

POV-M Parameterbepaling EEM

POV

MACRO
STABILITEIT

Auteur: ir. M. Post en M.S. Lujendijk M.Sc.

Datum: maart 2018

Versie 1





Definitief

Project 11201294-002
Pagina's 31

Samenvatting

Het onderzoeksprogramma POV-Macrostablieit, POV-M, heeft tot doel het toepassen van nieuwe inzichten en nieuwe technische oplossingen voor dijkversterking in relatie tot het faalmechanisme macrostablieit te faciliteren. Het toepassen van stabiliteit verhogende constructies is een dergelijke nieuwe technische oplossing. Omdat bij het ontwerpen van stabiliteit verhogende constructies niet alleen de sterkte, maar ook vervormingen en de interactie tussen constructie en grond van belang is kan niet meer worden volstaan met de reguliere analytische modellen. Voor dergelijke constructies wordt veelal gebruik gemaakt van eindige elementen modellen, EEM. Een aanzienlijk deel van de activiteiten van de rekencluster van de POV-M zijn dan ook gericht op het integreren van EEM analyses in het reguliere ontwerpproces.

In dit onderzoek is gekomen tot een eerste opzet voor een werkwijze waarmee aan de hand van laboratoriumproeven een parameterset voor het gebruik van EEM analyses kan worden opgesteld. Het door ontwikkelen van Software is onderdeel van de werkzaamheden. Deze ontwikkelingen zijn beschikbaar vanaf de 2D 2018 versie van het computerprogramma PLAXIS.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	april 2018	Ir. M. Post		Dr. ir. C. Zwanenburg		Ir. L. Voogt	
		M.S. Lujendijk MSc					

Status
definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Achtergrond	1
1.2 Doelstelling	1
1.3 Aanpak	2
1.4 Leeswijzer	3
2 Afbakening	4
2.1 Inleiding	4
2.2 Toegepaste software PLAXIS	4
2.3 Keuze grondsoorten	5
2.4 Keuze materiaal modellen en parameters	6
2.4.1 Drainage type	9
2.4.2 Overige opmerkingen	10
2.5 Keuze type laboratorium proeven	11
2.6 Keuze te fitten spanning – rek relaties (curves)	11
3 Werkwijze bepaling EEM parameters	15
3.1 Inleiding	15
3.2 Voorbereidende werkzaamheden	15
3.2.1 Selectie van representatief laboratorium onderzoek	15
3.2.2 Gereed maken van data voor inlezen in PLAXIS	15
3.2.3 Aanmaken parameter set in PLAXIS	16
3.2.4 <i>SoilTest</i> module versus <i>Parameter Optimisation</i>	16
3.3 Werkwijze bepalen EEM parameters	17
3.3.1 Algemeen	17
3.3.2 CRS proeven	17
3.3.3 Triaxiaalproeven	18
3.3.4 DSS proeven	19
3.3.5 SSC model	19
3.3.6 HS model	20
3.3.7 SHANSEP NGI-ADP model	21
3.4 Resume	21
4 Ervaringen volgend uit rekenvoorbeelden	24
5 Resume en aanbevelingen	29
5.1 Resume	29
5.2 Gewenste ontwikkelingen user interface	29
5.3 Gewenste ontwikkelingen reken mogelijkheden	30
6 Literatuur	31

Appendices

A Definitie van spanningen en rekken	A-1
B Gebruik van de <i>SoilTest</i> module	B-1
B.1 Algemene opmerkingen bij gebruik <i>SoilTest</i> module	B-1
B.2 Gebruik van *.vlt file om werkelijke laboratorium resultaten te tonen in <i>SoilTest</i>	B-1
C Gebruik van <i>Parameter Optimisation</i>	C-1
C.1 Algemene opmerkingen bij gebruik <i>Parameter Optimisation</i>	C-1
C.2 Ervaringen met <i>Parameter Optimisation</i>	C-2
D Voorbeeld uitwerking proefdata	D-1
D.1 Introductie	D-1
D.2 parameters Soft Soil Creep model	D-2
D.3 Parameters Hardening Soil model	D-9
D.4 Parameters SHANSEP NGI-ADP model	D-13

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Het onderzoeksprogramma POV-Macrostablieit, POV-M, heeft tot doel het toepassen van nieuwe inzichten en nieuwe technische oplossingen voor dijkversterking in relatie tot het faalmechanisme macrostablieit. De POV-M is onderverdeeld in clusters. Eén daarvan is de cluster rekentechnieken. De cluster rekentechnieken heeft tot doel waar nodig rekentechnieken en rekenmethodieken, ter ondersteuning van de nieuwe inzichten en nieuwe oplossingen, te ontwikkelen. In de lopende dijkversterkingsprojecten speelt het gebruik van constructies, zoals stabiliteitsschermen, een belangrijke rol. Bij het ontwerpen van groene dijken wordt in de huidige praktijk voornamelijk gebruik gemaakt van analytisch glijvlak modellen. Omdat bij het ontwerpen van stabiliteit verhogende constructies niet alleen de sterkte, maar ook vervormingen en de interactie tussen constructie en grond van belang is kan niet meer worden volstaan met de reguliere analytische modellen. Voor dergelijke constructies wordt veelal gebruik gemaakt van eindige elementen methoden, EEM. Een aanzienlijk deel van de activiteiten van de rekencluster van de POV-M zijn dan ook gericht op het integreren van EEM analyses in het reguliere ontwerpproces.

Goed inzicht in de bepaling van grondeigenschappen is noodzakelijk bij een betrouwbare stabiliteitsanalyse. Voor het bepalen van de sterkte parameters ten behoeve van de analytische glijvlakmodellen zijn reeds verschillende voorschriften beschikbaar. Bij het gebruik van EEM analyses is ook informatie over andere parameters noodzakelijk. Welke parameters dat zijn hangt af van het gebruikte materiaalmodel, echter, het betreft voornamelijk stijfheidseigenschappen. In algemene tekstboeken waarin de verschillende materiaalmodellen worden toegelicht worden de benodigde parameters weliswaar gedefinieerd, maar hoe deze voor een EEM analyse moeten worden bepaald, rekening houdend met de natuurlijke variatie en gevraagd veiligheidsniveau van de constructie, is weinig beschreven.

In het POV-M onderzoeksprogramma wordt, parallel aan dit project, ook een basishandleiding eindige elementen methoden, BEEM opgesteld [ref.8]. Het BEEM geeft een handleiding voor het ontwerpen van een dijkversterking door middel van het toepassen van constructieve elementen met behulp van eindige elementen analyses. Onderdeel van de BEEM handleiding is de algemene parameterbepaling. In de BEEM handleiding is beschreven hoe vanuit een serie laboratoriumproeven en / of veldsondemetingen de benodigde parameters kunnen worden bepaald. Ook beschrijft de BEEM handleiding hoe karakteristieke waarden kunnen worden bepaald. Voor de meer algemene achtergronden en richtlijnen bij het interpreteren van het grondonderzoek en het komen tot een parameterset wordt verwezen naar het BEEM [ref.8]. Het fitten van proefdata om te komen tot een EEM parameterset, zoals beschreven in dit rapport, kan worden gezien als een verlengde van het komen tot een algemene parameterset.

1.2 Doelstelling

In dit onderzoek wordt een werkwijze ontwikkeld waarmee aan de hand van laboratoriumproeven een parameterset voor het gebruik van EEM analyses kan worden opgesteld, ten behoeve van het uitvoeren van een dijkversterkingsontwerp. Het onderzoek richt zich op een werkwijze waarmee laboratoriumproeven worden gebruikt om de parameterset in EEM programma PLAXIS zo goed mogelijk de werkelijkheid te laten benaderen. Naast het gebruik van laboratoriumproeven wordt ook aandacht besteed aan de variatie in de sterkte en stijfheidseigenschappen. De te ontwikkelen werkwijze is geschikt

voor verschillende veelgebruikte materiaalmodellen, en verschillende typen laboratoriumproeven.

Onderdeel van de werkzaamheden is ook het verder ontwikkelen van de mogelijkheden om in het EEM programma PLAXIS de benodigde parameters te kunnen fitten. Hiertoe is het onderzoek in een samenwerking tussen Plaxis b.v. en Deltares uitgevoerd. Door Plaxis b.v. is met name de benodigde software ontwikkeling uitgevoerd. De verificatie en het opstellen van een werkwijze hoe met de verder ontwikkelde software de benodigde parameters kunnen worden bepaald is door Deltares verder ingevuld.

1.3 Aanpak

Om het gestelde doel te bereiken is de volgende aanpak gehanteerd:

1. Software ontwikkeling.
2. Opstellen werkwijze.
3. Vaststellen rekenvoorbeelden en verificatie.
4. Ervaringen beschrijven.

Punt 1 is opgepakt door Plaxis b.v. en de ontwikkelde software zal worden meegenomen in de release versie 2D 2018.00.

Het voorliggende rapport beschrijft punt 2 en 4: het vaststellen van de werkwijze en het beschrijven van de opgedane ervaringen. Punt 3 wordt toegelicht in de bijlagen van dit rapport.

Hieronder worden punten 1 t/m 4 nader toegelicht.

1) Software ontwikkeling

Met betrekking tot de software ontwikkeling zijn de volgende activiteiten uitgevoerd:

- Het beschikbaar maken van de materiaalmodellen SHANSEP MC en SHANSEP NGI-ADP in de *SoilTest* module.
- het oplossen van problemen die bij de verificatie aan het licht komen.

2) Opstellen werkwijze

Getracht wordt te komen tot een werkwijze waarbij de nadruk ligt op het vaststellen van de relevante parameters voor een gehele grondlaag, terwijl de software zich richt op de beste fit per laboratoriumproef. Hier speelt de kennis en kunde van de uitvoerende ingenieur een belangrijke rol. De op te stellen werkwijze dient ter ondersteuning van de uitvoerende ingenieur.

3) Vaststellen rekenvoorbeelden en verificatie

De verificatie van zowel de werkwijze als van de software heeft plaatsgevonden op basis van de laboratoriumproeven die voor de Bergambacht proef [ref. 10] zijn uitgevoerd. Het betreft hier proeven op voornamelijk klei en veen op de proeflocatie te Bergambacht.

4) Beschrijven van de ervaringen opgedaan met verificatie

De ervaringen opgedaan met de software en de voorgestelde werkwijze worden beschreven. Hierbij wordt o.a. ingegaan op de mogelijkheid dat met verschillende parametersets de meetdata met gelijkwaardig resultaat kan worden gefit. Naar mate er meerdere proeven in beschouwing worden genomen wordt de kans groter dat er geen unieke parameterset wordt

gevonden, maar verschillende gelijkwaardige parametersets, die elk de meetdata evengoed simuleren.

1.4 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 betreft de afbakening van dit project. Binnen dit project moeten keuzes worden gemaakt t.a.v. de zaken die kunnen worden opgepakt. In dit hoofdstuk worden de gemaakte keuzes toegelicht.

In hoofdstuk 3 wordt de werkwijze beschreven. Zoveel mogelijk praktische handvatten worden aangereikt.

De opgedane ervaringen met de software en de werkwijze zijn toegelicht in hoofdstuk 4.

In hoofdstuk 5 wordt het doel van deze rapportage herhaald en wordt aangegeven in welke mate deze doelstelling is gehaald. Verder worden hier aanbevelingen gedaan voor enkele gewenste aanpassingen aan de PLAXIS software.

2 Afbakening

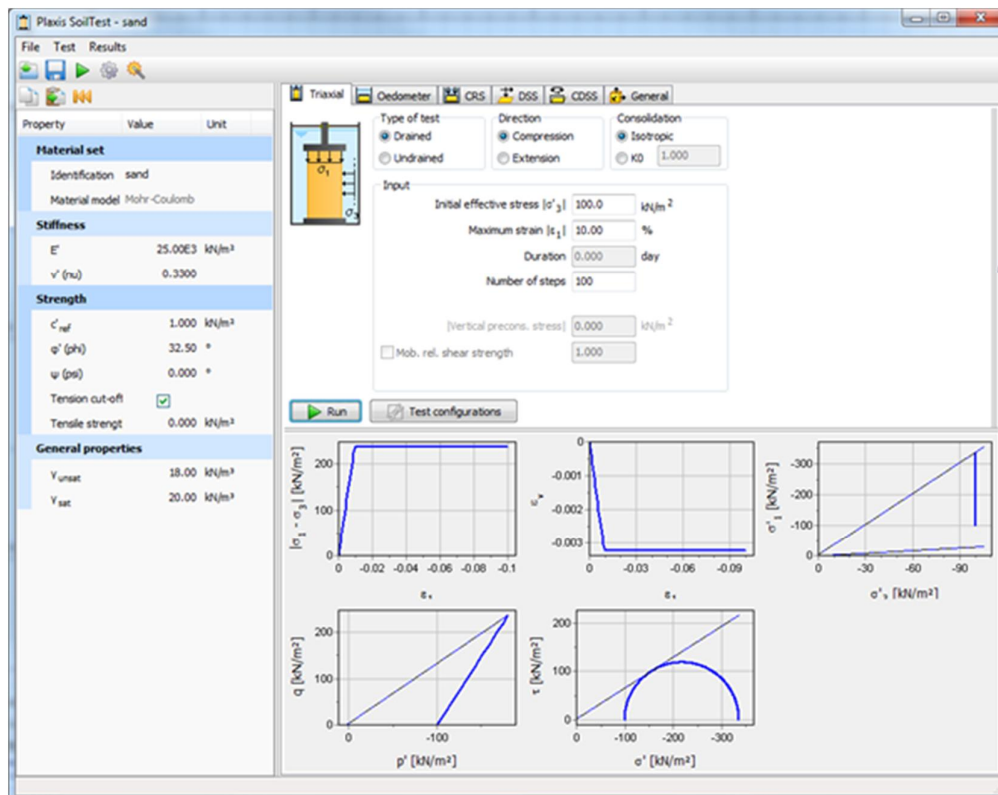
2.1 Inleiding

Binnen de geldende projectkaders moeten keuzes worden gemaakt voor hetgeen kan worden meegenomen in een eerste opzet voor de EEM parameter bepaling. In dit hoofdstuk worden de gemaakte keuzes verder toegelicht.

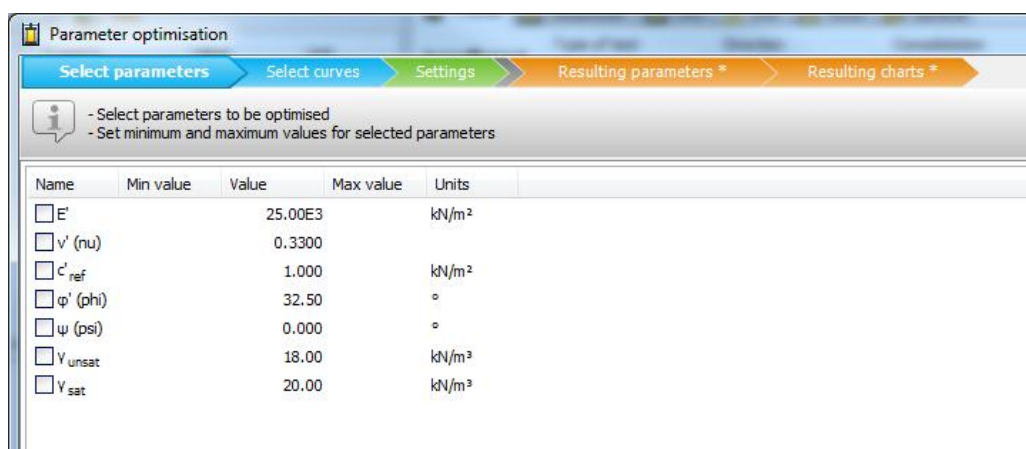
2.2 Toegepaste software PLAXIS

Zoals in de inleiding beschreven richt dit onderzoek zich op parameterbepaling ten behoeve van EEM analyses met behulp van het computerprogramma PLAXIS. Het programma PLAXIS heeft een module genaamd *SoilTest* [ref. 2]. In deze module kunnen laboratoriumproeven op basis van een spanningspuntmodel worden gesimuleerd, zie Figuur 2.1. De *SoilTest* module heeft tevens een optimalisatie mogelijkheid (*Parameter Optimisation*) waarmee de benodigde parameters aan proefresultaten kunnen worden geoptimaliseerd, zie Figuur 2.2.

De beschreven werkzaamheden richten zich op het zo effectief mogelijk inzetten van de genoemde software. De PLAXIS versie waar in deze rapportage mee gewerkt wordt is PLAXIS 2D versie 2017 en de PLAXIS 2D 2018 beta versie.



Figuur 2.1 Screenshot van SoilTest module



Figuur 2.2 Screenshot van Parameter Optimisation

De mogelijkheden van de *SoilTest* module en de *Parameter Optimisation* worden in meer detail beschreven in hoofdstuk 3.

2.3 Keuze grondsoorten

Uitgangspunt is dat een eerste opzet van de EEM parameter bepaling wordt gedaan voor de Holocene klei- en veenafzettingen in Nederland. Deze lagen kenmerken zich door een relatief kleine overconsolidatie (voor maagdelijke grond) en ongedraineerd gedrag. Aanvullend uitgangspunt is dat het volledig verzadigde grondsoorten betreft.

Gekozen is voor het gebruik van de data die beschikbaar is gekomen rondom de praktijkproef Bergambacht [ref.10]. In de uitwerking van de data is destijds gebruik gemaakt van de toen geldende geologische eenheden. Om verwarring te voorkomen wordt in dit rapport de toen gebruikte en inmiddels verouderde benaming gehanteerd. Gekozen is voor klei, afzettingen van Tiel en Gorkum en veen, Hollandveen, afzettingen uit de ondergrond bij Bergambacht. Hiervan is in het verleden uitgebreid grond en laboratoriumonderzoek uitgevoerd en gearchiveerd. Deze laboratoriumproeven zijn gebruikt om de verificatie uit te voeren.

Bijlage D geeft een uitwerking van de voorgestelde werkwijze van parameterbepaling aan de hand van de Bergambacht data. De werkwijze begint met het vooraf selecteren van proefdata uit de beschikbare database van proefresultaten. Er is steeds gezocht naar twee meest geschikte laboratoriumproeven. Bij het vaststellen van geschiktheid is gekeken naar de volgende zaken:

- De meetdata wordt geclusterd naar grondsoort. Vervolgens wordt per grondsoort gekeken naar de beschrijvende parameters per monster, zoals volume gewicht, watergehalte, gloeiverlies enzovoorts. Nagegaan wordt in hoeverre deze beschrijvende parameters homogeen zijn binnen de beschouwde grondsoort. In geval dat de beschrijvende parameters duidelijk afwijken van de andere monsters binnen de grondsoort dient de indeling te worden gecontroleerd. Indien de indeling correct blijkt te zijn kan mogelijk een onderverdeling van de grondlaag nodig zijn.
- Verloop van de meetdata; Gecontroleerd wordt of er geen sprongen, hiaten of een onlogisch verloop van meetdata is gevonden. Het beoordelen van de meetdata vraagt enige ervaring. Van belang is dat de meetdata die voor het fitten wordt gebruikt ook daadwerkelijk grondgedrag weergeeft en niet het gevolg is van de proefuitvoering. Met

betrekking tot een eventueel onlogisch verloop worden de volgende voorbeelden genoemd:

- CRS proeven waarbij initieel de zetting toeneemt zonder een significante toename van de belasting. Verklaring voor dergelijk gedrag kan zijn dat de diameter van het monster te gering is waardoor het monster niet goed opgesloten is. Andere verklaring kan zijn dat de bovendcap bij aanvang niet goed op het monster is gelegen waardoor initieel verplaatsingen worden gemeten die niet gerelateerd zijn aan de vervormingen van het monster.
- Ook het bezwijken van het monster in een triaxiaalproef, waarbij glijvlak vorming optreedt, kan leiden tot complexe spanningspaden die mogelijk meer het gevolg zijn van de onduidelijkheid van de spanningscondities op het glijvlak dan van het daadwerkelijk grondgedrag.
- Triaxiaalproeven op kruipgevoelig materiaal, bijvoorbeeld veen en humeuze klei, die bij spanningen hoger dan de oorspronkelijke grensspanning kort worden geconsolideerd kunnen in de ongedraineerde afschuif fase een zeer vlak spanningspad vertonen. Dit is het gevolg van de wateroverspanning die als gevolg van kruip zal ontwikkelen in de ongedraineerde fase. Dergelijke spanningspaden kunnen alleen correct worden gesimuleerd met materiaalmodellen die ook kruip modelleren.
- Onderling vergelijk van de proeven per grondlaag. Per grondlaag zullen over het algemeen meerdere proeven beschikbaar zijn. Onderlinge vergelijking geeft een indruk van de heterogeniteit van de grondsoort waar de proeven op zijn uitgevoerd. Door de spanningspaden van de verschillende proeven in een grafiek te plotten wordt inzichtelijk wat de verschillen zijn en welke proef of proeven representatief voor de proevenserie zijn. Mogelijk kan het helpen om genormaliseerde spanningspaden weer te geven. Het opstellen van de genormaliseerde spanningspaden wordt hier niet verder uitgewerkt.

Per grondlaag zijn twee of meer proeven gebruikt voor de parameterfit. Hiermee ontstaat een indruk van de representativiteit van de afgeleide parameters voor de gehele grondlaag.

2.4 Keuze materiaal modellen en parameters

De uitwerking van dit project concentreert zich op het fitten van de parameters van de materiaalmodellen die in het basisrapport eindige elementen, BEEM [ref.8] worden besproken; het Soft Soil Creep, SSC, model, het Hardening Soil, HS model en het SHANSEP NGI-ADP model. Het laatste model is in het kader van de POV-M ontwikkeld.

