	P	418.2	D	AV
32	129	-4.42	MB-09	B	9.8	41.7 - 45.8	In Situ	29.8	20.6	19.4	P	418.3	D	AV

Table F.4 Summary of the DSS tests performed

Where:  $\gamma_{wet}$  is wet density;  $P_c$  is the pre-consolidation pressure as derived from Ko-CRS tests where these are available;  $\sigma_{vc}'$  is the vertical effective stress at the end of consolidation;  $t_{peak}$  is the peak shear stress;  $t_{40\%}$  is the shear stress at 40% shear strain  $P=Peat$ ;  $C=Clay$ ;  $F=Fugro$ ;  $D=Deltares$ ;  $BV=Before the start of Vacuum$  and  $AV=After the end of Vacuum$ .

a/a	Test ID	Sample Depth (m NAP)	Boring Location	Location	$\gamma_{wet}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$P_c$ (kPa)	Testing Conditions	$\sigma_{vc}'$ (kPa)	$t_{peak}$ (kPa)	$t_{40\%}$ (kPa)	Type of soil	WC (%)	Lab	Testing Stage
1	14	-3.1	B7	S	9.8	-	In Situ	5	4.9	4.3	P	701.2	D	AV
2	15	-3.19	B6	S	9.8	-	In Situ	5	12	11.9	P	588.2	D	AV

Table F.5 Summary of the DSS tests performed on samples tested at stress conditions that occur 100 days after the application of vacuum consolidation

### F.1.3 Ko-CRS tests

The CRS tests were conducted in accordance to 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. Deltares has developed a CRS device that also measures the horizontal stresses, Den Haan & Kamao (2003). (check the standard for the Fugro tests).

The Ko-CRS test specifications per sample basis are summarized in Table 6 while the individual test results for each Ko-CRS test are presented in Appendix D and Appendix E.

a/a	Test ID	Sample Depth [NAP_m]	Boring Location	Location	$\gamma_{wet}$ (kN/m <sup>3</sup> )	Testing stage	Lab	Type of soil
1	59	-3.44	MB-04	B	10	BV	D	P
2	63	-3.79	MB-04	B	10.4	BV	D	P
3	73	-5.94	MB-04	B	11.6	BV	D	C
4	81	-7.09	MB-04	B	11.4	BV	D	C
5	Ps2A	-2.38	B3	S	10.1	BV	D	P
6	Ps2B	-2.48	B3	S	10	BV	D	P
7	Ps3	-3.61	B3	S	13.1	BV	D	C
8	Ps4	-4.19	B3	S	16.3	BV	D	C
9	Ps2	-3.78	B5	S	10	AV	D	P
13	Ps2	-3.48	B7	S	11.1	AV	F	P
11	Ps2	-3.51	B6	S	9.8	AV	F	P
15	Ps2	-3.81	B8	S	9.6	AV	F	P
10	Ps4	-4.97	B5	S	14.6	AV	F	C
12	Ps4	-5.19	B6	S	14.2	AV	F	C
14	Ps4	-4.63	B7	S	15.3	AV	F	C
16	Ps4	-5.11	B8	S	14.8	AV	F	C
17	128	-4.32	MB-09	B	9.8	AV	D	P
20	126	-4.02	MB-09	B	9.9	AV	D	P
18	132	-6.07	MB-09	B	11	AV	D	C
19	134	-6.72	MB-09	B	11.6	AV	D	C

Tabel F.6 Summary of the Ko-CRS tests performed

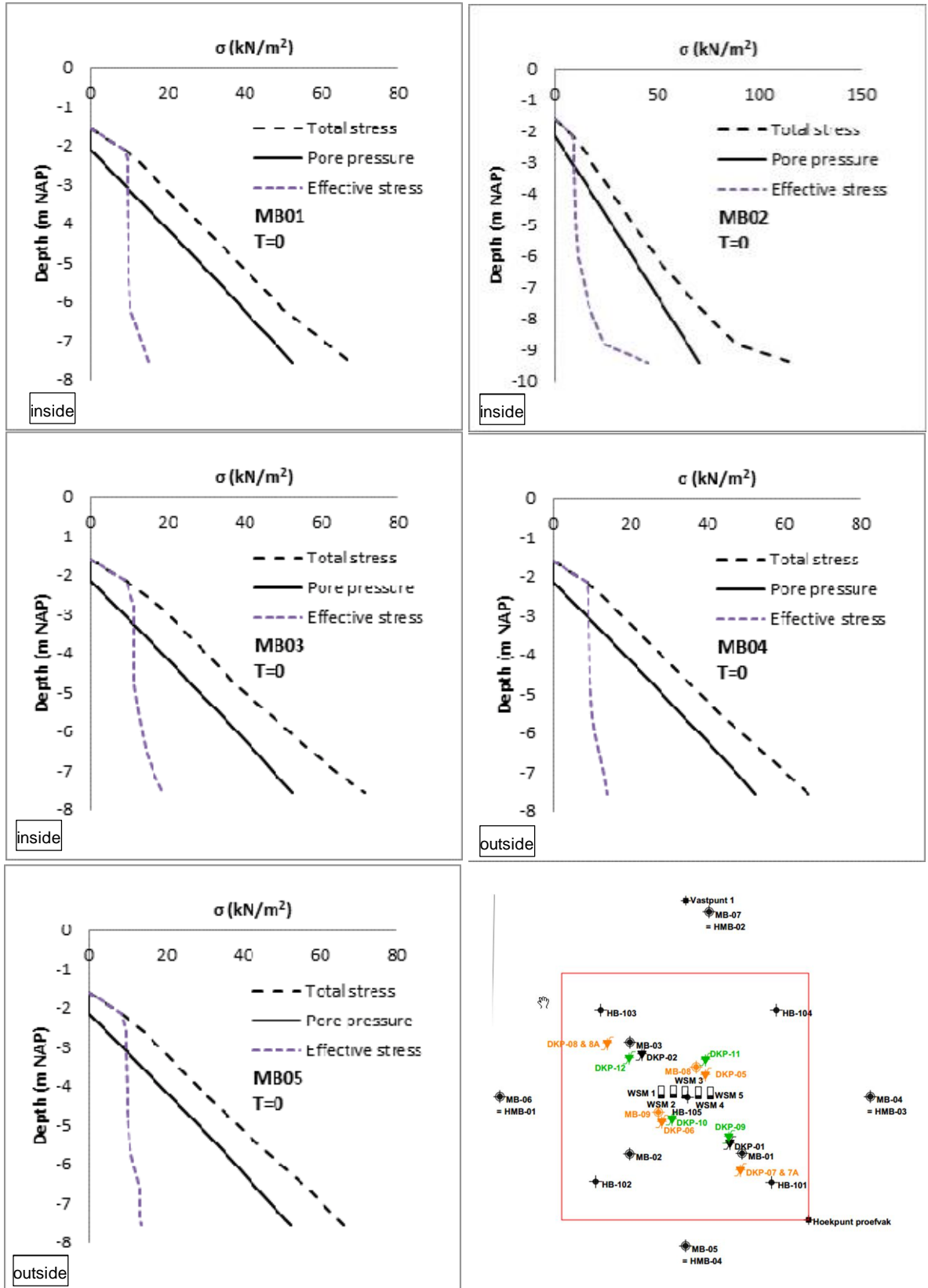
## F.2 In-situ stresses at different stages

The pore water pressures are found via interpolation of the groundwater table and the hydraulic heads measured at different depths. Figuur F.1 to Figuur F.6 show the pore pressure, total stress and effective stresses as calculated per field and per boring location for the following testing stages:

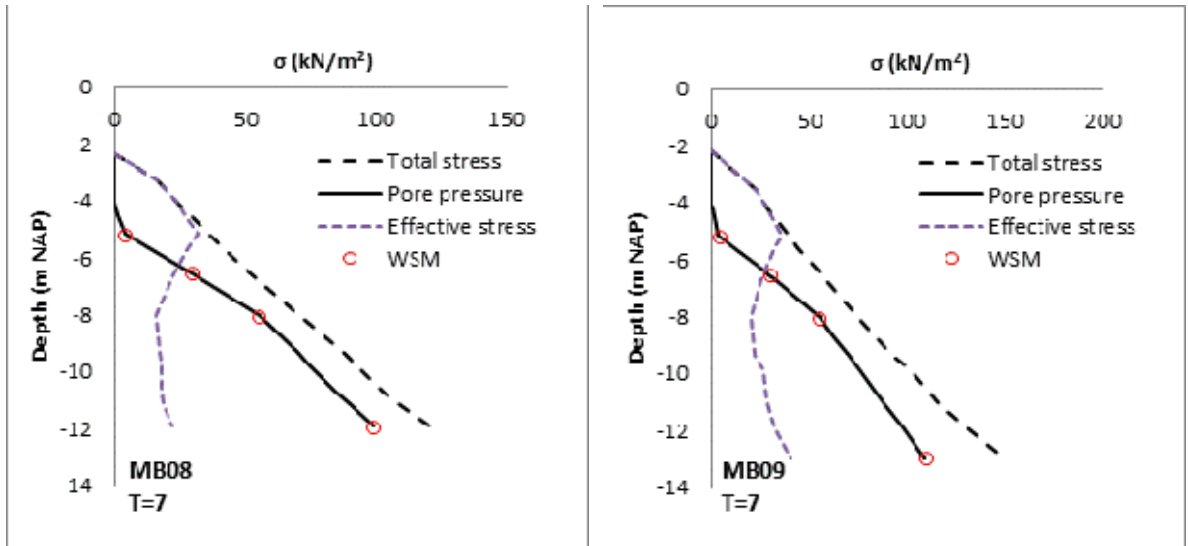
1. Before vacuum,  $T=0$ .
2. Immediately ( $\sim 7$  days) after the end of vacuum consolidation in the field,  $T=7$  and
3. 100 days after the end of vacuum consolidation in the field,  $T=100$ .

Figuur F.1 to Figuur F.3 present the graphs for Bleskensgraaf location while Figuur F.4 to Figuur F.6 present the graphs for Schardam location. The results from water pressure meters were used to estimate the pore pressure distribution in stage 2 and 3.

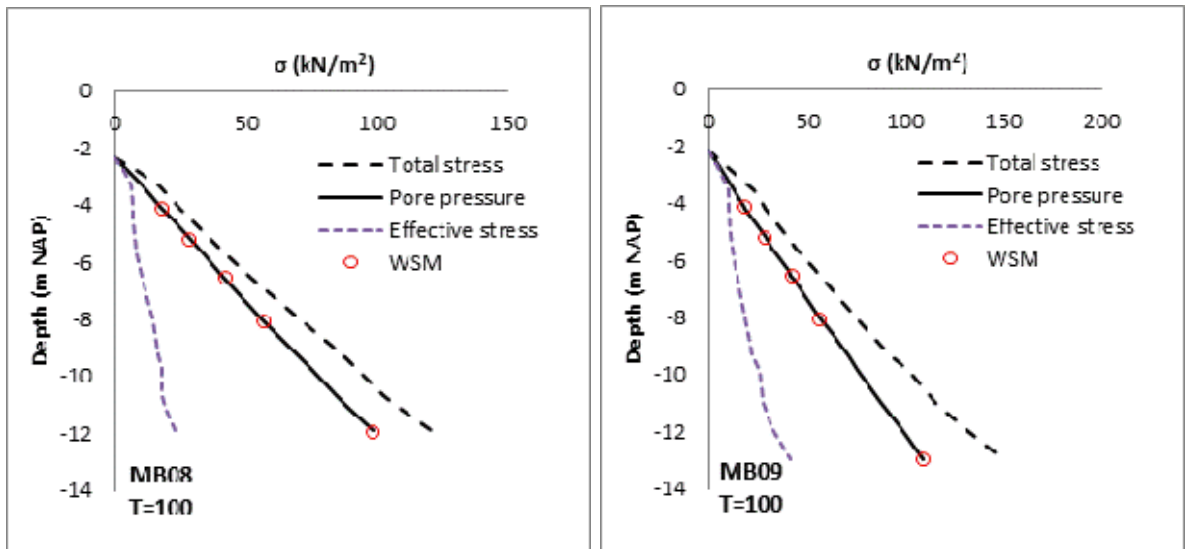
- Comparing  $T=7$  to  $T=0$ , the in situ effective stresses show higher. This is to be expected, as adaptation from the under pressure to the steady state conditions will be on-going.
- Comparing  $T=100$  to  $T=0$ , the in situ effective stresses at Bleskensgraaf have arrived approximately at their final steady state values.
- Comparing  $T=100$  to  $T=0$  for Schardam shows however that in situ stresses are still higher. Apparently the adaptation of pore pressures to the final steady state conditions is not yet completed.



