

# Voorwoord

In het kader van de opleiding Technische Aardwetenschappen aan de Technische Universiteit te Delft dient aan het einde van de Master fase een afstudeeronderzoek uitgevoerd te worden. Met mijn studierichting Ingenieursgeologie heb ik ervoor gekozen bij de sectie Geotechniek aan de Civiel technische faculteit te Delft af te studeren op het onderwerp met de titel:

## **Plaxis SSC**

### **de toepassing van een isotroop kruipmodel op de anisotrope ondergrond**

Hoewel het afstudeeronderwerp een individuele opdracht is, was het bereikte niveau niet behaald zonder de hulp van derden. Mijn dank gaat daarom uit naar de leden van mijn afstudeercommissie:

- Prof. ir. A.F. van Tol (TU Delft) voor het vinden, begeleiden en sturen van het onderwerp,
- Ing. H.J. Everts (TU Delft) voor het vinden van een geschikt afstudeeronderwerp, de praktische informatie, handige tips en sturing tijdens de vergaderingen,
- Dr. ir. R.B.J. Brinkgreve (TU Delft) voor zijn algehele bijdrage aan mijn afstudeeronderzoek en daarbij in het bijzonder zijn kennis m.b.t. het model en het EEM programma Plaxis, bijna al mijn gedetailleerde vragen konden door hem beantwoord worden,
- Ir. H. L. Jansen (Fugro) voor de dagelijkse begeleiding en de continue bereidheid voor het beantwoorden van vragen en het meedenken bij complexe vraagstukken,
- Ir. W.H.J. van der Velden (Fugro) voor de dagelijkse begeleiding en de continue bereidheid voor het beantwoorden van vragen en het meedenken bij complexe vraagstukken,
- Dr. ir. D. J. M. Ngan-Tillard voor de praktische informatie en haar energie waarmee zij de opleiding ingenieursgeologie weet voort te trekken.

Daarnaast wil ik alle medewerkers en vooral kamergenoten van Fugro Ingenieursbureau bedanken voor het creëren van een prettige werksfeer en behulpzaamheid. Het afstuderen was hierdoor een leerzame en vooral ook leuke periode. Vooral wil ik bedanken Flip Hoefsloot en Wim Nohl voor hun bereidheid tot het meedenken bij complexe vraagstukken en voor het beantwoorden van gedetailleerde vragen.

Uiteraard heeft mijn studie niet alleen maar vrolijke momenten gekend. De studie druk en de moeilijkheidsgraad van sommige vakken heeft ook voor bloed, zweet en tranen gezorgd. Mijn familie, vriendin en vrienden hebben mij op deze momenten weten op te beuren. Daarnaast hebben zij mij tijdens mijn afstuderen ook weten te overtuigen van de noodzaak van ontspanning. Hierdoor heb ik zonder al te veel stress op een rustige en prettige manier aan mijn afstudeeronderzoek kunnen werken. Veel dank hiervoor gaat daarom uit naar hen.

's Gravenhage, oktober 2006

Rens Servais



## Samenvatting

In met name West-Nederland bestaat de ondergrond voornamelijk uit slappe klei- en veenlagen. Bij het aanbrengen van een maaiveld belasting zullen behalve verticale ook horizontale vervormingen optreden. Voor het berekenen van zettingen en horizontale vervormingen zijn verschillende modellen beschikbaar. Het SSC model is echter het eerste materiaalmodel in Plaxis waarin kruip is geïntroduceerd. Dit model is gebaseerd op het in 1994 ontworpen a,b,c-Isotachenmodel.

Uit praktijk ervaring blijkt dat bij een correcte omrekening van de a,b,c-Isotachen samendrukkingsparameters in de SSC samendrukkingsparameters de zetting van het a,b,c-Isotachenmodel niet in overeenstemming is met de zetting volgend uit een 1D SSC berekening.

De eerste onderzoeksvraag is dan ook: *het achterhalen van de oorzaken van de verschillen in de verticale vervorming tussen het SSC- en a,b,c-Isotachenmodel, bij 1-dimensionale vervorming. Daarnaast onderzoeken of er relaties te vinden zijn tussen deze verschillen.* De gevonden oorzaken en relaties zijn vervolgens gevalideerd a.d.h.v. een samendrukkingsproef en een bestaand project (onderzoeksvraag 2).

Ook onderzoeksvraag 4 is gericht op 1-dimensionale vervorming: *het achterhalen van een fundamentele verklaring waarom geadviseerd wordt de OCR in het SSC model groter dan of gelijk aan 1,3 à 1,4 te kiezen.*

De resterende onderzoeksvragen 3 en 5 hebben betrekking op gevallen waarbij horizontale vervormingen een belangrijke rol spelen: *de werking van het SSC model a.d.h.v. praktische voorbeelden uitvoerig beschrijven, waarbij in het bijzonder aandacht zal worden besteed aan de invloed van de  $K_0^{nc}$ -afhankelijke  $M$  parameter en het model valideren aan 2-dimensionale grondvervormingen.* Dit is gebeurd a.d.h.v. een triaxiaalproef en een case study, om de werking van het SSC model bij meer dimensionale vervormingen beter te begrijpen en daarmee de praktische toepasbaarheid te vergroten.

Om antwoorden te vinden op de bovenstaande onderzoeksvragen zijn in eerste instantie verschillende zettingsmodellen (Koppejan, a,b,c-Isotachenmodel en het SSC model) op formule basis beschreven. Hierbij wordt tevens ingegaan op relaties tussen de verschillende modellen. Het SSC model wordt daarbij het uitvoerigste beschreven, aangezien dit onderzoek dit model omvat.

A.d.h.v. de modelbeschrijvingen is onderzoeksvraag 1 beantwoord. Formule technisch gezien komen bij 1-dimensionale vervormingsberekeningen met constante verhoudingen tussen de horizontale en verticale spanningen ( $K$  is constant) de zettingen van een SSC berekening exact overeen met de zettingen van een a,b,c-Isotachenberekening. Indien  $K$  niet constant is zullen er normaliter te verwaarlozen verschillen ontstaan, omdat de omrekening van  $a$  naar  $k^*$  niet exact is.

Deze bevinding is getoetst a.d.h.v. een samendrukkingsproef en een bestaand project (onderzoeksvraag 2). Bij de samendrukkingsproefsimulatie blijkt deze bevinding te kloppen. Uit de simulatie van de No-Recess case volgt dat er wel degelijk verschillen ontstaan. De oorzaak hiervan is het op een andere wijze in rekening brengen van het onderwaterzakken van belastingen in de vorm van grondlagen (bij de samendrukkingsproef speelt onderwaterzakken geen rol). In Plaxis (SSC model) is onderwaterzakken opgenomen in het iteratieproces. MSettle (a,b,c-Isotachenmodel) gaat uit van de eindzetting, waardoor onderwaterzakken minder nauwkeurig in rekening wordt genomen.

A.d.h.v de modelbeschrijvingen van het a,b,c-Isotachen- en SSC model is onderzoeksvraag 4 zo volledig mogelijk beantwoord.

In de literatuur wordt regelmatig terug gevonden dat de OCR bij SSC berekeningen groter dan of gelijk aan 1,3 à 1,4 moet zijn aangezien anders de initiële seculaire reksnelheid en daarmee de zetting t.g.v. een kruiptijd overschat wordt. Ook bij het a,b,c-Isotachenmodel speelt dit fenomeen.

Voor een correcte benadering van de zetting dient een hogere OCR ingevoerd te worden dan volgt uit een samendrukkingsproef. Om te onderzoeken of het SSC model de zetting bij 1-dimensionale vervorming in dezelfde mate overschat als het a,b,c-Isotachenmodel, zijn de initiële seculaire reksnelheidsvergelijkingen van het SSC- en a,b,c-Isotachenmodel met elkaar vergeleken.

Hieruit volgt dat in overgeconsolideerde spanningsituaties waarbij  $\kappa^*$  groter is dan  $a$  en/of  $K_0$  groter is dan  $K_0^{nc}$  de initiële seculaire reksnelheid van het SSC model significant groter kan zijn dan de initiële seculaire reksnelheid van het a,b,c-Isotachenmodel. Voor een 10 meter dikke slappe laag met realistische parameters kan dit bij een kruiptijd van 10000 dagen oplopen tot 0,08 meter zettingsverschil (op een SSC zetting van 0,29 meter). Bij dergelijke gevallen, waarbij de initiële seculaire reksnelheid grote invloed heeft op de zetting kan ervoor gekozen worden de OCR bij SSC berekeningen hoger aan te nemen dan bij a,b,c-Isotachenberekening.

Aan de hand van deze modelvergelijking kan echter geen harde conclusies worden getrokken m.b.t. een correcte keuze voor de OCR. Dit is afhankelijk van de situatie. Bij belastingen beïnvloedt de OCR naast de initiële seculaire reksnelheid ook de eindzetting.

Tot slot geeft de modelbeschrijving van het SSC model inzicht in de invloed van de  $K_0^{nc}$ -afhankelijke  $M$  parameter (onderzoeksvraag 3).

Bij 1-dimensionale samendrukking wordt de zetting nauwelijks door de  $M$ -waarde beïnvloed. Bij 2- en 3-dimensionale vervorming wordt de invloed van  $M$  noemenswaardig voor zowel de zetting als horizontale vervorming. Een grotere waarde voor  $M$  (kleinere waarde voor  $K_0^{nc}$ ) resulteert voornamelijk in kleinere horizontale vervormingen maar ook in kleinere zettingen. Correcte aannamen voor  $K_0^{nc}$  zijn daarom belangrijk bij het bepalen van de horizontale vervormingen met het SSC model. De veelgebruikte vuistregel van Jaky geeft bij klei en veen vaak te hoge waarden voor  $K_0^{nc}$ . Beter kunnen gemeten waarden van een  $K_0$ -c.r.s. proef gebruikt worden, die veel realistischer zijn.

T.b.v. onderzoeksvraag 5 is een geconsolideerde ongedraineerde triaxiaalproef gesimuleerd met het SSC model. Uit deze simulatie kunnen geen harde conclusies getrokken worden. De resultaten van de gesimuleerde triaxiaalproef komen allesbehalve overeen met de meetresultaten uit de werkelijke triaxiaalproef. Dit lijkt te komen door externe factoren (b.v. monsterverstoring). Het werkelijke monster reageert volgens de meetresultaten als een normaal geconsolideerd monster, terwijl uit de bijbehorende samendrukkingsproef wel degelijk volgt dat het monster overgeconsolideerd is.

Ter afsluiting van onderzoeksvraag 5 en daarmee tevens ter afsluiting van dit onderzoek is de No-Recess case gesimuleerd, om het SSC model te valideren m.b.t. 2-dimensionale vervormingen. Verder zijn bij deze case de invloeden van de  $K_0^{nc}$ -afhankelijke  $M$  parameter, doorlatendheid, OCR, hoek van inwendige wrijving, samendrukkingsparameters,  $K_0$ ,  $v_{ur}$  en de wijze van modelleren (axisymmetrische of plane strain) onderzocht. De case heeft voornamelijk inzicht gegeven in problemen m.b.t. het tijd-zettingsverloop en de keuze van  $K_0^{nc}$ , doorlatendheid en de manier van modelleren (axisymmetrische of plane strain). De laatste twee wijken af van het doel van dit onderzoek, maar zijn vanwege de impact op de resultaten toch behandeld.

Zoals hiervoor al opgemerkt (onder onderzoeksvraag 3) dienen realistische  $K_0^{nc}$ -waarden te worden gekozen om te voorkomen dat de horizontale vervorming overschat wordt. De case bevestigt dit.

Hoewel de eindzetting en verticale kruiptak volgens het SSC model redelijk overeenstemt met de gemeten waarde, is het tijd-zettingsverloop niet juist: in werkelijkheid komt de zetting langzamer tot ontwikkeling dan berekend. Om het berekende verloop aan de meetdata te fitten zou de OCR onrealistisch hoog gekozen moeten worden. Dit leidt echter weer tot andere problemen (de eindzetting, kruip en horizontale vervorming worden onderschat) en wordt daarom afgeraden. Wel dient opgemerkt te worden dat zowel de verticale als horizontale kruip en de verhouding horizontale / verticale vervorming bij een juiste parameterkeuze correct worden ingeschat.

# Inhoudsopgave

|                                                                                              |             |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>Voorwoord .....</b>                                                                       | <b>I</b>    |
| <b>Samenvatting .....</b>                                                                    | <b>III</b>  |
| <b>Inhoudsopgave.....</b>                                                                    | <b>V</b>    |
| <b>Lijst van tabellen .....</b>                                                              | <b>IX</b>   |
| <b>Lijst van figuren .....</b>                                                               | <b>XI</b>   |
| <b>Symbolen .....</b>                                                                        | <b>XIII</b> |
| <b>Termen definities .....</b>                                                               | <b>XVII</b> |
| <b>1. Inleiding .....</b>                                                                    | <b>1</b>    |
| <b>2. Probleemstelling .....</b>                                                             | <b>3</b>    |
| 2.1. Probleembeschrijving .....                                                              | 3           |
| 2.2. Onderzoeksvragen .....                                                                  | 4           |
| <b>3. Zettingsmodellen .....</b>                                                             | <b>5</b>    |
| 3.1. Koppejan .....                                                                          | 5           |
| 3.1.1. Modelbeschrijving.....                                                                | 5           |
| 3.1.2. Model beperkingen.....                                                                | 8           |
| 3.2. a,b,c-Isotachenmodel.....                                                               | 9           |
| 3.2.1. Modelbeschrijving.....                                                                | 9           |
| 3.3. Plaxis Soft Soil Creep .....                                                            | 16          |
| 3.3.1. Modelbeschrijving.....                                                                | 16          |
| 3.3.1.1. Spanningen, rekken en de $K_0^{nc}$ -afhankelijke M parameter .....                 | 16          |
| 3.3.1.2. Rek en reksnelheid beschrijving a.d.h.v. $\kappa^*$ , $\lambda^*$ en $\mu^*$ .....  | 21          |
| 3.3.1.2.1. Spanningsonderscheid en de bepaling van $\kappa^*$ , $\lambda^*$ en $\mu^*$ ..... | 21          |
| 3.3.1.2.2. Verhoudingen tussen $\kappa^*$ , $\lambda^*$ en $\mu^*$ .....                     | 25          |
| 3.3.1.2.3. Rekken en reksnelheden .....                                                      | 26          |
| 3.3.1.3. $K_0$ bepaling .....                                                                | 32          |
| 3.4. Relatie Koppejan, a,b,c-Isotachen en SSC parameters.....                                | 36          |
| 3.5. OCR definitie .....                                                                     | 38          |

|                                                                                                            |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>4. Deelonderzoeken t.b.v. analyse SSC model .....</b>                                                   | <b>41</b>  |
| 4.1. Initiële seculaire reksnelheid.....                                                                   | 41         |
| 4.2. Invloed van de $K_0^{nc}$ -afhankelijke M parameter op spanningen en vervormingen .....               | 44         |
| 4.2.1. Invloed M op 1-dimensionale samendrukking .....                                                     | 44         |
| 4.2.2. Invloed M op 3-dimensionale vervorming .....                                                        | 46         |
| 4.2.3. Conclusie .....                                                                                     | 49         |
| 4.3. Fictieve samendrukkingsproef.....                                                                     | 50         |
| 4.3.1. Verschil in richtingscoëfficiënten voor ontlasten en herbelasten in een spannings–rek grafiek. .... | 51         |
| 4.3.2. Horizontale spanningsverandering tijdens kruip .....                                                | 54         |
| 4.3.2.1. Horizontale spanningsverandering op de $K_0$ - en $K_0^{nc}$ -lijn .....                          | 54         |
| 4.3.2.2. Verandering $\sigma'_{xx}$ boven en beneden de $K_0$ - en $K_0^{nc}$ -lijn .....                  | 56         |
| 4.3.3. OCR op 1 dagslijn.....                                                                              | 59         |
| 4.4. Simulatie samendrukkingsproef .....                                                                   | 60         |
| 4.5. Simulatie triaxiaalproef.....                                                                         | 64         |
| 4.6. Samenvatting .....                                                                                    | 72         |
| <b>5. No-Recess case .....</b>                                                                             | <b>77</b>  |
| 5.1. Inleiding.....                                                                                        | 77         |
| 5.2. Geometrie proefvlak HW1 .....                                                                         | 79         |
| 5.3. Bodemopbouw en grondeigenschappen .....                                                               | 82         |
| 5.4. 1-dimensionale SSC, a,b,c-Isotachenmodel en Koppejan simulatie .....                                  | 87         |
| 5.5. 2-Dimensionale SSC simulatie.....                                                                     | 89         |
| 5.5.1. Profiel 'oost' .....                                                                                | 89         |
| 5.5.1.1. Vergelijking tijd-zettingsverloop 1D en 2D SSC berekening .....                                   | 90         |
| 5.5.1.2. 2-dimensionale varianten.....                                                                     | 91         |
| 5.5.2. Profiel 'noord'.....                                                                                | 97         |
| 5.6. Invloed parameters.....                                                                               | 103        |
| 5.7. Conclusie .....                                                                                       | 105        |
| <b>6. Slotanalyse .....</b>                                                                                | <b>107</b> |
| 6.1. Conclusies.....                                                                                       | 107        |
| 6.2. Aanbevelingen.....                                                                                    | 111        |
| <b>Referenties .....</b>                                                                                   | <b>113</b> |

**Bijlage 1 Aanbeveling uitbreiding triaxiaalproef****Bijlage 2 Afleidingen reksnelheden en  $\frac{\partial p'^{eq}}{\partial \sigma'_1} + \frac{\partial p'^{eq}}{\partial \sigma'_2} + \frac{\partial p'^{eq}}{\partial \sigma'_3} = \frac{\partial p'^{eq}}{\partial p'}$ , SSC model**

- 2.1 Afleiding seculaire volumieke reksnelheid op basis van twee referentiespanningen
- 2.2 Afleiding directe volumieke reksnelheid
- 2.3 Afleiding  $\frac{\partial p'^{eq}}{\partial \sigma'_1} + \frac{\partial p'^{eq}}{\partial \sigma'_2} + \frac{\partial p'^{eq}}{\partial \sigma'_3} = \frac{\partial p'^{eq}}{\partial p'}$
- 2.4 Afleiding volumieke seculaire reksnelheid op basis van de totale reksnelheid

**Bijlage 3 Afleiding default  $K_0$ -waarde****Bijlage 4 Afleidingen omrekenformules van  $a$  naar  $\kappa^*$** **Bijlage 5 Afname  $OCR_{p'^{eq}}$  t.g.v. ontlasten bij grote  $K$ -waarden****Bijlage 6 Invloed  $M$  op overgeconsolideerd grondmonster tijdens 1-dimensionale samendrukking**

- 6.1 Overgeconsolideerd grondmonster met default  $K_0$ -waarde
- 6.2 Overgeconsolideerd grondmonster met aangepaste  $K_0$ -waarde

**Bijlage 7 Belastingsschema's paragraaf 4.3.1****Bijlage 8 Belastingsschema's paragraaf 4.3.2.1****Bijlage 9 Parameter gevoeligheid op horizontale spanningsverandering tijdens kruipstappen****Bijlage 10 Belastingsschema's paragraaf 4.3.2.2****Bijlage 11 Simulatie samendrukkingsproef****Bijlage 12 Verschil in richtingscoëfficiënten tijdens ontlast-herbelaststappen****Bijlage 13 No-Recess case**

- 13.1 Sondeer- en boorlocaties
- 13.2 Grondprofielen
- 13.3 OCR, sterkte- en samendrukkingsparameter bepaling
- 13.4 Bepaling  $k$ -waarde
- 13.5 Volumieke gewichtsbepaling
- 13.6 Ophoogschema
- 13.7 Bepaling einde consolidatie en consolidatieperiode
- 13.8 Zettingsslang (seth 1.2)
- 13.9 Horizontale vervormingen hoge aardebaan HW1 als functie van de tijd



## Lijst van tabellen

|                                                                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabel 1: invloed M op spanningen bij 3-dimensionale vervorming                                                                       | 46  |
| Tabel 2: invloed M op rekken bij 3-dimensionale vervorming                                                                           | 48  |
| Tabel 3: modelparameters en geometrie, fictieve samendrukkingsproef                                                                  | 50  |
| Tabel 4: gewijzigde modelparameters en geometrie voor horizontale spanningsverandering tijdens kruip, fictieve samendrukkingsproef   | 54  |
| Tabel 5: modelparameters, simulatie samendrukkingsproef                                                                              | 61  |
| Tabel 6: samendrukkingsproefresultaten horende bij gesimuleerde triaxiaalproef                                                       | 64  |
| Tabel 7: Voor- en nadelen Soiltest en gedefinieerd mesh bij simulatie CU triaxiaalproef                                              | 65  |
| Tabel 8: modelparameters, gesimuleerde triaxiaalproef                                                                                | 65  |
| Tabel 9: toelichting Figuur 27; flowchart                                                                                            | 74  |
| Tabel 10: ophoog en drainage gegevens aardebaan HW1, No-Recess case                                                                  | 79  |
| Tabel 11: invoerparameters SSC model, No-Recess case                                                                                 | 85  |
| Tabel 12: invoerparameters HS model, No-Recess case                                                                                  | 86  |
| Tabel 13: invoerparameters MC model, No-Recess case                                                                                  | 86  |
| Tabel 14: varianten profiel 'oost' No-Recess case                                                                                    | 89  |
| Tabel 15: zettingsresultaten profiel 'oost', metingen en berekeningen                                                                | 92  |
| Tabel 16: resultaten horizontale vervormingen profiel 'oost', metingen en berekeningen                                               | 92  |
| Tabel 17: aangepaste parameters t.b.v. fit profiel 'oost' (variant 9)                                                                | 95  |
| Tabel 18: varianten profiel 'noord'                                                                                                  | 97  |
| Tabel 19: zettingsresultaten profiel 'noord', metingen en berekeningen                                                               | 99  |
| Tabel 20: resultaten horizontale vervormingen profiel 'noord', metingen en berekeningen                                              | 99  |
| Tabel 21: aangepaste modelparameters t.b.v. fit profiel 'noord' (variant 4)                                                          | 101 |
| Tabel 22: invloed parameters op verschillende resultaten, waarbij ongedraineerd gedrag geen invloed heeft op de vervormingen         | 103 |
| Tabel 23: invloed parameters op verschillende resultaten, waarbij ongedraineerd gedrag significante invloed heeft op de vervormingen | 104 |



# Lijst van figuren

|                                                                                                                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figuur 1: verschil in isotroop en anisotroop gedrag t.g.v. spanningstoename                                                                                                             | 1   |
| Figuur 2: $\ln(\sigma'_{yy}) - \varepsilon_{yy}$ grafieken met Koppejan parameters                                                                                                      | 6   |
| Figuur 3: superpositie beginsel in samendrukkingsproef op veen [17]                                                                                                                     | 7   |
| Figuur 4: $\ln(\sigma'_{yy}) - \varepsilon_{yy}$ grafiek met a,b,c-Isotachen parameters                                                                                                 | 10  |
| Figuur 5: spanningspaden in het a,b,c-Isotachenmodel                                                                                                                                    | 11  |
| Figuur 6: $p' - q$ grafiek met $p^{eq(p)}$ ellipsen                                                                                                                                     | 19  |
| Figuur 7A en B: visualisatie bereiken equivalente grensspanning met verschillende spanningspaden                                                                                        | 20  |
| Figuur 8A, B en C: $\ln(p') - \varepsilon_{yy}$ , $\ln(p^{eq}) - \varepsilon_{yy}$ en $\ln(t) - \varepsilon_{yy}$ grafieken met de SSC parameters                                       | 22  |
| Figuur 9: isotrope / equivalente spanningsverhouding t.g.v. herbelasten bij niet constante K-waarden                                                                                    | 23  |
| Figuur 10: beeldvorming ontstaan OCR en POP in $\ln p^{eq} - \varepsilon_v$ grafiek                                                                                                     | 33  |
| Figuur 11: beeldvorming bepaling aandeel OCR en POP uit twee grensspanningen op verschillende diepten                                                                                   | 34  |
| Figuur 12: verschil in verticale en equivalente OCR bij toenemende K-waarde                                                                                                             | 38  |
| Figuur 13A en B: invloed M op spanningen bij 3-dimensionale vervorming                                                                                                                  | 46  |
| Figuur 14: invloed M op de richting van de seculaire reksnelheid                                                                                                                        | 47  |
| Figuur 15A en B: verschil richtingscoëfficiënten in spannings – rek grafiek bij ontlast- herbelaststappen, fictieve samendrukkingsproef                                                 | 51  |
| Figuur 16: $\sigma'_{xx} - \sigma'_{yy}$ grafiek bereiken Mohr-Coulomb bezwijkcriterium bij ontlasten, fictieve samendrukkingsproef                                                     | 53  |
| Figuur 17A en B: invloed kruip op horizontale effectieve spanning, fictieve samendrukkingsproef                                                                                         | 55  |
| Figuur 18: invloed kruipstap op $\sigma'_{xx}$ bij onder- of overgeconsolideerde spanningstoestanden, fictieve samendrukkingsproef                                                      | 56  |
| Figuur 19A en B: spanningsverloop tijdens kruip in overgeconsolideerde spanningstoestanden waarbij K groter is dan $K_0^{nc}$                                                           | 57  |
| Figuur 20 A, B en C: modeltechnische verklaring voor de afname van de horizontale spanning tijdens kruip bij overgeconsolideerde spanningstoestanden waarbij K groter is dan $K_0^{nc}$ | 57  |
| Figuur 21: $\sigma'_{yy} - \varepsilon_{yy}$ grafiek, simulatie samendrukkingsproef met meetresultaten a,b,c-Isotachen en SSC resultaten voor $v_{ur} = 0,33$                           | 61  |
| Figuur 22: $\sigma'_{yy} - \varepsilon_{yy}$ grafiek, simulatie samendrukkingsproef met meetresultaten, SSC en SSC-soiltest resultaten voor K is constant ( $v_{ur} = 0,33$ )           | 62  |
| Figuur 23: $\sigma'_{yy} - \varepsilon$ grafiek, simulatie samendrukkingsproef met meetresultaten, a,b,c-Isotachen en SSC resultaten voor $v_{ur} = 0,15$ en $K_{gem} = 1,5$            | 63  |
| Figuur 24A, B, C, D en E: spannings en spannings-rek grafieken deviatorische belasting stap 1, gesimuleerde triaxiaalproef                                                              | 66  |
| Figuur 25A, B, C en D: spannings en spannings-rek grafieken deviatorische belasting stap 1 triaxiaalproef voor normaal en overgeconsolideerde grond                                     | 69  |
| Figuur 26A en B: spanningspad verschillen bij verschillende M ( $K_0^{nc}$ )-waarde in normaal geconsolideerde grond deviatorische belasting stap 1, gesimuleerde triaxiaalproef        | 70  |
| Figuur 27: flowchart, invloed parameters op vervormingsgerelateerde resultaten bij 2- en 3-dimensionale vervorming                                                                      | 73  |
| Figuur 28: bovenaanzicht proefterrein No-Recess case                                                                                                                                    | 77  |
| Figuur 29: plattegrond met monitoringslocaties HW1                                                                                                                                      | 80  |
| Figuur 30: HW1 langsdoorsnede (L) met hoog en laag gedeelte (x-richting)                                                                                                                | 81  |
| Figuur 31: HW1 dwarsdoorsnede (A) hoge aardebaan (y-richting)                                                                                                                           | 81  |
| Figuur 32: HW1 dwarsdoorsnede (B) lage aardebaan (y-richting)                                                                                                                           | 81  |
| Figuur 33: grondprofiel HW1 noord-zuid georiënteerd, inclusief locatie aardebaan                                                                                                        | 82  |
| Figuur 34: grondprofiel HW1 west-oost georiënteerd inclusief locatie aardebaan                                                                                                          | 83  |
| Figuur 35A en B: grondprofielen 'oost' en 'noord' met bijbehorende laagscheidingen in m-NAP                                                                                             | 84  |
| Figuur 36: 1D berekening met de meetresultaten, SSC en a,b,c-Isotachen- en Koppejan model, No-Recess case                                                                               | 87  |
| Figuur 37: tijd-zettingsverloop midden top ophoging meetresultaten, SSC 1D en 2D berekening, No-Recess case                                                                             | 90  |
| Figuur 38: horizontale vervorming als functie van de diepte profiel 'oost', variant 1 en meetresultaten                                                                                 | 91  |
| Figuur 39: gefitte tijd-zettingsverloop profiel 'oost' (variant 9)                                                                                                                      | 95  |
| Figuur 40: horizontale vervorming als functie van de diepte profiel 'noord', variant 1 en meetresultaten                                                                                | 98  |
| Figuur 41: gefitte tijd-zettingsverloop profiel 'noord' (variant 4)                                                                                                                     | 101 |