Voor de beschrijving van de materiaalmodellen wordt verwezen naar de PLAXIS handleidingen [2] en [3].

Tabel 2.1 geeft de samenvatting van de verschillende model parameters. De tabel geeft de parameters die voor optimalisatie door middel van het fitten van laboratoriumproefdata in aanmerking komen. In de tabel zijn een aantal parameters met ~~strike-through~~ gegeven. Deze parameters worden hier voor de volledigheid benoemd maar verder niet meegenomen in de uitwerking van dit project. In Tabel 2.2 is een toelichting gegeven waarom dit is gedaan.

Parameters als volume gewicht, doorlatendheid en advanced parameters zoals de incrementele toename van stijfheden of cohesie in de diepte zijn niet benoemd en worden niet in beschouwing genomen. Deze parameters kunnen niet met een spanningspunt model worden bepaald c.q. gefit.

Eigenschap	SSC	HS	SHANSEP NGI-ADP
stijfheid	$\kappa^*, \lambda^*, \mu^*$ $K_0^{nc} \text{ (}^b\text{)}$	$E_{50}^{ref}, E_{oed}^{ref}, E_{ur}^{ref}$, $m \text{ (}^c\text{)}, K_0^{nc} \text{ (}^b\text{)}$	$G/s_u^A, \gamma_f^C$, $\gamma_f^{DSS}, \gamma_f^E, \tau_0/s_u^A$
dwarscontractie coëfficiënt	ν_{eff}	ν_{eff}	ν
sterkte	$c', \varphi', \psi, \text{tensile}$	$c', \varphi', \psi, R_f, s_{ur}, m$, tensile	$\alpha, m \text{ (}^c\text{)}, s_u^P/s_u^A$, s_u^{DSS}/s_u^A
initiële conditie	POP / OCR ^(a)	POP / OCR ^(a)	POP / OCR ^(a)

Tabel 2.1 Benodigde materiaalparameters per materiaalmodel.

^(a) In de *SoilTest* module kan de POP of OCR niet rechtstreeks worden gefit. Wel kan bij het opgeven van de randvoorwaarden van de proef σ'_{vy} (de verticale preconsolidatie spanningen) worden opgegeven. Dit geeft de mogelijkheid om, handmatig, σ'_{vy} te fitten. De waarde voor POP of OCR moet vervolgens worden bepaald uit de verticale effectieve spanningen in het model en zijn daarmee afhankelijk van de schematisatie.

^(b) De K_0^{nc} waarde is een bijzondere parameter. Deze parameter is via de formule van (Jaky, 1948) gekoppeld aan de wrijvingshoek:

$$K_0^{nc} = 1 - \sin \varphi' \quad (0.1)$$

Opgemerkt wordt dat [ref.7] aantoont dat vergelijking (0.1) een zeer bruikbare relatie is voor de meest voorkomende grondsoorten. De K_0^{nc} en de φ' waarde worden echter afzonderlijk bepaald door middel van separate proeven. De K_0^{nc} uit een K0-CRS proef en de φ' uit een triaxiaal of een DSS proef. In de materiaalmodellen SSC en HS staat het bezwijkcriterium enigszins los van de gebruikte cap waarmee de plastische vervormingen worden gedefinieerd. De vorm van de cap wordt grotendeels door de K_0^{nc} waarde bepaald. Doordat het bezwijkcriterium enigszins los staat van de gebruikte cap geven de HS en SSC modellen de mogelijkheid om, binnen grenzen, de waarde van K_0^{nc} en φ' los van elkaar te kiezen. Toch is enige voorzichtigheid geboden met het fitten van K_0^{nc} waarden zo kan het zijn dat een lage waarde voor K_0^{nc} nodig is om spanningspaden goed te fitten, echter kan het gebruik van een lage waarde voor K_0^{nc} in de uiteindelijke berekening tot gevolg hebben dat plasticiteit onrealistisch snel optreedt.

^(c) Zowel het HS model als het SHANSEP NGI-ADP model kennen de parameter m . Deze parameter heeft in de verschillende modellen een verschillende functie. In het HS model geeft deze parameter de spanningsafhankelijkheid weer van de stijfheden. In het SHANSEP NGI-ADP model geeft deze parameter de afhankelijkheid van de ongedraineerde schuifweerstand s_u van de OCR weer. Beide parameters dienen niet met elkaar te worden verward.

Parameter	Argumentatie
ν_{ur}	voor de geavanceerde modellen is de dwarscontractie coëfficiënt een elastische stijfheidsparameter. Ervaring leert dat deze waarde meestal in de orde van 0,2 is. De ervaring leert dat de onzekerheid marge (circa 0,1 tot 0,3) meestal geen grote invloed heeft op de resultaten. Het is echter niet met zekerheid te zeggen dat dit in alle gevallen zo is. Binnen dit project wordt deze waarde als een constante beschouwd. Daarbij komt dat voor ongedraineerde proeven op klei -, en veensoorten de meetdata slechts in beperkte mate geschikt zijn voor het fitten van ν_{ur} .
ψ	Deze parameter heeft de volgende invloeden: <ul style="list-style-type: none"> • Een effect op de (piek)sterkte, dit effect dient in PLAXIS in de hier besproken materiaalmodellen te worden verdisconteerd in de te kiezen wrijvingshoek φ'. • Een effect op volumeverandering: door dilatantie wil de grond in volume toenemen, bij verhindering van deze volumevergroting zal dit leiden tot extra sterkte. Dit effect kan echter niet direct worden gesimuleerd in <i>SoilTest</i> module of de <i>Parameter Optimisation</i>. De volumeverandering wordt wel bepaald in de <i>SoilTest</i> module in een gedraineerde berekening. • In een ongedraineerde analyse met effectieve sterkte parameters zorgt de dilatantie ervoor dat de sterkte (onrealistisch) kan toenemen. De volumevergroting wordt dan vrijwel volledig verhinderd, een ongedraineerde berekening gaat uit van een constant volume en geeft uiteindelijk een sterke toename in effectieve spanningen en daarmee sterkte. In aansluiting op het basisrapport eindige elementen methoden [ref.8] wordt in een ongedraineerde analyse geen dilatantie toegepast.
s_u	Het HS model heeft de optie om binnen Undrained B direct een ongedraineerde sterkte s_u in te voeren. Bij switchen naar de Undrained B optie verliest het materiaal model een deel van zijn mogelijkheden (t.g.v. $\varphi' = 0$). Voor nu is gekozen deze parameter niet mee te nemen hier. Zie ook paragraaf 2.4.1 voor een verdere toelichting op drainage type.
Tensile strength	Binnen het SSC en HS model kan een tension cut off worden gespecificeerd in combinatie met een bepaalde tensile strength. Deze waarde kan invloed hebben op de ongedraineerde sterkte bij lage spanningen. Dit treedt met name op bij lage spanningen in combinatie met een hoge cohesie of ongedraineerde schuifsterkte, zie ook paragraaf 2.4.2 voor verdere toelichting. Voor nu is gekozen deze parameter niet mee te nemen.

Tabel 2.2 Parameters welke niet worden meegenomen in de uitwerking van dit project

Verklaring van gebruikte symbolen:

ν	= Poisson's ratio	[-]
ν_{ur}	= Poisson's ratio for unloading-reloading	[-]
c'	= cohesion	[kN/m ²]
φ'	= friction angle	[°]
ψ	= dilatancy angle	[°]
Tensile (strength)		[kN/m ²]
κ^*	= modified swelling index	[-]
λ^*	= modified compression index	[-]
μ^*	= modified creep index	[-]
E_{50}^{ref}	= secant stiffness in standard drained triaxial test	[kN/m ²]
E_{oed}^{ref}	= tangent stiffness for primary oedometer loading	[kN/m ²]
E_{ur}^{ref}	= unloading/reloading stiffness	[kN/m ²]
Rf	= failure ratio	[-]
m	= in Hardening Soil model, macht in stijfheid – spannings relatie	[-]

G/s_u^A	= shear modulus genormaliseerd voor de actieve ongedraineerde schuifsterkte	[-]
$\gamma_f^{C,DSS,E}$	= gemobiliseerde schuifrek bij het bereiken van de pieksterkte, voor de actieve, DSS en passieve toestand	[%]
s_u^P/s_u^A	= verhouding ongedraineerde passieve en actieve schuifsterkte	[-]
s_u^{DSS}/s_u^A	= verhouding ongedraineerde DSS en actieve schuifsterkte	[-]
τ_0/s_u^A	= initieel gemobiliseerde schuifweerstand	[-]
α	= s_u – ratio; s_u / σ'_{vi} voor normaal geconsolideerde condities	[-]
m	= in SHANSEP model, macht in relatie tussen s_u met OCR	[-]
POP	= pre overburden pressure (positief voor overdruk)	[kN/m ²]
OCR	= over consolidation ratio, over consolidatiegraad	[-]
K_0^{nc}	= Laterale gronddruk coëfficiënt voor normaal geconsolideerde spanningstoestand	[-]

2.4.1 Drainage type

Bij het modelleren van ongedraineerd grondgedrag kan in PLAXIS de keuze tussen drie methoden; A, B of C worden gemaakt. Deze keuze is van belang voor de uiteindelijke berekening van het dwarsprofiel, het randvoorwaarde probleem. In onderstaande tabel is een korte toelichting gegeven op deze drie methoden. Voor verdere achtergronden wordt verwezen naar de PLAXIS handleiding [ref.3].

	A	B	C (total stress)
Welke sterkte parameters benodigd?	gedraineerd	ongedraineerd	ongedraineerd
Welke stijfheid parameters benodigd?	gedraineerd	gedraineerd	ongedraineerd
Worden wateroverspanningen apart bepaald?	ja	ja	nee
Is consolidatie van wateroverspanningen mogelijk/zinvol?	ja	Nee (niet zinvol, wel mogelijk)	nee

Tabel 2.3 Opties voor modelleren ongedraineerd gedrag in een randvoorwaarde probleem in PLAXIS

Voor de verschillende materiaalmodellen dient een specifiek type undrained methode te worden gekozen, zie Tabel 2.4.

Materiaal model	A	B	C
SSC	X		
HS	X	(X)	
SHANSEP NGI-ADP		X	(X)

Tabel 2.4 Keuzemogelijkheid undrained methode per materiaalmodel.

Merk op:

- Voor het HS model kan eventueel een Undrained B aanpak worden gekozen. Undrained B is een mengvorm tussen Undrained A en C. Met deze mengvorm kan ook voor dit geavanceerde model direct een ongedraineerde schuifsterkte als invoer worden gegeven. Nadeel van deze aanpak is echter dat het model een gedeelte van zijn functionaliteit verliest (door de indirecte keus dat de wrijvingshoek gelijk aan nul is).

Ook kunnen de gegeneerde wateroverspanningen onrealistisch worden waardoor een consolidatie analyse niet langer zinvol is.

- Voor User Defined soil models, zoals het SHANSEP NGI-ADP model in PLAXIS kan de gebruiker alleen optie Undrained A model selecteren in de user interface. Echter het SHANSEP NGI-ADP werkt feitelijk als Undrained B. Bij keuze voor non porous werkt het SHANSEP NGI ADP model feitelijk als Undrained C.

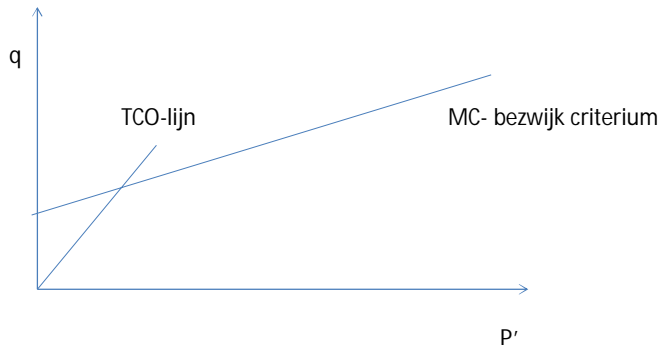
In de *SoilTest* module kan alleen een keuze worden gemaakt tussen gedraineerd of ongedraineerd gedrag (afhankelijk van de te modelleren proef). Zo kan bij de simulatie van triaxiaal en Direct Simple Shear proeven de keuze tussen een gedraineerde of ongedraineerde proef worden gemaakt. Vanwege de aard van de proef kan de samendrukkingsproef en Constant Rate of Strain proef alleen gedraineerd worden gesimuleerd. Opgemerkt wordt dat conform de proefuitvoering een gedraineerde DSS proef wordt gesimuleerd als een proef met constante bovenbelasting en een ongedraineerde proef als een proef met constante hoogte, dat wil zeggen volume vast.

In deze rapportage worden Holocene klei en veenlagen besproken. Deze lagen zullen in het algemeen als ongedraineerd worden gemodelleerd. Dit betekent dat bij de invoer van het materiaal model een keuze voor methode A, B of C dient te worden gemaakt. Bij gebruik van de *SoilTest* module zal dan waar relevant voor een ongedraineerde proef dienen te worden gekozen.

2.4.2 Overige opmerkingen

In de *SoilTest* module is een optie mogelijk om tension cut off aan of uit te vinken. Indien aangevinkt dient de grootte van de trekspanning (tensile strength) te worden opgegeven. Dit kan invloed hebben op de te realiseren sterkte. Dit geldt met name voor proeven die bij lage spanningen zijn uitgevoerd in combinatie met een relatief hoge waarde voor de cohesie. Figuur 2.3 geeft een principeschets, waarbij de tension cut off, TCO-lijn is getekend voor de conditie waarbij de toelaatbare trekspanning gelijk aan 0 is gesteld. De TCO – lijn geeft de combinatie van spanningscondities waarbij de laagste hoofdspanning gelijk aan 0 is. Spanningsspaden van ongedraineerde triaxiaalproeven uitgevoerd bij lage spanningen zullen de TCO lijn raken voordat het Mohr Coulomb, MC, bezwijkcriterium is bereikt. Indien de TCO is geactiveerd en de toelaatbare treksterkte gelijk aan 0 is gesteld, zal het spanningspad, ook voor ongedraineerde proeven (!) de TCO- lijn volgen tot het MC criterium wordt bereikt. Hierdoor kan mogelijk een groter dan verwachte sterkte worden ontwikkeld.

Indien de TCO niet is geactiveerd zal ook bij lage spanningen de sterkte door het MC criterium worden bepaald. Opgemerkt wordt dat indien er geen of zeer geringe cohesie wordt toegepast het MC bezwijkcriterium altijd onder TCO-lijn ligt. In dat geval zal een mogelijke tension cut off geen invloed op de maximaal te mobiliseren sterkte hebben, er is geen feitelijke tension cut-off.



Figuur 2.3 Principeschets MC = Mohr Coulomb, TCO = Tension Cut Off

Het aan of uit zetten van de TCO en de mogelijke waarde van de toelaatbare trekspanning is nu niet beschikbaar in *Parameter Optimisation*. Voor de verificatie is de tension cut off steeds uit gezet.

Conform het BEEM, [ref 8] wordt dilatantie niet in rekening gebracht, de dilatantie hoek ψ wordt gelijk aan 0° gesteld.

2.5 Keuze type laboratorium proeven

In *SoilTest* kunnen onderstaande typen proeven worden gesimuleerd:

- Triaxiaalproef (compressie en extensie).
- (K_0)-CRS proef.
- Oedometer proef.
- Direct Simple Shear proef.
- cyclische Direct Simple Shear proef.

Daarnaast bestaat de mogelijkheid om een proef met volledig vrije randvoorwaarden te simuleren via de optie general.

In dit project is aandacht besteed aan de meest gangbare laboratoriumproeven in de ontwerp praktijk van dijkversterkingen, te weten:

- Triaxiaalproef, compressie.
- Constant Rate of Strain proef (K_0 -CRS).
- Direct Simple Shear proef.

2.6 Keuze te fitten spanning – rek relaties (curves)

In het opstellen van een werkwijze voor het fitten van EEM parameters op basis van laboratoriumproeven wordt in deze paragraaf onderzocht welke relaties (curves) tussen de diverse spanningen en rekken zinvol zijn. Tabel 2.5, Tabel 2.6 en Tabel 2.7 geven een inventarisatie. Daarbij is aangegeven met ja, misschien of nee in welke mate het zinvol is om de betreffende curve te gebruiken bij het fitten. Ja betekent zinvol, misschien betekent afhankelijk van de situatie en nee betekent niet zinvol. Voor de definitie van de gebruikte symbolen wordt verwezen naar bijlage A.

Hierbij wordt opgemerkt dat niet alle spanningen en rekken die numeriek worden bepaald ook in een laboratoriumproef worden gemeten. Een goed voorbeeld hiervan is de Direct Simple

Shear, DSS, proef. In de DSS proef kan de horizontale spanning en de ontwikkeling van de horizontale spanning tijdens de proef niet worden gemeten. Dit heeft tot gevolg dat de hoofdspansingen evenals de isotrope en deviator spanning onbekend zijn in de laboratoriumproef. De numerieke resultaten kunnen op dit vlak dus niet worden gevalideerd met laboratoriumproeven, hetzelfde geldt voor de horizontale spanning in de klassieke samendrukkingsproef of CRS proef.

Standaard curves PLAXIS SoilTest module	Te gebruiken bij parameter bepaling	Toelichting
q versus ε_1	Ja	Deze curve bevat informatie over sterkte en stijfheid
ε_v versus ε_1	Drained: ja Undrained: nee	In een drained situatie geeft de curve informatie over o.a. de dilatantie hoek. In een undrained situatie is er vrijwel geen volume verandering en geeft de curve geen informatie. In dat geval wordt gekeken naar de grafiek p_w vs ε_1
σ'_1 versus σ'_3	ja	De toepasbaarheid van het spanningspad hangt af van het type materiaal model, o.a. is het materiaalmodel in staat realistische wateroverspanningen te voorspellen. Indien het spanningspad kan worden gebruikt dan bevat deze o.a. informatie over de K_0^{nc} waarde en de verhouding van de stijfheden.
q versus p'	ja	Zie toelichting bij curve σ'_1 versus σ'_3
τ versus σ' (Mohr cirkel)	Nee	alleen relevant indien een fit over meerdere proeven kan worden uitgevoerd. Dat is op dit moment nog niet mogelijk.
p_w versus ε_1 (undr)	ja	Zie toelichting bij curve ε_v versus ε_1

Tabel 2.5 Indicatie te gebruiken curves om te fitten bij gebruik triaxiaalproeven in PLAXIS.

Standaard curves PLAXIS SoilTest module	Te gebruiken bij parameter bepaling	Toelichting
σ'_{yy} versus ε_{yy}	Ja	Deze curve bevat informatie over de stijfheid, zowel de normaal geconsolideerde als de ontlast-, herbelaststijfheid en de grensspanning
σ'_{yy} versus σ'_{xx}	Misschien	Afhankelijk van type test. Bij oedometer test wordt horizontale spanning σ'_{xx} niet gemeten. Bij K0CRS wordt horizontale spanning σ'_{xx} wel gemeten.
q versus p'	Misschien	Afhankelijk van type test. Bij oedometer test wordt horizontale spanning σ'_{xx} niet gemeten. Bij K ₀ -CRS wordt horizontale spanning σ'_{xx} wel gemeten.
τ versus σ' (mohr cirkel)	Nee	levert geen relevante informatie op voor het fitten van oedometer of CRS data
ε_{yy} versus tijd	Ja	Deze curve bevat informatie over de (tijdsafhankelijke) stijfheid

Tabel 2.6 Indicatie te gebruiken curves om te fitten bij gebruik oedometer of K0-CRS proeven in PLAXIS.

Standaard curves PLAXIS SoilTest module	Te gebruiken bij parameter bepaling	Toelichting
τ_{xy} versus γ_{xy}	ja	Deze curve bevat informatie over sterkte en stijfheid
σ'_1 versus σ'_3	nee	Tijdens de uitvoering van de werkelijke proef is alleen de verticale spanning bekend, de horizontale spanningen en daarmee zowel de hoofdspansingen als de isotrope en deviator spanning zijn onbekend.
q versus p'	nee	
τ versus σ' (Mohr Circle)	nee	
τ versus σ'_v (zelf maken)	ja	De toepasbaarheid van het spanningspad hangt af van het type materiaal model, o.a. is het materiaalmodel in staat realistische wateroverspanningen te voorspellen.
p_w versus γ_{xy}	Drained: nee Undrained: ja	geeft geen extra informatie ten opzichte van τ versus σ'_v
ε_a versus γ_{xy}	Drained: ja Undrained: nee	gedraineerde proeven worden voor klei en veen zelden uitgevoerd.

Tabel 2.7 Indicatie te gebruiken curves om te fitten bij gebruik DSS proeven in PLAXIS.

Waarin geldt:

ε_1	= rek in hoofdrichting	[-]
q	= deviator spanning	[kPa]
ε_v	= volume rek	[-]
σ'_1	= grootste effectieve hoofdspanning	[kPa]
σ'_3	= kleinste effectieve hoofdspanning	[kPa]

τ	=	straal van de cirkel van Mohr, $(\sigma'_1 - \sigma'_3)/2$	[kPa]
σ'	=	gemiddelde verticale en horizontale effectieve spanning	[kPa]
p_w	=	waterspanning	[kPa]
σ'_{yy}	=	verticale spanning	[kPa]
σ'_{xx}	=	horizontale spanning	[kPa]
p'	=	isotrope spanning, $(\sigma'_v + 2\sigma'_h)/3$	[kPa]
ε_{yy}	=	verticale rek	[-]

3 Werkwijze bepaling EEM parameters

3.1 Inleiding

Uitgangspunt voor dit hoofdstuk is dat, conform de BEEM handleiding, de proeven zijn uitgewerkt en per proef de verschillende parameters zijn bepaald. Deze parameters leiden tot een algemene parameterset. Met behulp van een fitprocedure wordt vanuit de algemene parameterset een specifieke EEM parameterset vastgesteld die het beste past bij het materiaalmodel en de proefresultaten van de betreffende grondlaag.