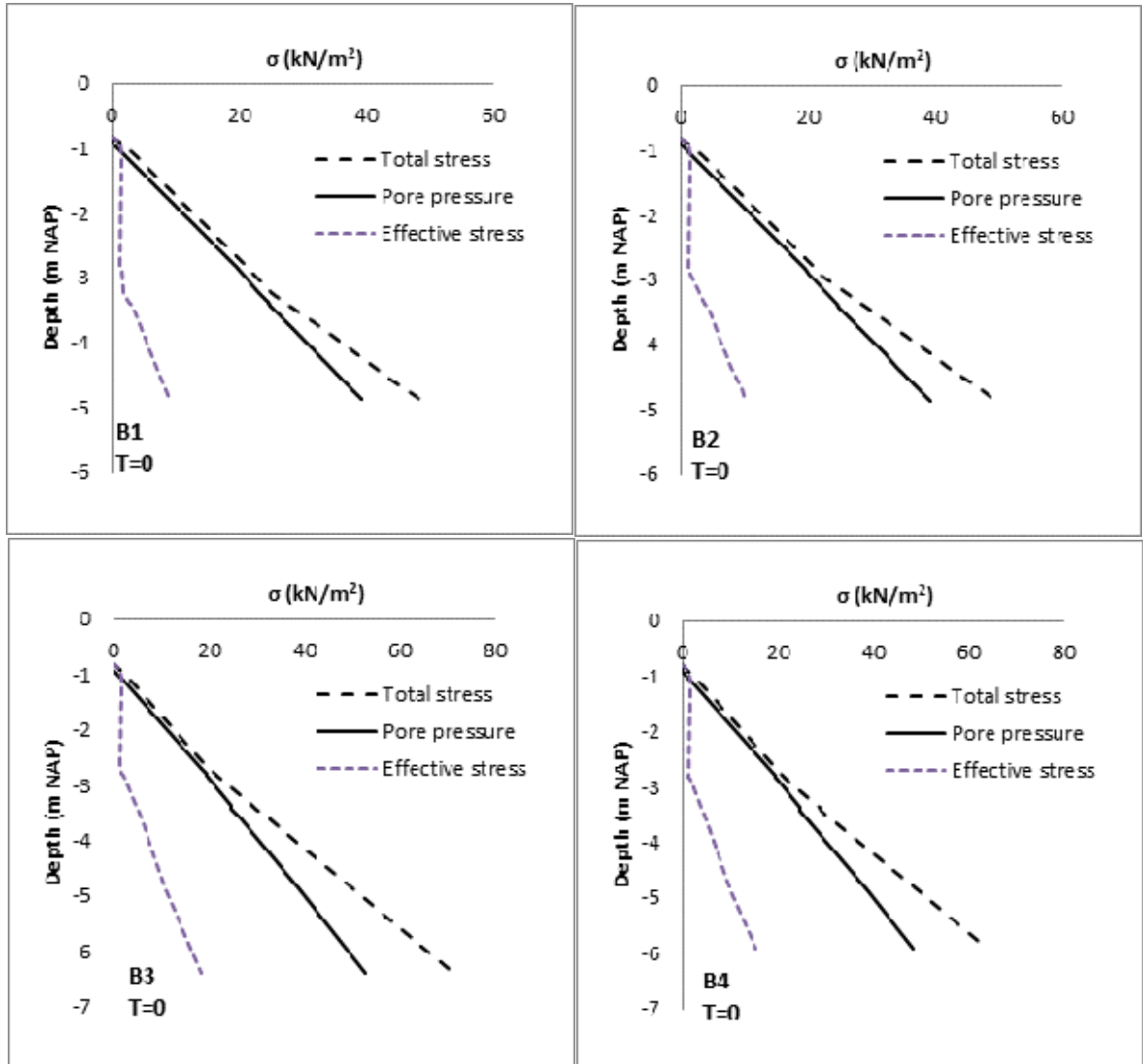
Figuur F.1 Bleskensgraaf. Computation of in situ effective stress level before the start of vacuum,  $T=0$



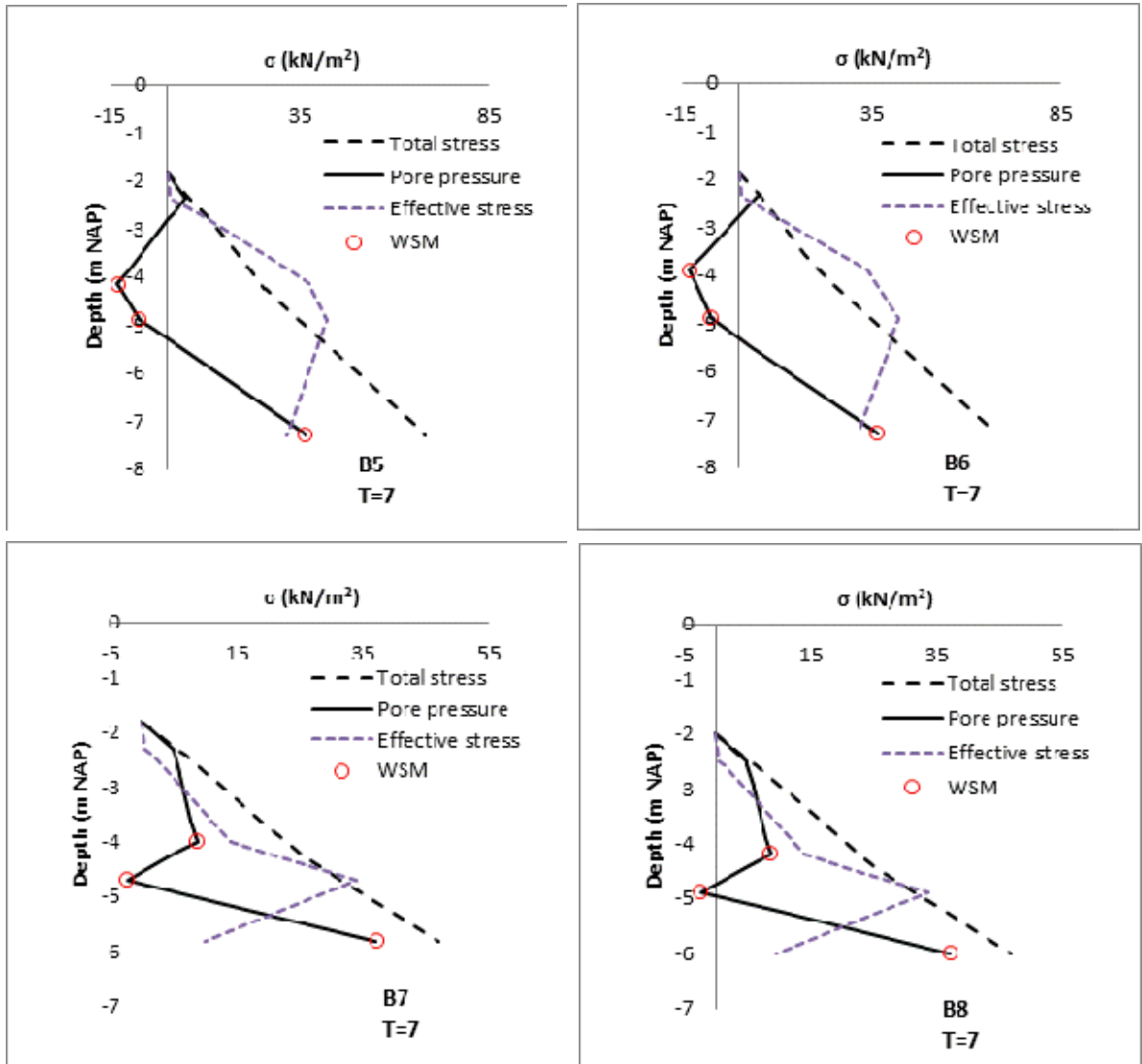
Figuur F.2 Bleskensgraaf. Computation of in situ effective stress level directly after the end of vacuum, T=7



Figuur F.3 Bleskensgraaf. Computation of in situ effective stress level 100 days after the end of vacuum, T=100

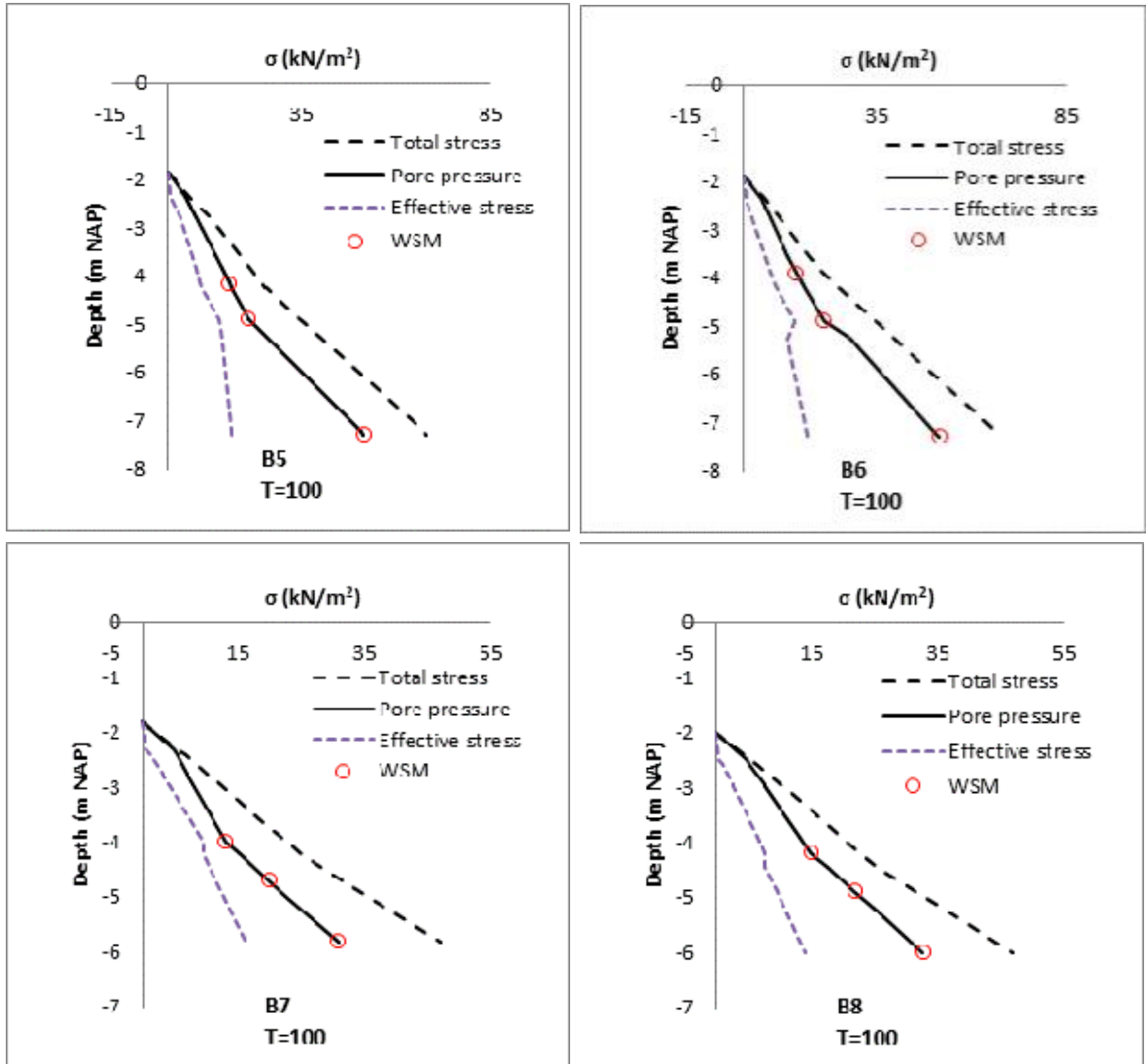


Figuur F.4 Schardam. Computation of in situ effective stress level before the start of vacuum, T=0