# Symbolen

| Symbol                           | Beschrijving                                                                     | Eenheid            |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| $a$                              | Directe samendrukkingcoëfficiënt (a,b,c-Isotachenmodel)                          | -                  |
| $b$                              | Natuurlijke samendrukkingcoëfficiënt (a,b,c-Isotachenmodel)                      | -                  |
| $c$                              | Natuurlijke seculaire samendrukkingcoëfficiënt (a,b,c-Isotachenmodel)            | -                  |
| $c$                              | Cohesie                                                                          | kN/m <sup>2</sup>  |
| $C_p$                            | Primaire samendrukkingcoëfficiënt onder de grensspanning (Koppejan)              | -                  |
| $C'_p$                           | Primaire samendrukkingcoëfficiënt boven de grensspanning (Koppejan)              | -                  |
| $C_s$                            | Secundaire samendrukkingcoëfficiënt onder de grensspanning (Koppejan)            | -                  |
| $C'_s$                           | Secundaire samendrukkingcoëfficiënt boven de grensspanning (Koppejan)            | -                  |
| $c_k$                            | Parameter die de verandering van de permeabiliteit t.g.v. rek in rekening brengt | -                  |
| $c_v$                            | Consolidatiecoëfficiënt                                                          | m <sup>2</sup> /s  |
| $\underline{\underline{D}}^{-1}$ | Lineaire spanningsafhankelijke stijfheidsmatrix volgens uit de Wet van Hooke     | m <sup>2</sup> /kN |
|                                  | voor isotrope elasticiteit                                                       |                    |
| $e$                              | Poriëngetal                                                                      | -                  |
| $e_{init}$                       | Poriëngetal bij de initiële spanning                                             | -                  |
| $k_x$                            | Horizontale permeabiliteit                                                       | m/s                |
| $k_y$                            | Verticale permeabiliteit                                                         | m/s                |
| $K$                              | Grondrukcoëfficiënt of grondrukfactor                                            | -                  |
| $K_0$                            | Neutrale grondrukcoëfficiënt                                                     | -                  |
| $K_0^{nc}$                       | Neutrale grondrukcoëfficiënt voor normaal geconsolideerde grond                  | -                  |
| $m_v$                            | Samendrukbaarheid                                                                | m <sup>2</sup> /kN |
| $M$                              | $K_0^{nc}$ -gerelateerde parameter                                               | -                  |
| $n$                              | Porositeit                                                                       | -                  |
| $p'$                             | Isotrope effectieve spanning                                                     | kN/m <sup>2</sup>  |
| $p'_{i0}$                        | Initiële isotrope effectieve spanning                                            | kN/m <sup>2</sup>  |
| $p'_p$                           | Isotrope spanning horende bij de equivalente grensspanning                       | kN/m <sup>2</sup>  |
| $\dot{p}'$                       | Tijdsafgeleide van de isotrope effectieve spanning                               | kN/m <sup>2</sup>  |
| $p^{eq}$                         | Equivalente spanning                                                             | kN/m <sup>2</sup>  |
| $p^{eq}_0$                       | Initiële equivalente spanning                                                    | kN/m <sup>2</sup>  |
| $p^{eq}_p$                       | Equivalente grensspanning op de 1 dagslijn                                       | kN/m <sup>2</sup>  |
| $p^{eq}_{p;0}$                   | Initiële equivalente grensspanning horende bij de initiële intrinsieke tijd.     | kN/m <sup>2</sup>  |
| $p^{eq}_r$                       | Equivalente referentiespanning                                                   | kN/m <sup>2</sup>  |
| $q$                              | Deviatorische spanning                                                           | kN/m <sup>2</sup>  |
| $q_p$                            | Deviatorische spanning horende bij de equivalente grensspanning                  | kN/m <sup>2</sup>  |
| $t_0$                            | Initiële tijd                                                                    | d                  |
| $t_e$                            | 'Einde' consolidatieperiode                                                      | d                  |
| $\Delta t$                       | Tijdstap                                                                         | d                  |
| $U$                              | Consolidatiegraad                                                                | -                  |

**Griekse tekens**

| Symbol                            | Beschrijving                                                                                      | Eenheid |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| $\alpha$                          | $\frac{\partial p^{eq}}{\partial p} = 1 - \frac{q^2}{M^2 p^2}$                                    | -       |
| $\alpha_p$                        | Primaire rek                                                                                      | -       |
| $\alpha_s$                        | Secundaire rek                                                                                    | -       |
| $\varepsilon_1$                   | In absolute zin de maximale rek                                                                   | -       |
| $\varepsilon_2$                   | Tussenkomenende rek                                                                               | -       |
| $\varepsilon_3$                   | In absolute zin de minimale rek                                                                   | -       |
| $\varepsilon^C$                   | Lineaire rek (Cauchy)                                                                             | -       |
| $\varepsilon^H$                   | Natuurlijke rek (Hencky)                                                                          | -       |
| $\varepsilon_q$                   | Deviatorische rek                                                                                 | -       |
| $\varepsilon_v$                   | Volumieke rek                                                                                     | -       |
| $\varepsilon_{v;d}$               | Directe volumieke rek                                                                             | -       |
| $\varepsilon_{v;s}$               | Seculaire volumieke rek                                                                           | -       |
| $\varepsilon_{v;s;sp}$            | Spanningsafhankelijke component van de seculaire volumieke rek                                    | -       |
| $\varepsilon_{v;s;t}$             | Intrinsieke tijdsafhankelijke component van de seculaire volumieke rek                            | -       |
| $\varepsilon_{xx}$                | Horizontale rek in vlak van tekening (x-richting)                                                 | -       |
| $\varepsilon_{yy}$                | Verticale rek in vlak van tekening (y-richting)                                                   | -       |
| $\varepsilon_{yy;d}$              | Directe verticale rek                                                                             | -       |
| $\varepsilon_{yy;s}$              | Seculaire verticale rek                                                                           | -       |
| $\varepsilon_{yy;s;sp}$           | Spanningsafhankelijke component van de seculaire verticale rek                                    | -       |
| $\varepsilon_{yy;s;t}$            | Intrinsieke tijdsafhankelijk component van de seculaire verticale rek                             | -       |
| $\varepsilon_{zz}$                | Horizontale rek loodrecht op vlak van tekening (z-richting)                                       | -       |
| $\dot{\varepsilon}_{i;d}$         | Directe reksnelheid in een willekeurige richting                                                  | 1/s     |
| $\dot{\varepsilon}_{s;0}$         | Initiële seculaire verticale reksnelheid                                                          | 1/s     |
| $\dot{\varepsilon}_{s;r}$         | Seculaire reksnelheid bij de referentiespanning                                                   | 1/s     |
| $\dot{\varepsilon}_{q;s}$         | Seculaire deviatorische reksnelheid                                                               | 1/s     |
| $\dot{\varepsilon}_v$             | Volumieke reksnelheid                                                                             | 1/s     |
| $\dot{\varepsilon}_{v;d}$         | Directe volumieke reksnelheid                                                                     | 1/s     |
| $\dot{\varepsilon}_{v;s}$         | Seculaire volumieke reksnelheid                                                                   | 1/s     |
| $\dot{\varepsilon}_{v;s;0}$       | Initiële seculaire volumieke reksnelheid                                                          | 1/s     |
| $\dot{\varepsilon}_{v;s;r}$       | Seculaire volumieke reksnelheid bij de referentiespanning                                         | 1/s     |
| $\dot{\varepsilon}_{yy;d}$        | Directe verticale reksnelheid                                                                     | 1/s     |
| $\dot{\varepsilon}_{yy;s}$        | Seculaire verticale reksnelheid                                                                   | 1/s     |
| $\underline{\dot{\varepsilon}}$   | Vector met reksnelheden in 3 richtingen met bijbehorende schuif reksnelheden                      | 1/s     |
| $\underline{\dot{\varepsilon}}_d$ | Vector met directe reksnelheden in 3 richtingen met bijbehorende<br>Schuif reksnelheden           | 1/s     |
| $\underline{\dot{\varepsilon}}_s$ | Vector met seculaire reksnelheden in de 3 hoofdrichtingen met bijbehorende<br>schuif reksnelheden | 1/s     |

|                             |                                                                                                                         |                      |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| $\gamma_d$                  | Droog volumieke gewicht                                                                                                 | kN/m <sup>3</sup>    |
| $\gamma_n$                  | Verzadigd volumieke gewicht                                                                                             | kN/m <sup>3</sup>    |
| $\gamma_w$                  | Volumieke gewicht van water                                                                                             | kN/m <sup>3</sup>    |
| $\gamma_{xy}$               | Schuifrek op x-vlak in y-richting                                                                                       | -                    |
| $\varphi$                   | Hoek van inwendige wrijving                                                                                             | °                    |
| $\varphi_{cv}$              | Hoek van inwendige wrijving bij de kritische dichtheid (critical-void friction angle)                                   | °                    |
| $\kappa^*$                  | Zwelcoëfficiënt (Plaxis SSC)                                                                                            | -                    |
| $\lambda^*$                 | Samendrukkingcoëfficiënt (Plaxis SSC)                                                                                   | -                    |
| $\mu^*$                     | Seculaire rekcoëfficiënt (Plaxis SSC)                                                                                   | -                    |
| $\nu$                       | Dwarscontractiecoëfficiënt (constante van Poisson)                                                                      | -                    |
| $\nu_{ur}$                  | Dwarscontractiecoëfficiënt (constante van Poisson) voor ontlasten - herbelasten                                         | -                    |
| $\sigma'_1$                 | In absolute zin de maximale effectieve hoofdspanning                                                                    | kN/m <sup>2</sup>    |
| $\sigma'_2$                 | Tussenkomenende effectieve hoofdspanning                                                                                | kN/m <sup>2</sup>    |
| $\sigma'_3$                 | In absolute zin de minimale effectieve hoofdspanning                                                                    | kN/m <sup>2</sup>    |
| $\sigma'_{xx}$              | Horizontale effectieve spanning in vlak van tekening (x-richting)                                                       | kN/m <sup>2</sup>    |
| $\sigma'_{xx;0}$            | Initiële horizontale effectieve spanning (x-richting)                                                                   | kN/m <sup>2</sup>    |
| $\sigma'_{xx;p}$            | Horizontale effectieve spanning (x-richting) horende bij de equivalente grensspanning                                   | kN/m <sup>2</sup>    |
| $\sigma'_{xy}$              | Schuifspanning op x-vlak in y-richting                                                                                  | kN/m <sup>2</sup>    |
| $\sigma'_{yy}$              | Verticale effectieve spanning (y-richting)                                                                              | kN/m <sup>2</sup>    |
| $\sigma'_{yy;0}$            | Initiële verticale effectieve spanning (y-richting)                                                                     | kN/m <sup>2</sup>    |
| $\sigma'_{yy;p}$            | Verticale effectieve spanning (y-richting) horende bij de equivalente grensspanning                                     | kN/m <sup>2</sup>    |
| $\sigma'_{yy;r}$            | Verticale effectieve referentiespanning                                                                                 | kN/m <sup>2</sup>    |
| $\sigma'_{zz}$              | Horizontale effectieve spanning loodrecht op vlak van tekening (z-richting)                                             | kN/m <sup>2</sup>    |
| $\dot{\sigma}'_i$           | Tijdsafgeleide van de effectieve spanning in een willekeurige richting                                                  | kN/m <sup>2</sup> /s |
| $\dot{\sigma}'_{yy}$        | Tijdsafgeleide van de verticale effectieve spanning                                                                     | kN/m <sup>2</sup> /s |
| $\underline{\dot{\sigma}}'$ | Vector met tijdsafgeleide van de effectieve spanningen in 3 richtingen met bijbehorende tijdsafgeleide schuifspanningen | kN/m <sup>2</sup> /s |
| $\tau$                      | Intrinsieke tijd                                                                                                        | d                    |
| $\tau_0$                    | Intrinsieke tijd horende bij de initiële seculaire rek                                                                  | d                    |
| $\tau_r$                    | Intrinsieke tijd bij referentiespanning                                                                                 | d                    |
| $\psi$                      | Dilatantiehoek                                                                                                          | °                    |



## Termen definities

|                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 dagslijn:                           | Isotach met een intrinsieke tijd van 1 dag                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Aging:                                | Geofysisch proces t.g.v. veroudering met als gevolg: grensspanningsverhoging onder constante belasting, waardoor een 'schijnbare' OCR ontstaat.                                                                                                                                                     |
| Anisotrope spanningsconditie:         | Spanningconditie waarbij de spanning afhankelijk is van de oriëntatie.                                                                                                                                                                                                                              |
| Anisotroop gedrag:                    | gedrag (samendrukbaarheid, stijfheid, doorlatendheid etc) welke afhankelijk is van de oriëntatie.                                                                                                                                                                                                   |
| Consolidatieperiode:                  | Periode die nodig is om het overspannen poriënwater ten gevolge van een belastingsverhoging weg te persen. Deze periode is onafhankelijk van de aangebrachte belasting, maar afhankelijk van de consolidatiecoëfficiënt en dikte van de laag                                                        |
| Contractantie:                        | Volume verkleining t.g.v. de ontwikkeling van schuifspanningen.                                                                                                                                                                                                                                     |
| Deviatorisch belasten:                | Belastingen die gepaard gaan met de ontwikkeling van schuifspanningen (voorbeeld: triaxiaalproef en niet uniforme ophogingen).                                                                                                                                                                      |
| Deviatorische spanning (q):           | Spanning welke groter is dan 0 bij anisotrope spanningscondities en gelijk is aan 1 bij isotrope spanningscondities.<br>$q = \sqrt{0,5((\sigma'_{xx} - \sigma'_{yy})^2 + (\sigma'_{yy} - \sigma'_{zz})^2 + (\sigma'_{zz} - \sigma'_{xx})^2 + 6(\sigma'^2_{xy} + \sigma'^2_{yz} + \sigma'^2_{zx}))}$ |
| Deviatorische rek ( $\epsilon_q$ ):   | Rek die naast volumieke rek optreedt tijdens deviatorisch (anisotroop) belasten.                                                                                                                                                                                                                    |
| Dilatantie:                           | Volume verandering t.g.v. de ontwikkeling van schuifspanningen.                                                                                                                                                                                                                                     |
| Directe rek:                          | Elastische rek die direct ontstaat bij een verandering van de effectieve spanning. Deze term wordt gebruikt in het SSC- als a,b,c-Isotachenmodel.                                                                                                                                                   |
| Dwarscontractiecoëfficiënt:           | Verhouding tussen horizontale en verticale rek t.g.v. een spanningsverandering.<br>$\nu = -\frac{\epsilon_{xx}}{\epsilon_{yy}}$                                                                                                                                                                     |
| Equivalentente spanning ( $p^{eq}$ ): | Constante spanning op ellipsen in een $p' - q$ grafiek. Deze spanning wordt gebruikt ter bepaling van de grensspanning. $p^{eq} = p' + \frac{q^2}{M^2(p' + c \cos(\phi))}$                                                                                                                          |
| Grensspanning <sup>1</sup> :          | Term die gebruikt wordt in een traditioneel bi-lineair zettingsmodel, waarmee het spanningsniveau van de overgang van de stijve naar de slappe tak wordt aangeduid.                                                                                                                                 |
| Gronddrukcoëfficiënt (K):             | De verhouding tussen horizontale effectieve spanning en verticale effectieve spanning, geldig voor iedere spanningstoestand. $K = \frac{\sigma'_{xx}}{\sigma'_{yy}}$                                                                                                                                |

<sup>1</sup> Met de grensspanning wordt in dit rapport de grensspanning horende bij de 1 dagslijn bedoeld. De grensspanning kan ook gekoppeld worden aan andere intrinsieke tijdslijnen en wordt dan ook wel de referentie isotach genoemd.

|                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Intrinsieke tijd:                                                 | Tijd die nodig zou zijn geweest om het hedendaagse volume te bereiken als de belasting direct na sedimentatie aangebracht zou zijn.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Intrinsieke tijdsafhankelijke seculaire rek:                      | Intrinsieke tijdsafhankelijke deel van de seculaire rek, ook wel te vergelijken met zuiver kruip (als gevolg van aging). Deze term wordt gebruikt bij de beschrijving van het SSC- en a,b,c-Isotachenmodel. De kwantiteit wordt bepaald door de intrinsieke tijdstoename, OCR en seculaire rekcoëfficiënten ( $c$ of $\mu^*$ ). Bij een gelijkblijvende effectieve spanning is de seculaire rek slechts (intrinsieke) tijdsafhankelijk en bestaat daarmee zuiver uit kruip. |
| Isotach:                                                          | Lijn van gelijke (seculaire) reksnelheid.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Isotrope spanningsconditie:                                       | Spanningconditie waarbij de spanning onafhankelijk is van de oriëntatie.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Isotroop gedrag:                                                  | gedrag (samendrukbaarheid, stijfheid, doorlatendheid etc) welke onafhankelijk is van de oriëntatie.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Isotrope effectieve spanning ( $p'$ ):                            | Gemiddelde effectieve spanning.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Kruip:                                                            | Intrinsieke tijdsafhankelijke seculaire rek                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Maagdelijk traject:                                               | De slappe tak uit de samendrukingsproef, waarbij de effectieve spanning wordt opgevoerd tot een waarde die groter is dan de 1 dags grensspanning.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Neutrale gronddruk-coëfficiënt voor normaal geconsolideerde grond | De verhouding tussen horizontale effectieve spanning en verticale effectieve spanning in een normaal geconsolideerde spanningstoestand.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| $(K_0^{nc})$ :                                                    | $K_0^{nc} = \frac{\sigma'_{xx}}{\sigma'_{yy}}$ . Let wel, indien er gerekend wordt met cohesie dan geldt deze verhouding bij relatief grote spanningen. Bij relatief kleine spanningen is de invloed van de cohesie niet te verwaarlozen.                                                                                                                                                                                                                                   |
| OCR <sub>..</sub> :                                               | Over Consolidatie Ratio, verhouding tussen de actuele spanning en de grensspanning. Het subscript geeft aan over welke spanningsverhouding het gaat. Het SSC model berekent de OCR a.d.h.v. de equivalente spanningen;<br>$OCR_{p^{eq}} = \frac{p^{eq}}{p^{eq}}$ <p>De invoer is echter gebaseerd op verticale spanningen,</p> $OCR_{yy} = \frac{\sigma_{yy;p}}{\sigma_{yy}}$ <p>Het a,b,c-Isotachenmodel bepaalt de OCR a.d.h.v. de verticale spanningen.</p>              |
| Overhoogte:                                                       | Zandlaagdikte (hoeveelheid grond) die wordt aangebracht met het doel na zetting van de ondergrond de gewenste hoogte van de constructie te bereiken.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Overhoogte, extra:                                                | Extra zandlaagdikte (hoeveelheid grond) die tijdelijk wordt aangebracht om zetting van het grondlichaam te bespoedigen.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| POP <sub>..</sub> :                                               | Pre Overburden Pressure, verschil tussen grensspanning en actuele spanning. Het subscript geeft aan over welke spanningen het gaat. De invoer van het SSC model is gebaseerd op een verticale POP; $POP_{yy} = \sigma_{yy;p} - \sigma_{yy}$ . A.d.h.v. $POP_{yy}$ wordt door het model een $OCR_{p^{eq}}$ berekend.                                                                                                                                                         |
| Primaire rek:                                                     | Rek die optreedt tijdens het consolidatieproces (uitpersen van overspannen poriënwater). Deze term wordt gebruikt in het Koppejan model.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |

|                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Referentiespanning:                  | Spanning horende bij de referentie isotach. Normaliter is dit de 1 dagslijn volgend uit een samendrukkingsproef.                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Restzetting:                         | Zetting die zich voordoet in een bepaalde periode vanaf de oplevering van de bovenbouw. Zetting in gebruikersfase.                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Schijnbare OCR:                      | OCR welke ontstaat t.g.v. aging.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Seculaire rek <sup>2</sup> :         | Spannings en intrinsieke tijdsafhankelijke seculaire rek welke zowel optreedt tijdens als na de directe rek. Deze term wordt gebruikt in het SSC en a,b,c-Isotachenmodel. In het SSC model wordt eerder gesproken over onomkeerbare (irreversible) rek. Om consistentie te behouden tussen het SSC- en a,b,c-Isotachenmodel is er in dit rapport voor gekozen bij beide modellen te spreken over seculaire rek. |
| Secundaire rek <sup>2</sup> :        | Oneindig lang durende rek die optreedt tijdens en na de primaire rek. Deze term wordt gebruikt in het Koppejan model.                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Spanningsafhankelijke seculaire rek: | Spanningsafhankelijke deel van de seculaire rek. Dit is de rek die optreedt bij een spanningsverhoging boven de grens/referentiespanning met een gelijk blijvende intrinsieke tijd. Deze term wordt gebruikt bij de beschrijving van het SSC- en a,b,c-Isotachenmodel. De kwantiteit wordt bepaald door de spanningsverhoging, OCR en (natuurlijke) samendrukkingcoëfficiënt ( $b$ of $\lambda^*$ ).            |
| Volumieke rek ( $\varepsilon_v$ ):   | Sommatie van de rekken in drie loodrecht op elkaar staande richtingen.<br>$\varepsilon_v = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$                                                                                                                                                                                                              |
| Voorbelaste traject:                 | Het belastingstraject in een samendrukkingsproef waarbij de grond een stijver gedrag vertoont, omdat de spanning lager is dan de 1 dags grensspanning.                                                                                                                                                                                                                                                          |

---

<sup>2</sup> Secundaire en seculaire rek worden vaak door elkaar gebruikt.

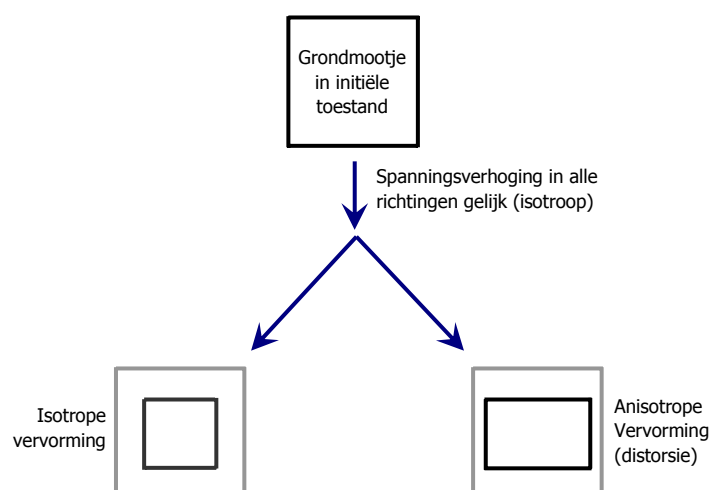


# 1. Inleiding

In met name West-Nederland bestaat de ondergrond voornamelijk uit slappe klei en veenlagen. Bij het aanbrengen van een maaiveld belasting zullen er verticale en horizontale vervormingen optreden. Voor het berekenen van zettingen en horizontale vervormingen zijn verschillende modellen beschikbaar. Het Plaxis Soft Soil Creep (SSC) model is echter het enige materiaalmodel in Plaxis waarin kruip is geïntroduceerd. Dit model is gebaseerd op het in 1994 ontworpen a,b,c-Isotachenmodel.

Deze scriptie gaat in op de toepassing van het isotrope SSC model op de anisotrope ondergrond. Figuur 1 geeft het verschil in isotroop en anisotroop gedrag weer. Het grondmootje ondervindt, zoals de afbeelding laat zien, een spanningsverhoging die in alle richtingen gelijk is. Wanneer er sprake is van anisotrope grondeigenschappen, is het gevolg na spanningsverhoging, dat het grondmootje anisotroop vervormt. Dit betekent dat de vervorming in de verschillende richtingen niet gelijk is. Isotrope grondeigenschappen wil zeggen dat het grondmootje na alzijdige spanningsverhoging in alle richtingen in dezelfde mate vervormt.

Met het SSC model is het niet mogelijk anisotrope grondeigenschappen te modelleren<sup>3</sup>, terwijl veen en klei wel degelijk anisotroop gedrag vertonen. Het model wordt echter alleen gebruikt bij vervormingsberekeningen van kruipgevoelige grondsoorten (veen en klei). De werkelijkheid is daardoor nooit exact te simuleren. Deze scriptie is erop gericht het SSC model beter te begrijpen waardoor de werkelijkheid zo volledig mogelijk benaderd kan worden.



**Figuur 1: verschil in isotroop en anisotroop gedrag t.g.v. spanningstoename**

Om een duidelijk beeld te krijgen van de geschiedenis m.b.t. de berekenmethoden van vervormingen in de Nederlandse ingenieurspraktijk, zijn de belangrijkste zettingsmodellen van oud naar nieuw op een rij gezet. Hierbij wordt begonnen met het 1-dimensionale Koppejan model (1948), waarna vervolgens dieper ingegaan wordt op het 1-dimensionale a,b,c-Isotachenmodel (1994). Deze laatstgenoemde vormt de basis voor het 3-dimensionale SSC model, het model wat het onderwerp is van deze scriptie. Dit SSC model zal dan ook uitgebreid behandeld worden. Tot slot komt de relatie tussen de verschillende modellen aan de orde.

Na deze modelbeschrijvingen worden a.d.h.v. deelonderzoeken naar antwoorden op de in paragraaf 2.2 gestelde onderzoeksvragen gezocht. Deze deelonderzoeken gaan in op de relatie tussen het SSC- en a,b,c-isotachenmodel. Daarnaast wordt het SSC model zo volledig mogelijk geanalyseerd om de case, op een verantwoorde manier en met juiste parameters, door te rekenen. Uit deze case study zal blijken hoe het SSC model het beste toegepast kan worden op de anisotrope ondergrond.

<sup>3</sup> De permeabiliteit kan daarentegen wel in twee richtingen worden gedefinieerd. De samendrukkingsparameters echter niet.



## 2. Probleemstelling

### 2.1. Probleembeschrijving

De zojuist getoonde Figuur 1 geeft het gevolg van spanningsverhoging weer. Deze spanningsverhoging heeft een samendrukking als gevolg. De mate van samendrukking wordt bepaald door de samendrukkingsparameters (grondeigenschappen). De samendrukkingsparameters van het SSC model zijn  $\kappa^*$ ,  $\lambda^*$  en  $\mu^*$ . Deze parameters kunnen volgens de onderstaande omrekenformules berekend worden uit de a,b,c-Isotachenparameters (a, b en c). M.b.v. deze omrekening wordt bij beide modellen dezelfde zetting verwacht.

Uit praktijk ervaringen blijkt echter dat na de omrekening, de zetting van het a,b,c-Isotachenmodel niet in overeenstemming is met de zetting volgend uit een 1-dimensionale SSC berekening.

Om echter gebruik te kunnen maken van het SSC model zullen de samendrukkingsparameters zoals deze ingevoerd worden in Plaxis, gefit moeten worden aan spreadsheet en/of MSettle berekeningen. De parameters van het SSC model ( $\kappa^*$ ,  $\lambda^*$ ,  $\mu^*$ ) worden aangepast totdat de zetting in voldoende mate overeenkomt met de zetting volgend uit het gebruikte controle model (spreadsheet en/of MSettle). Vervolgens worden 2/3-dimensionale vervormingen met het SSC model berekend. Hierbij wordt de orde grootte van de horizontale vervormingen vaak nog gecheckt a.d.h.v. het Ysseldijk-Loof berekeningsmodel.

Omrekenformules Van a,b,c-Isotachen naar SSC met Updated Mesh:

$$\kappa^* \approx 2a$$

$$\lambda^* = b$$

$$\mu^* = c$$

Uit het bovenstaande blijkt dat Fugro meer ervaring op wil doen met het SSC model, alvorens het SSC model grootschalig wordt toegepast.

## 2.2. Onderzoeksvragen

Het afstudeeronderzoek kan worden opgesplitst in de onderstaande onderzoeksvragen. Voorafgaande aan deze onderzoeksvragen zijn een aantal hoofdstukken ingericht op het verkrijgen van inzicht in het SSC-, a,b,c-Isotachen- en Koppejan model.

- 1) Het achterhalen van de oorzaken van de verschillen in de verticale vervorming tussen het SSC- en a,b,c-Isotachenmodel, bij 1-dimensionale vervorming. Daarnaast onderzoeken of er relaties te vinden zijn tussen deze verschillen.
- 2) Verificatie van de gevonden oorzaken bij onderzoeksvraag 1 a.d.h.v. samendrukkingsproeven en bestaande projecten.
- 3) De werking van het SSC model a.d.h.v. praktische voorbeelden uitvoerig beschrijven, waarbij in het bijzonder aandacht zal worden besteed aan de invloed van de  $K_0^{nc}$ -afhankelijke M parameter.
- 4) Het achterhalen van een fundamentele verklaring waarom geadviseerd wordt de OCR in het SSC model groter dan of gelijk aan 1,3 à 1,4 te kiezen.
- 5) Het model valideren aan 2-dimensionale grondvervormingen. Dit zal gebeuren a.d.h.v. een triaxiaalproef en een case study.