De werkwijze voor het bepalen van EEM parameters kan daarmee worden opgedeeld in de volgende onderdelen:

1. Bepalen van een algemene parameterset.
2. Voorbereidende werkzaamheden t.b.v. het fitten van de EEM parameters.
3. Fitten van de EEM parameters aan de hand van de *SoilTest* module en/of *Parameter Optimisation*.

Punt 1 is nader uitgewerkt in de BEEM handleiding [ref.10]. Punten 2 en 3 worden nader uitgewerkt in dit hoofdstuk.

3.2 Voorbereidende werkzaamheden

3.2.1 Selectie van representatief laboratorium onderzoek

Voorafgaand aan het fitten dienen de laboratoriumproeven te worden geselecteerd, waarop het materiaalmodel gedrag zo goed mogelijk kan worden afgestemd. Hiervoor dient de ingenieur te beoordelen of het laboratorium resultaat voldoende representatief is. Zaken die hierbij meespelen:

- 1) Selectie van laboratoriumproeven die passen bij de grondopbouw van de ondergrond, die verder onder te verdelen zijn in verschillende klei-, en veensoorten, naar afzettingsmilieu.
- 2) Juiste toepassing van uitgangspunten in de laboratoriumproeven: soms zijn proeven volgens een oud protocol uitgevoerd dat niet meer van toepassing is of waaruit de parameters lastig te herleiden zijn.
- 3) Delen van data die bijvoorbeeld toe te schrijven zijn aan het opstarten of afronden van de laboratoriumproef die geen fysische betekenis hebben.
- 4) Bruikbaarheid van gedeelten van laboratoriumproef indien het resultaat niet geheel naar verwachting is: bedenk vooraf wat belangrijk is om te fitten.

Voorgaande is geen eenduidige taak. Hiervoor is engineering judgement en ervaring met interpretatie van laboratoriumproeven vereist. Het meest praktische is een paar proeven te selecteren per grondlaag en deze te vergelijken en vervolgens op basis hiervan een nieuwe selectie te maken. Verwezen wordt naar bestaande protocollen [ref 5] voor het uitvoeren van laboratoriumproeven.

3.2.2 Gereed maken van data voor inlezen in PLAXIS

Na selectie van de gewenste laboratoriumresultaten moet de numerieke data in de juiste format worden gezet zodat deze kan worden ingelezen in PLAXIS. Opgemerkt wordt dat dit betekent dat de numerieke data van de proeven beschikbaar moet zijn. Bij gebruik van *SoilTest* dient de data in (*.vlt) format te worden voorbereid. Zie ook bijlage B voor een toelichting hoe een dergelijke file kan worden gemaakt.

Bij gebruik van de *Parameter Optimisation* module dient de data in (*.txt) format te worden voorbereid. Zie hiervoor de PLAXIS handleiding, reference manual [ref.4] voor een toelichting hoe een dergelijke file kan worden gemaakt. Aandachtspunt is de maximale hoeveelheid data die op dit moment kan worden ingelezen in *Parameter Optimisation*. In de huidige PLAXIS versie 2018 kan tot ca. maximaal 1000 regels met data worden ingelezen. Indien meer data beschikbaar is (en dat zal bij een laboratorium proef meestal het geval zijn) dient deze te worden gecomprimeerd.

3.2.3 Aanmaken parameter set in PLAXIS

In PLAXIS wordt al dan niet eerst een start gemaakt met een geometrie en vervolgens bij het toekennen van materiaaleigenschappen via 'material sets' worden de parameters gekozen conform de "generieke interpretatie" van de parameters. Verwezen wordt naar de PLAXIS handleiding [ref.4] voor de wijze van invoer van materiaaleigenschappen.

3.2.4 *SoilTest* module versus *Parameter Optimisation*

Na het aanmaken van de eerste parameterset dient een keuze te worden gemaakt voor de tool die wordt gehanteerd. Hierbij geeft PLAXIS twee mogelijkheden:

- *SoilTest* module: deze functionaliteit is bedoeld om snel inzicht te krijgen in het constitutieve materiaal model gedrag (oftewel de relatie tussen rek incrementen en spannings incrementen). In plaats van dat een "volledig" eindige elementen model hoeft te worden gebouwd kan hier zeer snel op basis van 1 spanningspunt worden gerekend/gevarieerd.
- *Parameter Optimisation* tool: deze functionaliteit binnen de *Soil Test* module, is bedoeld om zo goed mogelijk een curve (welke de relatie geeft tussen twee basis variabelen, meestal spanning en rek) te fitten door het variëren van 1 of meerdere parameters.

Noot: voor de volledigheid wordt opgemerkt dat het opzetten van een volledig EEM model in PLAXIS, dus het modelleren van een laboratorium proef met de echte fysieke afmetingen, ook altijd mogelijk is. Deze optie biedt meer rekenmogelijkheden t.o.v. de hierboven genoemde tools maar zal ook meer arbeidsintensief zijn. Deze optie is hier verder niet beschouwd.

In bijlage B en C is het gebruik van de *SoilTest* module respectievelijk *Parameter Optimisation* nader toegelicht. Geconcludeerd wordt dat op dit moment:

- *SoilTest* het meeste gebruiksgemak levert. Door de proef data in te laden kunnen per proef de curves voor de verschillende relaties uit Tabel 2.5 tot en met Tabel 2.7 worden vergeleken. Hiermee kan snel op het oog een passende EEM parameterset worden gevonden. *Parameter Optimisation* heeft vooral bij complexe situaties waar meerdere onbekende parameters, mogelijk op basis van meerdere proeven, geoptimaliseerd dienen te worden potentie. In dit geval is deze werkwijze mogelijk efficiënter dan handmatig (op het oog) fitten m.b.v. *SoilTest*. In bijlage C is ook geconcludeerd dat alvorens *Parameter Optimisation* breder wordt ingezet het wenselijk is dat deze tool eerst uitvoerig wordt geverifieerd.

Bij de beschrijving van de werkwijze in de rest van dit hoofdstuk wordt uitgegaan van het gebruik van *SoilTest*. De optie *Parameter Optimisation* wordt niet verder besproken.

3.3 Werkwijze bepalen EEM parameters

3.3.1 Algemeen

Gedurende dit project is beseft dat er meerdere volgorden van fitten mogelijk zijn waarbij (voor nu) niet zondermeer kan worden aangegeven welke volgorde de beste is. In deze paragraaf wordt een mogelijkheid beschreven. Deze mogelijkheid is ook toegepast bij de uitwerking van het voorbeeld in bijlage D.

Indien er meerdere proeven beschikbaar zijn, bestaande uit een samendrukkings-, of CRS proef en triaxiaal of DSS proef worden eerst de stijfheden uit de samendrukkings- of CRS-proef bepaald. Hierbij wordt een schatting gedaan voor de sterkte parameters op basis van de algemene parameterset. Vervolgens wordt met behulp van de geoptimaliseerde stijfheidsparementers de sterkte proeven, triaxiaal of DSS, gesimuleerd. Hierbij wordt gecontroleerd of de stijfheden die uit de samendrukkingsproeven volgden passen bij het spanningspad en het spannings – rek diagram van de sterkte proef.

Bij de verdere bespreking van de werkwijze in deze paragraaf wordt ingegaan op de volgende vragen:

- Welke materiaal model parameters dienen te worden aangepast om te komen tot een goede fit?
- In welke volgorde dienen de materiaalmodel-parameters te worden aangepast, wat is het meest efficiënt?
- Welke (delen van welke) curves dienen te worden gefit per type laboratorium proef? Zie ook Tabel 2.5 tot en met Tabel 2.7.

Verder wordt opgemerkt dat in de *SoilTest* module er (voor nu) geen directe maat beschikbaar is die aangeeft hoe nauwkeurig de fit is. Het fitten dient hier dus op het oog te gebeuren. Naar verwachting echter zal de op deze wijze geïntroduceerde fout relatief klein zijn ten opzichte van de al bestaande (natuurlijke) variatie in parameters.

3.3.2 CRS proeven

Bij het fitten van de afzonderlijke proeven kunnen meerdere relaties worden gecontroleerd. Bij het fitten van de CRS proeven kan eerst het spannings – rek diagram, of beter de logaritme van de spanning versus de verticale rek worden gebruik voor het fitten van de stijfheidsparementers. In het SSC model volgen uit deze fit de waarden voor κ^* , λ^* en σ'_{vy} . Opgemerkt wordt dat in het fitten de waarde voor κ^* en σ'_{vy} elkaar enigszins beïnvloeden. Bij het fitten dient eerst te worden getracht de maagdelijke zettingslijn aan te laten sluiten. Hierbij is zowel λ^* als σ'_{vy} van belang. Vervolgens kan de herbelast stijfheid κ^* worden gefit aan de ontlaststap. In een conventionele CRS proef, die volgens het WBI protocol [ref.9] is uitgevoerd, zijn er twee mogelijkheden. De eerste mogelijkheid is het fitten aan de ontlast – herbelaststap, meestal fase 2 en 3 in de proef. De tweede mogelijkheid is het fitten aan de laatste ontlaststap bij het beëindigen van de proef, fase 6. In het BEEM is er voor gekozen om de ontlast – herbelast stap, fase 2 en 3, hiervoor te gebruiken. In deze fase is een kleinere ontlast stap uitgevoerd dan in fase 6, dit leidt tot een hogere stijfheid. Verwacht wordt dat deze, hogere, stijfheid beter past bij de latere toepassingen van de EEM parameterset.

De kruipparameter μ^* , uit het SSC model, kan worden bepaald uit de relaxatiefase van de CRS proef. Indien bij het uitvoeren van de CRS proef ook de horizontale spanningen zijn gemeten, zoals bij de K_0 -CRS proef, kan ook de waarde van K_0^{nc} worden gefit. Dit kan aan de hand van de relaties tussen horizontale en verticale effectieve spanning, σ_{yy} - σ'_{xx} of isotrope

en deviatorspanning p' en q . Opgemerkt wordt dat in de basis de beide grafieken dezelfde informatie geven. Variatie in K_0^{nc} leidt tot verandering in de spanningsverhouding in de maagdelijke tak in beide grafieken en variatie in ν leidt tot verandering in spanningsverhouding in de ontlast – herbelast tak in beide grafieken. Indien de horizontale spanning niet is gemeten tijdens de uitvoering van de proef dient voor de K_0^{nc} en ν de default waarde te worden gebruikt; $K_0^{nc} = 1 - \sin(\varphi')$ respectievelijk $\nu = 0,15$. Indien gewenst kan bij het fitten van de spanningspaden van triaxiaalproeven de K_0^{nc} waarde verder worden geoptimaliseerd.

Na het optimaliseren van de stijfheidsparameters met behulp van de CRS proeven kan de parameterset verder worden geoptimaliseerd met behulp van de sterkteproeven, een triaxiaal of DSS proef.

3.3.3 Triaxiaalproeven

In het fitten van de triaxiaalproeven zijn in principe in twee relaties van belang, dit zijn de spannings – rek relatie, $q - \varepsilon_a$, en het spanningspad, $p' - q$. Ook hier geldt dat in de basis de relatie horizontale en verticale effectieve spanning, σ'_{xx} en σ'_{yy} dezelfde informatie oplevert als het $p' - q$ diagram. De relatie tussen de ontwikkeling van de waterspanning p_w versus axiale rek, ε_a levert, met betrekking tot het fitten vergelijkbare informatie op als de kromming van het spanningspad, $p' - q$. Veel normaal geconsolideerde grondsoorten vertonen bij oplopende rek eerst een piekwaarde voor de ongedraineerde schuifsterkte gevolgd door een lagere critical state sterkte. In de WBI methodiek is er voor gekozen de critical state sterkte te gebruiken als sterkte definitie waarbij de sterkte parameters worden bepaald. Voor het fitten van het sterkte gedrag met de verschillende materiaalmodellen dient bij voorkeur de sterkte bij grote rek tussen de modelsimulatie en meetdata overeen te komen. Voor, de in dit rapport besproken, materiaal modellen die geen piek en softening gedrag kennen betekent dit dat alleen de staart van het $q - \varepsilon_a$ relatie wordt gefit en de hogere piek waarde uit de metingen van de sterkte niet in de berekening wordt meegenomen.

Andere natuurlijke grondsoorten, met name overgeconsolideerde grondsoorten en / of siltige klei -, en leemlagen kennen dilatant gedrag. Zowel in de laboratoriumopstelling als in de numerieke simulatie wordt bij de uitvoering van de proeven volledig ongedraineerd gedrag beschouwd met hoge sterktes (door het dilatante gedrag) tot gevolg. In het veld echter is het in hoge mate onzeker in hoeverre er volledig ongedraineerd gedrag, dan wel gedeeltelijk of (bij zeer siltig materiaal) wellicht gedraineerd gedrag optreedt. Bij het fitten van grondlagen die in de sterkte berekening als ongedraineerd wordt aangehouden, wordt geen dilatantie hoek in rekening gebracht, $\psi = 0^\circ$. Voor de afweging van of lagen wel of niet volledig ongedraineerd kunnen worden beschouwd wordt verwezen naar de WBI schematiseringshandleiding, [ref 9]. Dit heeft tot gevolg dat in voorkomende gevallen slechts delen van de spanningspaden en spannings – rek diagrammen kunnen worden gebruikt en kan worden beschouwd als een conservatieve keuze op dit vlak.

Zowel het SSC als het HS model kennen de mogelijkheid om, binnen de Undrained A aanpak, het sterkte gedrag met een cohesie te beschrijven. De modellen zijn echter niet geschikt voor het gebruik van hoge waarden voor de cohesie. Aanbevolen wordt de fits te starten met $c' = 0$, en alleen indien het gebruik van een cohesie echt noodzakelijk is om de meetdata goed te fitten een hogere waarde toe te passen.

Voor het fitten van de triaxiaalproeven zijn voor de verschillende materiaalmodellen verschillende aandachtspunten zie paragraaf 3.3.5 t/m 3.3.7 voor nadere toelichting.

3.3.4 DSS proeven

Bij het fitten van de DSS proef resultaten zijn twee relaties van belang. Deze zijn het spannings – rek diagram, $\tau - \gamma_{xy}$ en het spanningspad $\sigma'_v - \tau$. In de DSS proef is het niet mogelijk om de horizontale spanningsontwikkeling te meten. Hierdoor kunnen de parameters die van belang zijn bij de simulatie van de horizontale spanningen niet worden aan DSS proef data worden gefit. Het gaat hierbij met name om de parameters K_0^{nc} en ν .

Voor het fitten van de sterkte en stijfheidsparameters geldt verder hetzelfde als opgemerkt bij triaxiaalproefdata.

Wellicht ten overvloede wordt opgemerkt dat met name voor het SHANSEP NGI-ADP model het fitten van DSS proeven aanvullende informatie oplevert voor bepaling van de sterkte parameters s_u^{DSS} en γ_f^{DSS} . Voor de andere materiaalmodellen geldt dat het gebruik van meerdere proeven is aan te bevelen om zo meerdere aspecten van het grondgedrag in de fit te betrekken.

3.3.5 SSC model

Simulaties van ongedraineerde, normaal geconsolideerde, triaxiaalproeven met het SSC model laten na het bereiken van een pieksterkte, in termen van gemobiliseerde ongedraineerde schuifsterkte, een lagere sterkte bij grote rek zien. De afname van de sterkte, na het overschrijden van de pieksterkte, is in de numerieke simulatie het gevolg van kruip. De mate van sterkte reductie is afhankelijk van de kruipparameter, μ^* en de snelheid waarmee de vervormingen wordt opgelegd. Hoe sneller de proef wordt uitgevoerd of lager μ^* is, hoe geringer de sterkte afname. Bij kruipgevoelige grond wordt in de laboratoriumproef de invloed van kruip op het gemeten sterkte gedrag van grond gevonden, zie o.a. Mayne et al 2009. Echter bij natuurlijk grondgedrag spelen meer facetten een rol. Aanbevolen wordt de waarde van μ^* alleen aan data van samendrukkingsproeven of CRS proeven te fitten en niet aan de sterkte proeven.

De verhouding tussen de stijfheden λ^* en κ^* en de waarde voor K_0^{nc} zijn bepalend voor de helling en kromming van het spanningspad, respectievelijk de waterspanningsontwikkeling tijdens de afschuiffase. De waarden van λ^* en κ^* zijn reeds met behulp van de samendrukkingsproeven bepaald. Aanpassen van deze waarden t.b.v. het fitten van het spanningspad zal ervoor zorgen dat het zettingsgedrag minder correct zal worden gesimuleerd. In plaats daarvan kan de waarde van K_0^{nc} worden aangepast. Een hogere K_0^{nc} - waarde geeft meer wateroverspanning en daarmee een lagere ongedraineerde schuifsterkte. Zoals aangegeven in paragraaf 3.2.5.3 kan het aanpassen van K_0^{nc} slechts in beperkte mate. Na de controle van de eerder gefitte stijfheden kunnen de sterkte parameters worden geoptimaliseerd. Zoals eerder aangegeven dient hierbij de dilatantiehoek, $\psi = 0^\circ$ te zijn en voor de cohesie c' bij voorkeur 0 of een lage waarde te worden toegepast. Na het aanpassen van de sterkte zullen mogelijk opnieuw de stijfheden en de K_0^{nc} waarde gecontroleerd dienen te worden.

Aandachtspunt bij het gebruik van het SSC model is de waarde die voor POP of OCR wordt toegepast. Voor normaal geconsolideerd gedrag, POP = 0 kPa of OCR = 1,0, zal de kruiprek zich maximaal ontwikkelen ook als er geen belastingverhoging in rekening is gebracht. Over het algemeen zal dit onrealistisch kruipgedrag weergeven en zal daarmee onwenselijk zijn. Aanbevolen wordt bij het gebruik van de SSC model, voor initiële condities een minimale OCR aan te houden, zie hiervoor ook het BEEM [ref 8]. Opgemerkt wordt dat bij het uitvoeren van normaal geconsolideerde laboratoriumproeven het monster wordt geconsolideerd bij een spanningsniveau dat ruim hoger is dan de oorspronkelijke grensspanning en werkelijk

normaal geconsolideerd gedrag zal optreden. Bij het simuleren van normaal geconsolideerde triaxiaalproeven zal, anders dan in de sterkte berekening van een dijkprofiel, conform proefomstandigheden $OCR = 1$ worden toegepast.

De toegepaste waarde van OCR of POP kan worden gecontroleerd door het uitvoeren van een 1D berekening, kolom grond. Hierbij wordt, na initialisatie van de spanningen een kruipfase uitgevoerd. In deze fase speelt alleen de tijd een rol, er wordt geen belasting geactiveerd. Indien zeer grote kruiprek wordt geeft dit een aanwijzing dat een te lage waarde voor OCR of POP is gekozen.

3.3.6 HS model

Het HS model heeft moeite om met dezelfde parameterset zowel de CRS data als de triaxiaal data van dezelfde grondlaag te simuleren. Het gaat hiermee met name om de E_{oed}^{ef} en E_{50}^{ef} die voor simulaties van de CRS data veelal een orde 2 à 3 lager dient te zijn dan bij de fit van de triaxiaal compressieproeven. De parameterset die hier wordt afgeleid is met name bedoeld voor de sterkte analyses van waterkeringen. De parameterset dient met name het sterkte gedrag goed weer te geven. De parameterfit richt zich daarmee vooral op de triaxiaalproeven. De resulterende parameterset kan dan ook niet zonder meer gebruikt worden voor een zettingsprognose. Hierbij wordt opgemerkt dat het HS model geen kruip modelleert, terwijl de voor Nederlandse waterkeringen relevante grondsoorten veelal kruipgevoelige gronden zijn. Ook om die reden is de HS parameterset niet bedoeld voor het uitvoeren van een zettingsprognose.

De *SoilTest* module geeft de mogelijkheid om pre-shearing apart van de isotrope voorbelasting op te geven door middel van de optie *mob. rel. shear strength*. Door deze een waarde te geven, tussen 0 en 1, zal het stijfheidsgedrag bij verder mobiliseren van de schuifweerstand deels of geheel, bij waarde 1,0, met de voorbelast stijfheid, E_{ur} , worden gemodelleerd. Door gebruik te maken van deze waarde bij normaal geconsolideerde proeven wordt de shear strain hardening deels of geheel, bij waarde 1,0, uitgezet. Opgemerkt wordt dat indien bij het fitten van normaal geconsolideerde triaxiaalproeven een hoge waarde voor *mob. rel. shear strength* wordt toegepast, goede fits van triaxiaalproeven en CRS proeven met één dataset mogelijk zijn. Echter, in de reguliere berekening is het niet mogelijk deze optie te gebruiken. Tevens wordt opgemerkt dat indien de optie *mob. rel. shear strength* bij normaal geconsolideerde proeven op 1,0 wordt gezet het HS model functioneert als het Soft Soil model.