Figuur F.5 Schardam. Computation of in situ effective stress level 7 days after the end of vacuum, T=7





Figuur F.6 Schardam. Computation of in situ effective stress level 100 days after vacuum, T=100

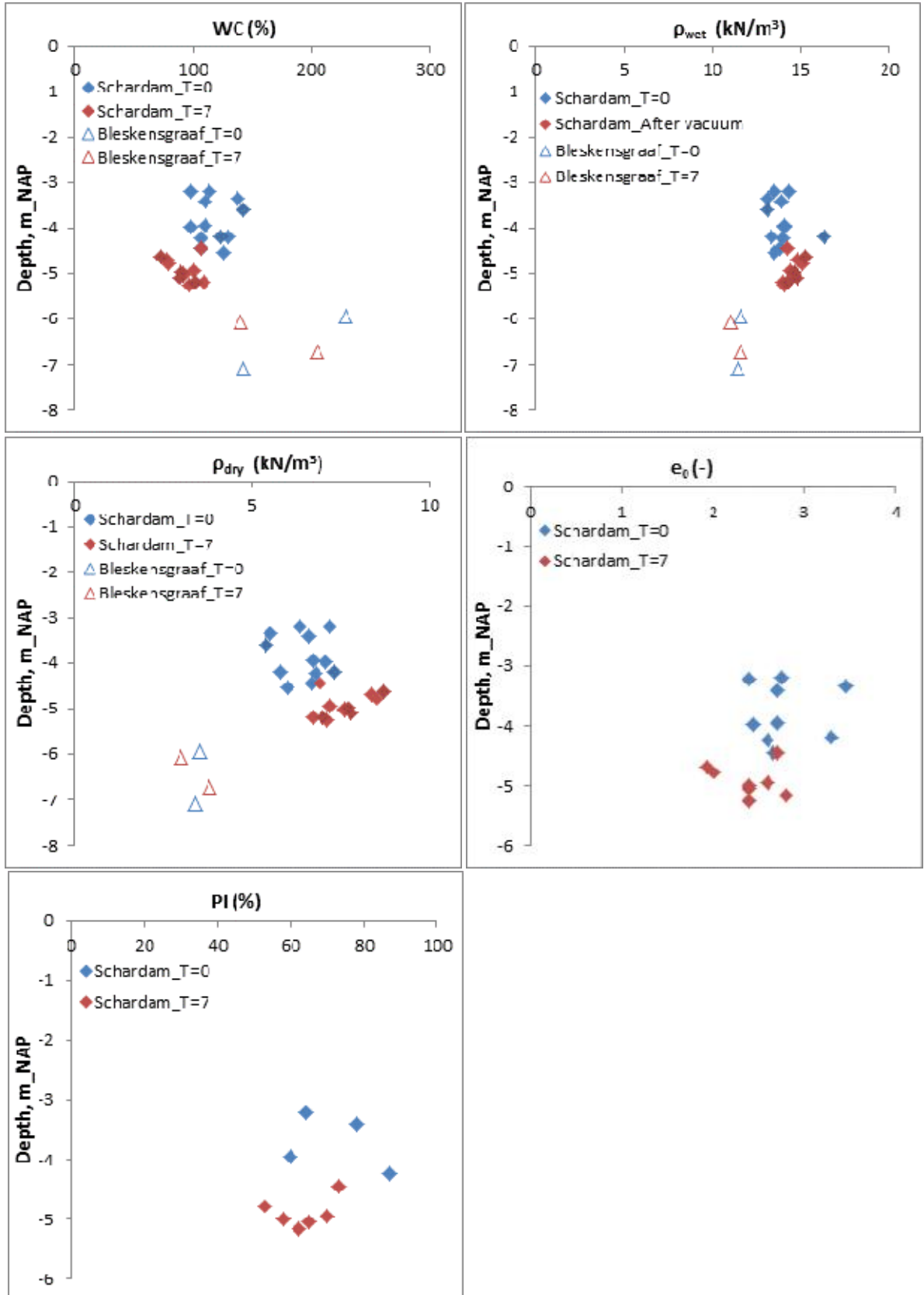
### **F.3 Classification parameters**

Classification parameters like density, dry density, particle density, void ratio water content and Atterberg limits were determined to get a better understanding of the tested materials. Figuur F.7, Figuur F.8 and Figuur F.9 show the depth profiles of the above classification parameters, when these are available, for the case of clay, peat and clayish peat samples tested respectively. The terminology 'clay' or 'peat' refers to the geological description of the samples as assessed from in situ tests and from visual observation of the material in the lab. For the Bleskensgraaf location, the material tested was classified as peat and CAU tests were performed to evaluate its undrained behaviour. Nevertheless, the classification test results for this type of encountered soil (refer to Fig. 9) reveal a more clayish structure as this is reflected in the low WC and high dry density values.

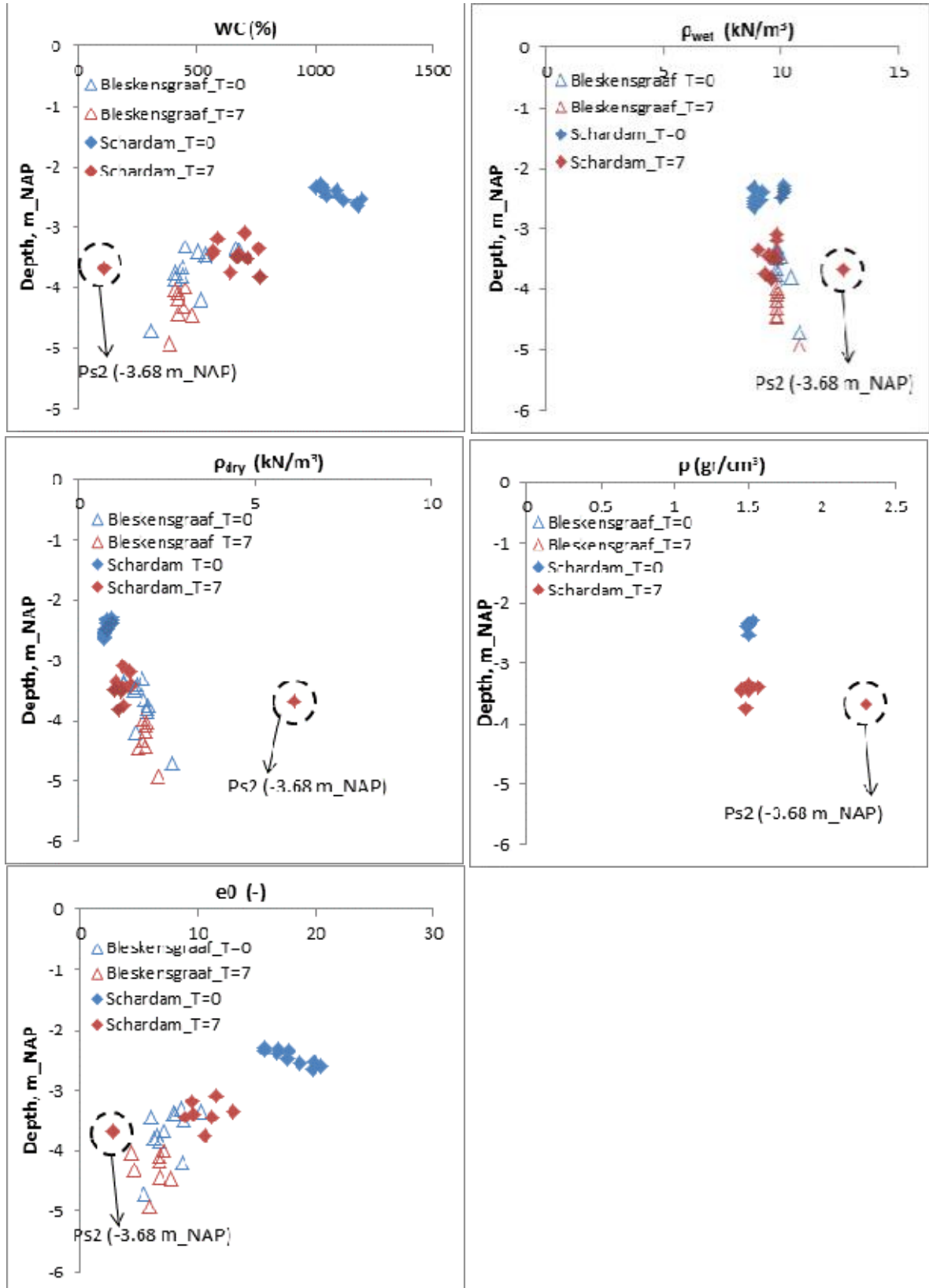
It should be noted that in all of the above figures the classification parameters were determined in both testing stages; before the start and after the end of the vacuum.

#### **Notes:**

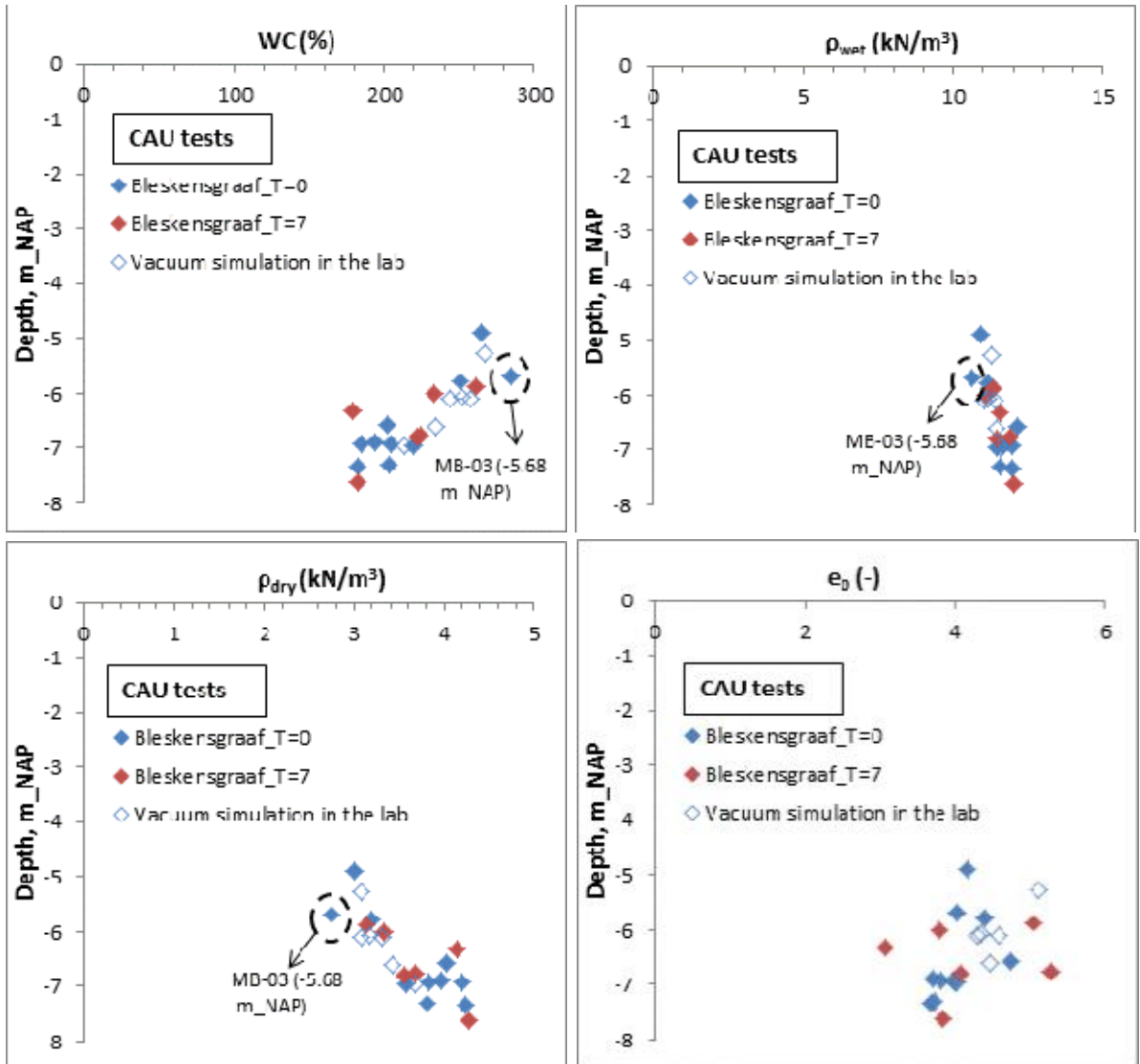
For the peat samples of Bleskensgraaf location a reduction in the water content and void ratio values before the start and after the end of vacuum is observed (expected trend). This is not evident in Schardam location. As can be seen from the graphs, this observation can be attributed to the fact that less settlements took place in Schardam compare to Bleskensgraaf location. It should also be pointed out that the impact of vacuum consolidation on the classification parameters is not so pronounced for the deeper clay layer in Schardam location. The tests points in the above graphs indicated with dashed circle black lines will be discussed in detail in following sections of this annex.