Hoofdstuk 3 van deze scriptie zal inzicht verschaffen in de verschillende modellen. Anders dan in de bovenstaande opsomming, zullen onderzoeksvragen 1 en 3 in dit hoofdstuk als eerste (gedeeltelijk) beantwoord worden (onderzoeksvraag 2 wordt later pas beantwoord). In hoofdstuk 4 waarin de deelonderzoeken t.b.v. de analyse van het SSC model behandeld worden, zal allereerst antwoord geven worden op onderzoeksvraag 4. Daaropvolgend zal onderzoeksvraag 3 verder en zo volledig mogelijk beantwoord worden, waarna onderzoeksvraag 2 gedeeltelijk aan de orde komt (paragraaf 4.4) en in paragraaf 4.5 zal onderzoeksvraag 5 deels beantwoord worden. Het vijfde hoofdstuk waarin de No-Recess case behandeld wordt, zal verder en zo volledig mogelijk antwoord geven op deze zojuist genoemde onderzoeksvragen (vragen 2 en 5).

### 3. Zettingsmodellen

Voor het berekenen van verticale grondvervormingen wordt, ondanks dat het a,b,c-Isotachenmodel recenter is (1994), tot op heden het meest gebruik gemaakt van het in 1948 geïntroduceerde Koppejan model.

In MSettle zijn beide modellen geïmplementeerd en het Plaxis Soft Soil Creep model is gebaseerd op het a,b,c-Isotachenmodel.

In dit hoofdstuk worden de verschillende modellen beschreven en zullen verschillen en relaties tussen de verscheidene modellen worden behandeld. Onderzoeksvragen 1 en 3 zullen hierbij gedeeltelijk beantwoord worden in respectievelijk paragraaf 3.4 en 3.3.1.

#### 3.1. Koppejan

Het Koppejan model is een 1-dimensionaal zettingsmodel dat in 1948 door Koppejan is samengesteld. In het model zijn de natuurlijk logaritmische spanningafhankelijkheid van Terzaghi (1925) en de 10-log logaritmische tijdsafhankelijkheid van Buisman (1936) verwerkt.

##### 3.1.1. Modelbeschrijving

Het Koppejan model kan beschreven worden door Vergelijking 1 en Vergelijking 2.

$$\Delta \varepsilon_{yy} = \left( \frac{U}{C_p} + \frac{1}{C_s} \log(t) \right) \ln \left( \frac{\sigma'_{yy}}{\sigma'_{yy;0}} \right) \quad (\text{onder de grensspanning})$$

**Vergelijking 1**

$$\Delta \varepsilon_{yy} = \left( \frac{U}{C'_p} + \frac{1}{C'_s} \log(t) \right) \ln \left( \frac{\sigma'_{yy}}{\sigma'_{yy;0}} \right) \quad (\text{boven de grensspanning})$$

**Vergelijking 2**

In deze vergelijkingen hebben de parameters de volgende betekenis:

|                  |                                                                         |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| $\sigma'_{yy}$   | Verticale effectieve spanning aan het einde van een belastingsverhoging |
| $\sigma'_{yy;0}$ | Initiële verticale effectieve spanning                                  |
| $C_p$            | Primaire samendrukkingscoëfficiënt onder de grensspanning               |
| $C'_p$           | Primaire samendrukkingscoëfficiënt boven de grensspanning               |
| $C_s$            | Secundaire samendrukkingscoëfficiënt onder de grensspanning             |
| $C'_s$           | Secundaire samendrukkingscoëfficiënt boven de grensspanning             |
| $U$              | Consolidatiegraad                                                       |
| $t$              | Belastingstijd in dagen                                                 |

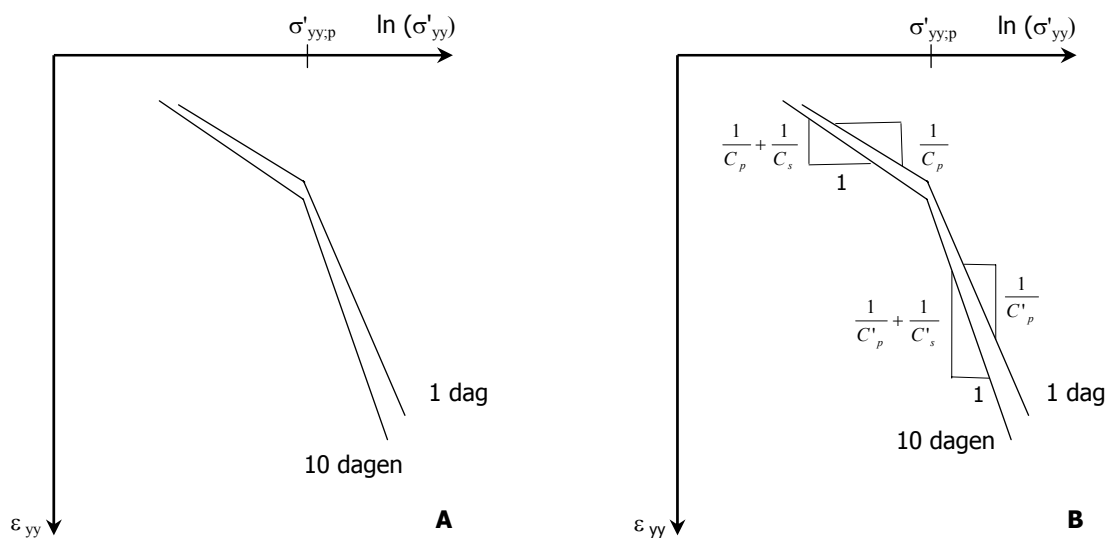
Indien een spanningspad zich zowel beneden als boven de grensspanning bevindt, zal gebruik moeten worden gemaakt van beide vergelijkingen. Vervolgens kan in Vergelijking 1,  $\sigma'_{yy}$  vervangen worden door de grensspanning ( $\sigma'_{yy;p}$ ) en in Vergelijking 2  $\sigma'_{yy;0}$  vervangen worden door de grensspanning ( $\sigma'_{yy;p}$ ).

De samendrukkingsparameters hebben onder de grensspanning een hogere waarde dan boven de grensspanning. Een spanningsverhoging t.o.v. een initiële spanning zal een grotere rek tot gevolg hebben wanneer de grensspanning kleiner is dan de initiële spanning. Dit in tegenstelling tot wanneer deze grensspanning groter is dan de initiële spanning.

Zoals uit de vergelijkingen volgt, heeft de consolidatiegraad ( $U$ ) alleen invloed op de primaire samendrukking. In de literatuur wordt echter ook wel eens gevonden dat de consolidatiegraad buiten de haakjes staat. Op deze manier is de secundaire samendrukking ook afhankelijk van de consolidatiegraad.

Indien in een grondmonster de consolidatiecoëfficiënt 0% is, dan is de effectieve spanning nog niet toegenomen. Niettemin wordt de te verwachte effectieve spanning aan het einde van belastingstap ingevuld in het spanningsafhankelijke deel van de vergelijkingen. Als er dus bij de seculaire rek geen rekening wordt gehouden met de consolidatiegraad dan wordt de seculaire rek overschat. Dit omdat er in de vergelijkingen vanuit wordt gegaan dat de effectieve belasting op tijdstip 0 aanvangt, hetgeen niet het geval is.

In Figuur 2A en B zijn de 1 en 10 dagslijnen bij verschillende effectieve verticale spanningen uit een samendrukkingsproef weergegeven. Deze  $\ln(\sigma'_{yy}) - \varepsilon_{yy}$  grafieken worden gebruikt om de benodigde samendrukkingsparameters van het model te bepalen, zoals weergegeven in Figuur 2 B. Bij de 1 dagslijn wordt er vanuit gegaan dat er nog geen seculaire rek is opgetreden, hetgeen niet het geval is. Want wanneer de effectieve korrelspanning groter is dan  $0 \text{ kN/m}^2$ , zullen er seculaire rekken optreden.



**Figuur 2:  $\ln(\sigma'_{yy}) - \varepsilon_{yy}$  grafieken met Koppejan parameters**

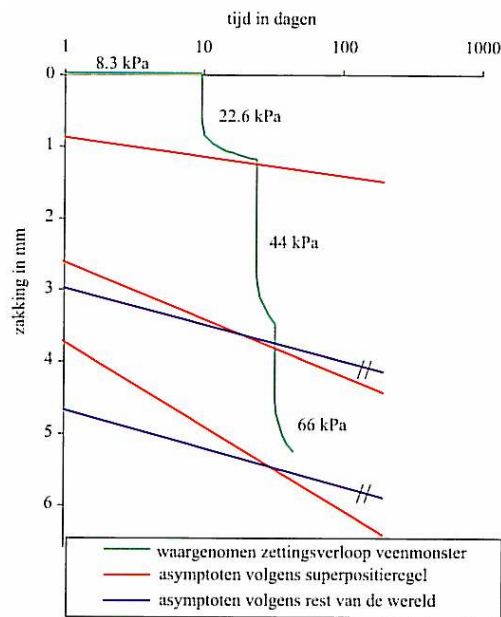
### Superpositie beginsel

Het superpositie beginsel, ook geldig voor het Koppejan model, is afkomstig van Keverling Buisman. Hij schreef hierover:

*"Indien men op een dun laagje, dat aan een samendrukkingsproces onderworpen is, en nadat dit gedurende zekeren tijd voortgang heeft gevonden, een nieuwe belastingsverhoging aanbrengt, kan men veronderstellen, dat ingevolge deze extra belasting een nieuw zettingsproces zal intreden, dat op het reeds in gang zijnde zettingsproces zal kunnen worden gesuperponeerd, en na een hydrodynamische tussenperiode van korten duur, voor het verdere verloop b.v. gekenmerkt zou kunnen worden door ongeveer gelijke constanten  $\alpha_p$  en  $\alpha_s$  als ook voor het in gang zijnde proces."*

Met  $\alpha_p$  en  $\alpha_s$  worden respectievelijk de primaire- en secundaire samendrukkingsparameters bedoeld.

Het superpositie beginsel leidt echter tot een overschatting van de seculaire zetting (de zettingsasymptoot wordt steiler). De zetting van de nieuwe belastingstap wordt bij de zetting van de vorige belastingstap gesuperponeerd. Hierbij wordt het seculaire zettingsaandeel van de nieuwe belastingstap berekend vanaf het nieuwe tijdstip. Doordat de seculaire reksnelheid afneemt naarmate de tijd vordert, zal in het geval van superpositie de zettingsasymptoot steiler worden. De nieuwe tijdstap begint namelijk later, waardoor de reksnelheid van deze stap is daardoor groter. In Figuur 3 zijn de steilere asymptoten als gevolg van de superpositie weergegeven en de asymptoten volgens de theorie dat de zettingsasymptoot spanningsonafhankelijk is en daarmee bij iedere spanningsverhoging dezelfde richtingscoëfficiënt heeft.



**Figuur 3: superpositie beginsel in samendrukkingsproef op veen [17]**

In Vergelijking 3 wordt het verschijnsel in formulevorm geschreven. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat alle belastingen groter zijn dan de grensspanning.  $t_1$  en  $t_2$  zijn niet gelijk aan elkaar.  $t_1$  is de tijdsduur vanaf het aanbrengen van de eerste ophoging tot het tijdstip van interesse.  $t_2$  is de tijdsduur vanaf het aanbrengen van de tweede ophoging tot het tijdstip van interesse.

$$\Delta \varepsilon = \left( \frac{U_1}{C'_p} + \frac{1}{C'_s} \log(t_1) \right) \ln \left( \frac{\sigma'_{yy;oph1}}{\sigma'_{yy0}} \right) + \left( \frac{U_2}{C'_p} + \frac{1}{C'_s} \log(t_2) \right) \ln \left( \frac{\sigma'_{yy;oph2}}{\sigma'_{yy;oph1}} \right)$$

### Vergelijking 3

Voor een uitgebreidere beschrijving van het model wordt verwezen naar literatuur [1], [10], [11], [17] en [23].

### 3.1.2. Model beperkingen

- Wanneer tijd ( $t$ ) kleiner is dan 1 dag is het seculaire rek aandeel negatief. Dit is onjuist.
- De aanname dat er geen seculaire rek optreedt binnen 1 dag is niet correct.
- Het superpositie beginsel is een aanname die niet correct is. Ten gevolge hiervan treden er vooral bij gefaseerde ophogingen te grote seculaire zettingen op.
- De afstroming van overspannen poriënwater wordt niet afgedekt tijdens het beschrijven van het tijd-zettings gedrag. Literatuur [14] en [17]

## 3.2. a,b,c-Isotachenmodel

Het a,b,c-Isotachenmodel is een geheel nieuwe wijze van 1-dimensionale zettingsberekeningen. Om het model beter te begrijpen worden hieronder eerst een aantal fundamentele verschillen t.o.v. het Koppejan model benoemd.

- De parameter  $a$  (te vergelijken met  $C_p$  uit het Koppejan model) geldt zowel onder als boven de grensspanning (de bepaling van deze parameter wordt echter net als bij het Koppejan model onder de grensspanning verricht).
- Er wordt niet meer gesproken over primaire en secundaire rek, maar over directe en seculaire rek. Deze termen hebben niet dezelfde betekenis. Voor de betekenis hiervan wordt verwezen naar het hoofdstuk Termen en definities.
- Seculaire reksnelheid is indirect en niet meer direct afhankelijk van de effectieve spanning.
- Er wordt gerekend met natuurlijke i.p.v. lineaire rekken. Hierdoor worden de effecten van grote vervormingen verwerkt.
- Er wordt niet meer gesproken over tijd ( $t$ ), maar over intrinsieke tijd ( $\tau$ ). Hetgeen ook al gebruikt werd door Bjerrum (1967). Voor de betekenis van intrinsieke tijd wordt verwezen naar het hoofdstuk Termen en definities.

Verder staat het a,b,c-Isotachenmodel bekend om het volgende:

- Uniek verband tussen seculaire reksnelheid, rek en effectieve spanning.
- Elasto-viscoplastisch grondgedrag volgens het model.
- Door de combinatie met Darcy, een rek afhankelijke permeabiliteit.

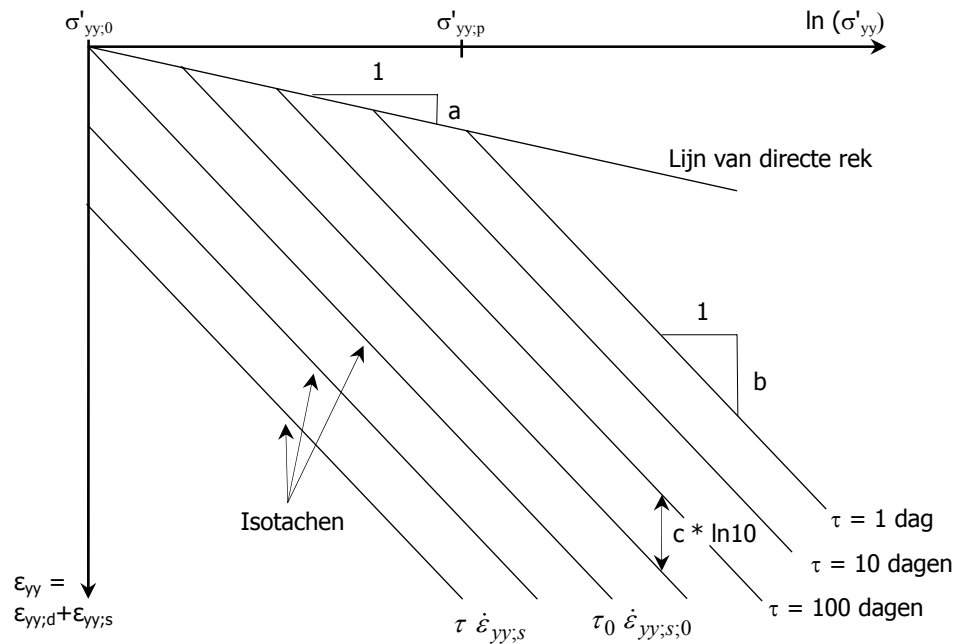
### 3.2.1. Modelbeschrijving

In deze paragraaf zal het model aan de hand van grafieken en vergelijkingen in grote lijnen worden beschreven.

In Figuur 4 is een  $\ln(\sigma'_{yy}) - \varepsilon_{yy}$  grafiek van het model weergegeven. Hierin is aangegeven hoe de benodigde grootheden en modelparameters worden bepaald. De schuine parallelle lijnen zijn de isotachen, elke isotach staat voor een intrinsieke tijd ( $\tau$ ) en heeft een specifieke seculaire reksnelheid ( $\dot{\varepsilon}_{yy;s}$ ). Verschillende intrinsieke tijdslijnen zijn ook weergegeven (1 dag, 10 dagen en 100 dagen). De afstand tussen deze lijnen is bepalend voor de parameter  $c$ . De parameter  $b$  bepaalt de richtingscoëfficiënt van de isotachen en de parameter  $a$  bepaalt de richtingscoëfficiënt van de directe compressielijn.  $\tau_0$  is de intrinsieke tijdlijn horende bij de initiële seculaire reksnelheid. Ditzelfde geldt voor de initiële seculaire reksnelheid ( $\dot{\varepsilon}_{yy;s;0}$ ). De grensspanning  $\sigma'_{yy;p}$  is in dit geval de grensspanning die hoort bij de 1 dagslijn. Deze grensspanning komt normaliter overeen met de grensspanning uit een samendrukkingsproef.

In een samendrukkingsproef wordt elke belastingstap 24 uur aangehouden. Er wordt vaak verondersteld dat de consolidatieperiode ongeveer 1 uur duurt. De intrinsieke tijd zou dan, indien de belastingstappen groter zijn dan de grensspanning, 23 uur zijn. Dit komt nagenoeg overeen met de 1 dagslijn. Dit is echter niet altijd het geval; bij  $c_v$ -waarden kleiner of gelijk aan  $10^{-8}$  m/s duurt de consolidatietijd beduidend langer.

De grensspanning kan bij elke willekeurige intrinsieke tijdslijn gekozen worden. Gemakshalve wordt de grensspanning vaak bij de 1 dagslijn gekozen, dit volgt zoals hierboven beschreven uit de samendrukkingsproef.



**Figuur 4:  $\ln(\sigma'_{yy}) - \varepsilon_{yy}$  grafiek met a,b,c-Isotachen parameters**

In Figuur 4 staat op de verticale as de verticale rek ( $\varepsilon_{yy}$ ) weergegeven, welke nog op te delen valt in de directe en seculaire rek. Bij het a,b,c-Isotachenmodel spreekt men echter altijd over de natuurlijk rek ( $\varepsilon^H$ ) i.p.v. lineaire rek ( $\varepsilon^C$ ). De superscripts H en C worden daarom niet genoteerd.

De lineaire rek, ook wel Cauchy rek genoemd, wordt beschreven door Vergelijking 4 en de natuurlijke rek met Vergelijking 5 en Vergelijking 6.

$$\varepsilon^C = \frac{\Delta h}{h_0}$$

**Vergelijking 4**

$$\varepsilon^H = -\ln\left(\frac{h}{h_0}\right)$$

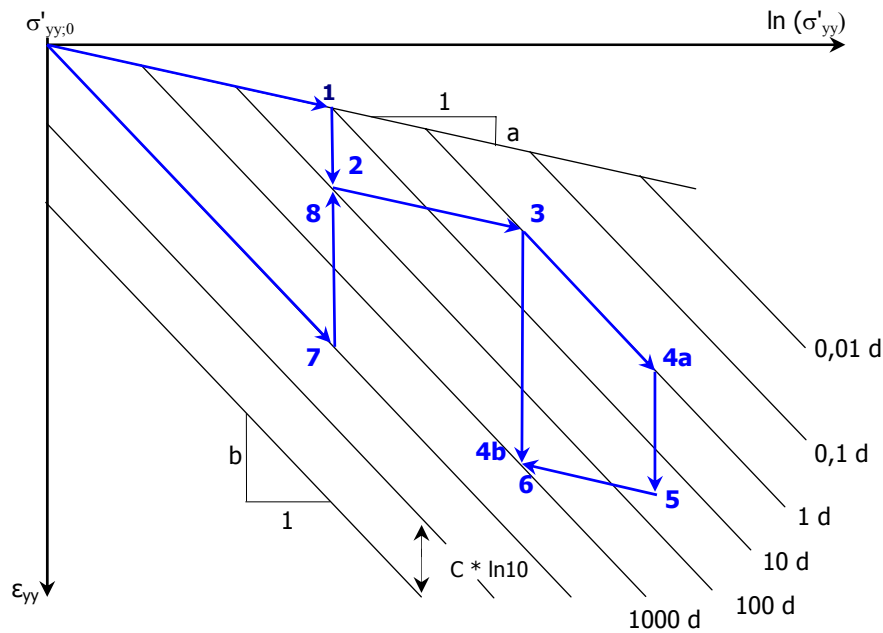
**Vergelijking 5**

$$\varepsilon^H = -\ln(1 - \varepsilon^C)$$

**Vergelijking 6**

Natuurlijke rekken zullen significant van lineaire rekken afwijken indien de lineaire rek groter wordt dan 20%. Bij een lineaire rek van 20% is de natuurlijke rek 18,2%.

Om het model nog beter te verduidelijken wordt gebruik gemaakt van een vereenvoudigde schematisatie (zie Figuur 5). In deze figuur worden verschillende spanningspaden doorlopen. De spanningspaden zullen hieronder stapsgewijs worden beschreven. Hierbij wordt de consolidatie niet in beschouwing genomen, de consolidatieperiode is 0 dagen. Ook wordt uitgegaan van een te verwaarlozen tijdsduur waarin de belasting wordt aangebracht.



**Figuur 5: spanningspaden in het a,b,c-Isotachenmodel**

### Spanningspad 1

In dit spanningspad wordt een grondmootje belast vanuit zijn in-situ spanning (hiermee wordt de verticale effectieve spanning bedoeld) tot een nieuwe spanning. Deze nieuwe spanning overschrijdt de grensspanning nog niet, daardoor wordt de 1 dagslijn niet bereikt. De OCR van het mootje was groter dan 1 en de opgetreden rekken zijn puur elastisch (directe rek).

### Spanningspad 2

In dit spanningspad wordt de spanning constant gehouden gedurende een periode van 90 dagen (van de 10 dagslijn naar de 100 dagslijn). Er zullen nu puur plastische vervormingen optreden (intrinsieke tijdsafhankelijke seculaire rek).

### Spanningspad 3

In dit spanningspad wordt de belasting verhoogd tot de nieuwe grensspanning. De grensspanning wordt nog niet overschreden, daardoor zullen de rekken puur elastisch zijn.

Deze grensspanning is groter dan de grensspanning die bereikt zou worden wanneer de spanning in spanningspad 1 verhoogd zou worden tot de grensspanning. Dit grensspanningsverschil wordt ook wel aging genoemd en is zoals de naam al zegt afhankelijk van een verstreken tijdsduur.

### Spanningspad 4a

In dit spanningspad wordt de belasting verder verhoogd, de grensspanning wordt dus overschreden. Er treden nu zowel elastische als plastische rekken op, gerelateerd aan respectievelijk de directe en spanningsafhankelijke seculaire rekken. De belasting is daarbij gedurende 0,92 dagen constant gehouden, zodoende wordt de 1 dagslijn bereikt.

### Spanningspad 4b

In dit spanningspad wordt de belasting gedurende een periode van 999 dagen constant gehouden. De rekken zijn nu puur plastisch en tijdsafhankelijk.

### Spanningspad 5

In dit spanningspad wordt de belasting gedurende een periode van ongeveer 60 dagen constant gehouden. Ook hier zijn de rekken puur plastisch.

### Spanningspad 6

In dit spanningspad wordt een ontlaststap ingelast tot de spanning bereikt wordt horende bij belastingstap 4b. Ook hierdoor zullen puur elastische rekken optreden.

### Spanningspaden 7 en 8

Deze spanningspaden geven een gedachte experiment weer. Hiermee kan een willekeurig punt beneden de grensspanning in een spannings-rek grafiek ook met de parameters b en c bereikt worden. Spanningspad 8 is hierbij een fictief spanningspad, er wordt terug gegaan in de tijd.

Als de spanningspaden 4a, 5 en 6 met spanningspad 4b vergeleken worden, blijkt al snel wat het effect is van een (extra) overhoogte; de belastingsperiode wordt d.m.v. de (extra) overhoogte met 939 dagen verkort.

De spanningspaden 1, 3 en 6 zijn parallel aan elkaar en hebben een richtingscoëfficiënt gelijk aan de parameter a. Omdat er geen rekening wordt gehouden met de consolidatietijd is deze schematisatie vereenvoudigd. De directe rek treedt hier instantaan op, terwijl in de praktijk het bereiken van de eindspanning gemoeid gaat met een consolidatieperiode (afhankelijk van de consolidatiecoëfficiënt en de laagdikte). Doordat het enige tijd duurt voordat de eindspanning is bereikt zullen er intrinsieke tijdsafhankelijke seculaire rekken optreden, hierdoor ontstaat er een geleidelijk verloop tussen de lijnen met richtingscoëfficiënt a en b.

Verder kan vermeld worden dat er ook de kleinere periodes op de intrinsieke tijdschaal kunnen worden bereikt.

**Basisformules:**

Nu de grote lijnen van het model beschreven zijn, zal in worden gegaan op de basisformules. Te beginnen met de modelparameters a, b en c (Vergelijking 7 tot en met Vergelijking 9). Al deze parameters zijn voor het maken van berekeningen geldig, zowel voor als na de grensspanning (zie hiervoor ook de consistentie die is aangetoond door spanningspad 1 en 2 te vergelijken met spanningspad 7 en 8). Voor het bepalen van de parameters (a, b en c) uit samendrukkingsproeven, dient echter wel rekening te worden gehouden met de grensspanning.

$$a = \frac{\Delta \varepsilon_{yy}}{\Delta \ln \sigma'_{yy}} \text{ (met } \sigma'_{yy} < \sigma'_{yy;p} \text{)}$$

**Vergelijking 7**

$$b = \frac{\Delta \varepsilon_{yy}}{\Delta \ln \sigma'_{yy}} \text{ (met } \sigma'_{yy} > \sigma'_{yy;p} \text{)}$$

**Vergelijking 8**

$$c = \frac{\Delta \varepsilon_{yy}}{\ln \tau}$$

**Vergelijking 9**

Verder kan het model beschreven worden met rekken en reksnelheden, te beginnen met de rekken. Onderstaand de vergelijking voor de totale rek (Vergelijking 10).

$$\Delta \varepsilon_{yy} = \Delta \varepsilon_{yy;d} + \Delta \varepsilon_{yy;s}$$

**Vergelijking 10**

De directe rek (Vergelijking 11) wordt beschreven door de initiële spanningstoestand, actuele spanningstoestand en parameter a. Tijd speelt bij deze rek geen rol.

$$\Delta \varepsilon_{yy;d} = a \ln \left( \frac{\sigma'_{yy}}{\sigma'_{yy;0}} \right) \text{ (zowel voor als na de grensspanning)}$$

**Vergelijking 11**

De totale seculaire rek wordt beschreven door Vergelijking 12 waarin  $\Delta \varepsilon_{yy;s;sp}$  de spanningsafhankelijke component van de seculaire rek en  $\Delta \varepsilon_{yy;s;t}$  de intrinsieke tijdsafhankelijke component is.

$$\Delta \varepsilon_{yy;s} = \Delta \varepsilon_{yy;s;sp} + \Delta \varepsilon_{yy;s;t}$$

**Vergelijking 12**

De spanningsafhankelijke component wordt beschreven door Vergelijking 13. Een dergelijke rek is weergegeven in de belastingsstappen 4a en 7 van Figuur 5.

$$\Delta \varepsilon_{yy;sp} = (b - a) \ln \left( \frac{\sigma'_{yy}}{\sigma'_{yy;0}} \right)$$

**Vergelijking 13**

De tijdsafhankelijke component wordt beschreven door Vergelijking 14. Een dergelijke rek is weergegeven in de belastingsstappen 2, 4b, 5 en 8 van Figuur 5.

$$\Delta \varepsilon_{yy;s;t} = -c (\ln \dot{\varepsilon}_{yy;s} - \ln \dot{\varepsilon}_{yy;s;o})$$

#### Vergelijking 14

$\Delta \varepsilon_{yy;s;t}$  kan ook beschreven worden met intrinsieke tijd i.p.v. de reksnelheid (Vergelijking 15). Het verschil tussen Vergelijking 14 en Vergelijking 15 m.b.t. de tekenwisseling (van negatief naar positief) laat zien dat de reksnelheid kleiner wordt als de intrinsieke tijd groter wordt en visa versa.

$$\Delta \varepsilon_{yy;s;t} = c (\ln \tau - \ln \tau_0)$$

#### Vergelijking 15

De intrinsieke tijd en reksnelheid kunnen m.b.v. Vergelijking 16 in elkaar worden omgeschreven.

$$\tau = \frac{c}{\dot{\varepsilon}_{yy;s}}$$

#### Vergelijking 16

De totale seculaire rek kan nu beschreven worden m.b.v. Vergelijking 17 en Vergelijking 18.

$$\Delta \varepsilon_{yy;s} = (b-a) \ln \left( \frac{\sigma'_{yy}}{\sigma'_{yy;0}} \right) - c \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_{yy;s}}{\dot{\varepsilon}_{yy;s;o}} \right)$$

#### Vergelijking 17

$$\Delta \varepsilon_{yy;s} = (b-a) \ln \left( \frac{\sigma'_{yy}}{\sigma'_{yy;0}} \right) + c \ln \left( \frac{\tau}{\tau_0} \right)$$

#### Vergelijking 18

De totale rek is een sommatie van de directe en seculaire rekken, welke is weergegeven in Vergelijking 19.

$$\Delta \varepsilon_{yy} = b \ln \left( \frac{\sigma'_{yy}}{\sigma'_{yy;0}} \right) + c \ln \left( \frac{\tau}{\tau_0} \right)$$

#### Vergelijking 19

Andere veel gebruikte vergelijkingen, zijn vergelijkingen waarbij de reksnelheid berekend wordt. De totale reksnelheid wordt beschreven in Vergelijking 20.

$$\dot{\varepsilon}_{yy} = \dot{\varepsilon}_{yy;d} + \dot{\varepsilon}_{yy;s}$$

#### Vergelijking 20

Zoals volgt uit Vergelijking 20 is de totale reksnelheid opgedeeld in een directe en seculaire component. De directe component wordt beschreven in Vergelijking 21.

$$\dot{\varepsilon}_{yy;d} = \frac{a}{\sigma'_{yy}} \dot{\sigma}'_{yy} \quad (\text{zowel voor als na de grensspanning})$$

### Vergelijking 21

De seculaire reksnelheid wordt beschreven in Vergelijking 22. Hierin is  $\sigma'_{v;r}$  de verticale effectieve referentiespanning en  $\tau_r$  de bijbehorende intrinsieke tijd. Op deze manier wordt de grensspanning verwerkt.

$$\dot{\varepsilon}_{yy;s} = \frac{c}{\tau_r} \left( \frac{\sigma'_{yy}}{\sigma'_{yy;r}} \right)^{\frac{b-a}{c}} \exp(-\Delta\varepsilon_{yy;s}/c)$$

### Vergelijking 22

De totale reksnelheid wordt nu beschreven door Vergelijking 23.

$$\dot{\varepsilon}_{yy} = \frac{a}{\sigma'_{yy}} \dot{\sigma}'_{yy} + \frac{c}{\tau_r} \left( \frac{\sigma'_{yy}}{\sigma'_{yy;r}} \right)^{\frac{b-a}{c}} \exp(-\Delta\varepsilon_{yy;s}/c)$$

### Vergelijking 23

In deze paragraaf is de werking van het a,b,c-Isotachenmodel in het kort beschreven. Voor een uitgebreidere beschrijving van het model wordt verwezen naar literatuur [10], [14], [17], [18] en [22]. Deze vergelijkingen zijn veelal afkomstig uit literatuur [22].