Bij het fitten van normaal geconsolideerde triaxiaalproeven zal het HS model geen softening gedrag tonen. Bij fitten van proeven die dat gedrag wel laten zien dient de gesimuleerde sterkte aan te sluiten bij de sterkte ontwikkeling na grote rek. Hierbij dient bij voorkeur het horizontale verloop van het gesimuleerde spannings – rek diagram aan te vangen bij het rek percentage waar de pieksterkte wordt bereikt. Hierbij kan gebruik worden gemaakt van het veranderen van de R_f -waarde. Hoewel de parameter R_f geen stijfheidsparameter is, beïnvloedt deze parameter wel het gesimuleerde stijfheidsgedrag. Enige voorzichtigheid met het aanpassen van de R_f waarde, ten opzicht van de default waarde $R_f = 0.9$, is geboden. Bij grote benodigde aanpassingen dient eerst de optimalisatie van de stijfheden te worden beschouwd voordat wordt over gegaan op een sterk afwijkende waarde voor R_f .

Ook voor het HS model geldt dat de verhouding van de stijfheden en de waarde van K_0^{nc} invloed hebben op de mate van waterspanningsgeneratie in ongedraineerde triaxiaalproeven en daarmee op de richting van het ongedraineerde spanningspad. Echter, vanwege beperkingen aan de door het programma getolereerde verhoudingen van de stijfheden en

K_0^{nc} waarde zijn de mogelijkheden voor optimalisatie beperkt en moet worden volstaan met de toegestane, combinatie van parameters die de sterkte bij grote rek het beste weergeeft.

3.3.7 SHANSEP NGI-ADP model

De benodigde sterkte parameters voor het SHANSEP NGI-ADP model sluiten aan bij de sterkte parameters zoals die voor glijvlakberekeningen. In de Schematiseringshandleiding [ref.6] is beschreven hoe deze uit laboratorium-, en veldmetingen kunnen worden bepaald. Vervolgens kan met behulp van het fitten van laboratoriumproefdata de resultaten van de bepaling van de sterkte parameters worden gecontroleerd en de stijfheidsparameters, G/s_u , γ_f en τ_0/s_u worden geoptimaliseerd.

Net als het HS zal ook het SHANSEP NGI-ADP model in simulatie van normaal geconsolideerd gedrag geen softening vertonen. Voor proefdata die dat gedrag wel laten zien geldt dat de sterkte met name aan de gemobiliseerde weerstand bij grote rek dient te worden gefit. Hiermee wordt aangesloten op de richtlijnen uit het WBI [ref.9]. Tevens geldt, net als bij de HS simulaties dat het horizontale deel van het gesimuleerde spannings – rek diagram dient te starten bij het axiale rekniveau waar in de proefdata de pieksterkte wordt gevonden.

Het SHANSEP NGI-ADP model is specifiek ontwikkeld om de anisotropie in schuifsterkte in rekening te kunnen brengen. Bij voorkeur dient voor de parameterbepaling triaxiale compressie, extensie proeven en DSS proeven beschikbaar zijn. In de praktijk zal dit zelden het geval zijn en zal in voorkomende gevallen gewerkt worden met default waarden voor de ontbrekende parameters.

Het SHANSEP NGI-ADP model is specifiek ontwikkeld voor het uitvoeren van ongedraineerde sterkte berekeningen. Het fitten van SHANSEP NGI-ADP parameters aan (gedraineerde) CRS data wordt niet zinvol geacht en is daarom ook niet uitgevoerd. Omdat het materiaal model feitelijk werkt volgens de Undrained B aanpak, is het fitten van het effectief spanningspad en de ontwikkeling van de waterspanning tijdens de ongedraineerde afschuif fase ook niet relevant.

3.4 Resume

De in dit hoofdstuk beschreven werkwijze is samengevat weergegeven in de onderstaande tabellen. Hierbij is de in hoofdstuk 2 beschreven afbakening direct verwerkt dus alleen de relevante en geselecteerde proeven, curves en parameters zijn benoemd.

Test	Curves	Relevante parameters	Opmerkingen
TRX ongedraineerd compr	q versus ε_1	Dominant: $\varphi', c', \lambda^*, \kappa^*$ Niet dominant: μ^*	Primaire curve tbv fit stijfheid en sterkte
	σ'_1 versus σ'_3	$K_0^{nc}, \varphi', c', \lambda^*, \kappa^*$	De grafieken σ'_1 versus σ'_3 , q versus p' en p_w versus ε_1 geven dezelfde informatie, namelijk de mate van waterspanningsontwikkeling tijdens ongedraineerd afschuiven
	q versus p'	$K_0^{nc}, \varphi', c', \lambda^*, \kappa^*$	
	p_w versus ε_1 (undr)	$K_0^{nc}, \lambda^*, \kappa^*$	
DSS	τ_{xy} versus γ_{xy}	Dominant: $\lambda^*, \kappa^*, \varphi', c'$ Niet dominant: μ^*, K_0^{nc}	Primaire curve tbv fit stijfheid en sterkte
	τ versus σ'_v (zelf maken)	$K_0^{nc}, \varphi', c', \lambda^*, \kappa^*$	In een DSS proef wordt waterspanning meestal niet gemeten. De verandering van σ_v tijdens de afschuiffase wordt gelijk gesteld aan de ontwikkeling van de waterspanning.
OED / (K0) CRS	σ'_{yy} versus ε_{yy}	Dominant: $\lambda^*, \kappa^*, \mu^*, POP/OCR$ Niet dominant: K_0^{nc}, φ', c'	Primaire curve tbv fit stijfheid
	σ'_{yy} versus σ'_{xx}	Dominant: K_0^{nc}	Primaire curve voor K_0^{nc} , bepaal deze in het NC gebied. Houdt rekening met Jaky relatie tov φ'
	q versus p'	K_0^{nc}	Alleen relevant voor K_0 -CRS proeven
	ε_{yy} versus tijd	Dominant: μ^*	Primaire curve voor μ^* , bepaal deze in het NC gebied.

Figuur 3.1 Aanpak bij SSC model

Test	Curves	Relevante parameters	Opmerkingen
TRX compr	q versus ε_1	Dominant: $E_{50}^{ref}, E_{ur}^{ref}, m, \varphi', c'$ Niet dominant: E_{oed}^{ref}	Primaire curve tbv fit stijfheid en sterkte
	σ'_1 versus σ'_3	$K_0^{nc}, E_{50}^{ref}, E_{ur}^{ref}, m, \varphi', c'$	De grafieken σ'_1 versus σ'_3 , q versus p' en p_w versus ε_1 geven dezelfde informatie, namelijk de mate van waterspanningsontwikkeling tijdens ongedraineerd afschuiven
	q versus p'	$K_0^{nc}, E_{50}^{ref}, E_{ur}^{ref}, m, \varphi', c'$	
	p_w versus ε_1 (undr)	$K_0^{nc}, E_{50}^{ref}, E_{ur}^{ref}$	
DSS	τ_{xy} versus γ_{xy}	Dominant: $G_{50} (E_{50}^{ref}), E_{ur}^{ref}, m, \varphi', c'$ Niet dominant: E_{oed}^{ref}, K_0^{nc}	Primaire curve tbv fit stijfheid en sterkte
	τ versus σ'_v (zelf maken)		In een DSS proef wordt waterspanning meestal niet gemeten. De verandering van σ'_v tijdens de afschuif fase wordt gelijk gesteld aan de ontwikkeling van de waterspanning.
OED / (K0) CRS	σ'_{yy} versus ε_{yy}	Dominant: $E_{oed}^{ref}, E_{ur}^{ref}, m$, POP/OCR Niet dominant: $E_{50}^{ref}, K_0^{nc}, \varphi', c'$	Primaire curve tbv fit stijfheid
	σ'_{yy} versus σ'_{xx}	Dominant: K_0^{nc}	Primaire curve voor K_0^{nc} , bepaal deze in het NC gebied. Houdt rekening met Jaky relatie tov φ'
	q versus p'	K_0^{nc}	Alleen relevant voor K_0 -CRS proeven

Figuur 3.2 Aanpak bij HS model.

Test	Curves	Relevante parameters	Opmerkingen
TRX compr	q versus ε_1	Dominant: $G/s_u^A, \gamma_f^C, \tau_0/s_u^A, \alpha, m$	Primaire curve tbv fit stijfheid en sterkte
DSS	τ_{xy} versus γ_{xy}	Dominant: $G/s_u^A, \gamma_f^{DSS}, \tau_0/s_u^A, s_u^{DSS}/s_u^A$	Primaire curve tbv fit stijfheid en sterkte
TRX ext	q versus ε_1	Dominant: $G/s_u^A, \gamma_f^E, \tau_0/s_u^A, s_u^E/s_u^A$	Voor de meeste praktische situaties zullen er geen triaxiale extensie beschikbaar zijn.
OED / (K0) CRS			Fitten aan samendrukkingsproeven wordt niet zinvol geacht voor dit model.

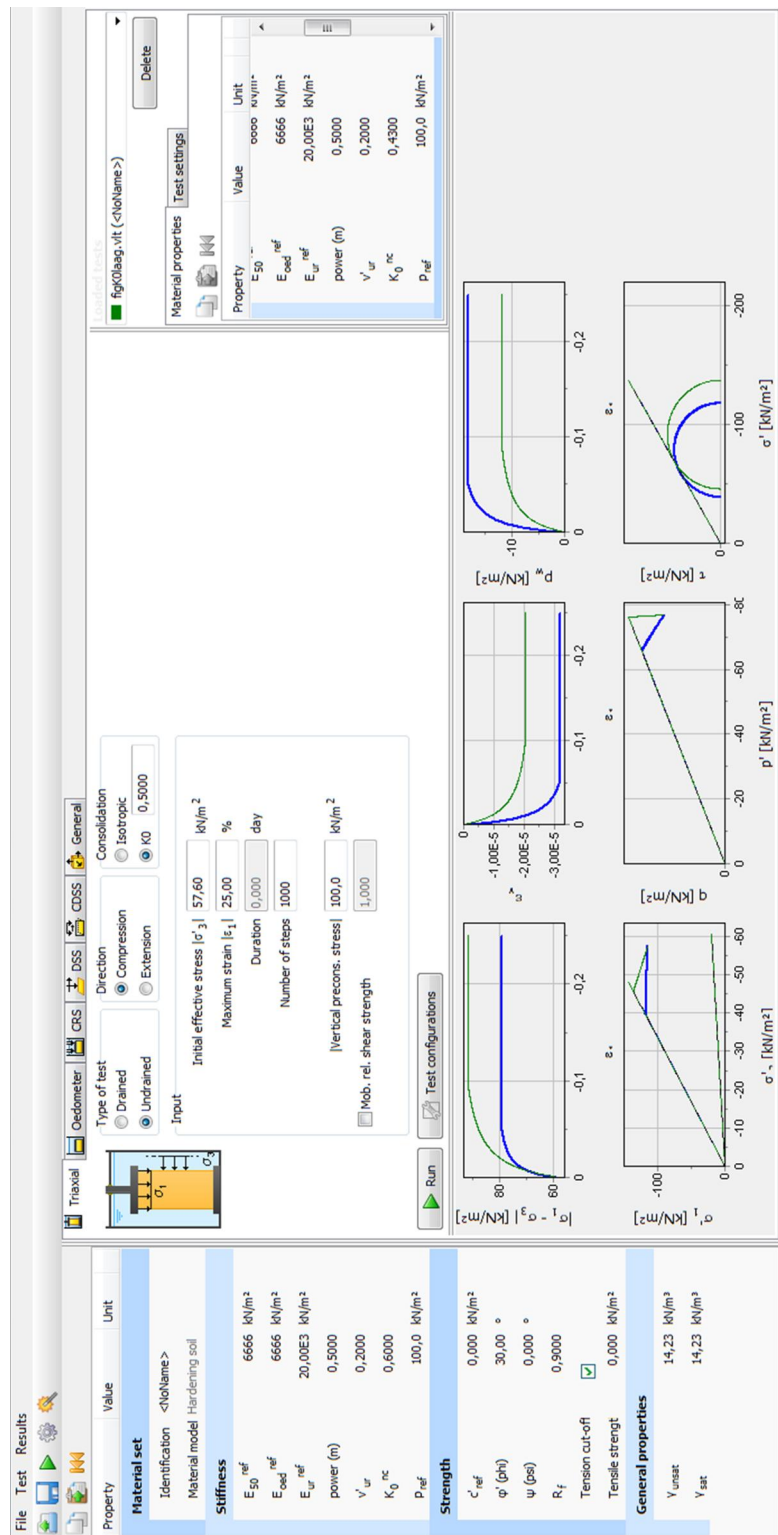
Figuur 3.3 Aanpak bij SHANSEP NGI-ADP model

4 Ervaringen volgend uit rekenvoorbeelden

In het SSC en het HS model wordt de generatie van waterspanning tijdens de afschuiffase in een ongedraineerde triaxiaalproef gemodelleerd. De mate waarin de gesimuleerde wateroverspanning zich ontwikkelt tijdens de afschuiffase is afhankelijk van de verhouding van de stijfheden, K_0^{nc} waarde en de lengte van het af te leggen spanningspad en daarmee van de sterkte parameters c' en ϕ' . Voor een meer gedetailleerde achtergrond wordt verwezen naar de PLAXIS handleiding [ref.3]. Hoe meer waterspanningsontwikkeling, hoe verder het spanningspad zal afbuigen en bij een lagere gemobiliseerde schuifweerstand het bezwijkcriterium wordt bereikt. Dit vertaalt zich dus in een hoger of lager gelegen spannings – rek, $q - \varepsilon_a$ diagram. Dit heeft tot gevolg dat in de simulatie van een ongedraineerde proef de stijfheden en de K_0^{nc} van invloed zijn op de gerealiseerde maximaal te mobiliseren ongedraineerde schuifweerstand s_u . Dit gedrag wordt geïllustreerd in Figuur 4.1, deze toont twee simulaties van een triaxiaal compressieproef. De opgelegde randvoorwaarden en grondeigenschappen zijn in beide simulaties gelijk, met uitzondering van de waarde van K_0^{nc} . De zwarte simulatie gaat uit van $K_0^{nc} = 0,43$, de blauwe gaat uit van $K_0^{nc} = 0,6$. Ter indicatie beide simulaties gaan uit van $\phi' = 30^\circ$, met $K_0^{nc} = 1 - \sin(\phi')$ levert dit op $K_0^{nc} = 0,50$.

Figuur 4.1 laat zien dat een lage K_0^{nc} waarde, zwarte lijn, leidt tot relatief geringe waterspanningsontwikkeling, met een stijl spanningspad tot gevolg en relatief hoog gelegen $q - \varepsilon_a$ diagram tot gevolg, met $q_{max} = 91,3$ kPa. De hogere K_0^{nc} waarde, blauwe lijn, heeft meer wateroverspanning tot gevolg waardoor het spanningspad flauwer loopt, het bezwijkcriterium op een lager niveau wordt bereikt en het $q - \varepsilon_a$ lager is gelegen, met $q_{max} = 80$ kPa. Hoewel in beide simulatie de waarde voor c' en ϕ' hetzelfde zijn wordt er een duidelijk verschillende maximale schuifspanning gemobiliseerd. Omdat voor de ongedraineerde schuifsterkte, voor triaxiaal condities, geldt $s_u = q/2$, kan worden gesteld dat de waarde van K_0^{nc} mede bepalend is voor de ongedraineerd schuifsterkte in ongedraineerde analyses. Een vergelijkbare redenering kan worden gevolgd voor de invloed van de stijfheden op het spanningspad en daarmee op s_u en voor het SSC model voor de kruipparameter, μ^* , in de beschouwing van de sterkte bij grote rek.

Hierdoor kan voor één set c' en ϕ' toch verschillende ongedraineerde sterktes worden uitgerekend. Voor de bepaling van c' en ϕ' – waarden wordt over het algemeen gebruik gemaakt van meerdere proeven die bij verschillende spanningen zijn uitgevoerd. Indien het resultaat van één triaxiaal proef wordt gesimuleerd zijn de waarden voor c' en ϕ' niet altijd eenduidig te bepalen. Tezamen met de mogelijke variatie in stijfheden en K_0^{nc} -waarde heeft dit tot gevolg dat met verschillende parametersets de proefdata goed kan worden benaderd. De best fit parameterset is niet per definitie uniek, er zullen meerdere parametercombinaties mogelijk zijn die een vergelijkbaar goede fit van proefdata tot gevolg hebben.



Figuur 4.1 Invloed K_0^{nc} op de simulatie van ongedraineerde triaxiaalproef, Simulatie zwarte lijn, $K_0^{nc} = 0,43$; blauwe lijn $K_0^{nc} = 0,6$ overige parameters identiek

Om tot een betrouwbare parameterset te komen dient zoveel mogelijk informatie te worden gecombineerd. Bij voorkeur dient informatie van verschillende proefsoorten te worden gecombineerd. Daarnaast zullen per proeftype meerdere proeven per grondlaag beschikbaar zijn. Er dient niet zozeer gefocussed te worden op de afzonderlijke proef, maar ook naar de andere proefresultaten. Dit kan door niet zozeer de extreme resultaten te beschouwen maar op zoek te gaan naar een gemiddeld proef verloop. Tot slot dient bij voorkeur het fitten op basis van verschillende proefresultaten plaats te vinden. Hierbij kan worden gedacht aan zowel het fitten van het $q - \varepsilon_a$ diagram als het $p' - q$ diagram.

Met betrekking tot het hierboven beschreven uitgangspunt gelden voor de verschillende materiaalmodellen verschillende beperkingen. Het SSC model is ontwikkeld voor het simuleren van normaal geconsolideerd gedrag. Dit leidt tot beperkingen in het simuleren van overgeconsolideerde proeven. Met het HS blijkt het lastig om met dezelfde parameterset zowel de CRS proefdata als de triaxiaal compressieproeven te kunnen simuleren. Het SHANSEP NGI-ADP model is niet gericht op het simuleren van effectieve spanningen. Spanningsspaden en waterspanningsontwikkeling tijdens ongedraineerde afschuif fase in triaxiaalproeven kunnen niet worden gesimuleerd.

Deze beperkingen leiden ertoe dat naast de laboratoriumproefdata engineering judgement nodig is om te komen tot een betrouwbare en bruikbare parameterset. Op basis van de opgedane ervaring en engineering judgement volgt hierna enige richtlijnen per materiaalmodel:

SSC-model

De stijfheden λ^* , κ^* en μ^* uit het SSC model vertonen grote overeenkomsten met de stijfheden uit de 1D samendrukkingsmodellen. Uit de literatuur blijkt dat natuurlijke gronden, binnen een bandbreedte, vaste verhoudingen tussen de stijfheidsparameters kennen. Hieruit volgt als richtlijn:

- $5 < \lambda^* / \kappa^* < 20$.
- $10 < \lambda^* / \mu^* < 25$.

Hoewel de kruipparameter μ^* van invloed is op de triaxiaalproef resultaten dient de waarde van μ^* te worden bepaald aan de hand van de oedometer,- of CRS-proef data. Bij goed gebruik van het SSC model dient ook een realistische waarde voor de OCR of POP te worden bepaald. De belastingsgeschiedenis die door middel van POP of OCR wordt voor geschreven is locatie afhankelijk. Hierdoor kan de POP of OCR waarde die voor een individuele proef wordt gevonden niet zondermeer worden toegepast in de sterkte berekeningen. Zoals eerder aangegeven dient er enige voorzichtigheid te worden geboden bij het gebruik van lage waarden voor de POP of OCR in de stabiliteitsberekening. Voor OCR = 1, POP = 0, geldt dat in de berekening de kruiprekken zich maximaal zullen ontwikkelen, met relatief grote vervormingen tot gevolg, ook als er in de berekening geen belasting wordt geactiveerd. In veel gevallen zal dit niet wenselijk zijn en dient enige POP of OCR > 1 te worden toegepast. Dit is een aandachtspunt bij met name het bepalen van de karakteristieke ondergrenswaarde voor OCR of POP. Voor het bepalen van de OCR of POP wordt verwezen naar het BEEM [ref 8] en de WBI schematiseringshandleiding [ref.9]

De waarde voor K_0^{nc} dient bij voorkeur slechts beperkt af te wijken van $K_0^{nc} = 1 - \sin(\varphi')$. Lage waarden voor K_0^{nc} , $K_0^{nc} < 0,2$, kunnen in de stabiliteitsberekeningen leiden tot ongewenste resultaten. Voorbeelden hiervan zijn het optreden van bezwijken tijdens het activeren van het

eigen gewicht of onrealistische consolidatietijden bij het uitvoeren van een consolidatieberekening.

De mogelijkheden voor het fitten van de dwarscontractiecoëfficiënt zijn beperkt maar over het algemeen kan hier worden volstaan met de default waarde.

HS model

Voor het HS model wordt de gebruiker, meer dan voor het SSC model, gestuurd door de software. Combinaties van parameters die numerieke problemen op zouden kunnen leveren worden niet toegestaan. Hierdoor is de range van waarden die de gebruiker in kan vullen minder groot met ook een verminderde kans op onrealistische waarden. Desalniettemin zijn er enkele richtlijnen:

- Ook hier geldt dat bij voorkeur $K_0^{nc} = 1 - \sin(\varphi')$ wordt aangehouden. Naar aanleiding van het fitten kan worden besloten hiervan af te wijken, maar dat mag niet teveel zijn.
- De PLAXIS handleiding geeft richtlijnen voor de verhoudingen van de stijfheden E_{50}^{ref} , E_{oed}^{ref} en E_{ur}^{ref} . Voor klei en veen wordt hier de verhouding $E_{oed}^{ref} / E_{50}^{ref} = 0,5$ en $E_{ur}^{ref} / E_{50}^{ref} = 5$. Indien deze combinatie niet wordt geaccepteerd wordt aangeraden de meest betrouwbare te handhaven en de andere parameters aan te passen. De uiteindelijk gekozen verhoudingen dienen dezelfde orde van grootte te hebben. De controle die het programma op de invoerwaarden levert voorkomt grote afwijkingen hiervan.
- De parameter R_f kan worden gebruikt om de helling van de $q - \varepsilon_a$ te corrigeren en daarmee indirect de stijfheden te beïnvloeden. Hierbij kan het mogelijk zijn deze waarde af te laten van de default waarde $R_f = 0,9$. Aanbevolen wordt R_f niet kleiner te kiezen dan $R_f = 0,5$.