Figuur F.7 Depth profile of classification parameters for samples classified as 'clay'



Figuur F.8 Depth profiles classification parameters for samples classified as 'peat'



Figuur F.9 Depth profiles of classification parameters for samples classified as 'peat' which exhibit a more clayish peat structure

#### F.4 SHANSEP parameter S

The undrained shear strength values as derived from each tested sample are summarized in Tables 1,2,3 and 4,5 for the case of the CAU and DSS tests respectively. Values of the undrained peak shear strength and undrained shear strength at large strains (25% axial strain for the CAU tests and 40% shear strain for the DSS tests) are shown.

It should be mentioned that for the majority of the CAU tests, the results are available up to maximum shear strains that can be less than 25%. This can be seen per sample basis in Tables 1, 2 and 3.

For the samples tested under normally consolidated conditions (OCR=1), the undrained shear strength ratio S has been calculated at the maximum applied axial strain for the case of CAU tests and at 40% shear strain for the case of DSS tests. For normally consolidated conditions the undrained shear strength ratio, S, is defined as:

$$S = \frac{s_u}{\sigma'_v} \Big|_{\sigma'_v = \sigma'_{vy}} \quad (\text{F.1})$$

- S = Schuifsterkte ratio.
- $s_u$  = Undrained shear strength in kPa.
- $\sigma'_v$  = Effective vertical stress in kPa.
- $\sigma'_{vy}$  = Preconsolidation stress in kPa.

An overview of the calculated S ratio values as these were derived for the tested peat samples is given in Figuur F.10 and Figuur F.11 for the case of DSS and CAU tests respectively. A similar overview is provided in Figuur F.12 for the S values as these were derived from CAU tests on clay samples. In these figures the S ratio values are plotted against the sample's volumetric weight. For comparison purposes a distinction of the data per sampling location (Schardam or Bleskensgraaf) is also provided in these figures.

For the CAU tests that were terminated before reaching a level of 25% axial strain the S ratio value was calculated at the maximum achievable axial strain. The level of this strain is noted in parenthesis in Fig. 12.

For the analysis of the data to follow the average and standard deviation values are calculated according to the equations:

$$x_{gem} = \frac{\sum_{x=1}^{x=n} (x_i \dots x_n)}{n} \quad (\text{F.2})$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{x=i}^{x=n} (x_i - x_{gem})^2}{n-1}} \quad (\text{F.3})$$

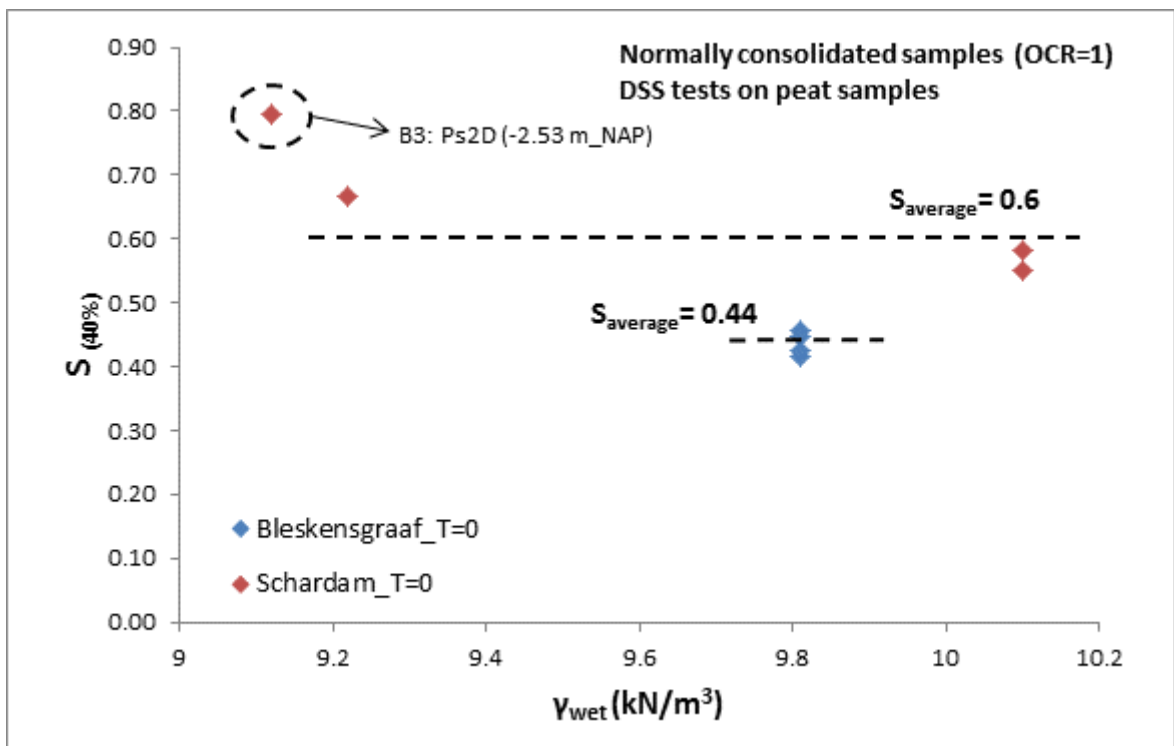
Where:

- $x_{gem}$  is the average value of parameter  $x$ .
- $n$  is the number of tests.

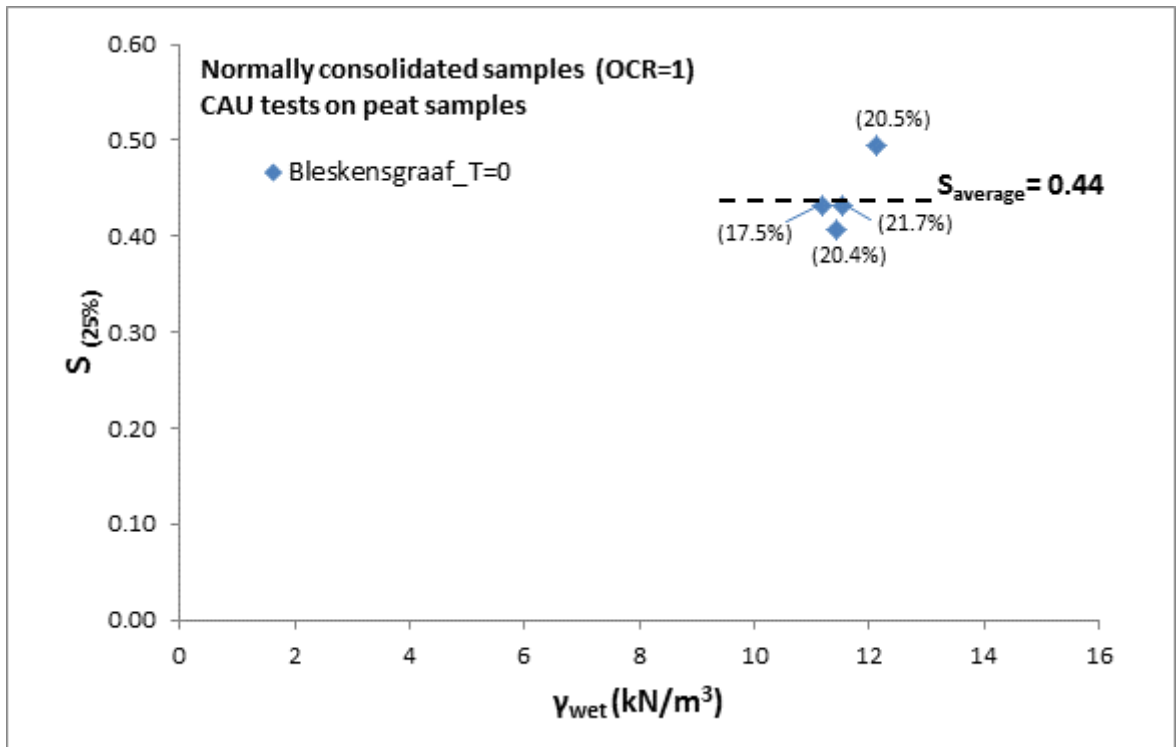
- $\sigma_x$  is the standard variation of parameter  $x$ .

For a normal distribution of the calculated average value of the shear strength ratio,  $S_{average}$ , and the standard deviation,  $\sigma$ , per type of test, type of soil and field location are summarized in Tabel F.7.

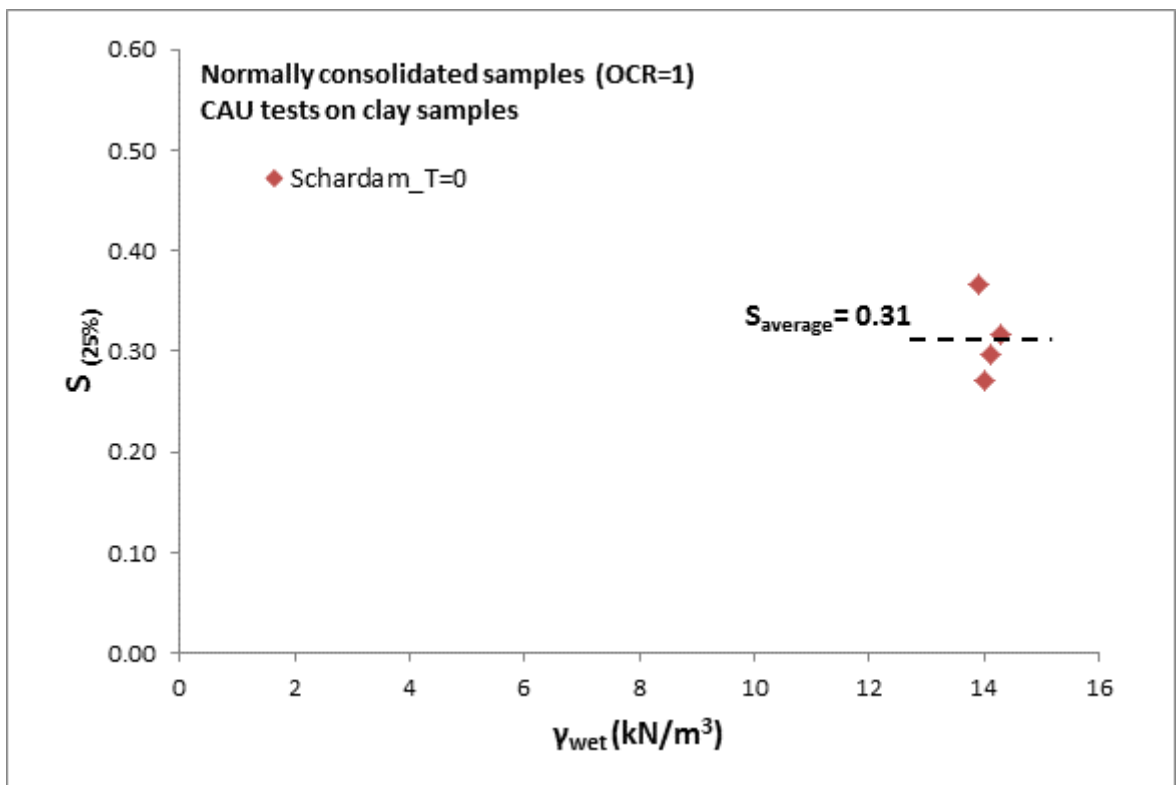
It should be noted though that the S ratio value of the sample B3: Ps2D at -2.53 m NAP is discarded from the analysis of data since this value is considered unjustifiably too high.