### 3.3. Plaxis Soft Soil Creep

Het 3-dimensionale elasto-viscoplastisch Soft Soil Creep model is gebaseerd op het 1-dimensionale a,b,c-Isotachen model en 3-dimensionale Modified Cam-Clay model. In tegenstelling tot het a,b,c-Isotachenmodel is het SSC model gebaseerd op isotrope spanningen i.p.v. verticale spanningen. Verder biedt het model mogelijkheden tot 3-dimensionale berekeningen. Het SSC model is het eerste materiaalmodel in Plaxis waarin kruip is geïntroduceerd.

Deze paragraaf is gebaseerd op literatuur [2], [3], [4], [5], [6], [7], [12], [13], [15], [16], [24] en [25].

#### 3.3.1. Modelbeschrijving

Om het SSC model te beschrijven, zullen de vereiste modelparameters in de subparagrafen uitvoerig worden beschreven. Onderzoeksvraag 3, *de werking van het SSC model a.d.h.v. praktische voorbeelden uitvoerig beschrijven, waarbij in het bijzonder aandacht zal worden besteed aan de invloed van de  $K_0^{nc}$ -afhankelijke M parameter*, zal hierbij deels behandeld worden.

Ter verduidelijking van het SSC model worden de basiseigenschappen hieronder opgesomd:

- Spanningsafhankelijke stijfheid (logaritmisch samendrukkingsgedrag).
- Onderscheid tussen primaire belasting boven de grensspanning en ontlasten/herbelasten.
- Secundaire (tijdsafhankelijke) samendrukking.
- Geheugen van de grensspanning.
- Bezwingen volgens Mohr-Coulomb.

##### 3.3.1.1. Spanningen, rekken en de $K_0^{nc}$ -afhankelijke M parameter

In deze paragraaf wordt beschreven op basis van welke spanningen, rekken en critical state line het SSC model is gebaseerd. M.b.v. vergelijkingen en figuren wordt dit verduidelijkt. Daarnaast zal uitgebreid ingegaan worden op de door het SSC model gebruikte grensspanningsbeschrijving en het nut hiervan.

In het SSC model wordt over het algemeen gesproken van  $\varepsilon_v$ ,  $\varepsilon_q$ ,  $p'$ ,  $q$  en  $p'^{eq}$  in plaats van  $\varepsilon_{yy}$  en  $\sigma'_{yy}$  bij het a,b,c-Isotachen model. De rekken  $\varepsilon_v$  en  $\varepsilon_q$  geven respectievelijk de volumieke en deviatorische rek weer. De spanningen  $q$  en  $p'$  zijn respectievelijk de deviatorische en isotrope effectieve spanningen. De equivalente spanning  $p'^{eq}$  wordt gebruikt om de seculaire reksnelheid te beschrijven. In Vergelijking 24 tot en met Vergelijking 27 zijn  $\varepsilon_v$ ,  $\varepsilon_q$ ,  $p'$  en  $q$  gedefinieerd. Het zijn nuttige parameters, omdat ze onafhankelijk zijn van de oriëntatie.

$$\begin{aligned}\varepsilon_v &= \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} \\ &= \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3\end{aligned}$$

##### Vergelijking 24

$$\begin{aligned}\varepsilon_q &= \sqrt{\frac{2}{9} \left( (\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{xx})^2 + (\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{zz})^2 + (\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{yy})^2 + 6(\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{yz}^2 + \varepsilon_{zx}^2) \right)} \\ &= \sqrt{\frac{2}{9} \left( (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 \right)}\end{aligned}$$

##### Vergelijking 25

$$p' = \frac{(\sigma'_{xx} + \sigma'_{yy} + \sigma'_{zz})}{3}$$

$$= \frac{(\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)}{3}$$

**Vergelijking 26**

$$q = \sqrt{0,5((\sigma'_{xx} - \sigma'_{yy})^2 + (\sigma'_{yy} - \sigma'_{zz})^2 + (\sigma'_{zz} - \sigma'_{xx})^2 + 6(\sigma'^2_{xy} + \sigma'^2_{yz} + \sigma'^2_{zx}))}$$

$$= \sqrt{0,5((\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_3 - \sigma'_1)^2)}$$

**Vergelijking 27**

Voor een samendrukkingsproef, triaxiaalproef en  $K_0$ -C.R.S. proef kan Vergelijking 27 vereenvoudigd worden geschreven in Vergelijking 28. Dit omdat  $\sigma'_{xx}$  gelijk is aan  $\sigma'_{zz}$  en de x, y en z assen dezelfde oriëntatie hebben als de hoofdspansing assen (de schuifspanningen  $\sigma'_{xy}$ ,  $\sigma'_{yz}$  en  $\sigma'_{zx}$  zijn dan 0).

$$q = |\sigma'_1 - \sigma'_3|$$

**Vergelijking 28**

Vergelijking 25 kan dan vereenvoudigd worden geschreven in Vergelijking 29.

$$\varepsilon_q = \frac{2}{3} |\varepsilon_1 - \varepsilon_2|$$

**Vergelijking 29**

De equivalente spanning ( $p'^{eq}$ ) kan berekend worden uit de hiervoor beschreven spanningsinvarianten  $p'$  en  $q$  (zie Vergelijking 30). De equivalente spanning is gebaseerd op de Cam-Clay bezwijkfunctie. In het SSC model staat deze equivalente spanning voor de kruipfunctie. In Figuur 6 is de  $p'$  -  $q$  grafiek weergegeven. De ellipsen staan voor de equivalente spanningen ( $p'^{eq}$ ), welke constant zijn op elke ellips. Het snijpunt van de ellips met de  $p'$ -as geeft de numerieke waarde van  $p'^{eq}$  weer. De kleinste ellips geeft een overgeconsolideerde spanningstoestand weer en de grootste ellips staat voor de equivalente grensspanning ( $p'^{eq}_p$ ). In dit rapport wordt, mits niet anders vermeld, met de grensspanning, de grensspanning op de 1 dagslijn bedoeld.  $p'^{eq}$  wordt in het SSC model gebruikt om de mate van overconsolidatie (OCR) te bepalen. Deze OCR bepaalt de seculaire reksnelheid. De equivalente grensspanning ( $p'^{eq}_p$ ) is de equivalente spanning horende bij de kruising van de directe rek lijn met de 1 dagslijn in een equivalente spannings-rek grafiek (zie ook Figuur 8B).

$$p'^{eq} = p' + \frac{q^2}{M^2 (p' + c \cot \varphi)}$$

**Vergelijking 30**

Tevens is het mogelijk  $p'^{eq}$  te definiëren met  $\sigma'_{yy}$  en  $K$  in plaats van  $p'$  en  $q$  (zie Vergelijking 31).

$$p'^{eq} = \sigma'_{yy} \left( \frac{1+2K}{3} \right) + \frac{(\sigma'_{yy} (1-K))^2}{M^2 \left( \sigma'_{yy} \left( \frac{1+2K}{3} \right) + c \cot \varphi \right)}$$

**Vergelijking 31**

De parameter K is de gronddrukcoëfficiënt en wordt beschreven met Vergelijking 32.

$$K = \frac{\sigma'_{xx}}{\sigma'_{yy}}$$

### Vergelijking 32

De parameter M (uit Vergelijking 31) is de richtingcoëfficiënt van de 'critical state line' in het p' - q vlak (zie Figuur 6) en bepaalt de vorm van de ellips. M kan berekend worden met Vergelijking 33 en Vergelijking 34. Vergelijking 33 is echter alleen geldig voor de default M-waarde van het SSC model. Verderop in deze paragraaf wordt ingegaan op de default M-waarde van het SS model. Voor de afleiding van Vergelijking 34 wordt verwezen naar literatuur [2].

$$M = \frac{6 \sin \varphi_{cv}}{3 - \sin \varphi_{cv}} \text{ (geldig voor de default M-waarde in het SSC model)}$$

### Vergelijking 33

$\varphi_{cv}$  staat in deze vergelijking voor de hoek van inwendige wrijving bij de kritische dichtheid (critical-void friction angle).

$$M = 3 \sqrt{\left( \frac{(1 - K_0^{nc})^2}{(1 + 2K_0^{nc})^2} + \frac{(1 - K_0^{nc})(1 - 2\nu_{ur})(\lambda^* / \kappa^* - 1)}{(1 + 2K_0^{nc})(1 - 2\nu_{ur})\lambda^* / \kappa^* - (1 - K_0^{nc})(1 + \nu_{ur})} \right)}$$

### Vergelijking 34

$K_0^{nc}$  is de neutrale gronddrukcoëfficiënt en geeft de verhouding weer tussen horizontale en verticale effectieve spanningen in normaal geconsolideerde grond. In Vergelijking 34 is de invloed van  $K_0^{nc}$  dominant. De vergelijking kan dan ook benaderd worden met Vergelijking 35.

$$M \approx 3,0 - 2,8K_0^{nc}$$

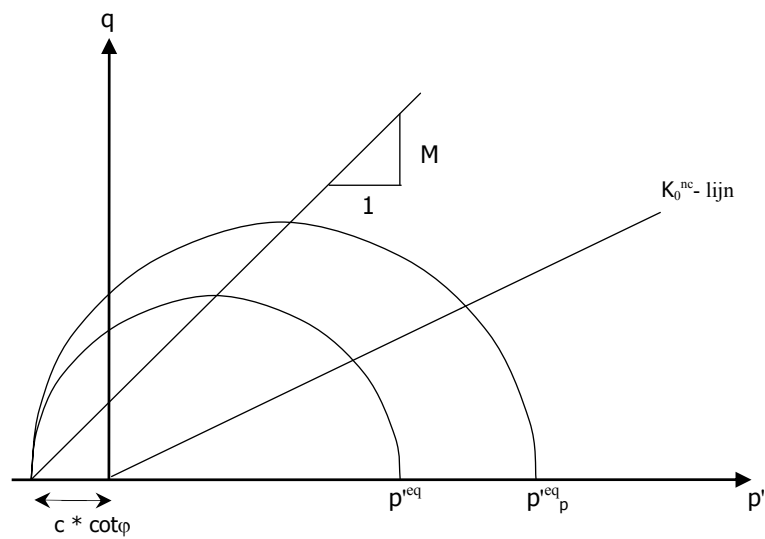
### Vergelijking 35

In Vergelijking 35 is weergegeven dat M en  $K_0^{nc}$  afhankelijk zijn van elkaar. De ervaring leert dat de waarde van M, zoals deze standaard wordt aangenomen in het Soft Soil model, een betere correlatie geeft met de werkelijkheid dan de default M-waarde in het SSC model. In het SS model wordt M bepaald via Vergelijking 34, met daarin  $K_0^{nc}$  bepaald volgens Vergelijking 36. Deze vergelijking staat ook bekend als de vuistregel van Jaky.

$$K_0^{nc} = 1 - \sin \varphi$$

### Vergelijking 36

De invloed van M op spanningen en vervormingen wordt besproken in paragraaf 4.2.

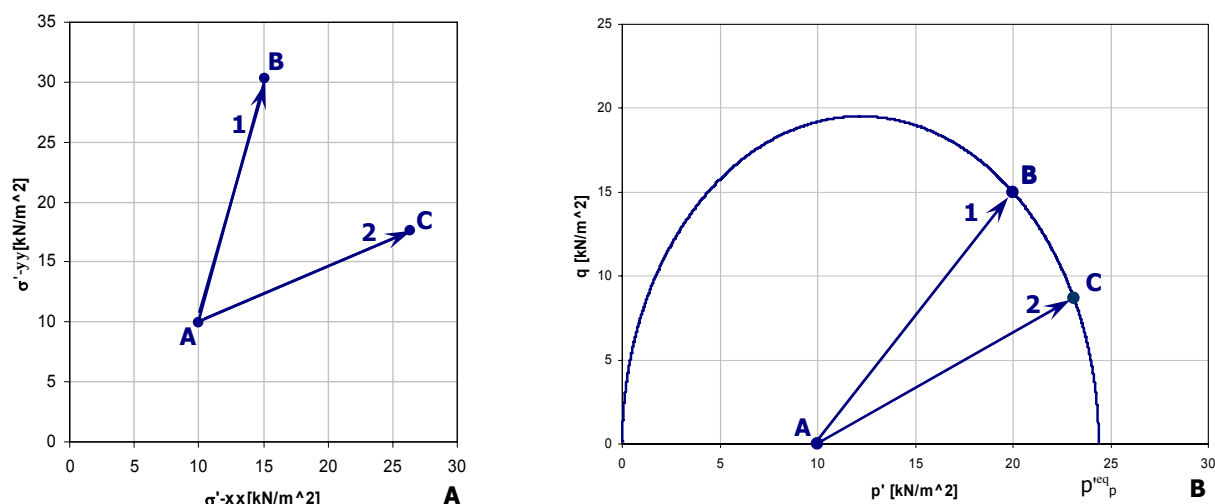


**Figuur 6:  $p'$  -  $q$  grafiek met  $p^{req}_{(p)}$  ellipsen**

De invloed van cohesie is in Figuur 6 weergegeven. Echter is het aan te raden cohesie te negeren bij vervormingsgerichte SSC berekeningen. Dit komt doordat cohesie een sterkteparameter is die tevens invloed heeft op de stijfheid (de ellips in een  $p'$  -  $q$  grafiek verschuift).

### Nut van de equivalente spanning

De equivalente grensspanning kan met verschillende spanningspaden worden bereikt. Bij deviatorische belastingen gedragen de horizontale en verticale spanning zich niet volgens de  $K_0^{nc}$ -lijn. Aan de rand van een ophoging zal de effectieve horizontale spanning afhankelijk van de diepte meer toenemen dan de effectieve verticale spanning. De equivalente grensspanning zal bij een andere combinatie van effectieve verticale en horizontale spanningen bereikt worden, anders dan op basis van 1-dimensionale samendrukking verwacht wordt. In Figuur 7 is dit grafisch weergegeven. Er wordt hierbij uitgegaan van een te verwaarlozen tijdsduur waarin de effectieve spanningsveranderingen optreden (consolidatieperiode wordt verwaarloosd). De equivalente grensspanning neemt daardoor niet toe.



**Figuur 7A en B: visualisatie bereiken equivalente grensspanning met verschillende spanningspaden**

Spanningspunt A is een spanningspunt dat bereikt is door te ontlasten vanuit spanningspunt B (een normaal geconsolideerde spanningstoestand). Spanningspunt B bevindt zich op de equivalente grensspannings ellips. Spanningspad 1 geeft een herbelaststap weer bij 1-dimensionale samendrukking vanuit spanningspunt A. Spanningspad 2 geeft een spanningspad weer waarbij de effectieve horizontale spanning meer toeneemt dan de effectieve verticale spanning (aan weerszijden van een ophoging). De effectieve horizontale en verticale spanningen in de spanningspunten B en C wijken aanzienlijk van elkaar af. Niettemin is de equivalente grensspanning bij beide spanningspaden bereikt (Figuur 7B).

Bij verder belasten vanuit de spanningspunten B en C wordt de slappe (spanningsafhankelijke seculaire) tak betreden. De optredende vervormingen zijn nu groter dan bij spanningsveranderingen voor de equivalente grensspanning. Dit betekent voor de effectieve verticale spanningen, dat bij spanningspad 2 de overgang van de stijve naar de slappe tak bij een lagere spanning optreedt dan bij spanningspad 1 (punt C;  $17,5 \text{ kN/m}^2$  i.p.v. bij punt B;  $30 \text{ kN/m}^2$ ).

Bij ophogingen zal het normaliter zo zijn dat onder de kern de spanningen verlopen volgens een vergelijkbaar spanningspad als spanningspad 1. Naast de ophoging verlopen de spanningspunten volgens een pad vergelijkbaar met spanningspad 2.

De equivalente grensspanning maakt het mogelijk een grensspanning te definiëren die onafhankelijk is van het te doorlopen spanningspad. Een verticale grensspanning volgend uit bijvoorbeeld een samendrukkingsproef is niet per definitie de effectieve verticale spanning die teruggevonden wordt bij de overgang van de stijve naar de slappe tak bij meer dimensionale vervormingen. Of deze beschrijving van de grensspanning overeenkomt met de praktijk zou uit triaxiaalproeven kunnen volgen. Op welke manier de triaxiaalproef voor deze bepaling uitgebreid dient te worden is beschreven in Bijlage 1.

De herkomst en het nut van de door het SSC model gebruikte spanningen, rekken en critical state line zijn nu beschreven. In de volgende paragrafen zal eerst onderscheid gemaakt worden tussen de verschillende rekken. Vervolgens zal beschreven worden waarom en met welke spanningen de verschillende rekken worden berekend.

### 3.3.1.2. Rek en reksnelheid beschrijving a.d.h.v. $\kappa^*$ , $\lambda^*$ en $\mu^*$

In het SSC model wordt de directe rek en reksnelheid beschreven met de zwelcoëfficiënt ( $\kappa^*$ ). De spanningsafhankelijke seculaire rek en reksnelheid worden met de samendrukkingscoëfficiënt ( $\lambda^*$ ) beschreven. Voor het beschrijven van de intrinsieke tijdsafhankelijke seculaire rek is de seculaire rekcoëfficiënt ( $\mu^*$ ) van toepassing. Verder worden verschillende spanningen gebruikt om de directe en spanningsafhankelijke seculaire rekken te beschrijven. In deze paragraaf wordt uitgelegd wanneer welke spanningen de verschillende rekken beschrijven. Verder zal ingegaan worden op realistische verhoudingen tussen  $\kappa^*$ ,  $\lambda^*$  en  $\mu^*$  en wordt er onderscheid gemaakt tussen totale rekken / reksnelheden en volumieke rekken / reksnelheden.

#### 3.3.1.2.1. Spanningsonderscheid en de bepaling van $\kappa^*$ , $\lambda^*$ en $\mu^*$

In deze paragraaf wordt beschreven wanneer isotrope of equivalente spanningen gebruikt worden om de modelparameters;  $\kappa^*$ ,  $\lambda^*$  en  $\mu^*$  te beschrijven. Dit wordt in eerste instantie gedaan door vergelijkingen voor het bepalen van de parameters  $\kappa^*$ ,  $\lambda^*$  en  $\mu^*$  uit de literatuur af te leiden. Vervolgens worden de verschillende parameters uitgezet in verschillende spannings-rek grafieken. Tot slot volgt een verklaring voor de beschrijving van de verschillende parameters a.d.h.v. verschillende spanningen.

#### *Vergelijkingen voor het bepalen van de modelparameters $\kappa^*$ , $\lambda^*$ en $\mu^*$*

De modelparameters;  $\kappa^*$ ,  $\lambda^*$  en  $\mu^*$  kunnen met de onderstaande vergelijkingen bepaald worden. Bij de vergelijkingen is vermeld op welke manier ze verkregen zijn.

De zwelcoëfficiënt ( $\kappa^*$ ) is afgeleid uit literatuur [7], vergelijking 6.28.

$$\kappa^* = \frac{-\Delta \varepsilon_v}{\Delta \ln p'}$$

#### **Vergelijking 37**

De samendrukkingscoëfficiënt ( $\lambda^*$ ) is afgeleid uit de hierboven beschreven Vergelijking 37 en vergelijking 6.23 uit literatuur [7].

$$\lambda^* = \frac{-\Delta \varepsilon_v}{\Delta \ln p'^{eq}}$$

#### **Vergelijking 38**

De seculaire rekcoëfficiënt ( $\mu^*$ ) is afgeleid uit vergelijking 6.23, literatuur [7].

$$\mu^* = \frac{-\Delta \varepsilon_v}{\Delta \ln \tau}$$

#### **Vergelijking 39**

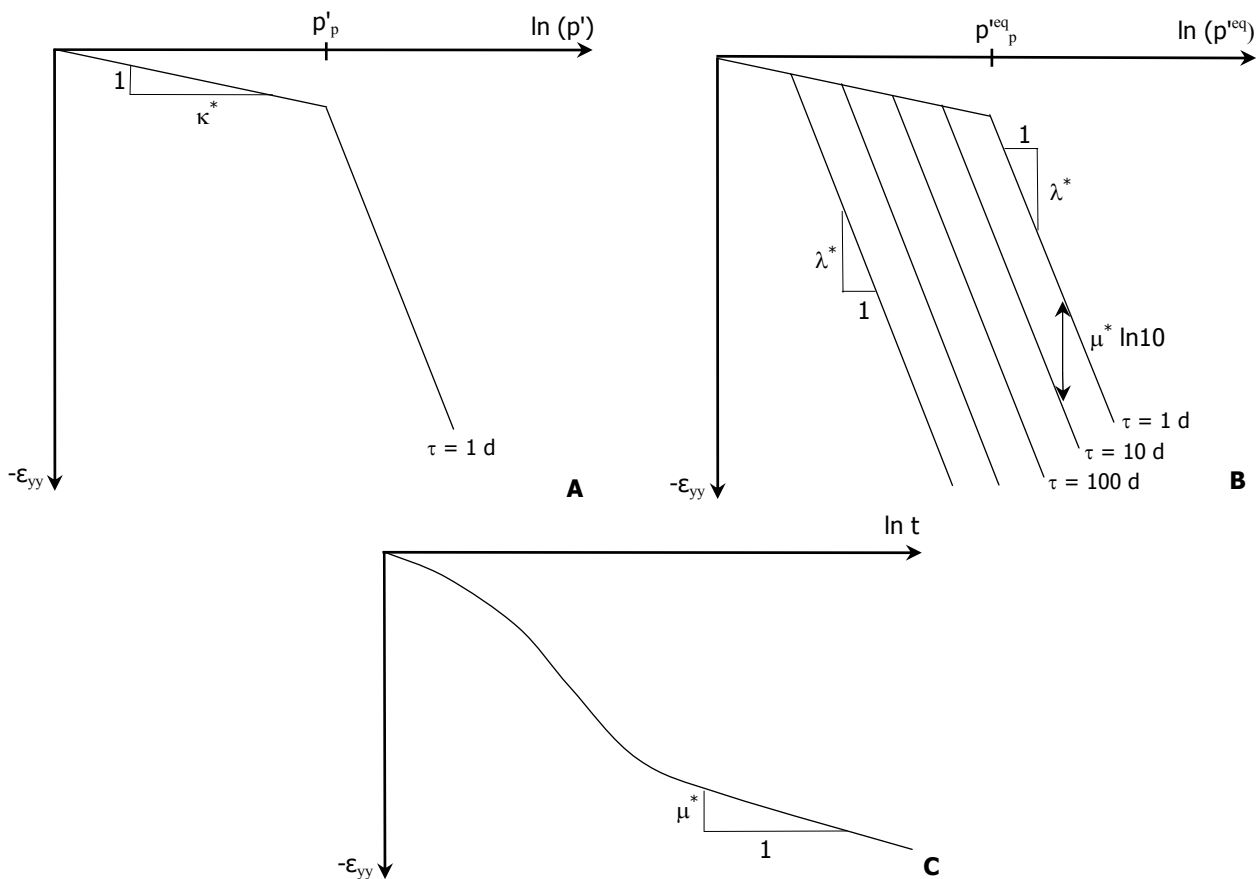
Zoals Vergelijking 37 en Vergelijking 38 weergeven, worden de zwel- en samendrukkingscoëfficiënt beschreven met verschillende spanningen.

### $\kappa^*$ , $\lambda^*$ en $\mu^*$ in de correcte spannings-rek grafieken

In Figuur 8 zijn  $\kappa^*$ ,  $\lambda^*$  en  $\mu^*$  in verschillende grafieken uitgezet t.o.v. de correcte spanningen ( $p'$  dan wel  $p'^{eq}$ ). Tevens is  $\mu^*$  uitgezet in een tijd-rek grafiek. Er dient hierbij opgemerkt te worden dat het SSC model in Plaxis rekent met druk als negatieve waarde. Optredende rekken t.g.v. druk zijn ook negatief. In grafieken worden drukspanningen positief weergegeven. De waarden kunnen anders niet op (natuurlijke) logaritmische schaal worden uitgezet. De resulterende volumieke rekken blijven negatief.

De grafieken zijn weergegeven voor 1-dimensionale samendrukking in een samendrukkingsproef. Hierbij is ervan uitgegaan dat de 1 dagslijn bereikt wordt na 1 dag belasten. De volumieke rek bij 1-dimensionaal belasten is gelijk aan de verticale rek.

Het a,b,c-Isotachenmodel staat bekend om zijn natuurlijke rek beschrijving; rek van Hencky. In Plaxis kan natuurlijke rek gesimuleerd worden door met Updated Mesh te rekenen. De vervormingen uit de vorige iteratie worden op deze manier in rekening genomen. Het programma gaat nu niet meer uit van de oorspronkelijke laagdikte, maar van de nieuwe laagdikte. Dit komt nagenoeg overeen met natuurlijke rek berekeningen.



**Figuur 8A, B en C:  $\ln(p') - \epsilon_{yy}$ ,  $\ln(p'^{eq}) - \epsilon_{yy}$  en  $\ln(t) - \epsilon_{yy}$  grafieken met de SSC parameters**

Voor het beschrijven van het model m.b.t. 1-dimensionale samendrukking zijn in tegenstelling tot het a,b,c-Isotachenmodel ( $\ln(\sigma'_{yy}) - \epsilon_{yy}$  grafiek) twee spannings – rek grafieken nodig. Dit is noodzakelijk, omdat de spanningsafhankelijke seculaire rek wordt beschreven aan de hand van de equivalente spanning ( $p'^{eq}$ ). De directe rek wordt daarentegen beschreven met de isotrope spanning ( $p'$ ).