SHANSEP NGI-ADP model

Het SHANSEP NGI-ADP model is een nieuw model waar op dit moment nog beperkte ervaring mee opgedaan is. Meer achtergrondinformatie is beschreven in de handleiding [ref 2] en [ref 11]. Het is daarmee lastig om in deze fase aan te geven binnen welke ranges de waarden van de verschillende parameters bij voorkeur zouden moeten blijven. De mogelijkheid bestaat om eerst de NGI-ADP parameters te bepalen door het fitten van laboratoriumproeven met het NGI-ADP model.

Met betrekking tot de parameters α en m geldt dat deze overeenkomen met de parameters s_u -ratio, S en m uit de WBI werkwijze. Alle informatie over de bepaling van realistische waarden voor gebruik in WBI context zoals beschreven in de WBI schematiseringshandleiding is ook hier van toepassing. Het nieuwe aspect is het onderscheid tussen het actieve, passieve en het tussen gelegen simple shear benadering. In praktijk zullen over het algemeen alleen triaxiaal compressieproeven voor klei beschikbaar zijn en alleen DSS proeven voor veen. Om toch een uitspraak te kunnen doen over de sterktes in de passieve en simple shear, in het geval alleen triaxiaal compressieproeven beschikbaar zijn, of in de passieve en actieve zone indien alleen simple shear proeven beschikbaar zijn, kan gebruik worden gemaakt van [ref.6]:

$$\frac{s_{u,pass}}{s_{u,act}} = e^{-2\beta}$$

$$\beta = \frac{\sqrt{3}\eta_0\Lambda}{2M}, \quad \eta_0 = \frac{3(1-K_0)}{1+2K_0}, \quad \Lambda = 1 - \frac{\kappa}{\lambda}, \quad M = \frac{6\sin(\varphi')}{3 - \sin(\varphi')} \quad (0.2)$$

Hierin is Λ dezelfde parameter als m .

Omtrent de parameter G/s_u^A wordt opgemerkt dat hier data uit de triaxiaal compressieproef, s_u^A wordt gecombineerd met data die rechtstreeks uit DSS proefdata volgt. Vanwege heterogeniteit en de spanningsafhankelijkheid van beide parameters, G en s_u , wordt aanbevolen beide uit één proef te halen, en geen proeven te combineren. Indien ongedraineerde triaxiaal proeven beschikbaar zijn kan de waarde voor G worden bepaald door

$$G = \frac{E_{50}^u}{2(1+\nu_u)} \approx \frac{E_{50}^u}{3} \quad (0.3)$$

Vervolgens kan deze berekende waarde voor G worden gebruikt met de s_u die in dezelfde triaxiaalproef is gevonden. In het geval; dat er alleen DSS proeven beschikbaar zijn, kan, met behulp van vergelijking (0.2) s_u^{DSS} worden omgerekend naar s_u^A en vervolgens worden gecombineerd met de waarde voor G uit dezelfde proef tot de parameter G/s_u^A .

5 Resume en aanbevelingen

5.1 Resume

Om de resultaten van het project te beschrijven wordt eerst de doelstelling herhaald:

Het doel van het onderzoek is een eenduidige werkwijze voor het bepalen van een complete parameterset voor EEM analyses op te stellen, ten behoeve van het uitvoeren van een dijkversterkingsontwerp. Het onderzoek levert, naast een beschrijving van de werkwijze, een bruikbare software tool voor parameterbepaling.

Samenvattend kan worden gesteld dat:

- Binnen dit project is gekomen tot een eerste opzet van een werkwijze van EEM parameterbepaling waarbij enkele specifieke aandachtspunten zijn benoemd. Belangrijk is ook op te merken dat gezien de complexiteit van het geheel engineering judgement van wezenlijk belang blijft.
- De verificatie heeft plaatsgevonden met verschillende soorten laboratoriumproeven, te weten triaxiaalproeven, DSS proeven en KO-CRS proeven van zowel klei als veen, binnen drie materiaalmodellen te weten Soft Soil Creep, Hardening Soil en SHANSEP NGI-ADP.
- De *SoilTest* module is aangepast waardoor hier nu ook met de materiaalmodellen SHANSEP MC en SHANSEP NGI-ADP kan worden gewerkt. Deze nieuwe functionaliteit is getest en lijkt goed te werken.
- Voor dit moment wordt de voorkeur gegeven aan het werken met de *SoilTest* boven het gebruik van *Parameter Optimisation*. De *Parameter Optimisation* tool in PLAXIS is een in potentie krachtig hulpmiddel voor complexe situaties (meerdere proeven en onbekende parameters) maar een uitgebreide verificatie van deze tool is nog benodigd juist voor deze complexe situaties.
- Binnen dit project is het inzicht ontstaan dat bestaande functionaliteit van *Soiltest* (het gebruik van *.vlt files) ook kan worden gebruikt t.b.v. het fit proces:
 - Met deze optie kan de echte laboratorium data (relatief eenvoudig) worden gevisualiseerd naast de numerieke laboratorium data.
 - De fit vindt vervolgens plaats “op het oog” en is daarmee snel en inzichtelijk;
 - De te bereiken nauwkeurigheid van de fit zal in het algemeen voldoende zijn (afgezet tegen de nauwkeurigheid van andere keuzes in het geotechnische traject om tot een parameter set te komen).

5.2 Gewenste ontwikkelingen user interface

Binnen dit project is de mogelijkheid geopperd om de bestaande functionaliteit van het inlezen van *.vlt files in *SoilTest* te gebruiken voor het visualiseren van werkelijke laboratorium data. Deze aanpak is inderdaad mogelijk gebleken, dit vergt echter een zekere inspanning van de gebruiker om de laboratorium data gereed te maken voor inladen. Mogelijk kan dit proces meer vanuit Plaxis worden gefaciliteerd. Een mogelijkheid is wellicht om in *SoilTest* per grafiek/curve m.b.v. een rechtermuis klik een *.txt file in te laden waar in twee kolommen de (voor de betreffende grafiek) relevante data staat van de werkelijke laboratorium proef. Hiermee kan selectief per type proef de relevante data worden gevisualiseerd.

5.3 Gewenste ontwikkelingen rekenmogelijkheden

Er is gezamenlijk met Plaxis b.v. geconstateerd dat de *Parameter Optimisation* potentie heeft om voor complexere situaties (meerdere proeven en onbekende parameters) tot een efficiënte bepaling van geoptimaliseerde parameters te komen. In aanvulling hierop is echter ook gezamenlijk geconstateerd dat eerst een uitvoerige verificatie van de *Parameter Optimisation* benodigd is alvorens deze tool breder in te zetten op POV-M projecten. De bij de verificatie eventueel naar voren komende issues dienen waar mogelijk te worden opgelost. Afhankelijk van de resultaten van de verificatie kan worden overwogen verdere aanpassingen aan de user interface te maken, o.a.:

- Mogelijkheid tot tussentijdse save, zodat het scherm even verlaten kan worden zonder alle input te verliezen.
- Mogelijkheid om meer dan 1000 regels data in te lezen.
- In *Parameter Optimisation* opnemen van de parameter σ'_{vy} (t.b.v. POP/OCR).
- Verwijderen van de parameters γ_{unsat} en γ_{sat} (welke geen rol spelen in een spanningspunt model).
- Fit mogelijk maken o.b.v. vaste verhouding van stijfheden.
- Bepalen en tonen van de kwaliteit van de gevonden fit.

Het is wenselijk om in *SoilTest* ook een overconsolidatie (σ'_{vy}) in te kunnen voeren bij het gebruik van het SHANSEP NGI-ADP model. Hiermee kan dan ook de sterkte en stijfheid voor overgeconsolideerde situaties worden gefit.

Zeer nuttig zou zijn de mogelijkheid om m.b.v. *SoilTest* ook een fit van het consolidatie gedrag mogelijk te maken. Wellicht kan dit worden bereikt door ook een fictieve dikte (c.q. afstroomlengte) in te kunnen voeren in het spanningspuntmodel of gebruik te maken van een 1D model.

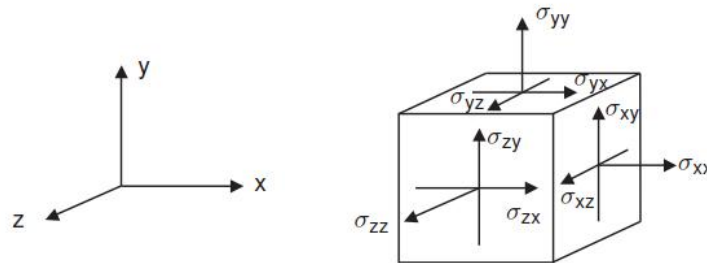
6 Literatuur

- [1] Zwanenburg, C. (2017) POV-M - parameterbepaling EEM Plan van Aanpak, 16 juni 2017
- [2] Panagoulas, S., Brinkgreve, R.B.J. (2017) SHANSEP NGI-ADP Model description and verification examples. PLAXIS.
- [3] PLAXIS (2017). Material Models Manual. Build 8601.
<https://www.PLAXIS.com/support/manuals/PLAXIS-2d-manuals/>
- [4] PLAXIS (2017). Reference Manual. Build 8601.
<https://www.PLAXIS.com/support/manuals/PLAXIS-2d-manuals/>
- [5] Deltares (2016) Protocol laboratoriumproeven voor grondonderzoek aan waterkeringen, rapport nr 1230090-019-GEO, versie 3
- [6] Ohta H., Nishihara A., Morita Y. (1985) Undrained stability of K_0 consolidated clays *proc 11th ICSMFE* San Francisco, I p 613-616
- [7] Mesri, G., Hayat, T. M. (1993). The coefficient of earth pressure at rest. *Can. Geotech. J.*, 30(4), 647-666
- [8] POV-M (2018) Basisrapport Eindige Elementen Methoden, BEEM (in ontwikkeling)
- [9] WBI (2016) Schematiseringshandleiding macrostabiliteit, WBI 2017 versie 2.1,
<https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/primaire/beoordelen-wbi/producten-wbi/#h2a9fe10d-22e2-efce-d77d-e19394d16e49> (laatste bezocht 23 02 2018)
- [10] Lindenberg J. VAN M.A., Koelewijn A.R., Zwanenburg C., Lambert J.W.M., van der Meer M.T., Teunissen P.A.A. (2002) Proefvak Bergambacht evaluatierapport, rapportnummer CO-710301/334
- [11] Grimstad G., Andresen L., Jostad H.P. (2012) NGI-ADP: anisotropic shear strength model for clay *International Journal for numerical and analytical methods in geomechanics* 36:483-497

A Definitie van spanningen en rekken

Een materiaal model is een set wiskundige vergelijkingen welke een relatie geven tussen spanningen en rekken. In de PLAXIS manual wordt uitvoerig beschreven welke relaties bestaan voor welke materiaal modellen en hoe spanningen en rekken zijn gedefinieerd in het programma [ref.3].

In deze bijlage wordt voor de volledigheid herhaald welke spanningen en rekken zijn gedefinieerd binnen de PLAXIS *SoilTest* module en daarmee dus van belang zijn voor het bepalen danwel fitten van de EEM parameterset. De hier genoemde definities zijn overgenomen uit de PLAXIS manual [ref.3]. Merk op dat naast spanningen en rekken ook de tijd als variabele is opgenomen in *SoilTest*.



Figuur A.1 Het gehanteerde Cartesische assenstelsel in PLAXIS en de definities van de spanningen (equivalent voor rekken)

Strain	Eenheid	Toelichting
ε_1	[-]	de rek in de eerste hoofdspansingsrichting
ε_2	[-]	de rek in de tweede hoofdspansingsrichting
ε_3	[-]	de rek in de derde hoofdspansingsrichting
ε_{xx}	[-]	de rek in de x richting in het Cartesische coördinaten stelsel
ε_{yy}	[-]	de rek in de y richting in het Cartesische coördinaten stelsel
ε_{zz}	[-]	de rek in de z richting in het Cartesische coördinaten stelsel
ε_v	[-]	de volumieke rek, deze is gelijk aan $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$ uitgaande van de theorie van kleine rekken
γ_{xy}	[-]	de som van de schuifrek in het xy vlak van de complementaire Cartesische schuifrekken: $\varepsilon_{xy} + \varepsilon_{yx}$
γ_{yz}	[-]	de som van de schuifrek in het yz vlak van de complementaire Cartesische schuifrekken: $\varepsilon_{zy} + \varepsilon_{yz}$
γ_{zx}	[-]	de som van de schuifrek in het zx vlak van de complementaire Cartesische schuifrekken: $\varepsilon_{xz} + \varepsilon_{zx}$
stress		
σ'_1	[kPa]	de effectieve spanning in de eerste hoofdspansingsrichting
σ'_2	[kPa]	de effectieve spanning in de tweede hoofdspansingsrichting
σ'_3	[kPa]	de effectieve spanning in de derde hoofdspansingsrichting
σ'_{xx}	[kPa]	de effectieve spanning in x richting in het Cartesische coördinaten stelsel
σ'_{yy}	[kPa]	de effectieve spanning in y richting in het Cartesische coördinaten

Strain	Eenheid	Toelichting
		stelsel
σ'_{zz}	[kPa]	de effectieve spanning in z richting in het Cartesische coördinaten stelsel
p'	[kPa]	de isotrope effectieve spanning
q	[kPa]	de deviatorische spanning, voor triaxiaal spannings situaties met $\sigma'_2 = \sigma'_3$ is deze gelijk aan $ \sigma'_1 - \sigma'_3 $
s'	[kPa]	$(\sigma'_1 + \sigma'_3) / 2$
t	[kPa]	$(\sigma'_1 - \sigma'_3) / 2$
τ_{xy}	[kPa]	de cartesische schuifspanning in het xy vlak
τ_{yz}	[kPa]	de cartesische schuifspanning in het yz vlak
τ_{zx}	[kPa]	de cartesische schuifspanning in het zx vlak
	[kPa]	waterspanning
time		
t	[dagen]	De tijd

Tabel A.1 Gedefinieerde spanningen en rekken in SoilTest

Noot:

- In PLAXIS worden de rekken en spanningen in de hoofdrichting geordend naar grootte: $\varepsilon_1 \leq \varepsilon_2 \leq \varepsilon_3$ en $\sigma'_1 \leq \sigma'_2 \leq \sigma'_3$.
- In PLAXIS wordt voor druk gebruik gemaakt van negatieve waarden en positieve waarden voor trek.
- In PLAXIS wordt gebruik gemaakt van gamma_xy, dit is de som van eps_xy en eps_yx (equivalent voor de andere vlakken).
- De hoofdspanningsrichtingen zijn de richtingen waarbij de schuifspanningen gelijk zijn aan nul.
- De genoemde eenheden zijn de default eenheden in PLAXIS maar kunnen desgewenst worden aangepast door de gebruiker.

B Gebruik van de *SoilTest* module

B.1 Algemene opmerkingen bij gebruik *SoilTest* module

De werking van de *SoilTest* module is uitvoerig beschreven in de PLAXIS manual [ref.4]. Hier wordt kort en puntsgewijs de werking herhaald. Daarbij worden enkele aandachtspunten benoemd welke relevant zijn voor de geotechnisch ingenieur die wil werken met deze module.

Puntsgewijze werking *SoilTest*:

1. Aanmaken van materiaal set in PLAXIS (invoer van alle parameters).
2. Ga naar *SoilTest* module.
3. Selecteer het gewenste tabblad (c.q. gewenste proef).
4. Instellen van randvoorwaarden proef (drained, steunspanning, overconsolidatie, etc.).
5. Run.
6. Evaluatie van proefresultaten (curves).
7. Eventueel aanpassen materiaal parameters en/of randvoorwaarden proef.
8. Run.
9. Herhaal punt 6, 7 en 8 tot gewenste resultaat.
10. Kopieer aangepaste parameterset naar PLAXIS.

Aandachtspunten:

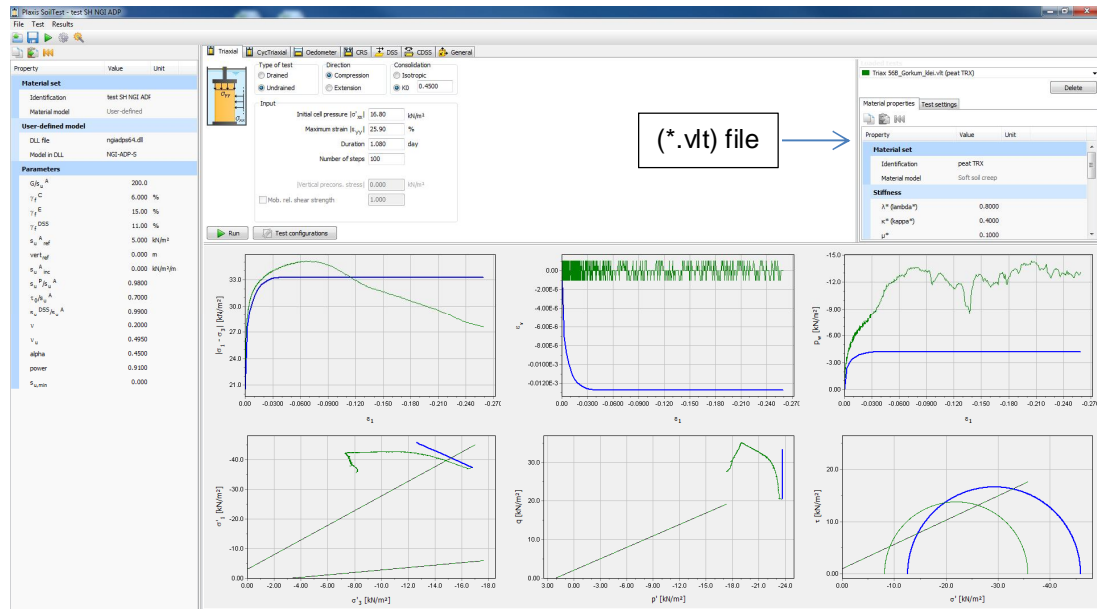
- De *SoilTest* module is gebaseerd op een enkel stresspoint, oftewel “het model” heeft geen fysieke afmetingen. Hierdoor is het o.a. niet mogelijk om afstroming of consolidatie te simuleren in deze module en ook is het niet mogelijk te rekenen met een “updated mesh” c.q. natuurlijke rekken. Gevolg is ook dat de parameters γ_{unsat} en γ_{sat} (welke voor de standaard materiaal modellen worden getoond in het invoer window van *SoilTest*) geen invloed hebben op de resultaten.
- Besef dat het programma (bij de geavanceerde materiaal modellen) vraagt om de verticale (1D) grensspanning, oftewel de maximale verticale spanning die het monster heeft gevoeld. Het programma berekent op basis van deze spanning zelf de isotrope grensspanning, uitgaande van een $K0_{nc}$ spanningspad.
- Bij gebruik van het HS model in *Soiltest* komt de optie *mob. rel. shear strength* beschikbaar.
- Let op: bij toepassing van het SHANSEP materiaal model in *SoilTest* bij in ieder geval de 2017 en 2018 versie van het programma dient een file genaamd “data.ngiadps.rs0” in de temp folder van de betreffende *SoilTest* simulatie (%Temp%\VL_XXXX) te worden geplaatst. Met deze file wordt de SHANSEP modellering van het materiaal model geactiveerd.

B.2 Gebruik van *.vlt file om werkelijke laboratorium resultaten te tonen in *SoilTest*

De bestaande *SoilTest* module biedt reeds de mogelijkheid om, met dezelfde *SoilTest* module, gesimuleerde laboratorium resultaten in te laden via een *.vlt file. Hiermee kunnen verschillende *SoilTest* simulaties naast elkaar worden gevisualiseerd. De *.vlt file is een text file waar de input en output van de simulatie op een logische manier zijn geordend.

Binnen dit project is de gedachte ontstaan dat door aanpassing van deze *.vlt files ook de werkelijke lab data kan worden gevisualiseerd naast de resultaten van het materiaalmodel. Groot voordeel van deze aanpak is dat de relevante curves in dezelfde figuur worden getoond en dus in één oogopslag kunnen worden vergeleken. In deze bijlage is aangegeven

hoe een bestaande *.vlt file zo kan worden aangepast dat hiermee de werkelijke laboratorium resultaten kunnen worden gevisualiseerd in *SoilTest*. Een voorbeeld van het eindresultaat is getoond in onderstaand figuur.



Figuur B.1 Grafisch resultaat SoilTest module (blauwe lijn is simulatie en groene lijn is werkelijk lab resultaat)

Om een eerste *.vlt file te krijgen kan in PLAXIS een zelfde type test gesimuleerd worden (b.v. Triaxial) als degene welke men wil vergelijken en deze kan vervolgens worden opgeslagen. Deze eerste test kan worden uitgevoerd met een willekeurige set randvoorwaarden en parameters. Deze *.vlt file wordt daarna gebruikt om de werkelijke laboratoriumdata in te plakken. In deze file hoeft hiervoor alleen de numerieke data onder het kopje [testresults] te worden aangepast. Overige data in deze file kan ongemoeid worden gelaten (onjuiste aanpassing van deze overige data kan er mogelijk toe leiden dat de *.vlt file niet kan worden geladen).