Figuur F.10 S ratio versus volumetric weight; DSS tests on peat samples



Figuur F.11 S ratio versus volumetric weight; CAU tests on peat samples



Figuur F.12 S ratio versus volumetric weight; CAU tests on clay samples



Location	Type of test	Type of soil	$S_{average}$	$\sigma$
Bleskens.	DSS	Peat	0.44	0.016
Bleskens.	CAU	Peat	0.44	0.032
Schardam	DSS	Peat	0.6	0.05
Schardam	CAU	Clay	0.31	0.035

Tabel F.7 Summary of calculated  $S_{average}$  and  $\sigma$  values

### F.5 SHANSEP parameter $m$

The parameter  $m$  was calculated from Ko-CRS test results according to the equation:

$$m = \frac{b - a}{b} \quad (F.4)$$

Where:  $a$  and  $b$  are the stiffness parameters of the abc - isotachen model.

The isotachen model parameters were calculated from plots of the logarithm of the effective vertical stress,  $\sigma_v'$ , as a function of the natural strain,  $\epsilon^H$  (the slope of the primary loading line gives the value of the modified compression index,  $b$ , and the slope of the unloading lines gives the modified index  $a$ ). The values of OCR were calculated based on the values of pre-consolidation pressure estimated in accordance with the NEN procedure method. OCR is defined as the ratio of pre-consolidation pressure to the vertical in situ effective stress.

An overview of the calculated  $m$  parameter values is provided in Figuur F.13 and Figuur F.14 for the case of peat and clay samples respectively. As can be seen from these figures, the  $m$  values under consideration appear to be independent of the testing stage (before the start or after the end of vacuum).

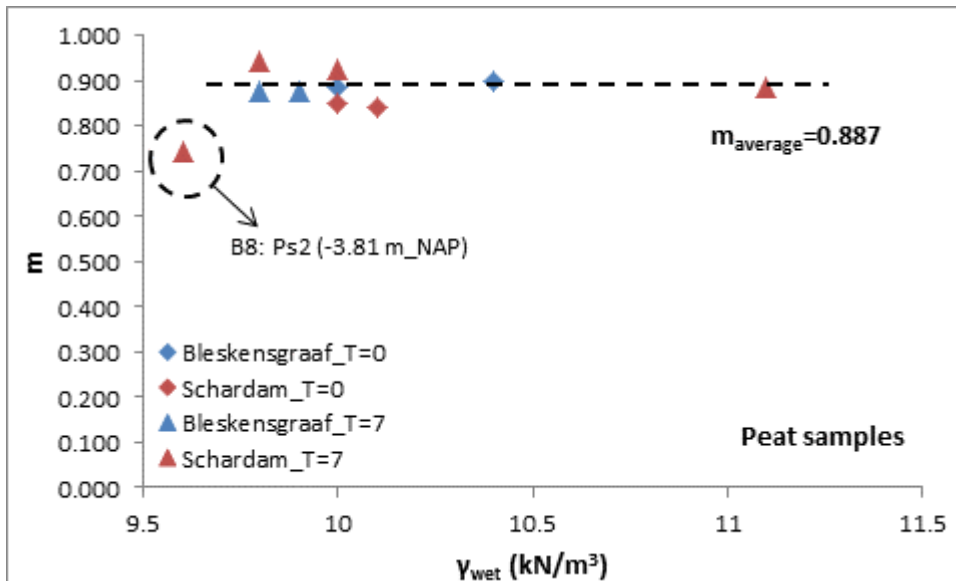
For the peat samples, and for a normal distribution of the data:

- $\mu=0.887$  ,  $\sigma = 0.031$

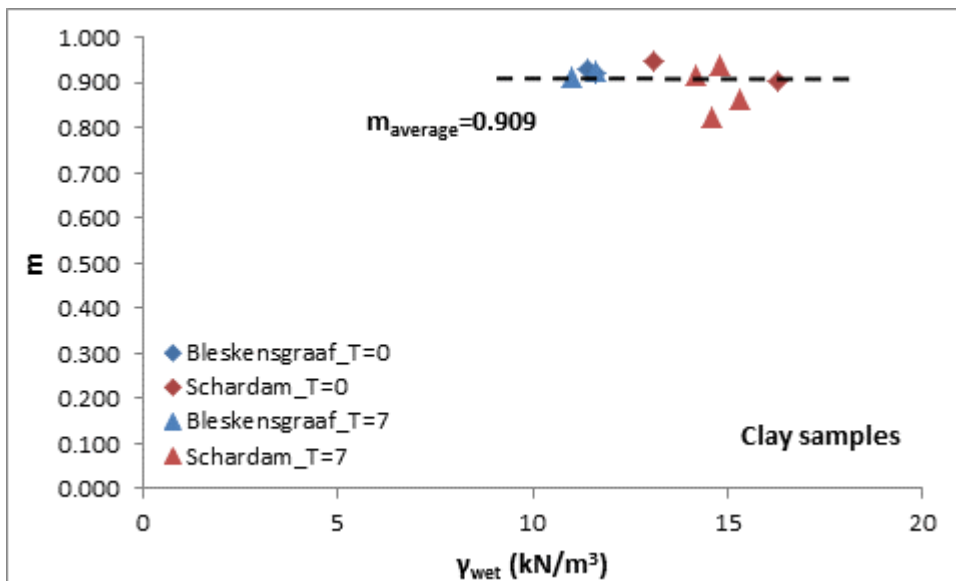
For the clay samples, and for a normal distribution of the data:

- $\mu=0.909$  ,  $\sigma = 0.036$

It should be noted that for test B8: Ps2 at -3.81 m NAP an  $m$  value of 0.742 is calculated. This value is too low and outside the expected range of values for the encountered soil conditions and has thus been excluded from the analysis of the data.



Figuur F.13  $m$  values against volumetric weight for peat samples



Figuur F.14  $m$  values against volumetric weight for clay samples

## G Correlation between CPT data and undrained strength

This annex describes an attempt to determine the assumed linear correlation coefficient  $N$  between undrained strength and CPT, through calibration of the lab tests to the CPT data.

The undrained shear strength,  $s_u$  is in general estimated from CPT data by using the following correlation with the net cone resistance ( $q_{net}$ ):

$$s_u = \frac{q_{net}}{N_{kt}}$$

$$q_{net} = q_t - \sigma_{vo}$$

$$q_t = q_c + (1 - \alpha) \cdot u_2$$

Where:

- $N_{kt}$  = empirical correlation factor, generally referred to as the cone factor.
- $\sigma_{vo}$  is the total vertical stress.
- $q_t$  is the corrected tip resistance.
- $q_c$  is the CPT tip resistance.
- $u_2$  is the pore pressure measured behind the cone shoulder ( $u_2$  position) and
- $\alpha$  is the cone's alpha factor.

The undrained shear strength,  $s_u$ , for the case of ball penetrometer data can be estimated through the following correlation:

$$s_u = \frac{q_b}{N_b}$$

Where:

- $q_b$  is the ball penetrometer tip resistance and
- $N_b$  = empirical correlation factor, generally referred to as the ball penetrometer factor.

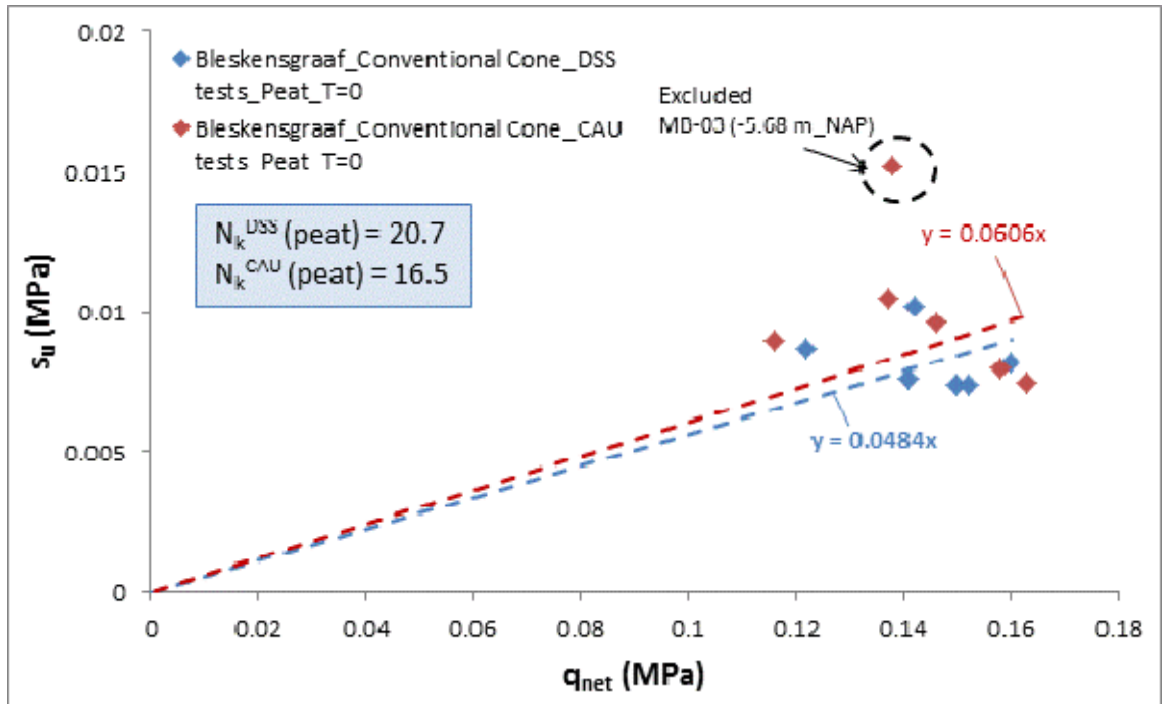
For deriving the  $N_{kt}/N_b$  factors, the undrained shear strength values as defined experimentally from the DSS and CAU tests were correlated with the corresponding  $q_{net}/q_b$  values from cone penetration/ball penetrometer tests at similar depths.

The values of  $N_{kt}$  and  $N_b$  were assessed for each type of encountered soil (clay and peat). Figuur G.1 and Figuur G.2 present the correlation of DSS/CAU data with in situ tests for Bleskensgraaf and Schardam location respectively before vacuum consolidation takes place.

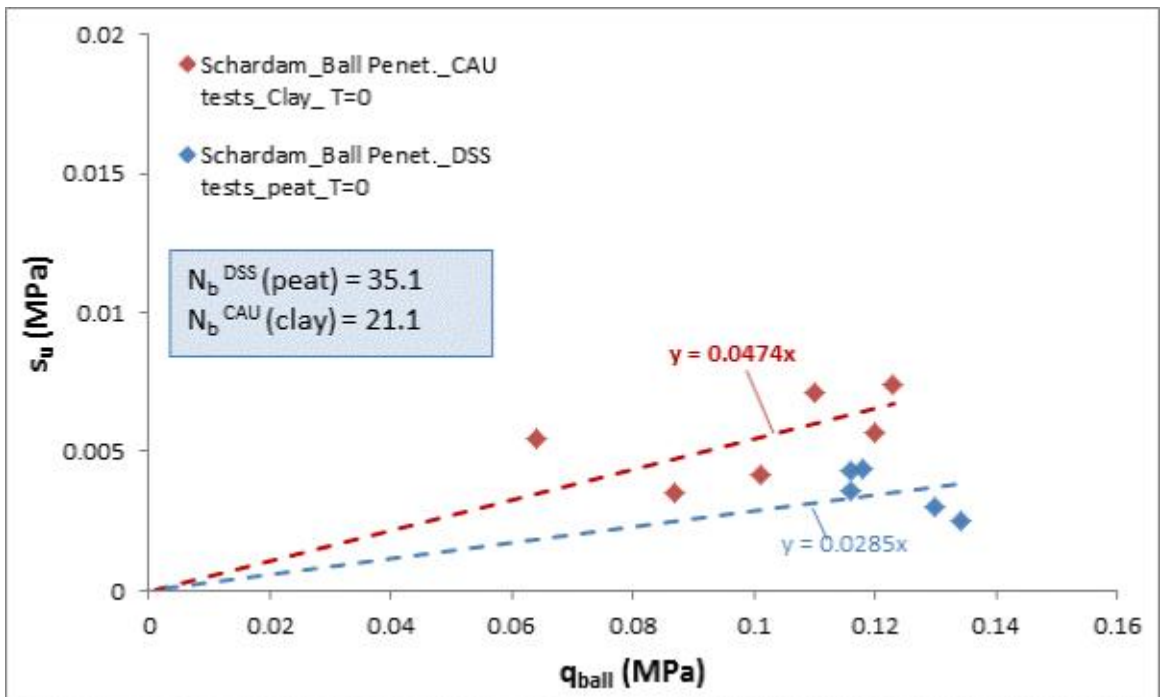
It should be noted that the location of the sampling boreholes within a horizontal distance in X or Y direction doesn't exceed the 2 m.