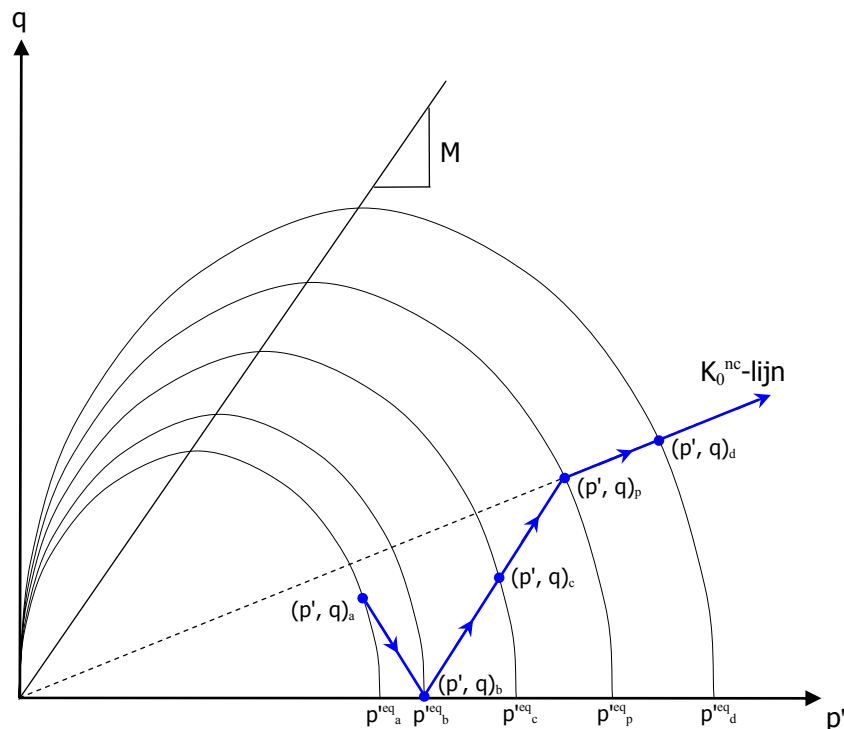
In paragraaf 3.4 wordt beschreven op welke manier de 1-dimensionale a,b,c-Isotachenparameters zich t.o.v. de 3-dimensionale SSC parameters verhouden. Zodoende kunnen  $\kappa^*$ ,  $\lambda^*$  en  $\mu^*$  bepaald worden uit a, b en c. Hierdoor is het niet noodzakelijk de uitvoering en/of interpretatie van de samendrukkingproef aan te passen om  $\ln(p') - \epsilon_v$  en  $\ln(p'^{eq}) - \epsilon_v$  grafieken te verkrijgen waaruit vervolgens  $\kappa^*$  en  $\lambda^*$  worden berekend.

### ***Waarom $\kappa^*$ en $\lambda^*$ niet in 1 grafiek uitgezet kunnen worden***

De oorzaak dat de parameters in verschillende grafieken worden uitgezet heeft te maken met de gronddrukcoëfficiënt (K). Indien K constant is, is de verhouding tussen isotrope en equivalente spanningen constant (beide spanningen nemen bij belasten toe met dezelfde factor). De parameters kunnen nu in beide spanningsgrafieken uitgezet worden. In de praktijk betekent dit dat K gelijk is aan  $K_0^{nc}$ , hetgeen normaliter het geval is op de 1 dagslijn. Dit is niet het geval indien met een significant grote cohesie wordt gerekend. Het is, zoals eerder vermeld, aan te raden cohesie bij SSC berekeningen klein te kiezen t.o.v. de spanningsconditie.

Spanningen kleiner dan spanningen op de 1 dagslijn kunnen het gevolg zijn van intrinsieke tijdsafhankelijke seculaire rek (kruip) en/of ontlasten. Tijdens een ontlaststap zal K niet constant zijn. K blijft daarentegen constant tijdens kruip (in paragraaf 3.3.1.3 wordt hier uitvoeriger op ingegaan).

In Figuur 9 is in een  $p'$ - $q$  grafiek het spanningspad weergegeven bij het belasten van een overgeconsolideerd grondmonster (overconsolidatie t.g.v. ontlasten).



**Figuur 9: isotrope / equivalente spanningsverhouding t.g.v. herbelasten bij niet constante K-waarden**

De initiële horizontale en verticale spanningscombinatie vormen spanningspunt a. In dit punt is de horizontale spanning groter dan de verticale spanning. De isotrope / equivalente spanningsverhouding is kleiner dan 1. Tijdens herbelasten vanuit spanningspunt a wordt de deviatorische spanning 0 zodra de verticale spanning gelijk wordt aan de horizontale spanning (spanningspunt b). De isotrope / equivalente spanningsverhouding is dan 1 (zie ook Vergelijking 30),  $q$  is immers 0.

$$p^{eq} = p' + \frac{q^2}{M^2 (p' + c \cot \varphi)}$$

### Vergelijking 30

Bij verdere toename van de verticale spanning wordt de verhouding opnieuw kleiner dan 1. Er ontstaan nu weer (positieve) deviatorische spanningen, omdat de verticale spanning groter wordt dan de horizontale spanning. De afname bereikt een constante waarde die kleiner is dan 1, zodra de 1 dagslijn wordt bereikt,  $K$  is constant (spanningspunten p en d in Figuur 9).

Verder kan er nog opgemerkt worden dat een ontlaststap vanuit spanningspunt p hetzelfde spanningspad volgt als de beschreven herbelaststap. Daarnaast zijn alle spanningsverhoudingen tussen willekeurige combinaties van  $p^{eq}$ ,  $p'$ ,  $\sigma'_{yy}$ ,  $\sigma'_{xx}$  en  $q$  constant indien  $K$  constant is. Theoretisch gezien kunnen bij constante waarde van  $K$  alle rekken worden beschreven door een willekeurige spanning. Rekken zijn conform het a,b,c-Isotachenmodel afhankelijk van spanningsverhoudingen, zoals later in deze paragraaf zal volgen. De verhouding tussen een actuele en initiële spanning is hetzelfde voor iedere hiervoor beschreven spanningen. Let wel dat dit alleen geldt bij 1-dimensionale samendrukking.

Samengevat betekent dit dat bij spanningen boven de grensspanning ( $p^{eq}_p$ ) de isotrope / equivalente spanningsverhouding consistent blijft ( $K$  is constant). Voor de grensspanning is de inconsistentie weergegeven.

## Conclusie

Het zal nu duidelijk zijn dat de modelparameters in verschillende spannings - rek grafieken worden uitgezet. In de  $\ln(p') - \epsilon_{yy}$  grafiek van Figuur 8 is  $\kappa^*$  uitgezet. Deze model parameter wordt niet weergegeven in de  $\ln(p^{eq}) - \epsilon_v$  grafiek, omdat de isotrope / equivalente spanningsverhouding inconsistent is, wanneer  $K$  niet constant is. Door de inconsistente verhouding zal de directe volumieke rek niet lineair zijn in een  $\ln(p^{eq}) - \epsilon_{yy}$  grafiek. Daarentegen kan  $\lambda^*$  in beide grafieken worden uitgezet, indien  $K$  constant is. De eerder genoemde verhouding is dan consistent. Op de verschillende isotachen in de  $\ln(p^{eq}) - \epsilon_v$  grafiek is  $\lambda^*$  te allen tijde geldig. De seculaire rekcoëfficiënt  $\mu^*$  kan weergegeven worden in de  $\ln(p^{eq}) - \epsilon_v$  en  $\ln(t) - \epsilon_v$  grafiek.

De opgedane kennis uit deze paragraaf zal later bij de afleiding van de modelvergelijkingen (paragraaf 3.3.1.2.3) toegepast worden.

### 3.3.1.2.2. Verhoudingen tussen $\kappa^*$ , $\lambda^*$ en $\mu^*$

De modelparameters  $\kappa^*$ ,  $\lambda^*$  en  $\mu^*$  kunnen in het SSC model niet onbeperkt gekozen worden. Er gelden verhoudingen (Vergelijking 40 en Vergelijking 41) waaraan voldaan moet worden om o.a. numerieke problemen te voorkomen. Deze verhoudingen zijn rechtstreeks uit Literatuur [25] overgenomen.

$$\frac{\lambda^* - \kappa^*}{\mu^*} \approx 5 \text{ tot } 25$$

#### Vergelijking 40

$$\frac{\lambda^*}{\kappa^*} \approx 2 \text{ tot } 10$$

#### Vergelijking 41

In de meest praktische gevallen voldoen de parameters van sterk samendrukbare grondsoorten aan de genoemde verhoudingen. Dit geeft meestal waarden tussen 10 en 20 voor Vergelijking 40 en waarden tussen 3 en 7 voor Vergelijking 41. Indien uit Vergelijking 40 een waarde groter dan 25 volgt, dan dient het nut van SSC berekeningen in acht genomen te worden. Het kruip aandeel is in dergelijke gevallen klein en in plaats van SSC berekeningen kunnen berekeningen gemaakt worden met het Soft Soil of Hardening Soil model.

Verder kan opgemerkt worden dat de verhouding  $\frac{\lambda^* - \kappa^*}{\mu^*}$  bepalend is voor de initiële seculaire reksnelheid en

$\frac{\lambda^*}{\kappa^*}$  invloed heeft op de parameter M (Vergelijking 34).

### 3.3.1.2.3. Rekken en reksnelheden

M.b.v. rek en reksnelheid vergelijkingen zal het SSC model uitvoeriger worden beschreven. De vergelijkingen komen veelal uit de literatuur of zijn door de schrijver afgeleid.

Bij de afleiding van de vergelijkingen wordt naar de formele modelvergelijkingen toegewerkt. Hiervoor is gekozen omdat het een overzichtelijker verloop geeft en het min of meer dezelfde structuur geeft als paragraaf 3.2.1, waarin het a,b,c-Isotachen model is beschreven.

Zoals eerder genoemd, is het model gebaseerd op isotrope spanningscondities. In dergelijke gevallen geldt dat de isotrope / equivalente spanningsverhouding constant is (K is dan constant en gelijk aan 1). Vergelijkingen met isotrope spanningen kunnen bij een constante verhouding worden omgeschreven in vergelijkingen met equivalente spanningen en visa versa. Deze kennis is noodzakelijk omdat de formele vergelijkingen anders niet in elkaar kunnen worden omgeschreven. Tijdens de beschrijving van de onderstaande vergelijkingen zal dit verduidelijkt worden.

#### **Volumieke rek**

Onderstaand de vergelijking voor de volumieke rek, welke is opgedeeld in een direct ( $-\Delta\varepsilon_{v;d}$ ) en seculair ( $\Delta\varepsilon_{v;s}$ ) deel.

$$-\Delta\varepsilon_v = -\Delta\varepsilon_{v;d} - \Delta\varepsilon_{v;s}$$

#### **Vergelijking 42**

De directe volumieke rek (Vergelijking 43) wordt formeel beschreven door de initiële isotrope spanning ( $p'_0$ ), actuele isotrope spanning ( $p'$ ) en parameter  $\kappa^*$ . Deze vergelijking kan afgeleid worden uit Vergelijking 37 en komt overeen met de in literatuur [7] beschreven vergelijking 6.28 (formele vergelijking).

$$-\Delta\varepsilon_{v;d} = \kappa^* \ln\left(\frac{p'}{p'_0}\right)$$

#### **Vergelijking 43**

$\Delta\varepsilon_{v;d}$  kan ook beschreven worden met de equivalente spanningsverhouding (Vergelijking 44), maar is dan alleen geldig indien K constant is.

$$-\Delta\varepsilon_{v;d} = \kappa^* \ln\left(\frac{p^{eq}}{p^{eq}_0}\right) \text{ (indien K constant is)}$$

#### **Vergelijking 44**

De totale seculaire volumieke rek wordt beschreven door Vergelijking 45 waarin  $\Delta\varepsilon_{v;s;sp}$  de spanningsafhankelijke en  $\Delta\varepsilon_{v;s;t}$  de intrinsieke tijdsafhankelijke component van de seculaire volumieke rek is.

$$-\Delta\varepsilon_{v;s} = -\Delta\varepsilon_{v;s;sp} - \Delta\varepsilon_{v;s;t}$$

#### **Vergelijking 45**

De spanningsafhankelijke component wordt beschreven door Vergelijking 46. Deze vergelijking is afgeleid uit Vergelijking 38 en Vergelijking 43.

$$-\Delta\varepsilon_{v;s;sp} = \lambda^* \ln\left(\frac{p'^{eq}}{p'^{eq}_0}\right) - \kappa^* \ln\left(\frac{p'}{p'_0}\right)$$

#### Vergelijking 46

$\Delta\varepsilon_{v;s;sp}$  kan ook beschreven worden met de equivalente spanningsverhouding (Vergelijking 47). Deze vergelijking kan rechtstreeks afgeleid worden uit literatuur [7], vergelijking 6.23 (formele vergelijking), maar geldt alleen indien K constant is.

$$-\Delta\varepsilon_{v;s;sp} = (\lambda^* - \kappa^*) \ln\left(\frac{p'^{eq}}{p'^{eq}_0}\right) \quad (\text{indien K constant is})$$

#### Vergelijking 47

De intrinsieke tijdsafhankelijke component wordt beschreven door Vergelijking 48. Deze vergelijking is afgeleid uit Vergelijking 39.

$$-\Delta\varepsilon_{v;s;t} = \mu^* (\ln \tau - \ln \tau_0)$$

#### Vergelijking 48

Verder is het nog mogelijk de intrinsieke tijdsafhankelijke seculaire volumieke rek uit te drukken in volumieke reksnelheden (Vergelijking 49).

$$-\Delta\varepsilon_{v;s;t} = -\mu^* (\ln(-\dot{\varepsilon}_{v;s}) - \ln(-\dot{\varepsilon}_{v;s;0}))$$

#### Vergelijking 49

Het verschil tussen Vergelijking 48 en Vergelijking 49 m.b.t. de tekenwisseling (van negatief naar positief) laat zien dat de seculaire volumieke reksnelheid kleiner wordt bij een toename van de intrinsieke tijd en visa versa.

De intrinsieke tijd en seculaire volumieke reksnelheid kunnen m.b.v. Vergelijking 50 in elkaar worden omgeschreven. Deze vergelijking is afgeleid a.d.h.v. vergelijking 6, literatuur [14], paper 3.

$$\tau = \frac{\mu^*}{-\dot{\varepsilon}_{v;s}}$$

#### Vergelijking 50

De totale seculaire volumieke rek is opgebouwd uit de voorgaande vergelijkingen en kan beschreven worden m.b.v. Vergelijking 51 en Vergelijking 52.

$$-\Delta\varepsilon_{v;s} = \lambda^* \ln\left(\frac{p^{eq}}{p^{eq}_0}\right) - \kappa^* \ln\left(\frac{p'}{p'_0}\right) + \mu^* \ln\left(\frac{\tau}{\tau_0}\right)$$

#### Vergelijking 51

$$-\Delta\varepsilon_{v;s} = \lambda^* \ln\left(\frac{p^{eq}}{p^{eq}_0}\right) - \kappa^* \ln\left(\frac{p'}{p'_0}\right) - \mu^* \ln\left(\frac{-\dot{\varepsilon}_{v;s}}{-\dot{\varepsilon}_{v;s;0}}\right)$$

#### Vergelijking 52

Deze vergelijkingen kunnen ook geschreven worden met enkel de equivalente spanningsverhoudingen (Vergelijking 53 en Vergelijking 54).

$$-\Delta\varepsilon_{v;s} = (\lambda^* - \kappa^*) \ln\left(\frac{p^{eq}}{p^{eq}_0}\right) + \mu^* \ln\left(\frac{\tau}{\tau_0}\right) \text{ (indien K constant is)}$$

#### Vergelijking 53

$$-\Delta\varepsilon_{v;s} = (\lambda^* - \kappa^*) \ln\left(\frac{p^{eq}}{p^{eq}_0}\right) - \mu^* \ln\left(\frac{-\dot{\varepsilon}_{v;s}}{-\dot{\varepsilon}_{v;s;0}}\right) \text{ (indien K constant is)}$$

#### Vergelijking 54

De totale volumieke rek is een sommatie van de directe en seculaire volumieke rek, welke is weergegeven in Vergelijking 55 en Vergelijking 56. In deze vergelijkingen is de zwelcoëfficiënt  $\kappa^*$  weggefallen. Het directe zettingsaandeel is positief bij de beschrijving van de directe volumieke rek en negatief bij de beschrijving van de seculaire volumieke rek. De totale volumieke rek wordt daardoor alleen beschreven door de equivalente spanningsverhouding.

$$-\Delta\varepsilon_v = \lambda^* \ln\left(\frac{p^{eq}}{p^{eq}_0}\right) + \mu^* \ln\left(\frac{\tau}{\tau_0}\right)$$

#### Vergelijking 55

$$-\Delta\varepsilon_v = \lambda^* \ln\left(\frac{p^{eq}}{p^{eq}_0}\right) - \mu^* \ln\left(\frac{-\dot{\varepsilon}_{v;s}}{-\dot{\varepsilon}_{v;s;0}}\right)$$

#### Vergelijking 56

## Volumieke reksnelheden

Andere veel gebruikte vergelijkingen zijn degenen waar de volumieke reksnelheden i.p.v. rekken berekend worden. De totale volumieke reksnelheid wordt beschreven in Vergelijking 57.

$$-\dot{\epsilon}_v = -\dot{\epsilon}_{v;d} - \dot{\epsilon}_{v;s}$$

### Vergelijking 57

Zoals volgt uit Vergelijking 57 is de totale volumieke reksnelheid opgedeeld in een directe en seculaire component. De directe component wordt beschreven in Vergelijking 58 en volgt uit de tijdsafgeleide van de directe volumieke rek (Vergelijking 43). Deze vergelijking komt overeen met vergelijking 6.28 uit literatuur [7].

$$-\dot{\epsilon}_{v;d} = \frac{\kappa^*}{p'} \dot{p}'$$

### Vergelijking 58

De seculaire volumieke reksnelheid wordt beschreven in Vergelijking 59.  $p^{eq}_p$  staat in deze vergelijking voor de equivalente grensspanning op de 1 dagslijn. De vergelijking komt overeen met vergelijking 6.23 uit literatuur [7]. De oorsprong van deze vergelijking wordt afgeleid in bijlage 2.1. Hieruit volgt dat Vergelijking 54 gebaseerd is op Vergelijking 59.

$$-\dot{\epsilon}_{v;s} = \frac{\mu^*}{\tau} \left( \frac{p^{eq}}{p^{eq}_p} \right)^{\frac{\lambda^* - \kappa^*}{\mu^*}}$$

### Vergelijking 59

Eerder is aangegeven dat Vergelijking 54 geldt indien K constant is. Verwacht zou worden dat alle vergelijkingen, gebaseerd op deze vergelijking, logischerwijs geldig zijn indien K constant is. Hierbij dient nogmaals opgemerkt te worden dat het SSC model is gebaseerd op isotrope spanningen (K is constant). Zoals eerder beschreven is K niet altijd constant tijdens vervormen. Niettemin is Vergelijking 59 een formele vergelijking die te allen tijde door het model gebruikt wordt. Het beschrijven van de directe rek componenten met  $p^{eq}$  is daarom een nuttige zaak geweest, Vergelijking 59 had anders niet afgeleid kunnen worden.

De totale volumieke reksnelheid wordt nu ook beschreven door Vergelijking 60.

$$-\dot{\epsilon}_v = \frac{\kappa^*}{p'} \dot{p}' + \frac{\mu^*}{\tau} \left( \frac{p^{eq}}{p^{eq}_p} \right)^{\frac{\kappa^* - \lambda^*}{\mu^*}}$$

### Vergelijking 60

### Totale reksnelheden

Tot nu toe is het 3-dimensionale SSC model beschreven met volumieke rekken. Naast deze rekken zullen er in slappe gronden deviatorische rekken optreden. Daarom zal de reksnelheid hier beschreven worden in totale rekken. In Vergelijking 61 is de totale reksnelheid beschreven. Ook deze rek is opgebouwd uit directe (elastische) en seculaire (plastische) reksnelheden. Er dient opgemerkt te worden dat de rekken, reksnelheden en spanningen worden gedefinieerd in vectoren (Vergelijking 62 tot en met Vergelijking 64).

$$-\dot{\underline{\varepsilon}} = -\dot{\underline{\varepsilon}}_d - \dot{\underline{\varepsilon}}_s$$

#### Vergelijking 61

$$\underline{\Delta \varepsilon} = (\Delta \varepsilon_1 \Delta \varepsilon_2 \Delta \varepsilon_3)^T = (\Delta \varepsilon_{xx} \Delta \varepsilon_{yy} \Delta \varepsilon_{zz} \Delta \gamma_{xy} \Delta \gamma_{yz} \Delta \gamma_{zx})^T$$

#### Vergelijking 62

$$\dot{\underline{\varepsilon}} = (\dot{\varepsilon}_1 \dot{\varepsilon}_2 \dot{\varepsilon}_3)^T = (\dot{\varepsilon}_{xx} \dot{\varepsilon}_{yy} \dot{\varepsilon}_{zz} \dot{\gamma}_{xy} \dot{\gamma}_{yz} \dot{\gamma}_{zx})^T$$

#### Vergelijking 63

$$\underline{\sigma}' = (\sigma'_1 \sigma'_2 \sigma'_3)^T = (\sigma'_{xx} \sigma'_{yy} \sigma'_{zz} \sigma'_{xy} \sigma'_{yz} \sigma'_{zx})^T$$

#### Vergelijking 64

De directe (elastische) rek wordt beschreven met Vergelijking 65. Deze vergelijking is afgeleid uit literatuur [7]; vergelijking 6.24.

$$-\dot{\underline{\varepsilon}}_d = \underline{\underline{D}}^{-1} \underline{\sigma}'$$

#### Vergelijking 65

In Vergelijking 65 staat  $\underline{\underline{D}}^{-1}$  voor de wet van Hooke met isotrope elasticiteit en lineaire spanningsafhankelijke stijfheid (Vergelijking 66). De stijfheid wordt bepaald door  $p'$ ,  $\kappa^*$  en  $\nu_{ur}$ .

$$\underline{\underline{D}}^{-1} = \frac{\kappa^*}{3p'(1-2\nu_{ur})} \begin{bmatrix} 1 & -\nu_{ur} & -\nu_{ur} \\ -\nu_{ur} & 1 & -\nu_{ur} \\ -\nu_{ur} & -\nu_{ur} & 1 \end{bmatrix}$$

#### Vergelijking 66

De eerder beschreven Vergelijking 58, welke de seculaire volumieke reksnelheid beschrijft kan nu ook afgeleid worden uit Vergelijking 65 en Vergelijking 66. Deze afleiding is beschreven in bijlage 2.2.

$$-\dot{\varepsilon}_{v;d} = \frac{\kappa^*}{p'} \dot{p}'$$

#### Vergelijking 58

De seculaire (viscoplastische) reksnelheid wordt beschreven volgens de vloeifunctie (Vergelijking 67).

$$-\dot{\underline{\epsilon}}_s = \lambda \frac{\partial g^c}{\partial \underline{\sigma}'}$$

#### Vergelijking 67

In het SSC model staat  $g^c$  (kruipfunctie) voor de equivalente spanning ( $p^{eq}$ ). Let wel dat  $\lambda$  niet gelijk is als  $\lambda^*$ .

Uit Vergelijking 67 volgt Vergelijking 68.

$$-\dot{\epsilon}_{v;s} = -\dot{\epsilon}_{1;s} - \dot{\epsilon}_{2;s} - \dot{\epsilon}_{3;s} = \lambda \frac{\partial p^{eq}}{\partial \underline{\sigma}'} = \lambda \left( \frac{\partial p^{eq}}{\partial \sigma'_1} + \frac{\partial p^{eq}}{\partial \sigma'_2} + \frac{\partial p^{eq}}{\partial \sigma'_3} \right) = \lambda \frac{\partial p^{eq}}{\partial p'} = \lambda \alpha$$

#### Vergelijking 68

Hierbij is  $\alpha$  gedefinieerd als  $\frac{\partial p^{eq}}{\partial p'}$ . De afleiding van  $\frac{\partial p^{eq}}{\partial \sigma'_1} + \frac{\partial p^{eq}}{\partial \sigma'_2} + \frac{\partial p^{eq}}{\partial \sigma'_3} = \frac{\partial p^{eq}}{\partial p'}$  is beschreven in bijlage 2.3.

De  $\lambda$  in Vergelijking 67 wordt nu vervangen door  $\alpha$  en  $-\dot{\epsilon}_{v;s}$  (Vergelijking 69). Deze vergelijking kan tevens afgeleid worden uit literatuur [7]; vergelijking 6.26.

$$-\dot{\underline{\epsilon}}_s = \frac{-\dot{\epsilon}_{v;s}}{\alpha} \frac{\partial p^{eq}}{\partial \underline{\sigma}'} = \frac{1}{\alpha} \frac{\mu^*}{\tau} \left( \frac{p^{eq}}{p^{eq}_p} \right)^{\frac{\lambda^* - \kappa^*}{\mu^*}} \frac{\partial p^{eq}}{\partial \underline{\sigma}'}$$

#### Vergelijking 69

De eerder beschreven seculaire volumieke reksnelheid Vergelijking 59 kan afgeleid worden uit Vergelijking 69. In bijlage 2.4 is deze afleiding gegeven. Eerder in bijlage 2.1 is de seculaire volumieke reksnelheid afgeleid a.d.h.v. twee referentiespanningen. De verschillende afleidingen zijn gemaakt om aan te tonen dat de vergelijkingen in verschillende richtingen in elkaar om te schrijven zijn. Op deze manier wordt de consistentie van het model aangetoond.

De totale reksnelheid is weergegeven in Vergelijking 70.

$$-\dot{\underline{\epsilon}} = \underline{\underline{D}}^{-1} \underline{\dot{\sigma}'} + \frac{1}{\alpha} \frac{\mu^*}{\tau} \left( \frac{p^{eq}}{p^{eq}_p} \right)^{\frac{\lambda^* - \kappa^*}{\mu^*}} \frac{\partial p^{eq}}{\partial \underline{\sigma}'}$$

#### Vergelijking 70

Het model is nu beschreven aan de hand van vergelijkingen. Het zal nu duidelijk zijn dat de formele modelvergelijkingen (Vergelijking 59) alleen afgeleid kunnen worden, indien  $K$  constant is. Voor spanningstoestanden met deviatorische spanningen zijn de formele vergelijkingen niet altijd op een 100% correcte manier in elkaar om te schrijven. Niettemin maakt het model gebruik van zijn formele vergelijkingen, gebaseerd op isotrope spanningssituaties. De rekverschillen die hierdoor ontstaan zijn normaliter te verwaarlozen.

Voor de reksnelheden in de verschillende richtingen wordt verwezen naar literatuur [15].

### 3.3.1.3. $K_0$ bepaling

Voor het bepalen van de initiële horizontale / verticale spanningsverhouding ( $K_0$ ) wordt door het SSC model een default waarde berekend. Deze default waarde is afhankelijk van  $\nu_{ur}$ ,  $K_0^{nc}$ , een OCR of POP (Pre Overburden Pressure). Er kan echter voor gekozen worden deze default waarde aan te passen. In deze paragraaf wordt beschreven op welke wijze de default  $K_0$ -waarde berekend wordt en wanneer er voor gekozen kan worden de  $K_0$ -waarde aan te passen. Tot slot komt de relatie OCR, POP en  $K_0$  aan bod.

#### **Default $K_0$ -waarde**

Voor het berekenen van  $K_0$  t.o.v. de grensspanning wordt in het SSC model, naast  $\nu_{ur}$  en  $K_0^{nc}$ , een POP of OCR opgegeven. Indien gebruik wordt gemaakt van de OCR dan kan  $K_0$  berekend worden met Vergelijking 71.

$$K_0 = OCR_{yy} \cdot K_0^{nc} - \frac{\nu_{ur}}{1 - \nu_{ur}} (OCR_{yy} - 1)$$

#### **Vergelijking 71**

Het subscript yy bij OCR duidt aan dat deze OCR gerelateerd is aan de verticale spanningen. Deze verticale OCR komt overeen met de ingevoerde OCR in het SSC model (zie ook paragraaf 3.5). Deze vergelijking is afgeleid van vergelijking 2.36, literatuur [6]. De afleiding is toegevoegd in Bijlage 3.

Indien gerekend wordt met een POP<sub>yy</sub> i.p.v. OCR<sub>yy</sub> dan geldt Vergelijking 72.

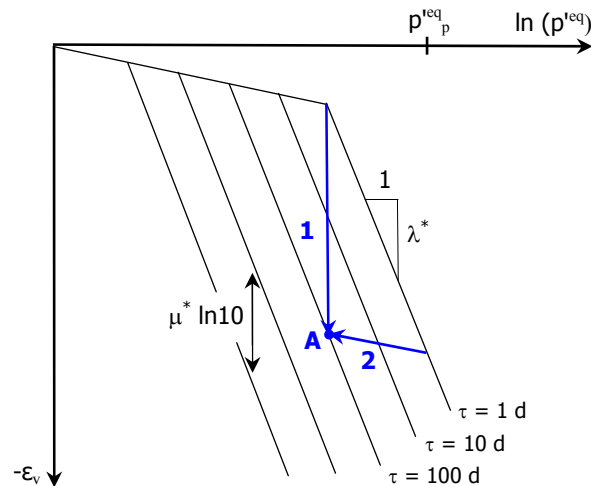
$$K_0 = \frac{\sigma'_{yy;p} \cdot K_0^{nc} - \frac{\nu_{ur}}{1 - \nu_{ur}} POP_{yy}}{\sigma'_{yy;p} - POP_{yy}}$$

#### **Vergelijking 72**

Er dient opgemerkt te worden dat  $K_0$  in Vergelijking 72 afhankelijk is van de diepte ( $\sigma'_{yy}$ ). In Vergelijking 71 is  $K_0$  constant over de diepte.

### Wanneer de default $K_0$ -waarde aanpassen?

De default  $K_0$ -waarde in Plaxis is gebaseerd op Vergelijking 71 of Vergelijking 72. Er kan echter ook voor gekozen worden de  $K_0$ -waarde aan te passen. M.b.v. Figuur 10 wordt uitgelegd waarom en wanneer hiervoor gekozen kan worden.