Om de numerieke testdata aan te passen is het gemakkelijk om b.v. de *.vlt in te laden in een Excel sheet met behulp van de optie "From Text". De numerieke data onder de kop [testresults] kan vervolgens worden vervangen door de werkelijke laboratoriumdata. Onderstaande tabel geeft aan in welke kolom welke parameter geplakt moet worden. Merk op dat een aantal kolommen direct kunnen worden berekend uit de andere kolommen. De relevante formules zijn hieronder opgenomen. Merk ook op dat onderscheid wordt gemaakt tussen axiaalsymmetrische (triaxiaal compressie, K0-CRS en oedometer)en plain strain proeven (DSS).

Kolom	Parameter	Eenheid	Opmerkingen
1	tijd	[dagen]	
2	eps_xx	[-]	0 bij K0-CRS proef want er zijn (theoretisch) geen zijdelingse vervormingen.
3	eps_yy	[-]	Verticale rek = eps_1 (voor axiaalsymmetrische proeven)
4	eps_zz	[-]	0 bij K0-CRS proef want er zijn (theoretisch) geen zijdelingse vervormingen.
5	gamma_xy	[-]	
6	gamma_yz	[-]	0 bij alle reguliere proeven
7	gamma_zx	[-]	0 bij alle reguliere proeven
8	sig'_xx	[kPa]	
9	sig'_yy	[kPa]	Verticale spanning. Sig'_yy = sig_1 voor axiaalsymmetrische proeven
10	sig'_zz	[kPa]	
11	sig_xy	[kPa]	0 bij K0-CRS proef en triaxiaalproef, want er zijn geen schuifvervormingen.
12	sig_yz	[kPa]	0 bij K0-CRS proef en triaxiaalproef, want er zijn geen schuifvervormingen.
13	sig_zx	[kPa]	0 bij K0-CRS proef en triaxiaalproef, want er zijn geen schuifvervormingen.
14	p_w	[kPa]	Waterspanning
15	eps_1	[-]	Verticale rek = eps_1 = eps_a = eps_yy (voor axiaalsymmetrische proeven*)
16	eps_2	[-]	Eps_2 = eps_3 = eps_xx = eps_zz (voor axiaalsymmetrische proeven*)
17	eps_3	[-]	Eps_2 = eps_3 = eps_xx = eps_zz (voor axiaalsymmetrische proeven*)
18	eps_v	[-]	Volume rek, eps_xx + eps_yy + eps_zz
19	sig'_1	[kPa]	grootste hoofdspanning; Verticale spanning sig'_yy = sig'_1, voor axiaalsymmetrische proeven.
20	sig'_2	[kPa]	intermediate stress; sig'_2 = sig'_zz
21	sig'_3	[kPa]	kleinste hoofdspanning; sig'_3 = sig'_xx voor axiaalsymmetrische proeven*
22	p'	[kPa]	(sig'_xx + sig'_yy + sig'_zz)/3
23	q	[kPa]	$\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(sig'_1 - sig'_2)^2 + (sig'_2 - sig'_3)^2 + (sig'_3 - sig'_1)^2}$ (voor plane strain proeven **)

Kolom	Parameter	Eenheid	Opmerkingen
24	q	[kPa]	= q, kolom 23
25	s	[kPa]	(sig'_xx + sig'_yy)/2
26	t	[kPa]	(sig'_1 – sig'_3)/2 waarbij voor plane strain proeven geldt: $\sigma'_1 = \frac{\sigma'_{xx} + \sigma'_{yy}}{2} - \sqrt{\frac{(\sigma'_{xx} - \sigma'_{yy})^2 + \sigma_{xy}^2}{4}}$ $\sigma'_3 = \frac{\sigma'_{xx} + \sigma'_{yy}}{2} + \sqrt{\frac{(\sigma'_{xx} - \sigma'_{yy})^2 + \sigma_{xy}^2}{4}}$
27	t	[kPa]	= t, kolom 26

Tabel B.1 Gewenste informatie per kolom in een *.vlt file

*) axiaalsymmetrische proeven zijn in dit geval de triaxiaal, K0-CRS en oedometer.

**) plane strain proeven zijn in dit geval de DSS.

Aandachtspunten:

- Bij aanpassing van de dummy (*.vlt) file om de werkelijke laboratoriumresultaten te tonen wordt er in principe geen aanpassing gemaakt aan de “header” van de file. In deze “header” staat de algemene informatie rondom de oorspronkelijke *SoilTest* (o.a. de waarden van de materiaal parameters). Deze data wordt ook getoond in *SoilTest* maar is dus niet meer relevant na de aanpassing en dient dus ook te worden genegeerd.
- zorg dat de eenheden op de juiste wijze worden geconverteerd. Een voorbeeld is de tijd, de metingen in een laboratoriumproef zijn dikwijls in seconden, terwijl in PLAXIS om dagen wordt gevraagd.

C Gebruik van *Parameter Optimisation*

C.1 Algemene opmerkingen bij gebruik *Parameter Optimisation*

In de PLAXIS handleiding [ref. 4] is in detail beschreven hoe de *Parameter Optimisation* module werkt en kan worden bediend. Hier wordt kort en puntsgewijs de werking herhaald. Daarbij worden enkele aandachtspunten benoemd welke relevant zijn voor de geotechnisch ingenieur die wil werken met deze module.

Puntsgewijze werking *Parameter Optimisation*:

1. Aanmaken van een materiaal set in PLAXIS.
2. *SoilTest* module openen en type proef selecteren.
3. Run de *SoilTest*.
4. Open de optie *Parameter Optimisation*.
5. Selecteer in het eerste tabblad de gewenste te optimaliseren parameters, geef per parameter een min en max value op waarbinnen de waarde wordt geacht zich te bevinden.
6. In het tweede tabblad "select curves" dienen de curves (waarop het materiaal model wordt gefit) te worden ingeladen. Van deze curves dienen vervolgens alleen de relevante delen te worden geselecteerd. Oftewel de delen van de curves welke overeenkomen met de ook hier geselecteerde fase uit de *SoilTest* run.
 - a. Als voorbeeld: een Oedometer test bestaat uit een belast fase en daarna een ontlast fase. In *SoilTest* bestaat dan een Phase 1: belasten (-100 kPa) en een Phase 2: ontlasten (+50 kPa). Getracht wordt te fitten op de maagdelijke stijfheidsparameter λ^* , hiervoor wordt Phase 1 geselecteerd. Daarnaast dient nu van de ingeladen curve vaneen complete fase, in dit geval, het deel tot -100 kPa te worden geselecteerd. Het programma kan nu voor dit stuk van de curve een fitprocedure runnen.
 - b. Besef verder dat de *Parameter Optimisation* tool dient te weten wat de randvoorwaarden zijn van de betreffende lab test. Default kunnen de settings uit de achterliggende *SoilTest* worden overgenomen. Echter het is mogelijk om aparte settings aan te maken bij b.v. een apart ingelezen curve vanuit een werkelijke lab test.
7. In het derde tabblad Settings wordt aangegeven hoe nauwkeurig de fit procedure dient te zijn.
8. In tabblad 4 worden de numerieke resultaten getoond van de fit procedure. Met behulp van de "sensitivity" parameter wordt aangegeven hoe gevoelig het resultaat is voor aanpassing van deze parameter.
9. In tabblad 5 "resulting charts" worden drie curves getoond: de curve welke volgt uit de invoer in het *SoilTest* programma (reference simulation), de curve welke is ingeladen (de optimisation target) en de resulterende curve op basis van de geoptimaliseerde parameters (optimisation results).
10. Het geoptimaliseerde resultaat van de run (resulting parameters) kan worden gekopieerd naar de materiaal set.

Aandachtspunten:

- Bij sluiten van de *Parameter Optimisation* module (om b.v. een wijziging te maken in de *SoilTest* instellingen) is alle invoer van de *Parameter Optimisation* weg en dient opnieuw te worden ingevoerd.
- Besef dat het mogelijk is om meerdere curves tegelijk in te laden, dus b.v. de resultaten van twee verschillende triaxiaal testen of van 1 triaxiaal test en 2 DSS testen. Hiermee kan het gedrag van het materiaal model voor verschillende spannings(pad) situaties worden gefit.
- Besef dat het mogelijk is om ook gesimuleerde lab data welke is gegenereerd met *SoilTest* direct in te laden in *Parameter Optimisation*. Voorgaande geeft de mogelijkheid om met deze gesimuleerde “perfecte” data de werking van de *Parameter Optimisation* te testen (omdat bekend is wat het antwoord moet zijn).
- De volgende parameters kunnen niet worden geselecteerd in *Parameter Optimisation*: tensile stress en de grensspanning.
- Besef dat je bij selectie van een bepaalde (belastings)fase uit de *SoilTest* run het gehele overeenkomstige deel van de “target” curve selecteert, dit is nodig om het programma goed te laten werken.
- Merk op dat een sensitiviteit van 100% nog niet betekent dat er een perfecte fit is. Het betekent alleen dat deze parameter veel invloed heeft op het model resultaat. Andersom betekent een lage sensitiviteit dat deze parameter niet veel invloed heeft op het fit proces en geeft dit aan dat het modelresultaat niet gevoelig is voor deze parameter en hiermee zal dan automatisch ook geen verbeterde fit zijn opgetreden.

C.2 Ervaringen met *Parameter Optimisation*

Binnen dit project is getest met de *Parameter Optimisation* om ervaring op te doen. Hiervoor zijn diverse *.vlt files met gesimuleerde lab data gegenereerd op basis van diverse materiaal sets en typen proeven. Vervolgens zijn diverse combinaties van deze *.vlt files ingevoerd in *Parameter Optimisation* als “target” curves. Hierbij zijn kleine aanpassingen gemaakt in de startwaarden van de te optimaliseren parameter set. Idee is dat uit de optimalisatie procedure de oorspronkelijke (en bekende) parameter waarden weer moeten worden gevonden. De resultaten van deze testserie zijn met Plaxis b.v. besproken en uit dit overleg zijn de volgende gezamenlijke conclusies getrokken:

- Voor eenvoudige situaties (max. 1 à 2 proeven en 1 à 2 te optimaliseren parameters) is het goed mogelijk om de oorspronkelijke (bekende) parameterset te bepalen.
- Voor de hier geteste meer complexere situaties, meer dan 1 à 2 proeven en 1 à 2 te optimaliseren parameters, werd niet in alle gevallen tot de oorspronkelijk, bekende, parameterset gekomen. Door PLAXIS b.v. zijn deze complexere situaties nader beschouwd en opgelost. Wel volgde uit deze tests dat het nodig is bij selectie van een bepaalde (belastings)fase uit de *SoilTest* run het gehele overeenkomstige deel van de “target” curve ook wordt selecteert, i.p.v. slechts een gedeelte, dit is nodig om het programma goed te laten werken.
- Op basis van de ervaringen met de complexere situaties is geconcludeerd dat *Parameter Optimisation* potentie heeft om te worden toegepast voor complexere situaties. Het is echter benodigd de tool meer uitvoerig te verifiëren alvorens dat deze op grotere schaal kan worden ingezet binnen de POV-M projecten. Binnen de projectkaders was een dergelijke uitvoerige test procedure niet meer mogelijk.

D Voorbeeld uitwerking proefdata

D.1 Introductie

Bijlage D beschrijft een uitgewerkt voorbeeld van het fitten van laboratoriumproefdata. In aansluiting op de cases die in het kader van het basisrapport Eindige Elementen Methoden, BEEM, zijn uitgewerkt, wordt data gebruikt uit het onderzoek rondom de praktijkproef Bergambacht. De praktijkproef Bergambacht had tot doel het faalmechanisme Macrostabieleit bij opdrijven beter te begrijpen. Onderdeel van het onderzoek was het tot bezwijken brengen van een bestaande, niet meer in gebruik zijnde, rivierdijk. De proef werd in de periode 2000 – 2001 uitgevoerd.

Het laboratorium -, en veldonderzoek rondom de proeflocatie Bergambacht is in twee delen uitgevoerd. Het eerste deel was ten behoeve van de voorbereiding en de analyse van de Bergambacht praktijkproef. Dit deel is uitgevoerd in de periode 2000 – 2001. Het tweede deel is uitgevoerd in het WBI kader validatie ongedraineerd rekenen. Het tweede deel is uitgevoerd in de periode 2010. Voor het tweede deel zijn nieuwe proeven uitgevoerd. Echter omdat de dijk, ter plaatse van het proefveld al verwijderd was zijn er in 2010 geen proeven op het dijksmateriaal uitgevoerd.

In de hieronder beschreven parameterbepaling is voor de ondergrond gebruik gemaakt van de proeven uit 2010. Deze proeven sluiten beter aan bij de huidige inzichten dan de proeven die in 2000 / 2001 zijn uitgevoerd. Voor het dijksmateriaal is wel gebruik gemaakt van de proeven uit 2000 / 2001. Bij de eerder uitgevoerde analyses, zowel in 2000/2001 als in 2010 is de ondergrond onderverdeeld in lithostratografische indeling. Deze indeling is overgenomen en niet gecontroleerd. Opgemerkt wordt dat in de werkwijze zoals in het SOS beschreven is wordt uitgegaan van een modernere indeling die niet geheel aansluit op de toen gehanteerde indeling.

De volgende data zijn beschikbaar:

Grondsoort	K0-CRS	Triaxiaal**		DSS**
		CIUC	CAUC	
Hollandveen	2	-	6	3
klei van Tiel	1	-	3	5
klei van Gorkum*	2	-	4	6
Gorkum Licht	2	-	8	11
Gorkum Zwaar	2	-	3	3
basisveen	1	-	-	3
kreftenheije	1	-	-	1
Dijksmateriaal, klei		10	-	

Tabel D.1 Beschikbare laboratoriumproeven

* = Het is ongebruikelijk om naast de kleisoorten Gorkum Licht en Gorkum Zwaar ook nog een grondsoort klei van Gorkum te definiëren. De eerder gemaakte indeling is hier gehandhaafd, waarbij wordt opgemerkt dat de resultaten van de proeven op het materiaal klei van Gorkum een grote overeenkomst laten zien met de grondsoort klei van Gorkum Licht.

** = Er zijn alleen normaal geconsolideerde proeven uitgevoerd.

Van elk monster is het volumiek gewicht bepaald. Op basis van deze waarnemingen zijn de verwachtingswaarden en de karakteristieke onder-, en bovengrens waarden bepaald. Tabel D.2 geeft de resultaten.

Grondsoort	μ	σ	VC	b	o	n
	[kN/m ³]	[kN/m ³]	[-]	[kN/m ³]	[kN/m ³]	[-]
klei van Tiel	14,23	0,40	0,03	14,46	14,00	10
Gorkum klei	13,88	0,93	0,07	14,32	13,44	14
Gorkum Licht	11,86	0,59	0,05	12,08	11,65	23
Gorkum Zwaar	15,44	0,56	0,04	15,77	15,12	10
Hollandveen	10,35	0,37	0,04	10,54	10,17	13
basisveen	10,86	0,41	0,04	11,33	10,38	4
dijksmateriaal	18,45	0,66	0,04	18,71	18,19	19

Tabel D.2 Volumieke gewichten, μ = verwachtingswaarde, σ = standaard afwijking, VC = variatiecoëfficiënt, b = bovengrenswaarde; 5% overschrijdingswaarde, o = ondergrenswaarde; 5% onderschrijdingswaarde, n = aantal waarnemingen

D.2 Parameters Soft Soil Creep model

Deze paragraaf beschrijft de bepaling van de parameters ten behoeve van het Soft Soil Creep model, SSC-model. De parameterbepaling wordt nader toegelicht voor de grondsoort Gorkum licht. De parameterbepaling wordt stapsgewijs opgebouwd. In de eerste stap worden parameters bepaald aan de hand van K₀-CRS data. Dit levert voornamelijk een optimalisatie van de stijfheden op. Vervolgens worden voornamelijk de sterkte parameters nader geoptimaliseerd aan de hand van triaxiaal proeven. Het SSC model kent in totaal 8 parameters:

Stijfheden:

- κ^* = Stijfheid ontlast – herbelast gedrag.
- λ^* = Stijfheid normaal geconsolideerd gedrag.
- μ^* = Kruipparameter.
- ν = Dwarscontractiecoëfficiënt.
- K^{nc}_0 = Verhouding horizontale en verticale spanning voor normaal geconsolideerde condities.

Sterkte:

- φ' = Wrijvingshoek.
- c' = Cohesie.
- ψ = Dilatatiehoek.

Stijfheidsparameters

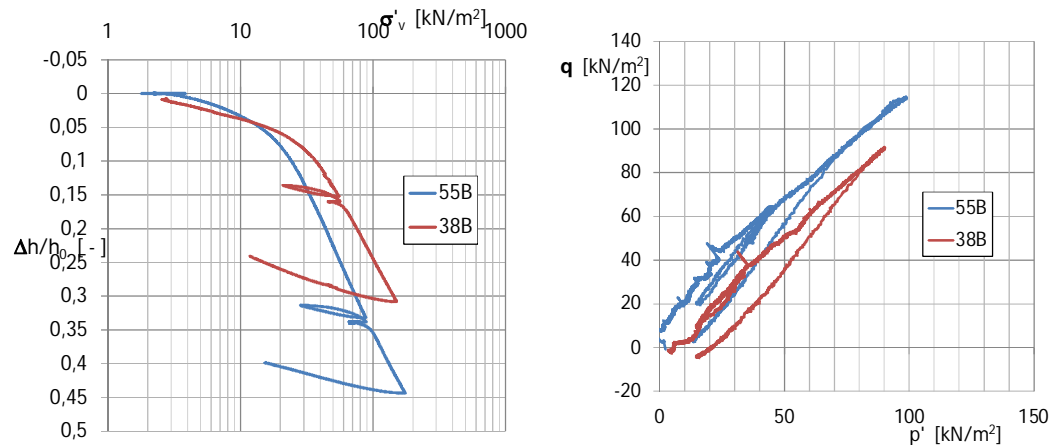
Er zijn twee K₀-CRS proeven beschikbaar voor de grondsoorten Gorkum Licht. Een indruk van de proefresultaten is gegeven in Figuur D.1

De hier besproken K₀ – CRS proeven zijn uitgevoerd in de volgende 6 stappen:

1. Belastfase
2. Ontlastfase
3. Her-belastfase

4. Relaxatiefase
5. Herbelast fase
6. Ontlast fase – einde proef.

In de relaxatiefase wordt de hoogte van het monster constant gehouden terwijl de spanningsafname wordt gemeten. Uit de snelheid van spanningsafname wordt de kruipparameter bepaald. De stijfheid λ^* volgt uit de helling van de belastfase, κ^* uit de helling van de ontlast – herbelast lus. De waarde voor K_0^{nc} volgt uit de gemeten verhouding van de horizontale en verticale spanning na het overschrijden van de grensspanning.



Figuur D.1 Gorkum licht, proefresultaten K_0 -CRS proeven 55B en 38 B

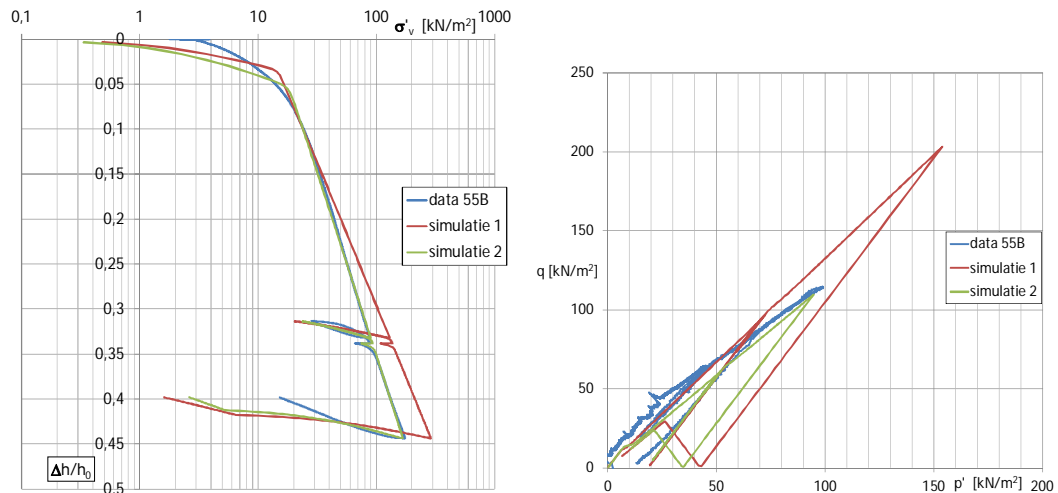
De proefresultaten laten zien dat de beide proefstukken een verschillende grensspanning, σ'_{vy} , kennen. Echter, de stijfheden, de hellingen van het spannings – rek verloop tonen overeenkomsten. Ook de helling van het $p' - q$ diagram van beide proeven lijkt op het eerste gezicht overeen te komen.

Op basis van de standaard uitwerking van de proefresultaten zijn de eerste waarden voor de stijfheden bepaald.