**Notes:**

- In Figuur G.1 for the assessment of the  $N_k$  value the test MB-03 at -5.68 m NAP has been excluded. As can be seen from the classification tests (annex F.3) the results for this sample slightly deviate from the bunch of data for the same type of material. This could be an indication of a sample potentially having a different origin.



Figuur G.1 Bleskensgraaf location: Undrained shear strength versus net cone resistance\_Data before vacuum, T=0



Figuur G.2 Schardam location: Undrained shear strength versus net cone resistance\_Data before vacuum, T=0

In Figuur G.3 and Figuur G.4 an overview of the depth location of the DSS/CAU tests in relation to the  $q_{net}/q_{ball}$  profile from in situ tests is provided for Bleskensgraaf and Schardam location respectively. To facilitate a more realistic correlation among the undrained shear strength and the  $q_{net}/q_{ball}$  data, the latter values were altered when the testing depth of the samples falls i.e. on a spike of the  $q_{net}/q_{ball}$  profile (refer to inset graph notes Figuur G.3 and Figuur G.4).

A direct comparison of the  $N_k/N_b$  values among the CAU/DSS - in situ test results before and after the application of vacuum in the field is provided for Bleskensgraaf location in Figuur G.5 and Figuur G.6 for the case of DSS and CAU tests respectively. Similar figures are produced for Schardam location (refer to Figuur G.7 and Figuur G.8).

Notes:

- In Figuur G.5 the observed spreading of the  $q_{net}$  data after vacuum consolidation could be an indication of vacuum being more effectively applied in specific zones i.e. due to the heterogeneity of the peat layer; variance of the coefficient of lateral permeability.
- In Figuur G.6 the  $q_{net}$  values after vacuum are lower than before vacuum. The  $q_{net}$  values in this graph correspond to testing depths of -6 to -7 m NAP. At this depth range the effectiveness of vacuum appears to be limited. This could be attributed to the fact that the tip of the vacuum consolidation channel (?) reaches only up to the depth of around -7 m. It is possible that vacuum is not effectively applied at depths close to the tip.
- In Figuur G.7 the test B8:Ps2 at -3.68 m NAP has been excluded from the analysis of the data. As can be seen from the classification test results (refer to Fig. 8) this sample appear to have a more clayish structure which could explain its deviation observed in Fig. 23.

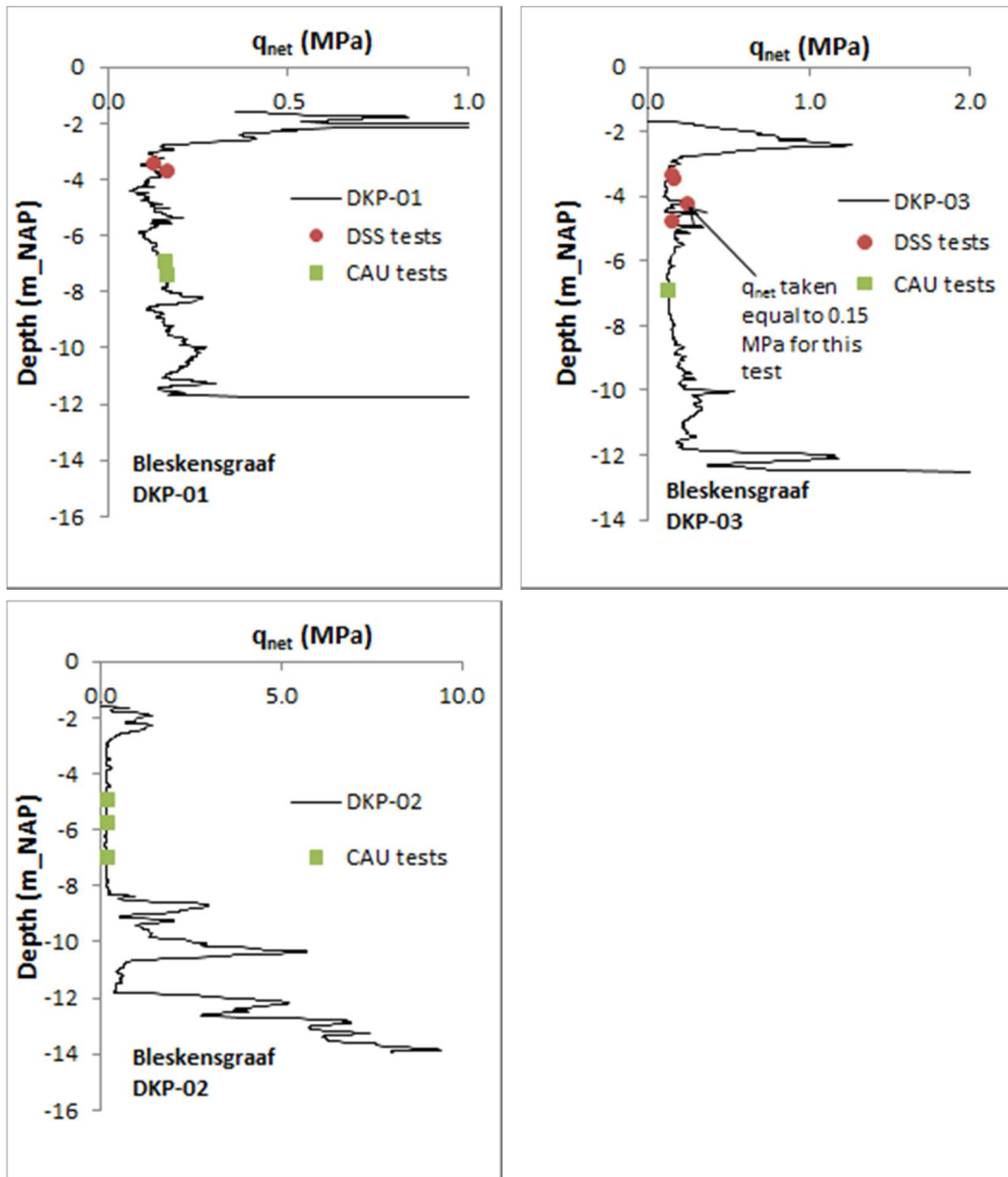
One of the uncertainties that could occur in the testing of samples after the application of vacuum consolidation is related to the performance of tests at the actual in situ effective stress level conditions. Information on the development of water pressure is obtained from piezometers at specific depths. For other depth intervals the development of pore water pressure is calculated by interpolation. This might yield some inconsistencies in regards to the sample's calculated effective stress level. The sample's computed stress level in relation to the location of the piezometers is indicated in Figuur G.9 and Figuur G.10 for the case of Bleskensgraaf and Schardam location respectively.

An overview of the depth location of the DSS/CAU tests in relevance to the  $q_{net}$  profile for the data after vacuum consolidation is provided in Figuur G.11 and Figuur G.12 for Bleskensgraaf and Schardam location respectively.

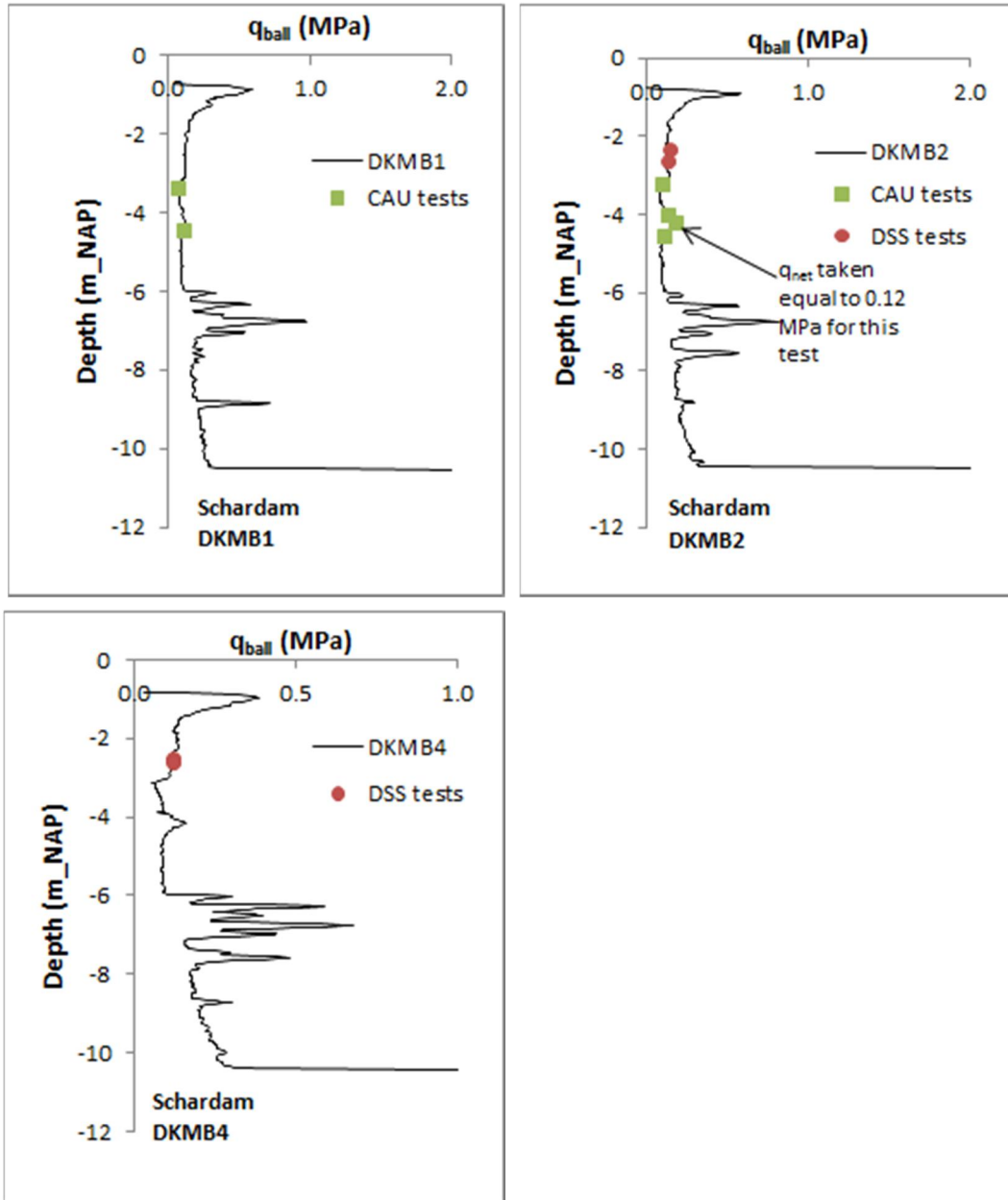
A summary of the  $N_k/N_b$  values as assessed in the current study per testing stage and per type of soil is provided in Table 7. Table 8 shows the  $N_k/N_b$  values used in further analysis of the data. In regards to the values presented in this table it should be mentioned that:

- An  $N_b^{DSS}$  value of 19.5 is considered for the peat layers. This value has been derived in a previous study (Nkt\_Reference)
- An  $N_b^{CAU}$  value of 15.2 is considered for the clay layers. This value has also been derived in a previous study (Nkt\_Reference)
- An  $N_k^{DSS}$  and an  $N_k^{CAU}$  value of 20.7 and 16.5 respectively were considered. These values were estimated in Figuur G.5 and Figuur G.6 from the test data prior to the application of vacuum. The corresponding values after vacuum were not taken into account due to the high degree of uncertainty related to their calculation (calculation of

effective stress level via interpolation of water pressure among WSM measurement points; heterogeneity of soil which might influences the effectiveness of vacuum).