**Figuur 10: beeldvorming ontstaan OCR en POP in  $\ln p^{\text{eq}} - \varepsilon_v$  grafiek**

Met stap 1 is een kruipstap (aging) vanuit een normaal geconsolideerde spanningstoestand weergegeven. Ten gevolge van intrinsieke tijdsafhankelijke seculaire rek zal de OCR toenemen. Theoretisch gezien zal de horizontale / verticale spanningsverhouding ten gevolge van deze seculaire rek constant blijven. In paragraaf 4.3.2 zal blijken dat dit in het SSC model niet altijd het geval is. In deze paragraaf wordt er echter van uitgegaan dat de spanningsverhouding ten gevolge van aging constant blijft. In stap 1 is een spanningstoestand bereikt die gelijk is aan de beginspanning van de stap ( $K_0$  is gelijk aan  $K_0^{\text{nc}}$ ). De default waarde van het SSC model geeft echter een  $K_0$  berekend volgens Vergelijking 71.

De bereikte equivalente spanning aan het einde van spanningspad 1 kan ook bereikt worden door een ontlaststap (stap 2). Tijdens een ontlaststap zal de horizontale / verticale spanningsverhouding aanzienlijk af gaan wijken van de  $K_0^{\text{nc}}$ -waarde. De default  $K_0$ -waarde wordt in een dergelijk geval correct berekend a.d.h.v. Vergelijking 71 of Vergelijking 72.

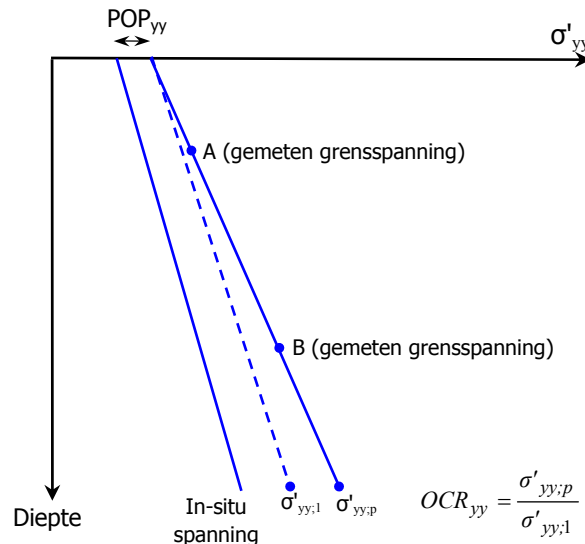
Uit het bovenstaande kan geconcludeerd worden dat  $K_0$  significante invloed heeft op spanningen onder de grensspanning. Dit zal vervolgens zijn uitwerking hebben in de optredende vervormingen. Een nauwkeurige bepaling van  $K_0$  is daarom zeker niet ongepast. Er bestaat een fundamenteel verschil tussen OCR of POP verhoging t.g.v. aging of ontlasten.

In paragraaf 4.2.1 en hoofdstuk 5 wordt de invloed van  $K_0$  tijdens 1- en 2-dimensionale vervorming beschreven.

### Relatie OCR, POP en $K_0$

In theorie is OCR gekoppeld aan aging en POP aan de mate van overbelasting. In de praktijk wordt echter maar 1 van deze grensspanning bepalende invoerparameters gebruikt bij het maken van berekeningen. Het invoeren van beide parameters in software programma's als Plaxis en MSettle is daarnaast niet mogelijk. Theoretisch gezien is het mogelijk de twee parameters te scheiden en daarmee zowel het aandeel POP als OCR te bepalen. Indien het aandeel POP en OCR bekend is, kan  $K_0$  berekend worden.

M.b.v. Figuur 11 is het verschil in  $OCR_{yy}$  en  $POP_{yy}$  beschreven.



**Figuur 11: beeldvorming bepaling aandeel OCR en POP uit twee grensspanningen op verschillende diepten**

In Figuur 11 is het verticale in-situ spanningsverloop in een 'homogene' laag weergegeven. Daarnaast zijn op twee verschillende dieptes de grensspanningen bepaald met bijvoorbeeld een samendrukkingsproef. Door een rechte lijn te trekken door deze twee punten kan de grensspanning bepaald worden in de hele laag. Zoals weergegeven in de figuur is de helling van de grensspanningslijn minder stijl dan de helling van de in-situ spanningslijn. Het verschil in helling wordt veroorzaakt door de  $OCR_{yy}$ . De  $OCR_{yy}$  is een vermenigvuldigingsfactor die op elke diepte van toepassing is, daardoor ontstaat er een verschil in helling. Naast dit hellingsverschil is er een horizontale verschuiving waar te nemen tussen de in-situ spanningslijn en de grensspanningslijn. Deze verschuiving wordt veroorzaakt door een overbelasting ( $POP_{yy}$ ). Een  $POP_{yy}$  geeft de toename van de verticale spanning op de in-situ spanning, die gelijk is op iedere diepte, weer. Hierdoor ontstaat er een verschuiving die gelijk is over de hele diepte.

Indien het aandeel  $POP_{yy}$  en  $OCR_{yy}$  bekend is, kan  $K_0$  bepaald worden. Hiervoor wordt Vergelijking 72 gehanteerd. De  $POP_{yy}$  die hiervoor benodigd is, betreft de  $POP_{yy}$  die het gevolg is van overbelasting zoals volgt uit Figuur 11.  $K_0$  is zodoende variabel in de diepte, Vergelijking 72 is immers afhankelijk van de diepte. Vergelijking 71 kan hierbij niet gehanteerd worden.

In de praktijk zal het bepalen van het aandeel  $OCR_{yy}$  en  $POP_{yy}$  bemoeilijkt worden door heterogeniteit, onnauwkeurigheid in de proefresultaten en leeftijdsverschil over de diepte. Niettemin lijkt het niet onwaarschijnlijk dat in dikke homogene kleilagen zoals Potklei onderscheid gemaakt kan worden in OCR en POP.

Normaliter wordt  $K_0$  indien noodzakelijk bepaald a.d.h.v een  $K_0$ -c.r.s. proef. Voor de beschrijving van deze proef wordt verwezen naar Literatuur [16] en [19].

**Conclusie**

De berekening van de default  $K_0$ -waarde in Plaxis is nu beschreven. Daarnaast is beschreven wanneer  $K_0$  aangepast dient te worden. De mate van overconsolidatie t.g.v. ontlasten of aging komt hierbij ter sprake. Bij overconsolidatie welke enkel het gevolg is van aging, dient  $K_0$  aangepast te worden voor een waarde die gelijk is aan  $K_0^{nc}$ . De horizontale verticale spanningsverhouding is immers gelijk aan een normaalgeconsolideerde spanningsverhouding. Bij overconsolidatie welke enkel het gevolg is van een overbelasting, wordt de default  $K_0$ -waarde correct berekend.

### 3.4. Relatie Koppejan, a,b,c-Isotachen en SSC parameters

De Koppejan, a,b,c-Isotachen en SSC parameters kunnen in elkaar worden omgeschreven. In deze paragraaf is de omrekening van Koppejan naar a,b,c-Isotachen en van a,b,c-Isotachen naar SSC parameters beschreven. Eveneens wordt aangetoond dat een deel van onderzoeksvraag 1, *het achterhalen van de oorzaken van de verschillen in de verticale vervorming tussen het SSC- en a,b,c-Isotachenmodel, bij 1-dimensionale vervorming. Daarnaast onderzoeken of er relaties te vinden zijn tussen deze verschillen*, met deze omrekenvergelijkingen beantwoord is.

De omrekening van de Koppejan parameters naar de a,b,c-Isotachen parameters is niet exact. Bij de Koppejan parameters is de seculaire rek enigszins in de primaire parameters verweven (seculaire rek treedt op binnen de 1<sup>ste</sup> dag, maar wordt niet apart beschouwd). In het a,b,c-Isotachenmodel en het SSC model is daarentegen een strak onderscheid gemaakt tussen seculaire en directe rek. De formules voor de omrekeningen zijn overgenomen uit Literatuur [10].

$$a \approx \frac{1}{(1 - \varepsilon_v) C_p}$$

**Vergelijking 73**

$$b \approx \frac{1}{(1 - \varepsilon_v) C'_p}$$

**Vergelijking 74**

$$c \approx \frac{1}{\ln 10} \frac{\ln \left( \frac{\sigma'_v}{\sigma'_p} \right)}{(1 - \varepsilon_v) C'_s}$$

**Vergelijking 75**

Vervolgens kunnen de a,b,c-Isotachen parameters met de onderstaande vergelijkingen worden omgeschreven in de SSC parameters. Er wordt uitgegaan van rekenen met Updated Mesh. Indien dit niet het geval is, dienen de resultaten voor de verschillende SSC parameters met  $(1 - \varepsilon_{yy})$  vermenigvuldigd te worden.

$$\kappa^* = a \text{ (indien K constant is)}$$

**Vergelijking 76**

$$\kappa^* = \frac{(1 - \nu_{ur})(1 + 2K)}{(1 + \nu_{ur})} a \text{ (indien K niet constant is)}$$

**Vergelijking 77**

Het is aan te raden de gemiddelde K-waarde te nemen voor de betreffende ontlast- of herbelaststap. K is immers niet constant tijdens ontlasten / herbelasten.

$$\lambda^* = b$$

**Vergelijking 78**

$$\mu^* = c$$

**Vergelijking 79**

In Bijlage 4 zijn de afleidingen van Vergelijking 76 en Vergelijking 77 gegeven.

Aangezien  $K$  verandert tijdens ontlasten en herbelasten, is de verhouding zoals weergegeven in Vergelijking 77 niet constant. In de literatuur wordt de verhouding ook wel geschreven als Vergelijking 80 of Vergelijking 81. Er worden dan aannamen gedaan voor  $K$  en  $\nu_{ur}$ .

$$\kappa^* = \frac{3(1-\nu_{ur})}{1+\nu_{ur}} a \quad (\text{indien } K \approx 1)$$

#### Vergelijking 80

$$\kappa^* = 2a \quad (\text{indien } K \approx 1 \text{ en } \nu_{ur} \approx 0,2)$$

#### Vergelijking 81

A.d.h.v. deze omrekenvergelijkingen kan onderzoeksvraag 1, *het achterhalen van de oorzaken van de verschillen in de verticale vervorming tussen het SSC- en a,b,c-Isotachenmodel, bij 1-dimensionale vervorming. Daarnaast onderzoeken of er relaties te vinden zijn tussen deze verschillen*, deels beantwoord worden.

Uit de omrekenvergelijkingen in combinatie met de opgedane kennis uit paragraaf 3.3.1.2.1, kan beredeneerd worden dat bij een constante waarde voor  $K$  de verticale rekken bij 1-dimensionale vervormingen exact met elkaar overeen moeten komen. Om dit aan te tonen zijn de verticale en volumieke rek vergelijkingen van de verschillende modellen nogmaals weergegeven.

$$\Delta \varepsilon_{yy} = b \ln \left( \frac{\sigma'_{yy}}{\sigma'_{yy;0}} \right) + c \ln \left( \frac{\tau}{\tau_0} \right) \qquad -\Delta \varepsilon_v = \lambda^* \ln \left( \frac{p^{eq}}{p^{eq}_0} \right) + \mu^* \ln \left( \frac{\tau}{\tau_0} \right)$$

Vergelijking 19 (a,b,c-Isotachenmodel).

Vergelijking 55 (SSC model)

Onderstaand wordt puntsgewijs aangetoond dat  $\Delta \varepsilon_{yy}$  gelijk is aan  $\Delta \varepsilon_v$ .

- De samendrukkingsparameters van het SSC- en a,b,c-Isotachenmodel zijn gelijk aan elkaar ( $K$  is constant)
- De spanningsverhoudingen  $\left( \frac{\sigma'_{yy}}{\sigma'_{yy;0}} \right)$  en  $\left( \frac{p^{eq}}{p^{eq}_0} \right)$  zijn gelijk (zie paragraaf 3.3.1.2.1)
- De volumieke rek is bij 1-dimensionale samendrukking gelijk aan de volumieke rek.
- De intrinsieke tijden zijn gelijk

$\Delta \varepsilon_{yy}$  is dus gelijk aan  $\Delta \varepsilon_v$ . Verschillen zullen echter ontstaan indien  $K$  niet constant is. Deze verschillen zijn normaliter te verwaarlozen. Het verschil in de parameters  $a$  en  $\kappa^*$  is namelijk gebaseerd op het verschil in spanningen. De verschillen in spanningsverhoudingen zullen deels worden opgeheven door de verschillen in  $a$  en  $\kappa^*$ . In paragraaf 4.4 wordt een samendrukkingsproef nagebootst en zullen de verschillen t.g.v. een variabele  $K$ -waarde aan bod komen.

### Conclusie

Tot slot kan aangeraden worden de omrekening van  $a$  naar  $\kappa^*$  per situatie te bekijken. Indien een spanningsverhoging zich op een spanningspad met constante  $K$ -waarde bevindt, kan het beste gekozen worden voor de verhouding  $\kappa^* = a$ . Een dergelijk spanningspad kan in overgeconsolideerde grond worden aangetroffen indien de OCR door aging is ontstaan (zie ook paragraaf 3.3.1.3). Bij ontlasten en herbelasten is  $K$  niet constant.  $\kappa^*$  kan dan het beste bepaald worden m.b.v. Vergelijking 77. Zo geldt voor iedere situatie een specifieke omrekening.

### 3.5. OCR definitie

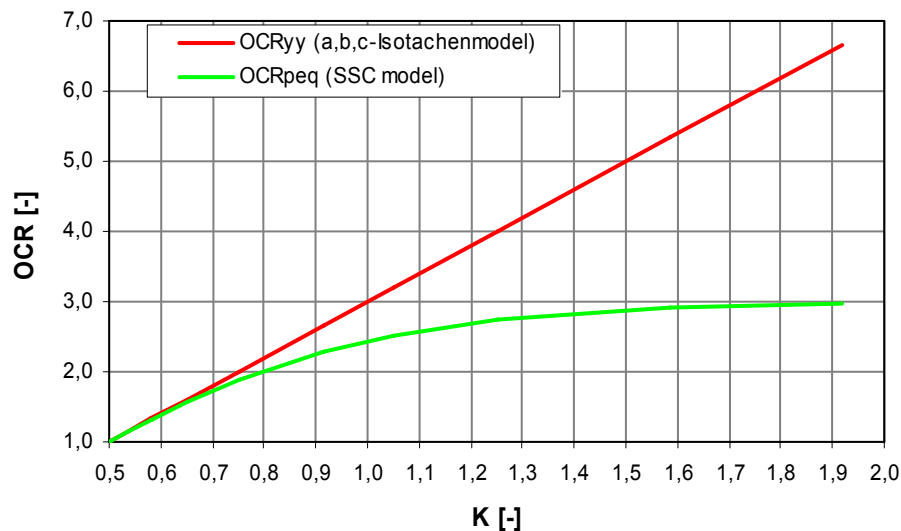
In deze paragraaf wordt ingegaan op de definitie en verschillen van OCR bij het Koppejan, a,b,c-Isotachen en SSC model. De bepaling van de waarde voor OCR is gebaseerd op de grensspanning en initiële spanning. Zoals al eerder vermeld, hanteert het SSC model een equivalente spanning voor het beschrijven van de grensspanning (paragraaf 3.3.1.1). Het Koppejan en a,b,c-Isotachenmodel hanteren daarentegen een verticale spanning voor het beschrijven van de grensspanning. De invoerwaarden van OCR (of POP) in het SSC model zijn echter gebaseerd op verticale spanningen. Het model rekent uit de ingevoerde OCR (of POP), een OCR gebaseerd op de initiële equivalente spanning en de equivalente grensspanning.

Indien een OCR gebaseerd is op verticale spanningen wordt dit aangeduid met  $OCR_{yy} \left( = \frac{\sigma'_{yy;p}}{\sigma'_{yy}} \right)$ . Voor een OCR

gebaseerd op equivalente spanningen wordt  $OCR_{p'eq} \left( = \frac{p'^{eq}_p}{p'^{eq}} \right)$  gehanteerd.

Met de opgedane kennis uit de paragraaf 3.3.1.2.1 kan beredeneerd worden dat er bij een OCR groter dan 1 en een K-waarde groter dan  $K_0^{nc}$  verschillen zullen ontstaan in  $OCR_{yy}$  en  $OCR_{p'eq}$  (de verhouding tussen de equivalente en verticale spanning is niet constant). Het verschil in  $OCR_{yy}$  en  $OCR_{p'eq}$  neemt toe naarmate K toeneemt. In Figuur 12 is dit grafisch weergegeven voor 1-dimensionale samendrukking. De figuur is tot stand gekomen door vanuit een normaal geconsolideerde spanningstoestand met een  $K_0$  en  $K_0^{nc}$  van 0,5 te ontlasten (verticale spanningsafname). Verder zijn voor deze berekening de volgende waarden aangehouden:  $\kappa^* = 0,03$ ;  $\lambda^* = 0,17$ ;  $v_{ur} = 0,2$ ;  $M = 1,611$  en  $K_0^{nc} = 0,5$ . De berekening van K, gedurende ontlasten, is hierbij gebaseerd op Vergelijking 71. Deze vergelijking is beschreven in paragraaf 3.3.1.3. Het ontlasten is doorgezet totdat het Mohr-Coulomb bezwijkcriterium is bereikt ( $\phi = 20^\circ$  en  $c = 0 \text{ kN/m}^2$ ).

Er dient opgemerkt te worden dat bij een OCR verhoging t.g.v. intrinsieke tijdsafhankelijke seculaire rek (aging) geen verschillen ontstaan tussen  $OCR_{yy}$  en  $OCR_{p'eq}$ . K blijft immers constant en gelijk aan  $K_0^{nc}$ .



**Figuur 12: verschil in verticale en equivalente OCR bij toenemende K-waarde**

In Figuur 12 valt op dat bij een OCR-waarde van 1,8 de  $OCR_{yy}$  en  $OCR_{p'eq}$  zichtbaar van elkaar af gaan wijken. Hetzelfde geldt voor de ingevoerde  $OCR_{yy}$  en berekende  $OCR_{p'eq}$  in Plaxis. Voor lagere M-waarden wijken  $OCR_{yy}$  en  $OCR_{p'eq}$  meer van elkaar af en treedt de afwijking eerder (bij een lagere OCR-waarde) op.

De afwijkingen lijken dramatisch groot. Er dient echter opgemerkt te worden dat de OCR invloed heeft op de initiële seculaire reksnelheid. De intrinsieke tijdsafhankelijke seculaire rek t.g.v. een opgegeven kruiptijd neemt aanzienlijk af naarmate de OCR toeneemt. Grote verschillen tussen de intrinsieke tijdsafhankelijke seculaire reksnelheid bij een 1-dimensionale samendrukkingsberekening met het a,b,c-Isotachenmodel en het SSC model worden daarom niet verwacht. In paragraaf 4.1 wordt hier dieper op ingegaan.

Verder is bij berekeningen met hogere  $K_0^{nc}$ -waarden opgevallen dat de  $OCR_{peq}$  kan afnemen t.g.v. ontlasten. Bij zettingsberekeningen wordt in de praktijk zelden ontlast tot het omslagpunt. Van ontlasten is sprake bij het verwijderen van een overhoogte. Overhoogten worden regelmatig gehanteerd om aan restzettingseisen te voldoen. Het aandeel overhoogte t.a.v. de totale ophoging is normaliter niet groter dan 50%. Bij dergelijke waarden wordt het omslagpunt niet bereikt. De oorzaak en gevolgen van dit omslagpunt worden behandeld in Bijlage 5.



## 4. Deelonderzoeken t.b.v. analyse SSC model

In paragraaf 3.3 is de theoretische achtergrond van het SSC model beschreven. In dit hoofdstuk wordt ernaar gestreefd het model zo volledig mogelijk te analyseren. De onderstaande onderzoeksvragen zullen hierbij aan bod komen:

- 2) Verificatie van de gevonden oorzaken bij onderzoeksvraag 1 a.d.h.v. samendrukkingsproeven en bestaande projecten.
- 3) De werking van het SSC model a.d.h.v. praktische voorbeelden uitvoerig beschrijven, waarbij in het bijzonder aandacht zal worden besteed aan de invloed van de  $K_0^{nc}$ -afhankelijke M parameter.
- 4) Het achterhalen van een fundamentele verklaring waarom geadviseerd wordt de OCR in het SSC model groter dan of gelijk aan 1,3 à 1,4 te kiezen.
- 5) Het model valideren aan 2-dimensionale grondvervormingen. Dit zal gebeuren a.d.h.v. een triaxiaalproef.

Gedachtesgangen en berekeningen met oplopende complexiteit in de geometrie, worden gehanteerd om op deze onderzoeksvragen (een zo volledig mogelijk) antwoord te geven.

### 4.1. Initiële seculaire reksnelheid

In deze paragraaf wordt getracht onderzoeksvraag 5, *het achterhalen van een fundamentele verklaring waarom geadviseerd wordt de OCR in het SSC model groter dan of gelijk aan 1,3 à 1,4 te kiezen*, te beantwoorden. In literatuur ([4] en [5]) wordt regelmatig terug gevonden dat de OCR bij SSC berekeningen groter dan of gelijk aan 1,3 à 1,4 moet zijn, de initiële seculaire reksnelheid wordt anders overschat.

Om een verklaring voor deze 'hoge' OCR invoer te achterhalen wordt de invloed van verschillende parameters op de initiële seculaire reksnelheid bij 1-dimensionale vervorming in het SSC model besproken. Hierbij wordt een vergelijking gemaakt met de initiële seculaire reksnelheden van het a,b,c-Isotachenmodel. De OCR heeft naast de invloed op de initiële seculaire reksnelheid, invloed op de verhouding directe en spanningsafhankelijke seculaire rek. Bij een hogere OCR wordt het aandeel directe rek groter, waardoor er minder zetting optreedt. In deze paragraaf wordt echter alleen gekeken naar de initiële seculaire reksnelheid.

Voor de volledigheid wordt Vergelijking 59, welke de seculaire volumieke reksnelheid ( $-\dot{\epsilon}_{v,s}$ ) beschrijft onderstaand herhaald. Hierbij dient opgemerkt te worden dat bij 1-dimensionale samendrukking de volumieke rek gelijk is aan de verticale rek.

$$-\dot{\epsilon}_{v,s} = \frac{\mu^*}{\tau} \left( \frac{p^{eq}}{p^{eq}_p} \right)^{\frac{\lambda^* - \kappa^*}{\mu^*}}$$

#### Vergelijking 59

De grootte van de initiële seculaire reksnelheid ( $\dot{\epsilon}_{v,s}$ ) wordt bepaald door de onderstaande grootheden / parameters. Hierbij wordt de absolute waarde van de initiële seculaire reksnelheid bedoeld.

- $\mu^*$ , een grotere waarde voor deze parameter heeft een grotere initiële seculaire reksnelheid tot gevolg.
- $\frac{p^{eq}}{p^{eq}_p}$ , hetgeen gelijk staat aan  $\frac{1}{OCR_{p^{eq}}}$ . Hoe hoger de  $OCR_{p^{eq}}$ , hoe lager de initiële seculaire reksnelheid.
- $\frac{\lambda^* - \kappa^*}{\mu^*}$ , bij  $OCR_{p^{eq}}$  groter dan 1 neemt de initiële seculaire reksnelheid af naarmate de verhouding  $\frac{\lambda^* - \kappa^*}{\mu^*}$  toeneemt.

In Vergelijking 82 is de initiële seculaire reksnelheid beschrijving gegeven die geldig is voor het a,b,c-Isotachenmodel. De afleiding van deze vergelijking is verder buiten beschouwing gelaten.

$$\dot{\epsilon}_s = \frac{c}{\tau} \left( \frac{\sigma'_{yy}}{\sigma'_{yy;p}} \right)^{\frac{b-a}{c}}$$

## Vergelijking 82

### *Invloed $\mu^*$*

De parameter  $\mu^*$  beïnvloedt rechtstreeks de initiële seculaire reksnelheid. Hetzelfde geldt voor de a,b,c-Isotachenparameter c.  $\mu^*$  en c worden normaliter 1 op 1 in elkaar omgerekend. Verschillen tussen het a,b,c-Isotachenmodel en het SSC model worden dan ook niet verwacht.

### *Invloed OCR*

In paragraaf 3.5 is reeds besproken dat er verschillen ontstaan tussen  $OCR_{yy}$  en  $OCR_{p'eq}$  indien K niet gelijk is aan  $K_0^{nc}$ . Bij het berekenen van de initiële seculaire reksnelheid maakt het a,b,c-Isotachenmodel gebruik van  $OCR_{yy}$ . Bij het SSC model wordt  $OCR_{p'eq}$  gehanteerd. Significante verschillen tussen  $OCR_{yy}$  en  $OCR_{p'eq}$  bij realistische parameters voor slappe gronden treden echter pas op bij  $OCR_{yy}$  en  $OCR_{p'eq}$ -waarden van 1,8 of hoger. Bij een  $OCR_{yy}$  gelijk aan 1 is  $OCR_{p'eq}$  ook gelijk aan 1. Bij ophogingen wordt de geschiedenis gedeeltelijk uitgewist, de mate van overconsolidatie neemt daardoor ook af. De invloed van de initiële OCR wordt daardoor ook kleiner. Verschillen zullen alleen optreden indien de geschiedenis niet volledig wordt uitgewist. K is dan groter dan  $K_0^{nc}$  en daarmee is de  $OCR_{yy}$  groter is dan 1.

Na het verwijderen van een overhoogte ( $K_0$  is groter dan  $K_0^{nc}$ ) ontstaat er opnieuw een mate van overconsolidatie. Hierdoor treden er verschillen op tussen  $OCR_{yy}$  en  $OCR_{p'eq}$ . Let wel dat na ontlasten door de modellen een OCR wordt berekend. Deze OCR kan dus niet rechtstreeks door de gebruiker worden aangepast. Door de initiële OCR te verhogen wordt dit verschil niet opgelost.

Om een indicatie te geven van de zettingsverschillen die tussen de twee modellen kunnen ontstaan zijn een aantal berekeningen uitgevoerd. Het gaat hierbij om zettingsverschillen t.g.v. kruip. De berekeningen zijn gemaakt door een 10 meter dikke slappe laag 10000 dagen te laten kruipen. Voor de slappe laag zijn de volgende materiaaleigenschappen aangehouden,  $\kappa^* = 0,03$ ;  $\lambda^* = 0,17$ ;  $\mu^* = 0,01$  en  $v_{ur} = 0,2$ . Voor M is een waarde aangehouden van 1,611 ( $K_0^{nc} = 0,5$ ). De berekeningen zijn gemaakt voor  $OCR_{yy}$ -waarden van 1 tot 2. Het maximale verschil tussen het a,b,c-Isotachenmodel en het SSC model is gevonden bij een  $OCR_{yy}$  van 2. Het verschil is dan 0,04 meter op een SSC zetting van 0,09 meter.

Afhankelijk van de restzettingseisen kunnen dergelijke verschillen noemenswaardig zijn. Het invoeren van een hogere OCR bij het SSC model t.o.v. het a,b,c-Isotachenmodel lijkt daarmee niet volkomen onlogisch, wanneer de initiële seculaire reksnelheid bepalend is voor de zettingen. Dit geldt alleen voor 1-dimensionale samendrukkingssituaties waarbij de ondergrond overgeconsolideerd is ten gevolge van ontlasten ( $K_0$  is groter dan  $K_0^{nc}$ ). Bij een initiële situatie met OCR-waarden gelijk aan 1, treden geen intrinsieke tijdsafhankelijke seculaire rekverschillen op tussen de twee modellen. Hetzelfde is het geval bij overgeconsolideerde situaties t.g.v. aging (K is constant en gelijk aan  $K_0^{nc}$ ).

### **Parameters $\kappa^*$ en $a$**

In paragraaf 3.4 is beschreven op welke manier de 1-dimensionale a,b,c-Isotachen parameters kunnen worden omgeschreven in de 3-dimensionale SSC parameters. Samengevat volgt hieruit dat:

$$\kappa^* = \frac{(1 - \nu_{ur})(1 + 2K)}{(1 + \nu_{ur})} a$$

$$\lambda^* = b$$

$$\mu^* = c$$

$\kappa^*$  is daarmee niet constant indien K niet constant is. Naast de directe rek heeft  $\kappa^*$  ook invloed op de initiële seculaire reksnelheid. Volgens de bovenstaande omrekenmethode is  $\kappa^*$  altijd groter of gelijk aan a. De verhouding

$\frac{\lambda^* - \kappa^*}{\mu^*}$  is daarmee altijd kleiner dan of gelijk aan  $\frac{b-a}{c}$ , waardoor de initiële seculaire reksnelheid van het SSC

model groter dan of gelijk is aan de initiële seculaire reksnelheid van het a,b,c-Isotachenmodel. In hoeverre het verschil tussen a en  $\kappa^*$  de initiële seculaire reksnelheid en daarmee de zetting t.g.v. kruip beïnvloed, is hieronder beschreven.