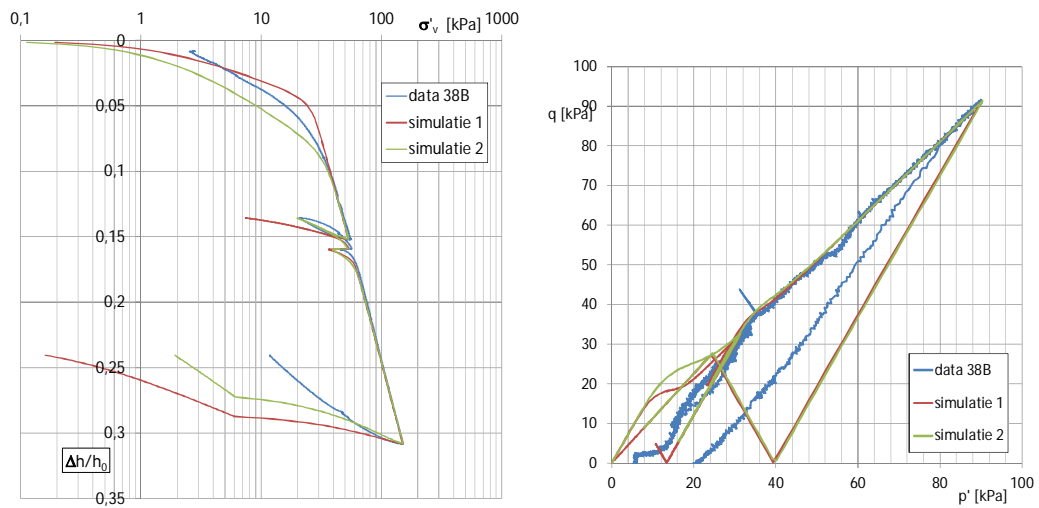
Parameter	Eenheid	55B	38B
γ	[kN/m ³]	11,16	11,65
κ^*	[-]	0,0153	0,0175
λ^*	[-]	0,1400	0,1522
μ^*	[-]	0,0075	0,020
K_0^{nc}	[-]	0,30	0,40
σ'_{vy}	[kN/m ²]	12,5	22

Tabel D.3 Parameters voor de proeven 55B en 38B, conform de standaard uitwerking

Figuur D.2 en Figuur D.3 tonen het resultaat van de simulaties. Simulatie 1 is gebaseerd op de parameters die volgen uit de standaard uitwerking, Tabel D.3 en simulatie 2 toont het resultaat van de optimalisatie van de parameters. Tabel D.3 geeft geen informatie omtrent de sterkte parameters en de dwarscontractiecoëfficiënt. Deze parameters zijn echter wel nodig om simulaties te kunnen maken. Voor de dwarscontractiecoëfficiënt is uitgegaan van een defaultwaarde, $\nu_{ur} = 0,15$. De sterkte parameters worden nader bepaald bij de simulatie van de sterkte proeven. In de simulatie van de $K_0 - CRS$ proeven is aangehouden, $c' = 0$, $\varphi' = \text{asin}(1-K_0^{nc})$.



Figuur D.2 Simulaties proef 55B, simulatie 1 met parameters uit Tabel D.3, simulatie 2 met geoptimaliseerde parameters



Figuur D.3 Simulaties proef 38B, simulatie 1 met parameters uit Tabel D.3, simulatie 2 met geoptimaliseerde parameters

Uit de simulatie volgt dat de standaardbepaling van de parameters de proefresultaten redelijk benadert, maar dat optimalisatie van de resultaten mogelijk is. Voor proef 55B levert de standaard uitwerking een te lage waarde voor λ^* . In het spannings – rek diagram, linker grafiek van Figuur D.2 loopt simulatie 1, rode lijn, voor het normaal geconsolideerde deel minder steil dan de meetdata, blauwe lijn. In het p' - q diagram, rechtergrafiek van Figuur D.2 is dit terug te zien aan de aanzienlijk hogere waarde voor q die simulatie 1, rode lijn, ten opzichte van de meetdata, blauwe lijn, wordt gevonden.

Voor proef 38B, Figuur D.3, komt het maagdelijk gedrag van simulatie 1, rode lijn, goed overeen met de meetdata, blauwe lijn. Echter, in de ontlastfase wordt bij dezelfde, opgelegde, afname in rek in simulatie 1, rode lijn, een grotere afname in spanningen gevonden dan in de metingen, blauwe lijn. Dit is met name zichtbaar in de spannings – rek relatie, de linker grafiek van Figuur D.3. In simulatie 2 is de waarde voor κ^* zodanig verhoogd dat simulatie en

metingen overeenkomen. Voor beide proeven geldt dat het aanpassen van de stijfheden κ^* en λ^* dat de grensspanning iets moet worden aangepast om in de simulatie het normaal geconsolideerde deel van de spannings – rek relatie in overeenstemming te brengen met de metingen.

De kruipparameter μ^* kan worden gecontroleerd aan de hand van de relaxatiefase. De grootte van de spanningsafname in de relaxatiefase wordt bepaald door μ^* . Voor beide proeven geldt dat er geen reden is om de waarde voor μ^* uit simulatie 1 aan te passen.

De waarde van K_0^{nc} bepaald, onder andere, de verhouding tussen de horizontale en verticale spanningen voor normaal geconsolideerd gedrag. Dit is in het p' - q diagram, de rechtergrafiek van Figuur D.2 en Figuur D.3, terug te vinden in de helling van het spanningspad. Hoe hoger de waarde voor K_0^{nc} hoe lager het spanningspad in p' - q grafiek komt te liggen. Na het aanpassen van de stijfheden, waardoor de grootte van de maximale waarde van q in de simulatie overeenkomt met de meetdata, is alleen voor proef 55B de K_0^{nc} – waarde iets verhoogd.

De helling van de ontlast – herbelast tak in het p' - q diagram wordt bepaald door de waarde van v_{ur} . In simulatie 2 is de waarde voor v_{ur} niet aangepast ten opzichte van simulatie 1.

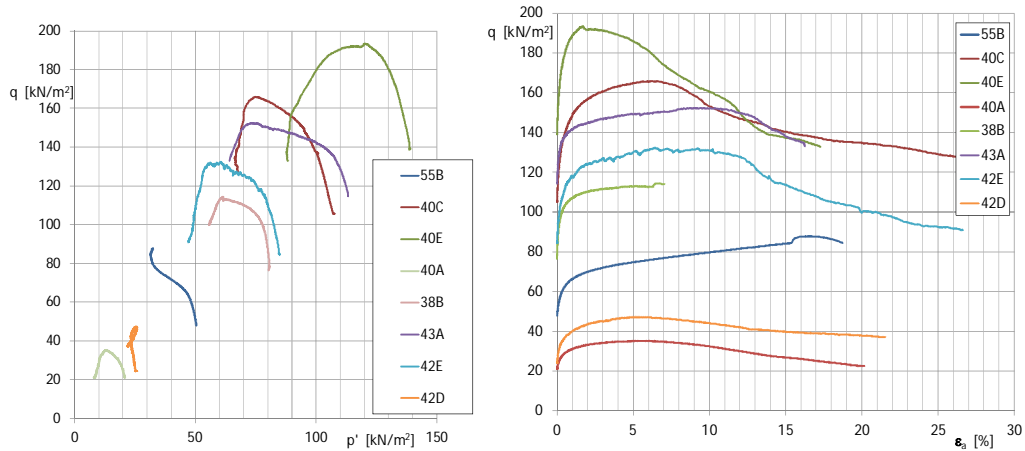
De stappen 2 en 3, de ontlast en herbelast stap leiden tot een hysteresis in het spannings – rek diagram. Het SSC model kent één stijfheid voor het ontlast – herbelast gedrag. Hierdoor wordt in de simulatie de hysteresis gereduceerd tot een lijn. De simulatie dient door het begin -, en eindpunt van de hysteresis te lopen. Opgemerkt wordt dat het fitten van κ^* aan stap 6, ontlast stap – einde proef, leidt tot een andere waarde voor κ^* . Omdat hoge waarden voor κ^* , slapper gedrag, leiden tot onrealistische berekeningsresultaten voor dijkberoevingen in de fase waarin de verhoogde (grond) waterstanden worden geactiveerd, wordt κ^* gefit aan de stappen 2 en 3 en niet aan stap 6.

Parameter	Eenheid	55B	38B
γ	[kN/m ³]	11,16	11,65
κ^*	[-]	0,022	0,03
λ^*	[-]	0,180	0,1522
μ^*	[-]	0,010	0,020
K_0^{nc}	[-]	0,35	0,40
σ'_{vy}	[kN/m ²]	16	30

Tabel D.4 Parameters voor de proeven 55B en 38B na optimalisatie

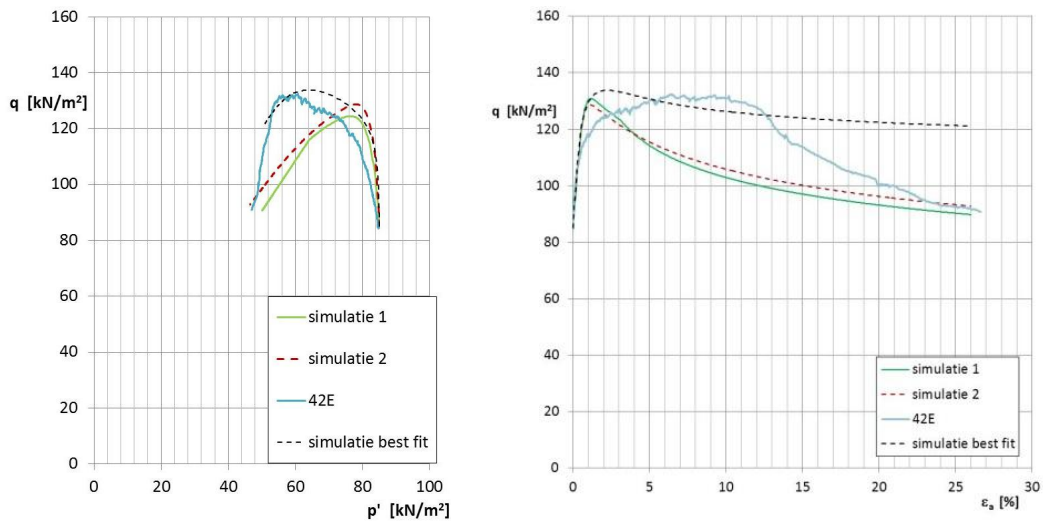
sterkte parameters

In totaal zijn er 8 triaxiale compressieproeven op het materiaal Gorkum licht uitgevoerd. Alle proeven zijn normaal geconsolideerd uitgevoerd. De monsters zijn anisotroop geconsolideerd onder een verhouding van $\sigma'_h / \sigma'_v = 0,4$.

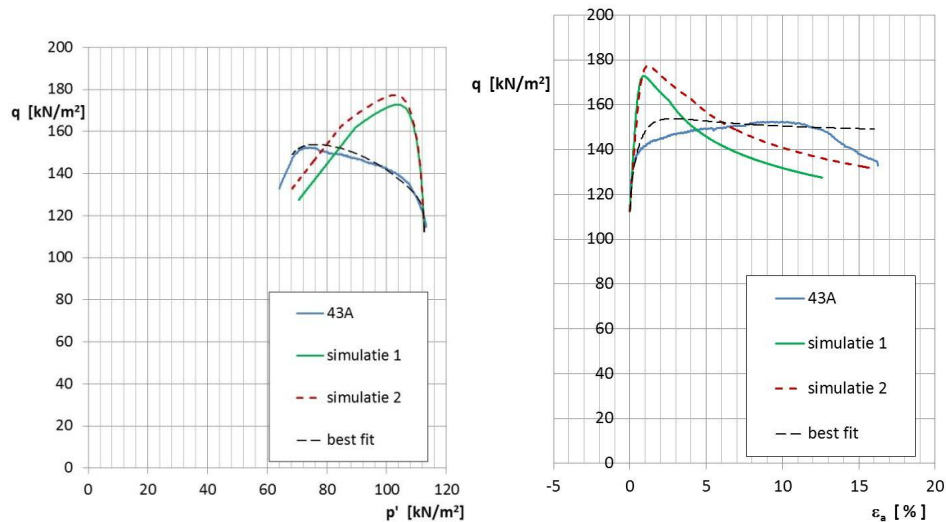


Figuur D.4 Resultaten triaxiaalproeven

Figuur D.4 toont de resultaten van de triaxiaal compressie proeven. De spanningspaden zijn niet gelijkvormig. Het spanningspad van proef 42D en 55B wijken af van de vorm van de andere spanningspaden. Het zal dan ook niet mogelijk zijn om met een parameterset alle proeven naar behoren te kunnen fitten. Er zijn twee proeven uitgekozen met een, voor dit materiaal, representatief verloop van het spanningspad. Dit zijn de proeven 42E en 43A.



Figuur D.5 Simulatie triaxiaalproef 42E, simulatie 1 met parameters Tabel D.4 proef 38B, simulatie 2 met ge-optimaliseerde parameter, simulatie best fit geeft de beste benadering van het spanningspad



Figuur D.6 Simulatie triaxiaalproef 43A, simulatie 1 met parameters Tabel D.3 proef 38B, simulatie 2 met geoptimaliseerde parameter, simulatie best fit geeft de beste benadering van het spanningspad

Figuur D.5 en Figuur D.6 tonen de simulaties van de proeven 42E en 43A. Simulatie 1 gaat uit van de parameter waarden uit Tabel D.4. Simulatie 2 geeft de benadering met geoptimaliseerde waarden weer. Tot slot geeft de simulatie best fit de beste benadering van de spanningspad weer. In de volgende alinea's zal worden aangetoond dat bij deze best fit gebruik wordt gemaakt van onrealistische parameters.

Parameter	Eenheid	Waarde
γ	[kN/m ³]	11,86
κ^*	[-]	0,03
λ^*	[-]	0,1522
μ^*	[-]	0,02
ν_{ur}	[-]	0,15
K^{nc}_0	[-]	0,4
c'	[kPa]	5
φ'	[°]	44
ψ	[°]	0

Tabel D.5 Definitieve parameterset Gorkum Licht

Simulatie 1 gaat uit van de stijfheden uit Tabel D.4. De toegepaste sterkte eigenschappen voor simulatie 1 zijn $c' = 0$, $\psi = 0$ en $\varphi' = 44^\circ$. In simulatie 2 is de cohesie verhoogd naar $c' = 5$ kN/m². Simulatie 1 en simulatie 2 hebben voor de proeven 42E en 43A dezelfde parameterset. Voor proef 42E geldt dat de grootte van de pieksterkte en de eindsterkte in de simulatie 2 overeenkomst met de meetdata. Echter, de piek wordt zowel in het spanningspad als in de spannings – rek diagram in simulatie eerder bereikt dan in de meetdata. Voor proef 43A wordt in simulatie 2 een hogere pieksterkte gevonden dan in de meetdata. Voor beide proeven geldt dat het spanningspad ronder is dan in de simulaties wordt gevonden. Het spannings – rekdiagram van de meetdata geeft na het bereiken van een axiale rek van 1% een geleidelijke toename van de gemobiliseerde weerstand, strain hardening. Bij een axiale rek van circa 12% neemt het spannings-rek diagram sterk af, mogelijk treedt hier glijvlakvorming op. Het strain hardeningsgedrag, het traject $1\% < \varepsilon_a < 12\%$, kan niet goed met het SSC model worden gesimuleerd.

De mate van ronding van het spanningspad wordt bepaald door de mate waarin wateroverspanning wordt gegenereerd tijdens het afschuiven. In het SSC model wordt de mate waarin wateroverspanning wordt gegenereerd tijdens het afschuiven bepaald door de verhouding van stijfheden, κ^* / λ^* en de waarde voor K_0^{nc} . Een hogere waarde voor K_0^{nc} leidt tot een toename van wateroverspanning tijdens afschuiven en daarmee tot een ronder spanningspad. Echter, de K_0^{nc} kan in het SSC model niet vrij gekozen worden. Het SSC model combineert een cam clay-type vloeicontour met het Mohr – Coulomb bezwijkcriterium. De waarde voor K_0^{nc} bepaald mede de vorm van het vloeicontour. Het vloeicontour kan niet onder de Mohr-Coulomb bezwijklijn komen te liggen vanwege numerieke instabiliteit. Omdat het sterkte gedrag van Gorkum licht, een humeuze klei, met een relatief hoge ϕ' beschreven kan worden, kan de waarde van K_0^{nc} niet groter dan 0,4 worden gekozen. Dit wordt door de software aangegeven.

Een alternatieve mogelijkheid om de vorm van het spanningspad aan te passen is het veranderen van de stijfheden. In Figuur D.5 en Figuur D.6 wordt dit weergegeven met simulatie best fit. De simulatie best fit voor proef 42E is gevonden door een zeer lage waarde voor μ^* te kiezen; $\mu^* = 0,005$, in combinatie met een verhoging van de sterkte parameters, $c' = 10 \text{ kN/m}^2$ en $\phi' = 50^\circ$. Voor proef 43A is dit gevonden door een zeer hoge waarde voor λ^* te kiezen, $\lambda^* = 0,5$, in combinatie met $c' = 10 \text{ kN/m}^2$ en $\phi' = 44^\circ$. Hoewel deze parameters een goede simulatie van het spanningspad opleveren kunnen deze parameters niet gebruikt worden. Immers in de vervormingsberekeningen zou hiermee onrealistische vervormingen worden uitgerekend.

Opgemerkt wordt dat in de SSC model de kruipparameter μ^* mede bepalend is voor de hoogte van de pieksterkte en de daarop volgende softening. Verandering van μ^* of de uitvoersnelheid van de proef heeft gevolgen voor de gevonden softening.

Bij het uitvoeren van de fits zijn de volgende aandachtspunten geconstateerd:

- Relatie K_0^{nc} en ϕ' : Het SSC model combineert het bezwijkcriterium van Mohr Coulomb met een vloeicontour. De waarde van K_0^{nc} is mede bepalend voor de vorm van de contour. Voor details wordt verwezen naar de PLAXIS handleiding. Dit stelt eisen aan de waarde voor K_0^{nc} . Deze eisen zijn afhankelijk van de waarde die voor ϕ' wordt toegepast. Voor humeuze klei of veen kan het nodig zijn een hoge waarde voor ϕ' toe te passen. Dit heeft tot gevolg dat de waarde voor K_0^{nc} relatief laag moet zijn. In dat geval worden hoge waarden door het programma niet geaccepteerd, terwijl een hoge waarde wenselijk zou zijn om de kromming van het spanningspad goed te kunnen benaderen. In dat geval zal een steiler spanningspad dan uit de proeven volgt moeten worden geaccepteerd.
- Een lage waarde voor K_0^{nc} kan er toe leiden dat in de berekening, voor de bewuste laag, snel plastisch bezwijken wordt gevonden. Hierop dient te worden gecontroleerd en indien relevant dient de waarde van K_0^{nc} te worden verhoogd.
- Sommige materiaalsoorten zoals siltige klei vertonen dilatant gedrag. In ongedraineerde proeven wordt bij toenemende vervorming een toenemende sterkte gevonden. Dergelijk gedrag wordt niet alleen in natuurlijke afzettingen gevonden, maar ook in antropogene gronden zoals dijksmateriaal. In laboratorium omstandigheden kan aanzuiging van water worden voorkomen, waardoor, als gevolg van het ongedraineerd gedrag de sterktes behoorlijk kunnen oplopen. Ook rekenkundig worden bij simulatie van ongedraineerd gedrag zeer grote sterktes worden gevonden indien dilatantie, $\psi > 0^\circ$, wordt toegestaan. Voor veldcondities is het niet waarschijnlijk dat volledig ongedraineerd gedrag zal optreden. De siltige lagen zijn veelal redelijk doorlatend waardoor rondom het glijvlak tijdens het optreden van een afschuiving enige consolidatie op kan treden en het gedrag

als gedraineerd of gedeeltelijk gedraineerd kan worden beschouwd. In de schematiseringshandleiding van het WBI wordt dan ook voorgeschreven deze lagen als gedraineerd te beschouwen.

- Bij het fitten van de proeven is het aan te bevelen de verhouding tussen de verschillende parameters te controleren. Op basis van literatuur over samendrukkingsparameters, o.a. Den Haan & Kruse 2007¹ kunnen bandbreedtes van de stijfheidsparameters, κ^* , λ^* en kruipparameters, μ^* , worden gegeven:

- $5 < \lambda^* / \kappa^* < 20$.
- $0,02 < \mu^* / \lambda^* < 0,1$.

D.3 Parameters Hardening Soil model

De parameterbepaling voor het Hardening soil model wordt toegelicht aan de hand van de proeven op klei van Tiel, zie. Hierbij is gebruikt gemaakt van de K_0 -CRS proef 49A en de triaxiaalproef 35A. Behoudens de advanced parameters kent het Hardening Soil model 11 parameters:

Stijfheid

E_{50}^{ref} = Stijfheid deviatorische belasting.

E_{ur}^{ref} = Elastische stijfheid ontlast - herbelast belasting.

E_{oed}^{ref} = Stijfheid isotrope belasting.

m = Macht stijfheid – spanningsrelatie.

R_f = Verhouding bezwijksterkte en hoger gelegen asymptoot; beschrijft kromming in $q - \varepsilon_a$ verloop.

K_0^{nc} = Verhouding horizontale en verticale spanning voor normaal geconsolideerde condities.

ν_{ur} = Dwarscontractiecoëfficiënt.