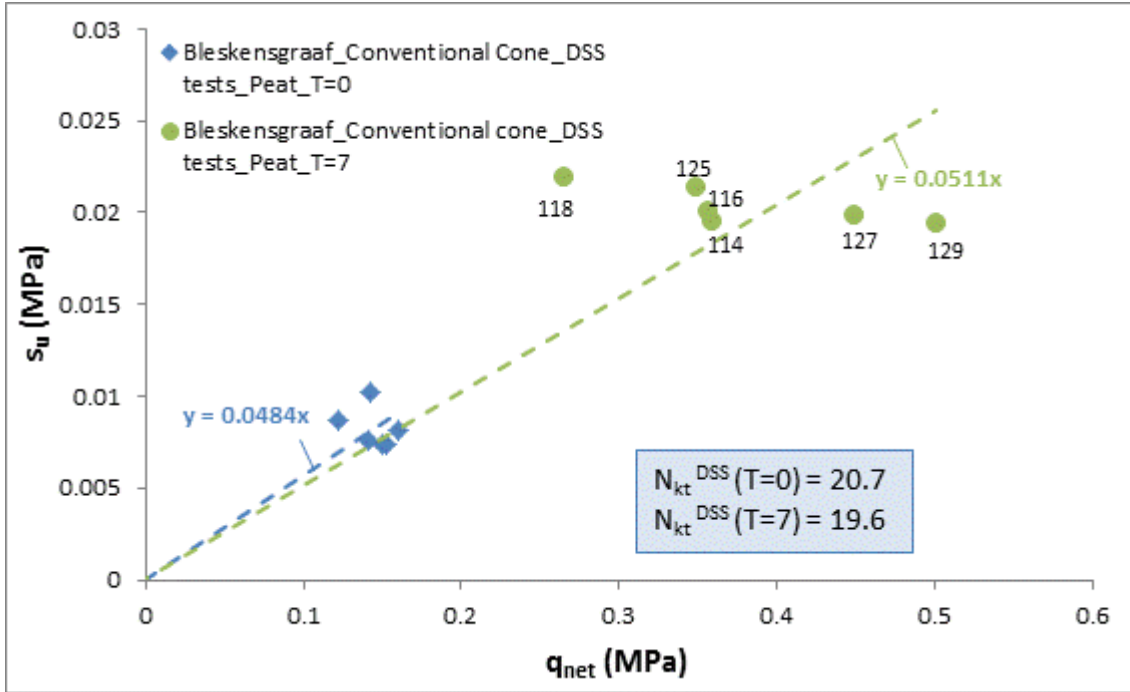


Figuur G.3 Bleskensgraaf location: In depth location of the CAU/DSS tests in relevance to the  $q_{net}$  profile\_Data before vacuum consolidation in the field,  $T=0$

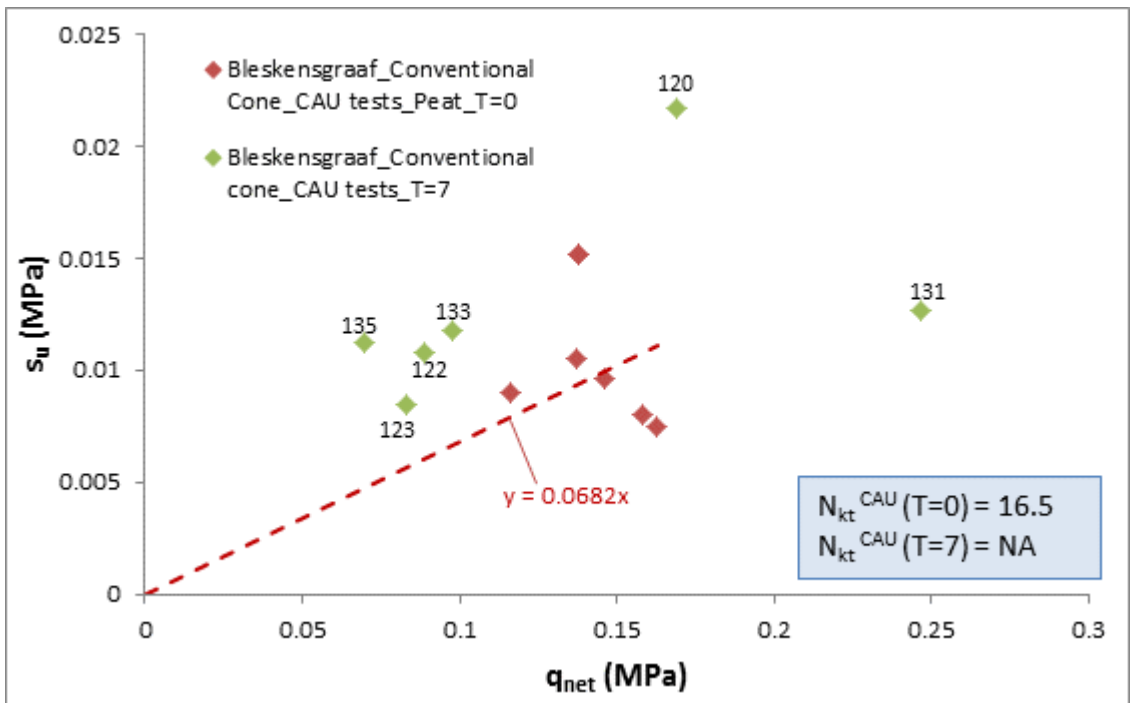


Figuur G.4 Schardam location: In depth location of the CAU/DSS tests in relevance to the  $q_{net}$  profile\_Data before vacuum consolidation in the field,  $T=0$

1220719-000-GEO-0010, Versie 2, 10 augustus 2017, definitief

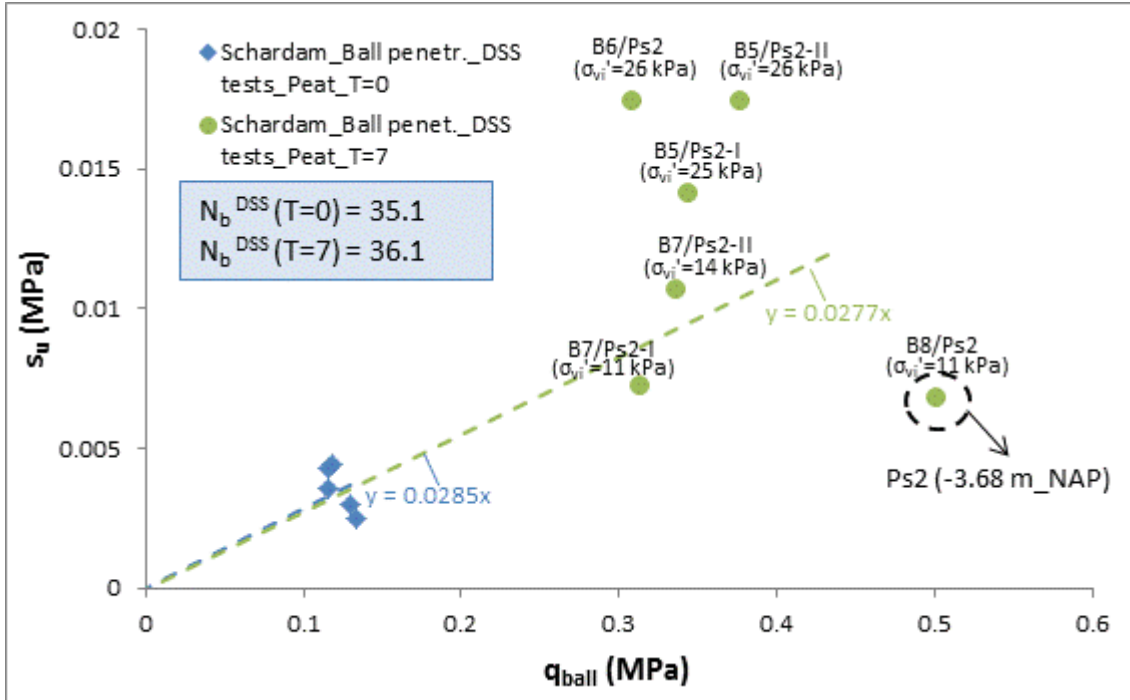


Figuur G.5 Bleskensgraaf location: Undrained shear strength versus net cone resistance before the start of vacuum (T=0) and directly after the end of vacuum (T=7); DSS tests

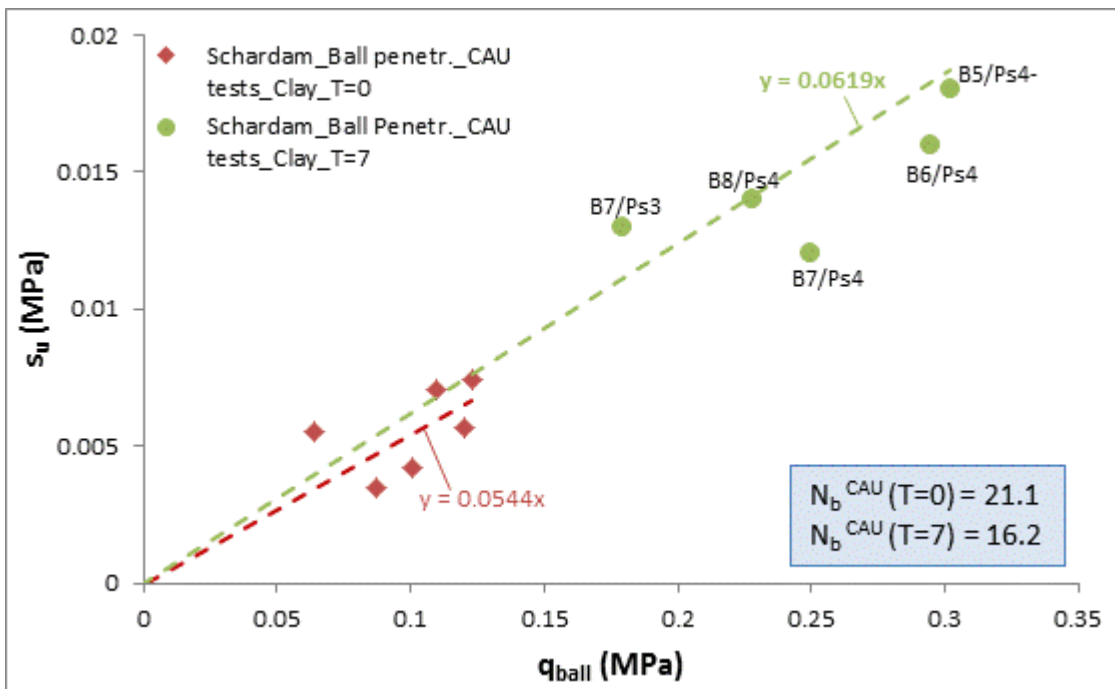


Figuur G.6 Bleskensgraaf location: Undrained shear strength versus net cone resistance before the start of vacuum (T=0) and directly after the end of vacuum (T=7); CAU tests