Indien vanuit OCR = 1 wordt gestart met de kruipfase zijn er geen verschillen tussen de twee modellen. Wanneer vanuit verschillende mate van overconsolidatie wordt gestart met de kruipfase kan bij de hierboven beschreven 10 meter dikke laag het verschil bij een kruiptijd van 10000 dagen oplopen tot 0,08 meter (op een SSC zetting van 0,29 meter). Dit verschil is gevonden bij een OCR<sub>yy</sub> van 1,67. De omrekening van a en  $\kappa^*$  is hierbij gebaseerd op bovenstaand beschreven vergelijking. Het gevonden verschil is voor restzettingseisen noemenswaardig.

Indien gekozen wordt voor een  $\kappa^*$ -waarde die groter is dan a, dient in de gaten te worden gehouden dat dit niet alleen invloed heeft op de directe rek. Bij OCR-waarden groter dan 1 neemt de intrinsieke tijdsafhankelijke seculaire rek toe, naarmate  $\kappa^*$  toeneemt.

### **Conclusie**

Het SSC model berekent bij 1-dimensionale vervorming en OCR-waarden groter dan 1 grotere initiële seculaire reksnelheden dan het a,b,c-Isotachenmodel indien  $\kappa^*$  groter is dan a en/of  $K_0$  is groter dan  $K_0^{nc}$ . Bij dergelijke gevallen, waarbij de initiële seculaire reksnelheid grote invloed heeft op de zetting, kan ervoor gekozen worden de OCR bij SSC berekeningen groter aan te nemen dan bij a,b,c-Isotachenberekeningen. Bij een OCR gelijk aan 1 is de initiële seculaire reksnelheid voor beide modellen gelijk.

Onderzoeksvraag 5, *het achterhalen van een fundamentele verklaring waarom geadviseerd wordt de OCR in het SSC model groter dan of gelijk aan 1,3 à 1,4 te kiezen*, is hiermee deels beantwoord. Er dient hierbij wel opgemerkt te worden dat de OCR naast de invloed op de initiële seculaire reksnelheid, invloed heeft op de verhouding directe en spanningsafhankelijke seculaire rek. De directe rek beschrijft de stijve tak in een samendrukkingsproef en de spanningsafhankelijke seculaire tak beschrijft de slappe tak. Bij een hogere OCR neemt het aandeel directe rek toe waardoor de totaal optredende rek afneemt.

## 4.2. Invloed van de $K_0^{nc}$ -afhankelijke M parameter op spanningen en vervormingen

In deze paragraaf wordt de invloed van de  $K_0^{nc}$ -afhankelijke M parameter op de spanningen en vervormingen tijdens 1 en 3-dimensionale vervorming besproken. Daarmee wordt ingegaan op onderzoeksvraag 3, *de werking van het SSC model a.d.h.v. praktische voorbeelden uitvoerig beschrijven, waarbij in het bijzonder aandacht zal worden besteed aan de invloed van de  $K_0^{nc}$ -afhankelijke M parameter.*

Dit onderwerp wordt uitgebreid behandeld, omdat het Soft Soil model een andere waarde voor M suggereert dan het SSC model (zie ook paragraaf 3.3.1.1). Uit literatuur [4] komt naar voren dat de default waarde van M in het SS model realistischere effectieve spanningsverhoudingen geeft dan de default waarde voor M in het SSC model. Er wordt daarom constant een vergelijking gemaakt tussen SSC berekeningen met M-waarden gebaseerd op het SS model en M-waarden gebaseerd op het SSC model.

### 4.2.1. Invloed M op 1-dimensionale samendrukking

In deze paragraaf worden twee situaties beschouwd, waarbij gekeken wordt naar de invloed van M tijdens 1-dimensionale samendrukking. De eerste situatie betreft een overgeconsolideerd grondmonster met een default  $K_0$ -waarde. De tweede situatie betreft een overgeconsolideerd grondmonster met een aangepaste  $K_0$ -waarde. Voor beide situaties worden spanningen berekend en zal op basis hiervan een interpretatie worden gemaakt voor de optredende vervormingen.

Het gaat bij deze situatie om een willekeurig spanningspunt in de geometrie. De geometrie wordt daarom ook niet beschreven. De horizontale spanning wordt berekend a.d.h.v. de verticale spanningsverandering. De verticale spanning is de variabele. De geometrie met randvoorwaarden is te vergelijken met een samendrukkingproef.

#### ***Overgeconsolideerd grondmonster met default $K_0$ -waarde***

In de eerst beschouwde situatie is de default  $K_0$ -waarde aangehouden voor het berekenen van de initiële spanningen. De resultaten en interpretaties zijn uitvoerig beschreven in bijlage 6.1. In deze bijlage wordt diep ingegaan op alle verschillen. In deze paragraaf zal echter alleen besproken worden wat de invloed is op de totale vervorming.

Beneden de grensspanning zijn de verschillen in de gevonden horizontale spanningen bij de verschillende waarden voor M klein. Dit resulteert dan ook in kleine verschillen m.b.t. de isotrope spanningen. Verschillen m.b.t. volumieke vervorming zijn daardoor ook klein. Volumieke vervorming is bij 1-dimensionale samendrukking gelijk aan de verticale vervorming (de M-waarde van het SSC model geeft kleinere vervormingen dan de M-waarde van het SS model). Er dient hierbij opgemerkt te worden dat de optredende vervorming beneden de grensspanning normaliter klein zijn t.o.v. vervormingen boven de grensspanning. Het is meestal zo dat bij zettingsberekeningen het merendeel van de belastingsverhoging plaats vindt boven de grensspanning. De kleine verschillen t.g.v. verschillende M-waarden die beneden de grensspanning optreden zijn te verwaarlozen t.o.v. de totale vervormingen.

Voor de spanningspaden boven de grensspanning geldt dat de verhoudingen tussen de spanningen hetzelfde zijn voor de verschillende M-waarden (de spanningsverhoudingen bepalen de rekken). Bij 1-dimensionale samendrukking heeft de M-waarde geen invloed op de verticale vervorming boven de grensspanning.

Er kan geconcludeerd worden dat de invloed van M op vervormingen tijdens 1-dimensionale samendrukking klein zijn.

***Overgeconsolideerd grondmonster met aangepaste  $K_0$ -waarde***

In overeenstemming met de vorige situatie betreft het in deze studie een overgeconsolideerd grondmonster. In deze studie is de default  $K_0$ -waarde aangepast door een kleinere waarde (0,8), waar deze in de vorige situatie niet aangepast is. De waarde voor  $K_0$  zijn voor beide M-waarden gelijk. De resultaten en interpretaties zijn uitvoerig beschreven in bijlage 6.2. In deze bijlage wordt diepgaand ingegaan op alle verschillen, hier zal echter alleen besproken worden wat de invloed is op de totale vervorming.

Er is hierbij alleen gekeken naar het overgeconsolideerde spanningspad. Het normaal geconsolideerde spanningspad komt immers overeen met het hiervoor beschreven spanningspad boven de grensspanning. De verschillen in de gevonden horizontale spanningen (t.g.v. horizontaal belasten) zijn klein. Dit resulteert in kleine verschillen m.b.t. de isotrope spanningen. Hierdoor zijn ook de volumieke/verticale vervorming klein (de M-waarde van het SSC model geeft grotere vervormingen dan de M-waarde van het SS model). Hierbij dient weer opgemerkt te worden dat de optredende vervorming beneden de grensspanning normaliter klein zijn t.o.v. vervormingen boven de grensspanning. De kleine verschillen t.g.v. verschillende M-waarden die beneden de grensspanning optreden zijn normaliter te verwaarlozen t.o.v. de totale vervormingen.

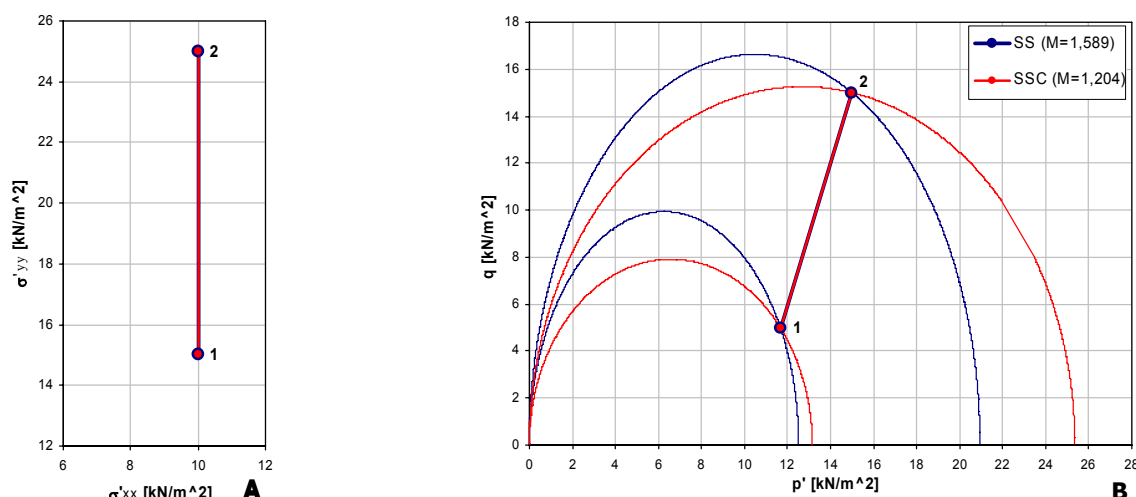
Er kan geconcludeerd worden dat de invloed van M op vervormingen tijdens 1-dimensionale samendrukking klein zijn.

### 4.2.2. Invloed M op 3-dimensionale vervorming

In de voorafgaande paragraaf is de invloed van de  $K_0^{nc}$ -afhankelijke M parameter op spanningen en vervormingen bij 1-dimensionale samendrukking beschreven. In deze paragraaf wordt de invloed van M op de spanningen en vervormingen tijdens 3-dimensionale vervorming beschreven a.d.h.v een spanningspad volgend uit een fictieve geconsolideerde gedraineerde (CD) triaxiaalproef. Hierbij zal de uitgebreide interpretatie in de paragraaf zelf worden beschreven i.v.m. de grote impact van M op de vervormingen. Verder wordt beschreven wat verwacht kan worden bij niet uniforme maaiveld belastingen.

De spanningspaden zijn grafisch weergegeven in Figuur 13A en B. De bijbehorende numerieke waarden zijn opgenomen in Tabel 1. Het gaat hierbij om een willekeurig spanningspunt in een geometrie. Op het gesimuleerde spanningspunt wordt een zijdelingse druk aangebracht, waarna de verticale belasting wordt verhoogd bij een constante horizontale belasting (in beide richtingen; axisymmetrie). Ongedraineerd gedrag wordt hierbij genegeerd. De effectieve verticale spanning zal daardoor toenemen en de effectieve horizontale spanning blijft constant.

Het monster is normaal geconsolideerd en de materiaaleigenschappen komen overeen met het gesimuleerde monster van de voorgaande paragraaf (paragraaf 4.2.1). Het getoonde spanningspad start bij een effectieve verticale spanning die groter is dan de effectieve horizontale spanning. De stap waarbij de verticale belasting wordt verhoogd is al in gang gezet voordat het eerste spanningspunt is geplot.



Figuur 13A en B: invloed M op spanningen bij 3-dimensionale vervorming

|                                   | SS    | SSC   |
|-----------------------------------|-------|-------|
| M                                 | 1,589 | 1,204 |
| $K_0^{nc}$ (default)              | 0,500 | 0,636 |
| $K_0$                             | 0,67  | 0,67  |
| $\sigma'_{yy;1}$                  | 15,00 | 15,00 |
| $\sigma'_{yy;2}$                  | 25,00 | 25,00 |
| $\sigma'_{yy;2} / \sigma'_{yy;1}$ | 1,67  | 1,67  |
| $\Delta\sigma'_{yy}$              | 10,00 | 10,00 |
| $\sigma'_{xx;1}$                  | 10,00 | 10,00 |
| $\sigma'_{xx;2}$                  | 10,00 | 10,00 |
| $\sigma'_{xx;2} / \sigma'_{xx;1}$ | 1,00  | 1,00  |
| $\Delta\sigma'_{xx}$              | 0,00  | 0,00  |

|                         | SS    | SSC   |
|-------------------------|-------|-------|
| $p'_1$                  | 11,67 | 11,67 |
| $p'_2$                  | 15,00 | 15,00 |
| $p'_2 / p'_1$           | 1,29  | 1,29  |
| $\Delta p'$             | 3,33  | 3,33  |
| $q'_1$                  | 5,00  | 5,00  |
| $q'_2$                  | 15,00 | 15,00 |
| $q'_2 / q'_1$           | 3,00  | 3,00  |
| $\Delta q'$             | 10,00 | 10,00 |
| $p'^{eq}_1$             | 12,52 | 13,15 |
| $p'^{eq}_2$             | 20,94 | 25,35 |
| $p'^{eq}_2 / p'^{eq}_1$ | 1,67  | 1,93  |
| $\Delta p'^{eq}$        | 8,42  | 12,20 |

Tabel 1: invloed M op spanningen bij 3-dimensionale vervorming

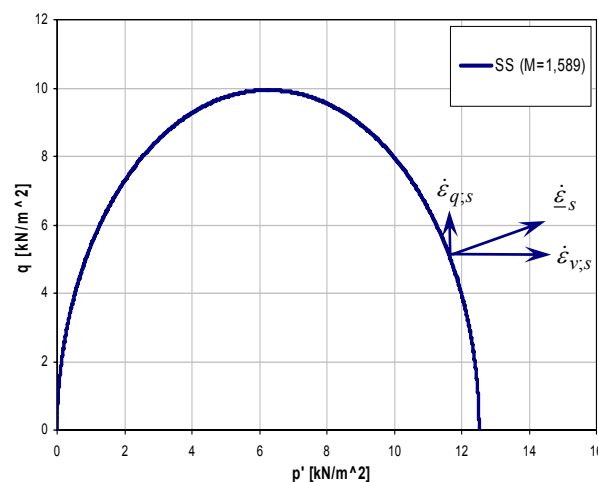
Interpretatie Figuur 13 en Tabel 1:

- Voor beide M-waarden volgt het spanningspad exact hetzelfde pad. De initiële- en eindspanningen zijn voor beide M-waarden gelijk. De isotrope spanningen zijn daardoor hetzelfde, hetgeen resulteert in overeenkomende directe rekken in de verschillende richtingen.
- De equivalente spanningen zijn niet gelijk bij de verschillende M-waarden. Bij kleinere M-waarden en daarmee een minder steile kruipfunctie zijn de equivalente spanningen en spanningsverhoudingen groter. De grotere equivalente spanningsverhouding heeft tot gevolg dat de spanningsafhankelijke seculaire volumieke rek groter zal zijn naarmate M afneemt.
- Bij kleinere waarden voor M neemt de verhouding deviatorische over volumieke seculaire reksnelheid toe. Dit resulteert vooral in grotere horizontale vervormingen. In hoofdstuk 4 van literatuur [15] is dit formule technisch beschreven hetgeen resulteert in de in Vergelijking 83 beschreven verhouding.

$$\frac{\dot{\epsilon}_{q,s}}{\dot{\epsilon}_{v,s}} = \frac{2 \frac{q}{p'}}{M^2 - \left(\frac{q}{p'}\right)^2}$$

**Vergelijking 83**

In Figuur 14 is de seculaire reksnelheidsrichting, behorende bij spanningspunt 1 met  $M = 1,589$ , opgesplitst in de deviatorische ( $\dot{\epsilon}_{q,s}$ ) en volumieke ( $\dot{\epsilon}_{v,s}$ ) seculaire reksnelheid. De totale seculaire reksnelheid ( $\dot{\epsilon}_s$ ) staat altijd loodrecht op de ellips. De steilheid van de ellips, afhankelijk van M, bepaald daarmee het aandeel deviatorisch en volumieke seculaire reksnelheid (zoals ook volgt uit Vergelijking 83). Een afname van M resulteert in een toename van de verhouding deviatorische over volumieke seculaire reksnelheid.



**Figuur 14: invloed M op de richting van de seculaire reksnelheid**

Er kan geconcludeerd worden dat een kleinere waarde voor  $M$ , significant grotere horizontale vervorming tot gevolg heeft bij de simulatie van een CD triaxiaalproef. Verder zal de spanningsafhankelijke seculaire volumieke rek groter zijn naarmate  $M$  toeneemt. Om een indicatie te geven van de optredende rekkenverschillen in verschillende richtingen is het bovenstaande spanningspad in het SSC model nagebootst. De tijdsduur van de spanningsverhoging is 1 dag. In Tabel 2 zijn de berekende rekken opgenomen. Negatieve waarden staan voor samendrukking.

|                    | $M$   | $K_0^{nc}$ (default) | $K_0$ | $\varepsilon_{yy}$ [%] | $\varepsilon_{xx}$ [%] | $\varepsilon_v$ [%] |
|--------------------|-------|----------------------|-------|------------------------|------------------------|---------------------|
| <b>SS</b>          | 1,589 | 0,500                | 0,67  | -5,5                   | 0,6                    | -4,3                |
| <b>SSC</b>         | 1,204 | 0,636                | 0,67  | -12,9                  | 3,8                    | -5,3                |
| <b>Vershil [%]</b> |       |                      |       | 236                    | 644                    | 124                 |

**Tabel 2: invloed  $M$  op rekken bij 3-dimensionale vervorming**

Interpretatie Tabel 2:

De horizontale rek neemt aanzienlijk toe bij een afnemende  $M$ -waarde. Het monster zet in horizontale richting verder uit. De volumieke rek neemt toe in tegenovergestelde richting, het monster neemt af in volume (samendrukking). Dit ontstaat doordat de equivalente spanningsverhouding groter is bij kleinere waarden voor  $M$ . Deze volume afname wordt opgenomen in verticale richting. De verticale rek neemt in absolute zin toe met een waarde die gelijk is aan 2 maal de horizontale rek toename plus de volumieke rek toename.

Naast de  $M$  parameter hebben  $p'$  en  $q$  invloed op de equivalente spanningsverhouding en verhouding deviatorische over volumieke seculaire reksnelheden. Dit resulteert voor minder steile spanningspaden in kleinere verschillen m.b.t. de volumieke rek en verhouding deviatorische over volumieke seculaire reksnelheden.

In de beschreven triaxiaalproef is de horizontale spanning opgelegd en daarmee onafhankelijk van  $M$ . Bij het aanbrengen van een niet uniforme maaiveld belasting zullen vooral de horizontale spanningen afhankelijk zijn van de  $M(K_0^{nc})$ -waarde. Dit betekent dat de spanningspaden bij berekeningen met verschillende waarde voor  $M$  niet hetzelfde pad doorlopen (in tegenstelling tot de CD triaxiaalproef). De deviatorische en volumieke spanningen ( $q$  en  $p'$ ) zijn daarmee afhankelijk van  $M$ . Uit Vergelijking 83 volgt dat naast  $M$ , de verhouding  $q / p'$  invloed heeft op de verhouding deviatorische over volumieke seculaire reksnelheid. Indien  $q / p'$  toeneemt, neemt de verhouding deviatorische over volumieke seculaire reksnelheid toe (Vergelijking 83).

Bij toenemende  $M$ -waarden neemt de verhouding  $q / p'$ , bij niet uniforme maaiveld belastingen, toe. Dit betekent dat de deviatorische over volumieke seculaire reksnelheid afneemt t.g.v. de toename van  $M$ , maar toeneemt t.g.v. de toename van  $q / p'$ . De invloed van  $M$  is normaliter groter dan de invloed van  $q / p'$ , waardoor ook bij een niet uniforme maaiveld belasting de verhouding deviatorisch over volumieke seculaire reksnelheid afneemt bij een toename van  $M$ . Deze afname is kleiner dan bij de CD triaxiaalproef, maar blijft zeker voor de horizontale vervormingen noemenswaardig.

Tot slot kan geconcludeerd worden dat een toename van de  $K_0^{nc}$ -afhankelijke  $M$  parameter bij 3-dimensionale vervormingen resulteert in stijver grondgedrag. Vooral de horizontale vervorming zal sterk beïnvloed worden door  $M$ . De invloed van  $M$  hangt naast de numerieke waarde voor  $M$  af van het te doorlopen spanningspad. In een CD triaxiaalproef is de invloed van  $M$  groter dan bij het aanbrengen van een niet uniforme maaiveld belasting.

Na een belastingsverhoging blijft de  $K_0^{nc}$ -afhankelijke  $M$  parameter invloed hebben op de kruip vervormingen. De seculaire reksnelheid staat immers loodrecht op de equivalente spanningsellips.  $M$  is daarmee bepalend voor het gehele vervormingsproces.

### 4.2.3. Conclusie

Onderzoeksvraag 3, *de werking van het SSC model a.d.h.v. praktische voorbeelden uitvoerig beschrijven, waarbij in het bijzonder aandacht zal worden besteed aan de invloed van de  $K_0^{nc}$ -afhankelijke M parameter*, is nu deels beantwoord.

De invloed van de  $K_0^{nc}$ -afhankelijke M parameter, op de verticale vervorming, is bij 1-dimensionale samendrukking te verwaarlozen. Daarentegen heeft M bij 3-dimensionale vervorming significante invloed op het gehele vervormingsproces. Bij grotere M-waarden neemt de deviatorische over volumieke seculaire reksnelheid af. Dit heeft normaliter tot gevolg dat vooral de horizontale vervorming beïnvloed wordt door M, de horizontale / verticale vervormingsverhouding neemt daardoor af. Een correcte bepaling/aanname van  $M(K_0^{nc})$  is daarom erg belangrijk, in hoofdstuk 5 wordt hier uitgebreid op ingegaan.

### 4.3. Fictieve samendrukkingsproef

In deze paragraaf is een fictieve samendrukkingsproef nagebootst. Deze berekening is gemaakt voor het verkrijgen van een beter modelbegrip en ter validatie én staat daarmee los van de onderzoeksvragen. Hierbij worden drie onderwerpen behandeld; verschillende richtingscoëfficiënten voor ontlasten en herbelasten in een spannings-rek grafiek, horizontale spanningsverandering t.g.v. een kruipstap en de ontwikkeling van de OCR op de 1 dagslijn.

In Tabel 3 zijn de belangrijkste parameters en geometrie gegevens opgenomen.

|                 |                 |                   |
|-----------------|-----------------|-------------------|
| Model           | axisymmetrie    |                   |
| Elementen       | 15              |                   |
| Afstroming      | 2 zijdig        |                   |
| Materiaal model | SSC             |                   |
| Materiaal type  | undrained       |                   |
| Hoogte          | 0,02            | m                 |
| Breedte         | 0,04            | m                 |
| $\gamma_w$      | 19              | kN/m <sup>3</sup> |
| $\gamma_d$      | 19              | kN/m <sup>3</sup> |
| $k_x$ en $k_y$  | 1,00E-04        | m/dag             |
| $\kappa^*$      | 2,00E-03        | -                 |
| $\lambda^*$     | 1,00E-02        | -                 |
| $\mu^*$         | 5,00E-04        | -                 |
| c               | 1               | kN/m <sup>2</sup> |
| $\varphi$       | 30              | deg               |
| $\psi$          | 0               | deg               |
| $v_{ur}$        | 0,15            | -                 |
| $K_0^{nc}$      | 0,636 (default) | -                 |

**Tabel 3: modelparameters en geometrie, fictieve samendrukkingsproef**

De samendrukkingsparameters zijn aan de lage kant (factor 10 lager dan slappe grondsoorten) om 'problemen' m.b.t. grote rekken te voorkomen. De verhouding tussen de parameters  $\kappa^*$ ,  $\lambda^*$  en  $\mu^*$  zoals deze beschreven zijn in paragraaf 3.3.1.2.2 zijn wel reëel.

Als er rekken optreden groter dan 20 %, is het alleen verantwoord de samendrukkingsparameters uit het a,b,c-Isotachenmodel om te rekenen naar SSC parameters indien een correctie voor de optredende rek wordt toegepast. De oorzaak hiervan zit hem in het verschil in natuurlijke rek (a,b,c-Isotachenmodel) en lineaire rek (SSC model). Dit is hier omzeild door te kiezen voor lage waarden voor de samendrukkingsparameters, de optredende rek blijft hierdoor beneden de 10%.

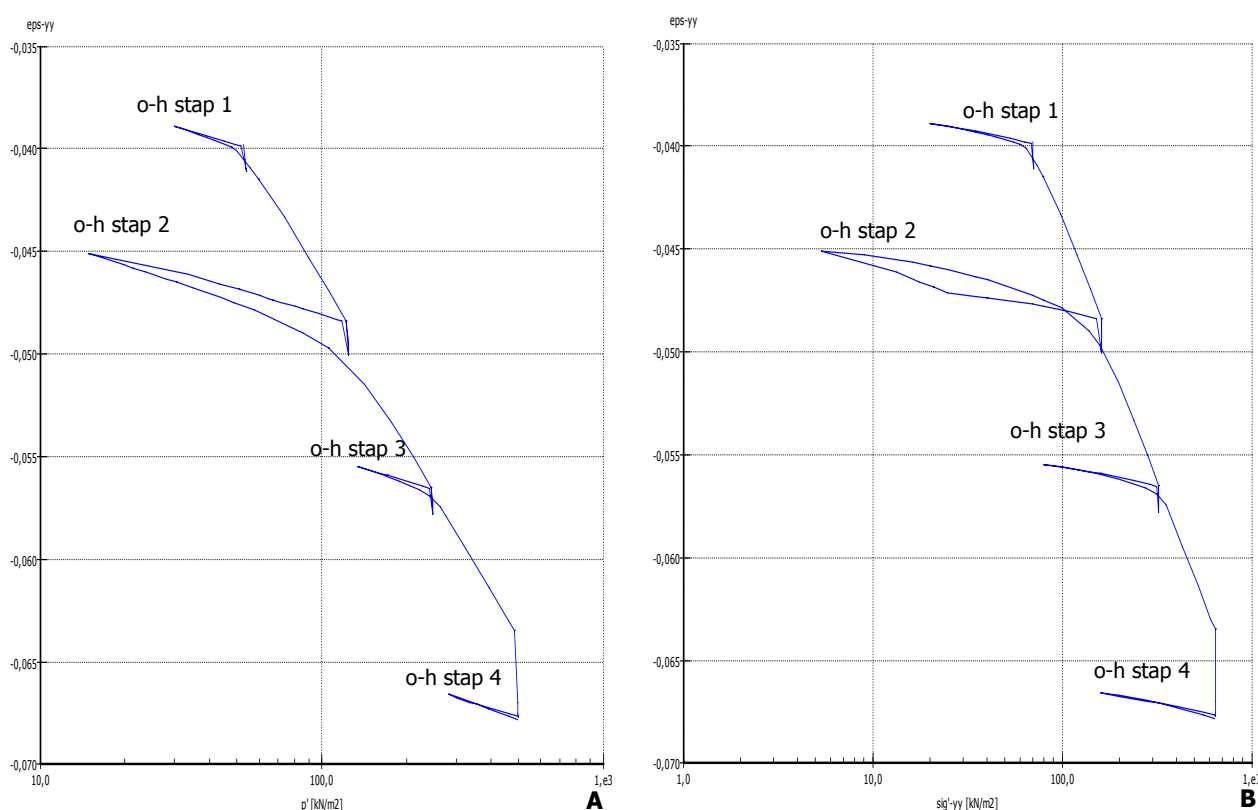
Bij rekken groter dan 20% wordt geadviseerd te rekenen met de Updated Mesh optie. Met deze optie wordt de opgetreden rek in rekening genomen bij iedere belastingstap. Daarnaast is het in praktijksituaties aan te raden met Updated Waterpressures te rekenen. Bij een samendrukkingsproef is het rekenen met Updated Waterpressures echter niet noodzakelijk, omdat het monster constant onder water staat en onderwaterzakken van de belasting te verwaarlozen is. Bij praktijksituaties speelt het onderwaterzakken van een ophoging, dan wel de niet verzadigde ondergrond, een noemenswaardige rol bij de bepaling van de effectieve spanningsverhoging.

Bij het simuleren van een samendrukkingsproef is het vaak gemakkelijk de tijd in seconden i.p.v. dagen in te voeren. Bij general settings in Plaxis Input dient voor de tijdseenheid, seconden ingevoerd te worden. Bij een tijdseenheid in seconden wordt de OCR gerefereerd aan de 1 secondenlijn i.p.v. de 1 dagslijn. Dit resulteert in een overschatting van de intrinsieke tijdsafhankelijke seculaire rek. In Plaxis moet de tijdseenheid daarom altijd op dagen staan.

### 4.3.1. Verschil in richtingscoëfficiënten voor ontlasten en herbelasten in een spannings–rek grafiek.

Tijdens het maken van verschillende berekeningen is opgevallen dat de richtingscoëfficiënten voor ontlasten en herbelasten in een spannings–rek grafiek verschillen. In deze paragraaf worden de verschillen weergegeven en verklaard.

Voor de visualisatie van de bovenstaande bevinding is een belastingschema gehanteerd met verschillende ontlast-herbelast (o-h stappen) en kruipstappen. In Bijlage 7 is dit belastingschema opgenomen. Om de grafiek interpretatie te vereenvoudigen zijn alle berekeningen gedraineerd uitgevoerd. Vervolgens zijn in Figuur 15A en B respectievelijk de  $\ln(p') - \epsilon_{yy}$  en  $\ln(\sigma'_{yy}) - \epsilon_{yy}$  grafieken van deze berekening weergegeven<sup>4</sup>.