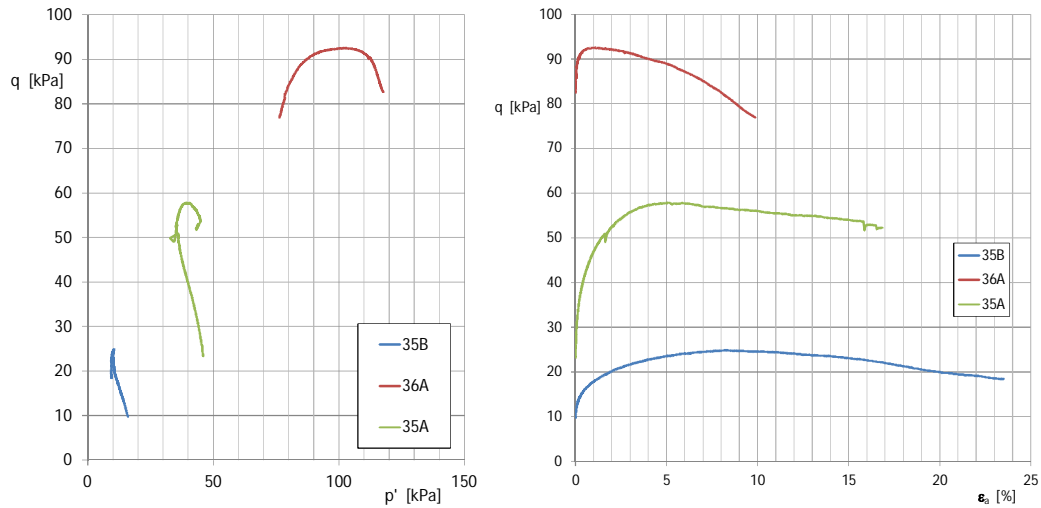
Sterkte

c' = Cohesie [kPa].

φ' = Wrijvingshoek [°].

ψ = Dilatantiehoek [°].

¹ Den Haan E.J. Kruse G.A.M. (2007) *Characterisation and engineering properties of Dutch peats in: characterisation and engineering properties of natural soils* Tan, Phoon, Hight & Leroueil (eds) Taylor & Francis Group London ISBN 978-0-415-42691



Figuur 6.1 Beschikbare triaxiaalproeven op klei van Tiel

De parameterbepaling voor het Hardening Soil model wordt toegelicht aan de hand van de resultaten voor de grondsoort klei van Tiel.

De eerste schatting van de stijfheidsparameters is gebaseerd op de E_{50}^{ref} en vaste verhoudingen tussen de E_{ur}^{ref} en E_{oed}^{ref} met E_{50}^{ref} . De afschuifase van proef 35A is ongedraineerd uitgevoerd en levert derhalve E_{50}^u als stijfheidsparameter. De schatting, uitgaande van lineair elastisch materiaalgedrag, van E_{50}^{ref} uit E_{50}^u is als volgt uitgevoerd:

$$E_{50} = \frac{2(1+\nu)}{2(1+\nu_u)} E_{50}^u,$$

$$E_{50}^{ref} = E_{50} \left(\frac{p_{ref}}{\sigma'_h} \right)^m$$

Waarin:

- E_{50}^u = Waarde E_{50} uit ongedraineerde triaxiaalproef.
- ν = Dwarscontractiecoëfficiënt.
- ν_u = Dwarscontractiecoëfficiënt voor ongedraineerd gedrag.
- E_{50} = Gedraineerde waarde E_{50} .
- m = Macht, $m = 0,9$.
- p_{ref} = Referentie waarde spanning, $p_{ref} = 100$ kPa.
- σ'_h = Steundruk tijdens afschuifase triaxiaalproef.
- E_{50}^{ref} = Referentiewaarde E_{50} .

In totaal zijn er drie triaxiaal proeven uitgevoerd op het materiaal klei van Tiel. Uit deze proeven volgt aan de hand van de bovenstaande vergelijkingen; $E_{50}^{ref} = 26,12$, $12,88$ en $18,34$ MPa en een gemiddelde waarde van $E_{50,gem}^{ref} = 19,11$ MPa. Aan de hand van deze gemiddelde waarde is een schatting, uitgaande van lineair elastisch materiaalgedrag, voor de E_{ur}^{ref} en E_{oed}^{ref} gemaakt op basis van:

$$E_{ur}^{ref} = 3E_{50}^{ref}$$

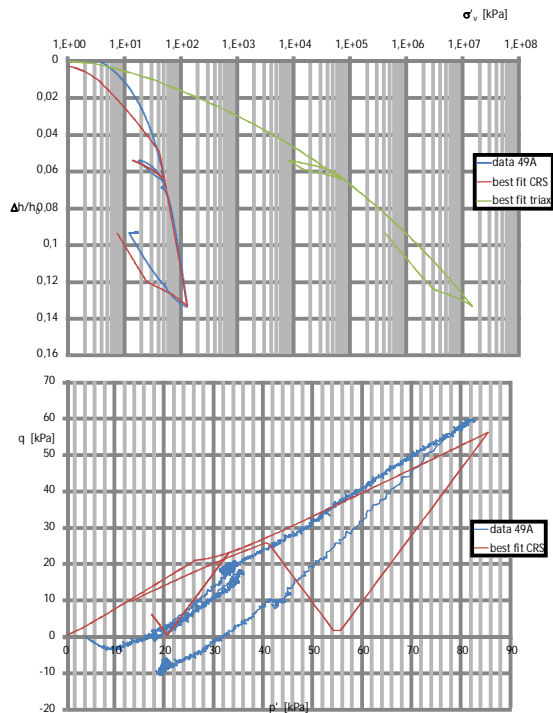
$$E_{oed}^{ref} = \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} E_{50}^{ref}$$

met $\nu = 0,15$ volgt $E_{ur}^{ref} = 57,3$ MPa en $E_{oed}^{ref} = 20,2$ MPa.

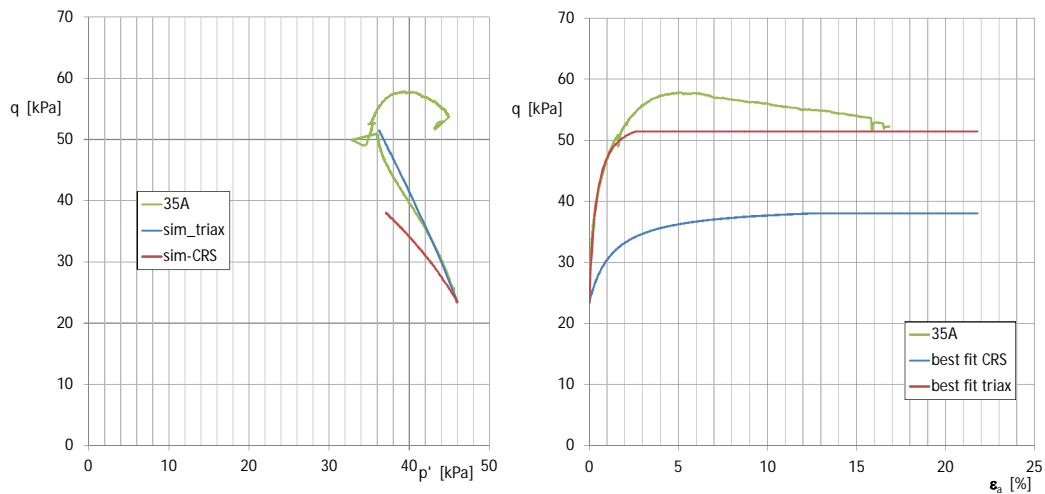
Voor de parameters m en R_f zijn de default waarden aangehouden, $m = R_f = 0,9$.

Parameter	Eenheid	Best fit CRS	Best fit triax
volume gewicht, γ	[kN/m ³]	14,23	14,23
E_{50}^{ref}	[kPa]	2 500	19 113
E_{oed}^{ref}	[kPa]	1 350	20 182
E_{ur}^{ref}	[kPa]	13 000	57 340
m	[-]	0,9	0,9
R_f	[-]	0,9	0,9
K_0	[-]	0,55	0,44
ν_{ur}	[-]	0,15	0,15
c'	[kPa]	0	0
φ'	[°]	26	34
ψ	[°]	0	0

Tabel 6.1 Resultaat fitten CRS proef 49A en triaxiaalproef 35A



Figuur 6.2 Resultaat fit CRS proef 49A



Figuur 6.3 Resultaat fit triaxiaal proef 35A

Figuur 6.2 en Figuur 6.3 laten zien dat zowel de CRS proef als de triaxiaal proef met de juiste parameterkeuze goed benaderd kunnen worden. Echter de hiervoor benodigde parameters verschillen sterk. Voor een goede simulatie van de triaxiaal compressie proeven dienen de stijfheden, E_{50}^{ref} , E_{oed}^{ref} en E_{ur}^{ref} vier tot acht maal hoger te worden gekozen dan de stijfheden waarmee de K0-CRS proef goed wordt gesimuleerd. Het is voornamelijk niet goed mogelijk gebleken om met een parameterset zowel K0-CRS proef als de triaxiale compressieproef te kunnen benaderen. Met name de E_{oed}^{ref} heeft een grote invloed op het fitten van de CRS proef. Een relatief kleine verhoging in E_{oed}^{ref} leidt tot aanzienlijk hogere spanningen. Als gevolg van de door PLAXIS gehanteerde toelaatbare bandbreedte in verhouding van parameters is het niet mogelijk een lage waarde voor E_{oed}^{ref} te combineren met hoge waarden voor E_{ur}^{ref} en E_{50}^{ref} al zou dit mogelijk een goede simulatie van zowel de CRS als triaxiaal proef met een parameterset mogelijk maken.

De *SoilTest* module geeft de mogelijkheid om pre-shearing apart van de isotrope voorbelasting op te geven door middel van de optie *mob. rel. shear strength*. Door deze een waarde te geven, tussen 0 en 1, zal het stijfheidsgedrag bij verder mobiliseren van de schuifweerstand deels of geheel, bij waarde 1,0, met de voorbelast stijfheid, E_{ur} , worden gemodelleerd. Door gebruik te maken van deze waarde bij normaal geconsolideerde proeven wordt de shear strain hardening deels of geheel, bij waarde 1,0, uitgezet. Opgemerkt wordt dat indien bij het fitten van normaal geconsolideerde triaxiaalproeven een hoge waarde voor *mob. rel. shear strength* wordt toegepast, goede fits van triaxiaalproeven en CRS proeven met één dataset mogelijk zijn. Echter, in de reguliere berekening is het niet mogelijk deze optie te gebruiken. Tevens wordt opgemerkt dat indien de optie *mob. rel. shear strength* bij normaal geconsolideerde proeven op 1,0 wordt gezet het HS model functioneert als het Soft Soil model.

In de stabiliteitsanalyse van dijken ligt de nadruk op de sterkte berekening en minder op het correct voorspellen van de verplaatsingen. Daarom zijn in het vervolg de parameters alleen bepaald voor de triaxiaal compressieproeven en zijn de resultaten niet meer vergeleken met de K0-CRS proeven. Dit heeft tot gevolg dat de parameters niet kunnen worden gebruikt voor het bepalen van de zettingen in het ontwerp van de dijkversterking.

Met betrekking tot het fitten van de proefdata met het Hardening Soil model gelden de volgende opmerkingen:

- Uit praktische overwegingen kan $E_{oed}^{ref} = E_{50}^{ref}$ worden gekozen.
- De verhouding tussen $E_{ur}^{ref} / E_{50}^{ref}$ heeft net als de waarde voor K_0 invloed op de kromming van het spanningspad.
- Een verlaging van $E_{ur}^{ref} / E_{50}^{ref}$ leidt tot een steiler verloop van het spanningspad.
- Het verlagen van de K_0^{nc} waarde heeft hetzelfde effect.
- De verhouding $E_{ur}^{ref} / E_{50}^{ref}$ ligt in de orde van $2 < E_{ur}^{ref} / E_{50}^{ref} < 5$.

D.4 Parameters SHANSEP NGI-ADP model

Het SHANSEP NGI ADP model is een nieuw model dat gebruik maakt van een aantal parameters waar voor de Nederlandse praktijk vooralsnog weinig ervaring mee is opgedaan. Conform de parameterbepaling voor het SSC en HS model is eerst een schatting van de verschillende parameters gemaakt. Deze zijn vervolgens met behulp van het fitten van proefresultaten in PLAIXS *SoilTest* module geoptimaliseerd. Bij de analyse van de proefdata is gebruik gemaakt van de triaxiaal compressieproeven en van de Direct Simple Shear proeven. Er zijn geen triaxiale extensie proeven voor handen.

De parameter G/s_u^A is bepaald uit triaxiaal compressieproeven. Hiertoe is de E_{50}^u die per proef bepaald is omgerekend naar G . Vervolgens is per proef G/s_u bepaald. De gemiddelde G/s_u is gebruikt als de startwaarde voor de fitprocedure. Opgemerkt wordt dat de DSS proeven ook een waarde voor G en s_u opleveren. Echter de verhouding van die levert G/s_u^{DSS} op en niet de actieve waarde G/s_u^A .

Om de verhouding s_u^P/s_u^A en s_u^{DSS}/s_u^A te bepalen is uit de triaxiaalproeven en DSS proeven de ratio $S^A = s_u^A/\sigma'_c$ en $S^{DSS} = s_u^{DSS}/\sigma'_c$ bepaald. Vervolgens is S^P bepaald door aan te nemen dat de verhouding S^A / S^{DSS} gelijk is aan S^{DSS}/S^P met $S^P = s_u^P/\sigma'_c$. Vervolgens zijn de verhoudingen s_u^P/s_u^A en s_u^{DSS}/s_u^A gelijk gesteld aan S^P/S^A en S^{DSS}/S^A . De waarden voor ν zijn gelijk genomen aan de waarden die zijn toegepast voor het HS model. Voor ν_u is de default waarde 0,495 toegepast. De waarden voor $s_u^A_{ref}$ en $vert_{ref}$ kunnen in de *SoilTest* module niet worden gefit en worden in de berekening niet gebruikt indien de initiële toestand met het HS model of het SSC model wordt geactiveerd en het SHANSEP NGI-ADP model alleen voor ongedraineerde sterkte berekeningen wordt toegepast. De waarden voor γ_f^C en γ_f^{DSS} zijn bepaald door middel van het fitten van proefdata. Vervolgens is γ_f^E bepaald door het verschil tussen γ_f^E en γ_f^{DSS} gelijk te laten zijn aan het verschil tussen γ_f^C en γ_f^{DSS} . Voor de parameter m is 0,8 aangehouden voor alle grondlagen. De waarde voor α is gelijk aan de eerder genoemde S^A . In het onderstaande tabellen zijn in aansluiting op de WBI methode de sterkte bij grote rek bepaald.

Grondsoort	γ [kN/m ³]	G/s_u^A [-]	γ_f^C [%]	γ_f^{DSS} [%]	γ_f^E [%]	$S_u^A_{ref}$ [kN/m ²]
Dijksmateriaal	18,45					-
Klei Tiel	14,23	68,5	8	10	12	-
Hollandveen	10,35	40,9	10	12	14	-
Klei Gorkum licht (humeus)	11,86	51,3	8	10	12	-
klei Gorkum	13,88	115,4	5	9	13	-
klei Gorkum zwaar	15,44	221,4	4	8	12	-
basisveen	10,86	idem Hollandveen (4)				

Tabel 6.2 Bepaling parameters SHANSEP NGI-ADP model

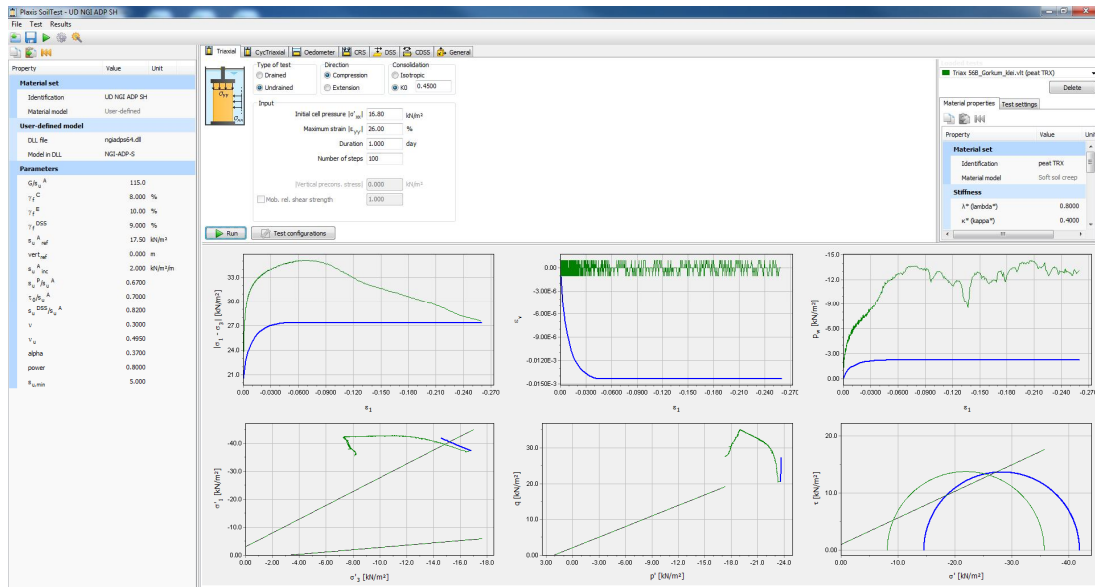
Grondsoort	$vert_{ref}$ [m]	$S_u^A inc$ [kN/m ² /m]	S_u^P/S_u^A [-]	τ_0/S_u^A [-]	S_u^{DSS}/S_u^A [-]	ν [-]	ν_u [-]
Dijksmateriaal	-	0	0,33	0,5	0,66	0,2	0,495
Klei Tiel	-	0	0,45 ^a	0,5	0,73 ^b	0,15	0,495
Hollandveen	-	0	0,79	0,5	0,89	0,2	0,495
Klei Gorkum licht (humeus)	-	0	0,69	0,6	0,83	0,2	0,495
klei Gorkum	-	0	0,67	0,7	0,82	0,2	0,495
klei Gorkum zwaar	-	0	0,30	0,7	0,55	0,15	0,495
basisveen	idem Hollandveen (4)						

Tabel 6.3 Bepaling parameters SHANSEP NGI-ADP model

Grondsoort	α	m	$S_{u,min}$ [kN/m ²]	OCR_{min} [-]	POP_{min} [-]	nr
Dijksmateriaal		0,8	5	1	1	OB
Klei Tiel	0,27	0,8	5	1	1	12
Hollandveen	0,36	0,8	5	1	1	4
Klei Gorkum licht (humeus)	0,33	0,8	5	1	1	15
klei Gorkum	0,32	0,8	5	1	1	16
klei Gorkum zwaar	0,31	0,8	5	1	1	17
basisveen	idem Hollandveen (4)					

Tabel 6.4 Bepaling parameters SHANSEP NGI-ADP model

Onderstaand is een voorbeeld gegeven van de fit van het SHANSEP NGI-ADP model op een monster van Gorkum klei.



Figuur D.7 Resultaten van fit proces m.b.v. SHANSEP NGI-ADP model op een monster van Gorkum klei.

Ervaringen opgedaan bij het fit proces:

- De standaard PLAXIS GUI voor het “normale” NGI-ADP model kan worden gebruikt om te toetsen of een bepaalde parameter combinatie acceptabel is voor het programma. Er gelden meerdere restricties, b.v. $\gamma_f^c < \gamma_f^{DSS} = \gamma_f^{DSS}$.
- Het is op dit moment nog niet mogelijk in PLAXIS een overconsolidatie in te voeren bij het gebruik van het SHANSEP model in *SoilTest*. Hiermee kan de parameter m dus nog niet worden gefit.
- Uit [ref.2] volgt rondom het model gedrag het volgende: voorafgaand aan activatie van het SHANSEP gedeelte van het model is het ongedraineerde sterkte profiel bepaald door de parameters $s_{u\ ref}^A$ en $s_{u\ inc}^A$ van het NGI-ADP model en de bijbehorende ratios t.o.v. s_u^{DSS} en s_u^P . De elastische stijfheid is gebaseerd op de constante G/s_u^A ratio. Als gevolg van activatie van het SHANSEP gedeelte van het model wordt de SHANSEP formule toegepast op s_u^A ($s_{u\ inc}^A$ wordt genegeerd) waarbij de bestaande ratios t.o.v. s_u^{DSS} en s_u^P en G hetzelfde blijven. De stijfheid en sterkte parameters van alle spanningspunten worden op deze wijze gedurende de berekening geupdate.
- De parameter τ_0/s_u^A is beschreven in de PLAXIS handleiding. In aanvulling op deze beschrijving: deze parameter beschrijft de mate waarin de grond is voorbelast door een schuifspanning, pre-shearing. De grond zal zich bij spanningen onder deze voorbelasting elastisch gedragen en bij spanningen hierboven elasto-plastisch.
- Merk op dat het NGI-ADP model oorspronkelijk is ontwikkeld voor pure (scandinavische) kleien. Voor de meer organische grondsoorten in Nederland zijn de richtlijnen voor de plastic strain waarden (γ_f^c , γ_f^{DSS} en γ_f^{DSS}) zoals gegeven in de PLAXIS material model vermoedelijk aan de lage kant. Er dient meer ervaring te worden opgedaan met dit model om tot betere richtlijnen voor Nederlandse condities te komen.
- Bij de hier gehanteerde fit procedure is de sterkte, α bij een eindrek van 25% bepaald voor een triaxiaal proef en 40% voor een DSS proef. Daarna is de stijfheid gefit dusdanig dat de maximale sterkte in het materiaal model wordt bereikt bij dezelfde rek als in de werkelijke lab test de piek sterkte wordt bereikt. Gedachte is dat met deze aanpak het meest realistisch wordt gemodelleerd i.v.m. de strain compatibiliteit in de actieve, DSS en passieve zone van het afschuifvlak.