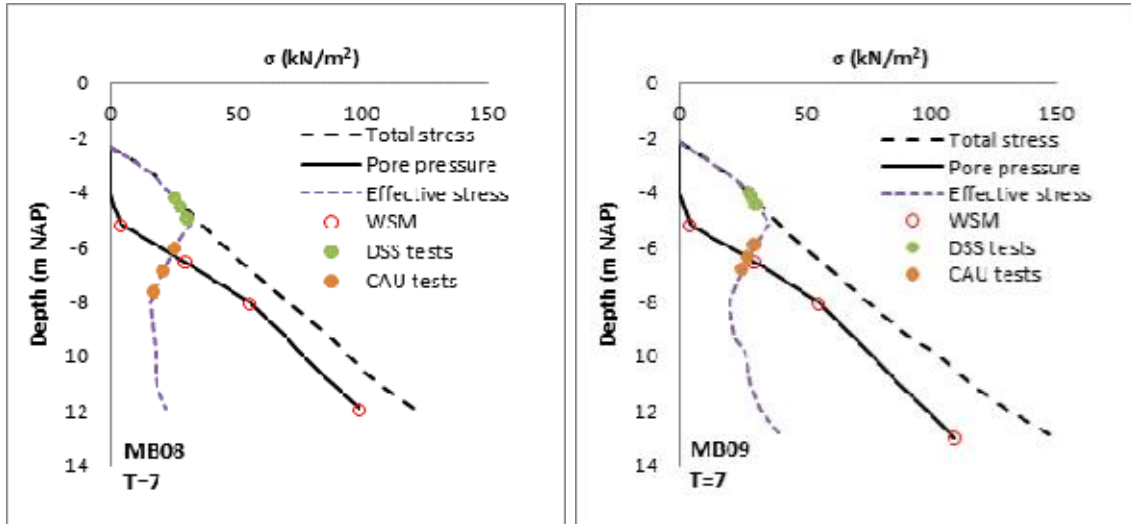




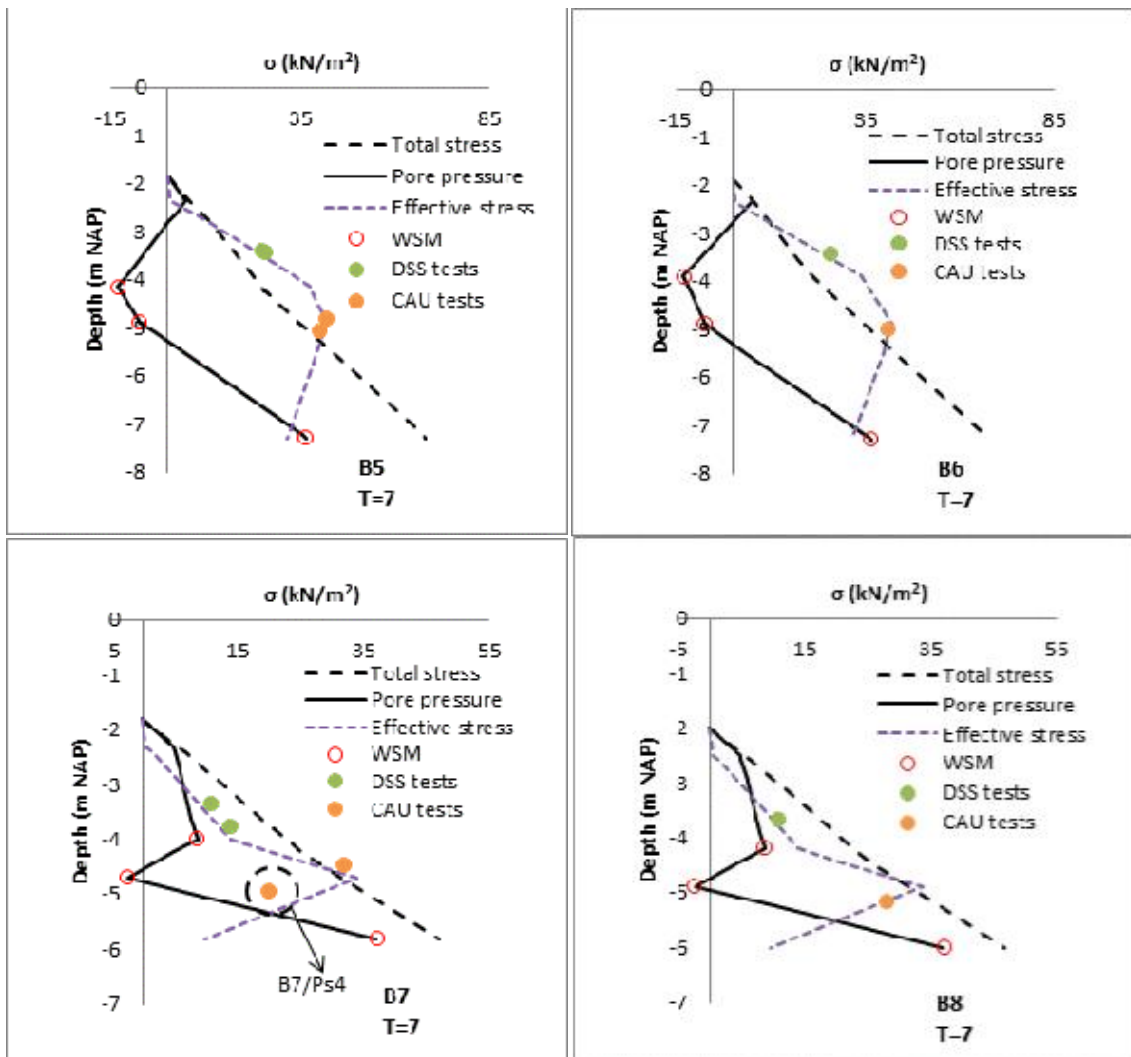
Figuur G.7 Schardam location: Undrained shear strength versus net cone resistance before the start of vacuum (T=0) and directly after the end of vacuum (T=7); DSS tests



Figuur G.8 Schardam location: Undrained shear strength versus net cone resistance before the start of vacuum (T=0) and directly after the end of vacuum (T=7); CAU tests

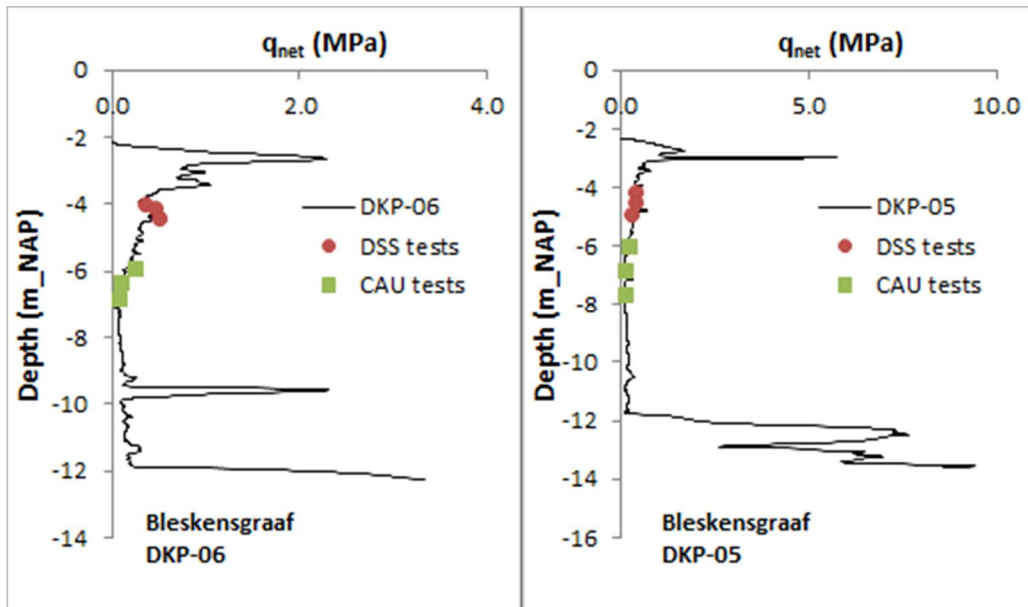


Figuur G.9 Bleskensgraaf location: In depth distribution of the CAU/DSS tests in relevance to the effective stress profile directly after the end of vacuum, T=7

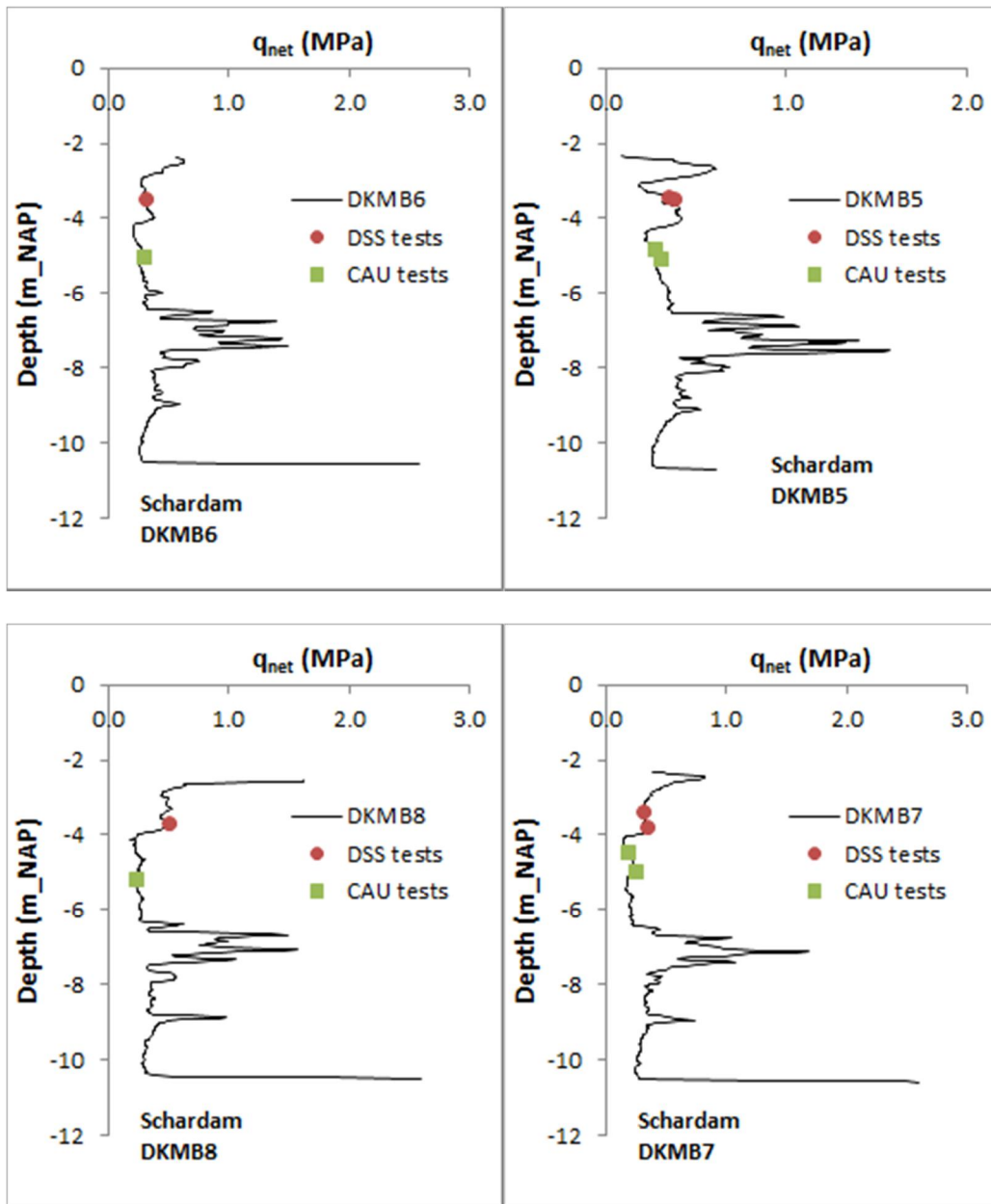


1220719-000-GEO-0010, Versie 2, 10 augustus 2017, definitief

Figuur G.10 Schardam location: In depth distribution of the CAU/DSS tests in relevance to the effective stress profile directly after the end of vacuum,  $T=7$



Figuur G.11 Bleskensgraaf location: In depth location of the CAU/DSS tests in relevance to the  $q_{net}$  profile directly after the end of vacuum,  $T=7$



Figuur G.12 Schardam location: In depth location of the CAU/DSS tests in relevance to the  $q_{net}$  profile 7 days after the end of vacuum,  $T=7$

$N_b/N_k$	Peat		Clay	
	Before vacuum	After vacuum	Before vacuum	After vacuum
$N_b^{DSS}$	35.1	36.1	-	-
$N_b^{CAU}$	-	-	21.1	16.2
$N_k^{DSS}$	20.7	19.6	-	-
$N_k^{CAU}$	16.5	NA	-	-

Tabel G.1 Summary of  $N_k/N_b$  values as derived from individual cases

1220719-000-GEO-0010, Versie 2, 10 augustus 2017, definitief

$N_b/N_k$	Peat	Clay
$N_b^{DSS}$	19.5	
$N_b^{CAU}$	-	15.2
$N_k^{DSS}$	20.7	-
$N_k^{CAU}$	16.5	-

Tabel G.2  $N_k/N_b$  values from the previous study (Fugro, 2015)