**Figuur 15A en B: verschil richtingscoëfficiënten in spannings – rek grafiek bij ontlast- herbelaststappen, fictieve samendrukkingsproef**

Uit deze grafieken zijn twee opmerkelijke dingen te constateren. Ten eerste blijkt uit beide figuren dat de ontlast-herbelaststappen niet volgens 1 lijn verlopen en ten tweede is er een vreemd verloop te zien in de tweede ontlast-herbelaststap van Figuur 15B.

<sup>4</sup> De weergave van de grafieken is niet helemaal correct. De ontlaststappen worden aangebracht t.o.v de voorgaande voorbelasting of primaire belasting (zie ook de belastingschema's in Bijlage 1). In de grafieken lijkt het echter dat de ontlaststappen worden aangebracht na de seculaire stap, hetgeen niet het geval is. De berekende grafiekpunten zijn correct, alleen de lijnen worden verkeerd verbonden.

***Verskil richtingscoëfficiënt ( $\kappa^*$ ) ontlast en herbelast curve.***

In beide figuren is te zien dat de ontlast- herbelaststappen niet volgens 1 lijn verlopen. Een aannemelijke verklaring voor deze verschillen kan gezocht worden in intrinsieke tijdsafhankelijke seculaire rek. Elke belastingsstap wordt namelijk gedurende 1 dag vast gehouden. Tijdens deze dag treedt er een zekere mate van intrinsieke tijdsafhankelijke seculaire rek op. In de figuren is te zien dat er op het moment van ontlasten tegelijkertijd een kruipstap wordt ingezet. Deze kruipstap kan gezien worden als een zijsprong van de 1 dagslijn. De tijdsduur is steeds gelijk gekozen aan de totale tijdsduur tijdens de ontlaststap. Deze tijdsduur verstrijkt gedurende de totale ontlast- herbelaststap. Aangezien de belasting nu hoger is dan de gemiddelde belasting gedurende de ontlast- herbelaststap, zou de optredende intrinsieke tijdsafhankelijke seculaire rek groter moeten zijn dan het rekverschil tussen begin ontlasten en eind herbelasten. Dit is bij de eerste en derde ontlast- herbelaststappen het geval, in de laatste ontlast- herbelaststap is dit echter niet zo.

De tweede ontlast- herbelaststap wordt hier verder niet in beschouwing genomen vanwege het vreemde verloop tijdens ontlasten in Figuur 15B. Later in deze paragraaf wordt hier wel een verklaring voor gegeven.

Uit het voorgaande blijkt dat de optredende intrinsieke tijdsafhankelijke seculaire rek waarschijnlijk niet helemaal de oorzaak van het verschil in richtingscoëfficiënt is. Opgemerkt kan worden dat de optredende rekverschillen t.o.v. de totale rek in deze berekening te verwaarlozen zijn. Het aandeel van de rekverschillen in alle vier de ontlast- herbelaststappen bedraagt 1,5% van de totaal optredende rek. In dit geval is dit rekverschil te verwaarlozen. In paragraaf 4.4 zal echter blijken dat de verschillen in specifieke gevallen noemenswaardig kunnen worden. De verklaring voor deze noemenswaardige verschillen zal daar dan ook worden gegeven.

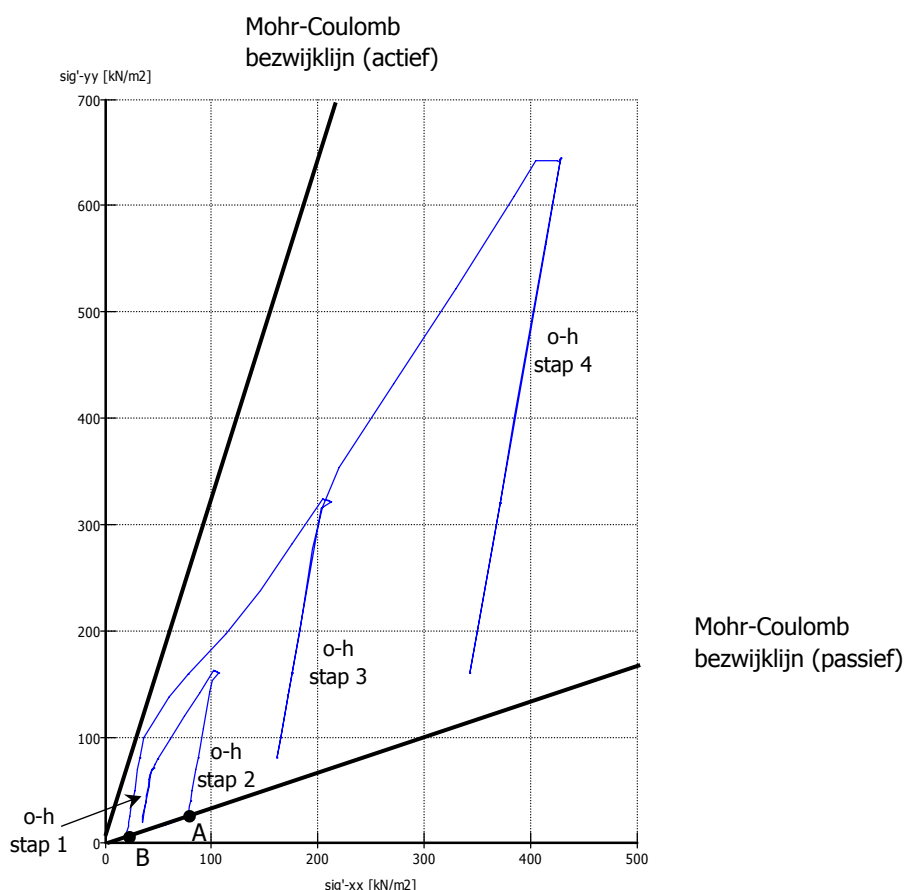
### ***Inconsistent verloop ontlast en herbelast curve in de $\ln(\sigma'_{yy}) - \varepsilon_{yy}$ grafiek***

Zoals al eerder vermeld is er een vreemd verloop te zien in de tweede ontlast- herbelaststap van Figuur 15B. Dit heeft te maken met het Mohr-Coulomb bezwijk criterium dat in het SSC model is verwerkt. Tijdens ontlasten zal  $\sigma'_{xx}$  langzamer afnemen dan  $\sigma'_{yy}$ . Dit heeft tot gevolg dat  $\sigma'_{xx}$  groter kan worden dan  $\sigma'_{yy}$  (K is dan groter dan 1). Nadat  $\sigma'_{xx}$ ,  $\sigma'_{yy}$  heeft ingehaald zal het verschil alleen maar groter worden totdat het Mohr-Coulomb bezwijk criterium wordt bereikt. De spanningen ( $\sigma'_{xx}$  en  $\sigma'_{yy}$ ) waarbij dit zal gebeuren vallen terug te rekenen met Vergelijking 84.

$$\sigma'_{yy} = \frac{2c' \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} + \sigma'_{xx} \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$$

#### **Vergelijking 84**

In Figuur 16 is  $\sigma'_{yy}$  tegen  $\sigma'_{xx}$  uitgezet, tevens zijn in deze figuur de Mohr-Coulomb bezwijklijnen voor ontlasten en herbelasten weergegeven. Deze bezwijklijnen zijn bepaald m.b.v. Vergelijking 84. In punt A raakt de ontlasttak de bezwijklijn, hierdoor wijken de spanningsverhoudingen ( $\sigma'_{xx} / \sigma'_{yy}$ ) af van het 'normale' ontlast herbelast gedrag. De volumieke rek is gelijk aan de verticale rek. De volumieke (verticale) rek wordt berekend a.d.h.v. de isotrope spanningen. Bij bezwijken is de verhouding isotrope / verticale spanning afwijkend t.o.v. de verhouding tijdens een normale ontlaststap (welke niet bezwijkt). Dit resulteert in het rare zettingsverloop in de  $\ln(\sigma'_{yy}) - \varepsilon_{yy}$  grafiek.



**Figuur 16:  $\sigma'_{xx} - \sigma'_{yy}$  grafiek bereiken Mohr-Coulomb bezwijkcriterium bij ontlasten, fictieve samendrukkingsproef**

Het verdere verloop van de ontlastingsstap na punt A, volgt de Mohr-Coulomb bezwijklijn tot punt B. Bij punt B wordt de herbelaststap ingezet. De punten A en B bevinden zich beide in de ontlaststap 2 van -5 kPa.

Om juiste interpretaties te verrichten op spannings-rek grafieken wordt aangeraden de ontlaststap niet tot het Mohr-Coulomb bezwijkcriterium voort te zetten.

### 4.3.2. Horizontale spanningsverandering tijdens kruip

Tijdens het maken van verschillende berekeningen is opgevallen dat de horizontale spanning niet constant is tijdens een kruipstap (constante belasting, rek t.g.v. aging). In deze paragraaf is uitgezocht wanneer en in welke mate de horizontale spanning verandert. De parameters en geometrie zijn gedeeltelijk aangepast om een initiële spanningstoestand in rekening te nemen (zie Tabel 4).

|            |                  |                   |
|------------|------------------|-------------------|
| Afstroming | 1 zijdig (boven) |                   |
| Hoogte     | 1                | m                 |
| Breedte    | 1                | m                 |
| POP        | 70               | kN/m <sup>2</sup> |
| $K_0$      | 1                |                   |

**Tabel 4: gewijzigde modelparameters en geometrie voor horizontale spanningsverandering tijdens kruip, fictieve samendrukkingsproef**

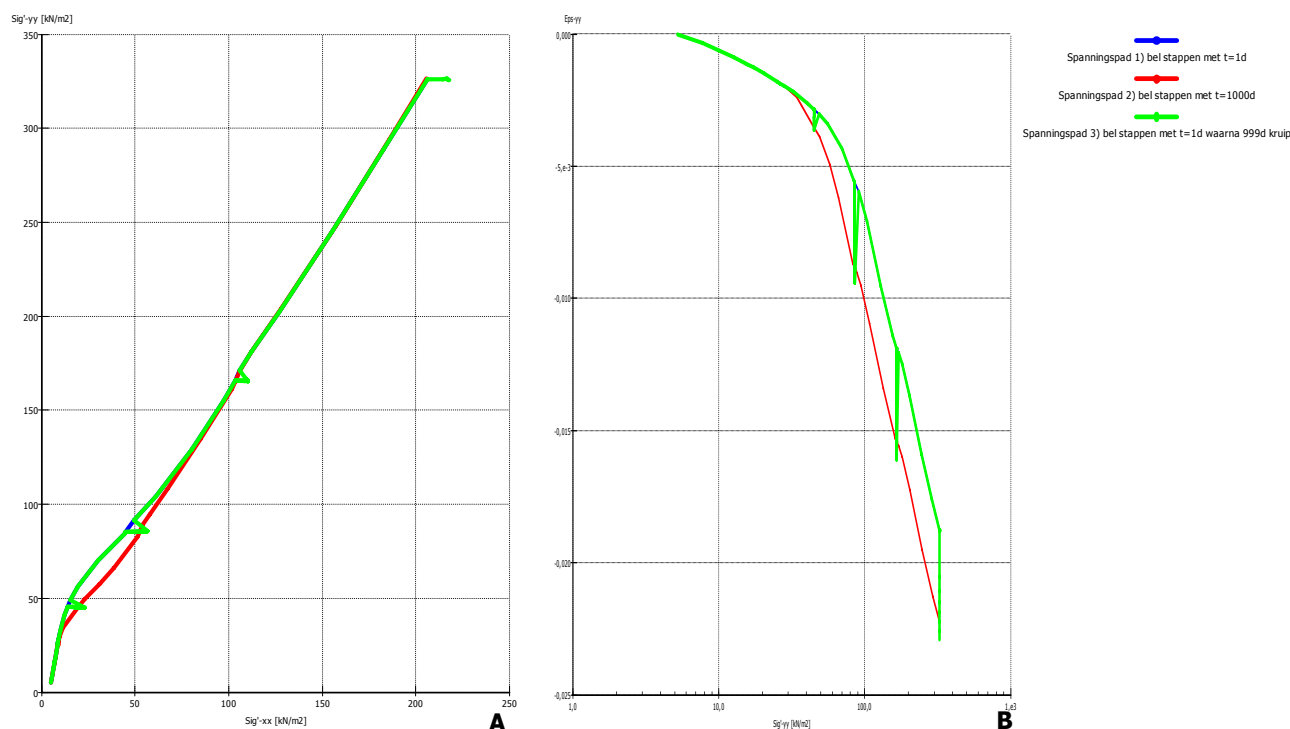
Allereerst zal gekeken worden naar de horizontale spanningsverandering, bij een kruipstap startende op de  $K_0$ - of  $K_0^{nc}$ -lijn. Daarna zal de verandering van de horizontale spanning in onder- of overgeconsolideerde toestand bekeken worden.

#### 4.3.2.1. Horizontale spanningsverandering op de $K_0$ - en $K_0^{nc}$ -lijn

In deze paragraaf is de horizontale spanningsverandering tijdens een kruip stap startende op de  $K_0$ - en  $K_0^{nc}$ -lijn onderzocht. In Figuur 17 A en B zijn de resultaten grafisch weergegeven in respectievelijk een  $\sigma'_{xx} - \sigma'_{yy}$  en  $\ln(\sigma'_{yy}) - \varepsilon_{yy}$  grafiek. Om de grafiek interpretatie te vereenvoudigen zijn alle berekeningen plastisch en gedraineerd uitgevoerd.

In totaal zijn er drie spanningspaden berekend. Bij het eerste spanningspad (rode curve) is de tijdsduur van iedere spanningsverhoging 1 dag. Bij het tweede spanningspad (rode curve) is de tijdsduur van iedere belastingstap 1000 dagen. En bij het derde spanningspad (groene curve) is de tijdsduur van iedere spanningsverhoging 1 dag, het verschil met de spanningspad 1 is de invoer van kruipstappen na iedere spanningsverhoging. Deze kruipstappen hebben een tijdsduur van 999 dagen. Elke spanningsverhoging vindt plaats t.o.v. de vorige spanningsverhogingen. Deze kruipstappen zijn zijsprongetjes van de 1 dagslijn.

De belastingschema's van de verschillende spanningspaden zijn opgenomen in Bijlage 8.



**Figuur 17A en B: invloed kruip op horizontale effectieve spanning, fictieve samendrukkingsproef**

#### Interpretatie Figuur 17A:

- Spanningspad 3 laat zien dat de horizontale spanning tijdens een kruipstap toeneemt. Dit geldt niet voor de kruipstappen bij  $\sigma'_{yy} = 10 \text{ kN/m}^2$  en  $20 \text{ kN/m}^2$ , welke significant lager zijn dan de grensspanning. De oorzaak hiervan kan zijn dat ze significant lager zijn dan de grensspanning.
- De eindpunten van de kruipstappen van spanningspad 3 komen niet overeen met punten op de 1000 dagslijn (spanningspad 2). De oorzaak hiervan is dat een belasting niet op  $t = 1$  dag wordt aangebracht. De belasting wordt verspreid over het opgegeven tijdsinterval van 1000 dagen.

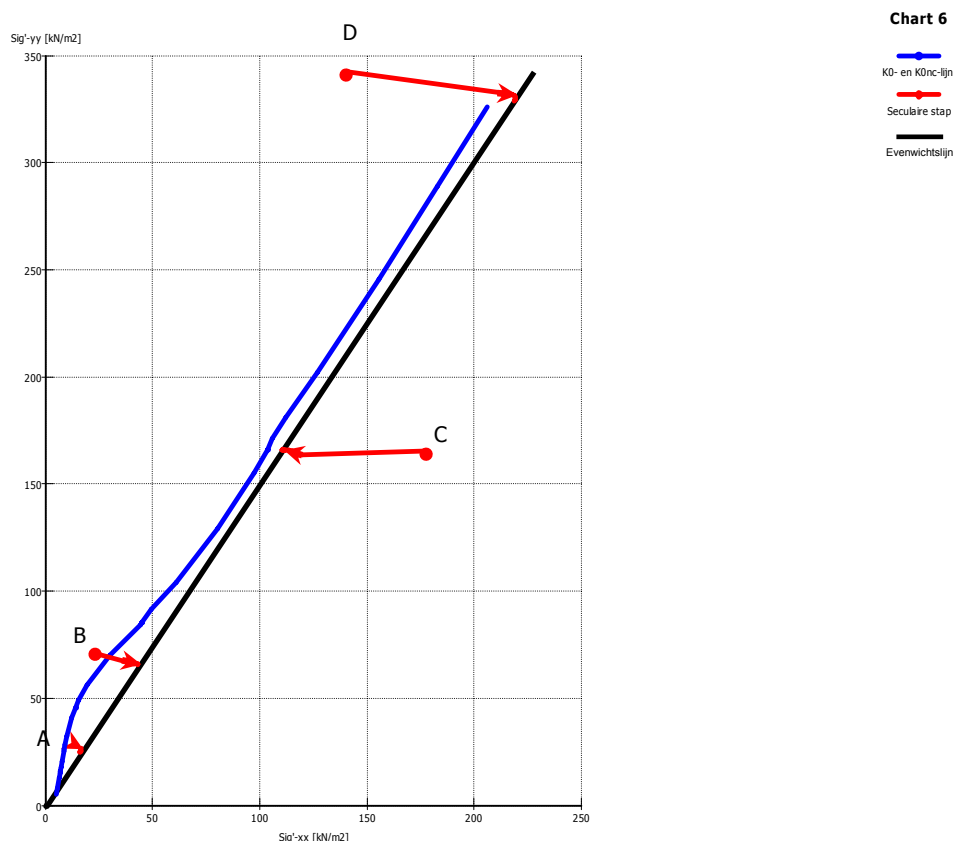
#### Interpretatie Figuur 17B:

- In deze figuur valt op dat de 1 dags spanningsverhogingen van spanningspaden 1 en 3 hetzelfde pad volgen.
- De rek bij de 1000 dagslijn (spanningspad 3) kleiner is dan de rek bij de kruipstappen van spanningspad 3. Door de toename van  $\sigma'_{xx}$  bij de kruipstappen van spanningspad 3, nemen de isotrope en equivalenten spanningen toe. Er treed daardoor naast intrinsieke tijdsafhankelijke seculaire rek ook directe spanningsafhankelijke seculaire rek op. Daarnaast wordt in paragraaf 4.3.3 een andere oorzaak beschreven welke naast de spanningsafhankelijke seculaire rek het gevolg kan zijn van de verschillen.

Er is een beknopte studie gedaan naar de invloed van de kruiptijd,  $\kappa^*$ ,  $\lambda^*$ ,  $\mu^*$ ,  $c$ ,  $\phi$ ,  $\psi$ ,  $v_{ur}$  en  $K_0^{nc}$  op de horizontale spanningsverandering op de  $K_0$ - en  $K_0^{nc}$ -lijn in een samendrukkingsproef. De resultaten hiervan zijn opgenomen in Bijlage 9. Hieruit valt te concluderen dat geen van alle individuele parameters significante invloed heeft op de horizontale spanningsverandering. Wel dient opgemerkt te worden dat de horizontale spanning constant blijft tijdens een kruipstap met  $K_0^{nc} \leq 0,5 \cdot \text{default } K_0^{nc}$ -waarde. De normaal geconsolideerde spanningen komen echter niet altijd overeen met de ingevoerde  $K_0^{nc}$  waarde. Er wordt verder geen aandacht besteed aan deze gevallen. Wel is belangrijk dat de horizontale spanning tijdens kruipstappen op de  $K_0$ - en  $K_0^{nc}$ -lijn in een samendrukkingsproef geen extreem grote veranderingen ondergaat. In Literatuur [15] wordt een fundamentele verklaring gegeven voor deze horizontale spanningsverandering.

### 4.3.2.2. Verandering $\sigma'_{xx}$ boven en beneden de $K_0$ - en $K_0^{nc}$ -lijn

In deze paragraaf zal de horizontale spanningsverandering tijdens intrinsieke tijdsafhankelijke seculaire rek stappen bekeken worden. Deze stappen worden ingezet boven en beneden de  $K_0$ - en  $K_0^{nc}$ -lijn. In Figuur 18 is het 'normale' spanningsverloop tijdens belasten in een samendrukkingsproef uitgezet (blauwe curve). Tevens zijn de kruipstappen vanuit verschillende spanningstoestanden weergegeven. Punt A en C geven spanningstoestanden na ontlasten weer (overgeconsolideerd). Punt B en D zijn ondergeconsolideerde spanningstoestanden. De spanningstoestanden zijn bereikt door de rechter randvoorwaarde van de samendrukkingsproef te vervangen voor een belasting en een voorgeschreven verplaatsing. In eerste instantie wordt zowel een boven- als zijbelasting aangebracht. Door met de verhouding en grote van deze belastingen te variëren, kunnen verschillende spanningstoestanden gecreëerd worden. Er kunnen zowel spanningstoestanden boven als beneden de  $K_0$ - en  $K_0^{nc}$ -lijn bereikt worden. Als een dergelijke spanningstoestand bereikt is, wordt er een voorgeschreven horizontale verplaatsing van 0 meter aan de rechter zijde opgelegd. De rechter belasting is hierbij uitgeschakeld. De verticale belasting wordt constant gehouden t.o.v. de voorgaande stap. Met deze randvoorwaarden wordt de kruipstap ingezet. Deze stap wordt gedurende een periode van  $10^9$  dagen aangehouden. Bij elke kruipstap worden de al opgetreden verplaatsingen uit de voorgaande stappen tot 0 gereduceerd. In Figuur 18 zijn de kruipstappen vanuit de verschillende spanningstoestanden weergegeven. Het belastingschema van deze berekening is opgenomen in Bijlage 10.



**Figuur 18: invloed kruipstap op  $\sigma'_{xx}$  bij onder- of overgeconsolideerde spanningstoestanden, fictieve samendrukkingsproef**

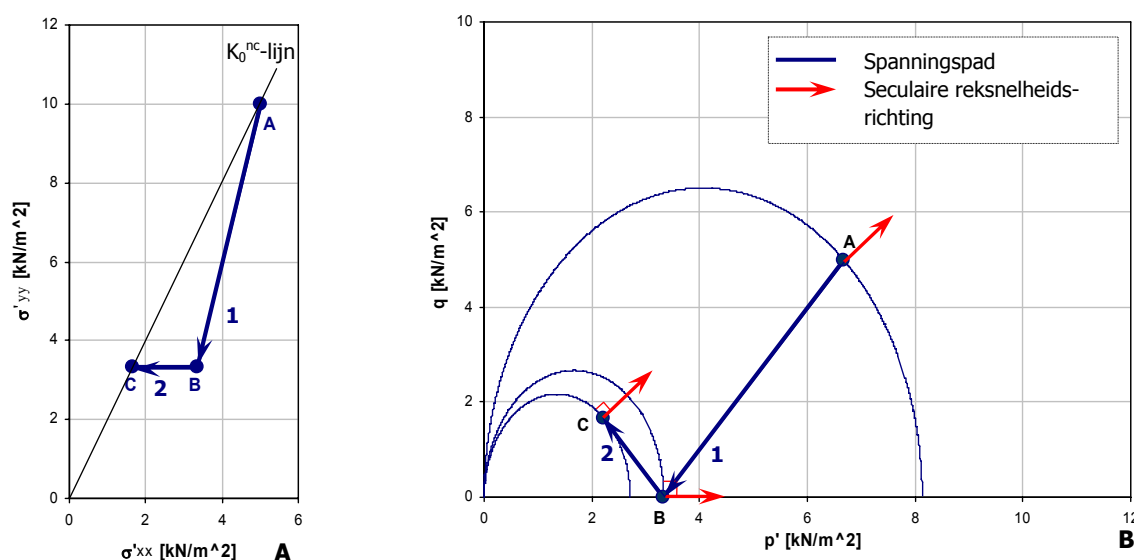
#### Interpretatie Figuur 18:

Ten gevolge van de seculaire stappen verandert de horizontale spanning. De horizontale spanning neemt af dan wel toe totdat de evenwichtslijn (zwarte curve) wordt bereikt. De verticale spanning blijft daarbij zo goed als constant. Deze evenwichtslijn is een verbindingslijn van de punten aan het einde van kruipstappen, startende op de  $K_0$ - en  $K_0^{nc}$ -lijn, zoals beschreven in paragraaf 4.3.2.1. Er kan opgemerkt worden dat deze lijn in beperkte mate afwijkt van de  $K_0^{nc}$ -lijn. Er wordt er daarom verder in dit rapport ook vanuit gegaan dat de evenwichtslijn gelijk is aan de  $K_0^{nc}$ -lijn.

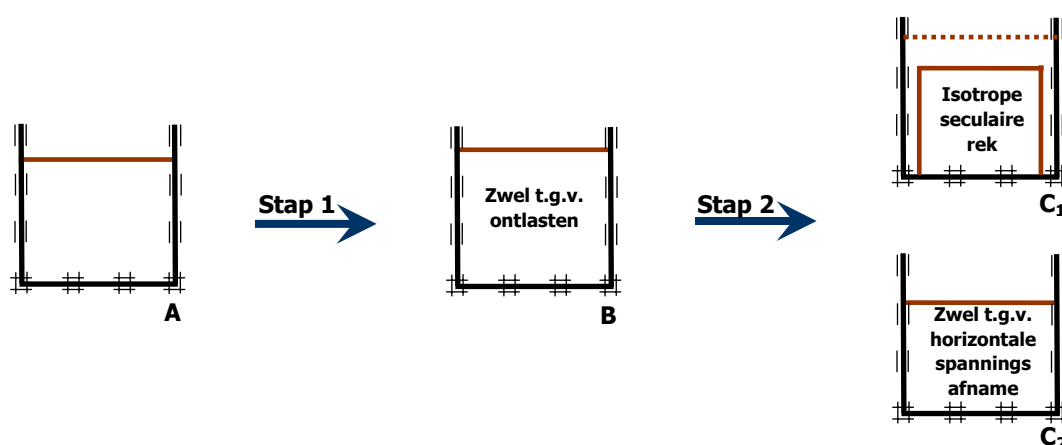
## Verklaring

Op de lange termijn gaan de spanningen in grond zich isotroop verhouden. Het is daarom niet te verklaren dat  $\sigma'_{xx}$  eerst groter kan zijn dan  $\sigma'_{yy}$  en vervolgens kleiner wordt. Mocht  $\sigma'_{xx}$  dan al veranderen, dan zou eerder verwacht worden dat de twee spanningen gelijk worden aan elkaar.

Modeltechnisch gezien kan dit gedrag wel worden verklaard. A.d.h.v. Figuur 19 en Figuur 20 zal dit worden beschreven. In Figuur 19A en B is een spanningspad weergegeven waarbij vanuit een normaalgeconsolideerde spanningstoestand een ontlaststap wordt ingezet (stap 1). Na deze ontlaststap wordt een kruipstap ingezet (stap 2). In Figuur 19B is tevens de richting van de seculaire reksnelheid bij de verschillende spanningstoestanden weergegeven, welke altijd loodrecht op de equivalente spanningsellips staat. In Figuur 20 is de invloed van de spanningspaden op de vervorming weergegeven (tijdens 1-dimensionale samendrukking).



Figuur 19A en B: spanningsverloop tijdens kruip in overgeconsolideerde spanningstoestanden waarbij  $K$  groter is dan  $K_0^{nc}$



Figuur 20 A, B en C: modeltechnische verklaring voor de afname van de horizontale spanning tijdens kruip bij overgeconsolideerde spanningstoestanden waarbij  $K$  groter is dan  $K_0^{nc}$

Interpretatie Figuur 19 en Figuur 20:

De bereikte spanning na ontlasten is isotroop (spanningspunt B), de horizontale spanning is gelijk aan de verticale spanning en de deviatorische spanning is  $0 \text{ kN/m}^2$ . Uit Figuur 19A volgt dat tijdens de kruipstap (stap 2) de horizontale spanning afneemt en de verticale spanning gelijk blijft. Een verklaring hiervoor wordt gegeven door de richting van de seculaire reksnelheid in de  $p' - q$  grafiek (Figuur 19B). In de isotrope spanningssituatie (spanningspunt B) volgt de seculaire reksnelheidsrichting de isotrope spanningsas. T.g.v. intrinsieke tijdsafhankelijk seculaire rek wil het monster isotroop vervormen (de reksnelheidsrichting heeft geen deviatorische component). Dit betekent dat er naast verticale vervorming horizontale vervormingen optreden (Figuur 20C<sub>1</sub>). De randvoorwaarden geven echter aan dat het monster horizontaal is ingeklemd. Horizontale compactie gaat daardoor gepaard met horizontale spanningsafname. T.g.v. van deze spanningsafname zwelt het monster waardoor aan de randvoorwaarden voldaan worden (Figuur 20C<sub>2</sub>). Dit proces wordt iteratief doorgezet totdat de horizontale / verticale spanningverhouding gelijk is aan  $K_0^{nc}$  / evenwichtslijn. Op dat moment is het aandeel deviatorische en volumieke seculaire reksnelheid volgend uit de seculaire reksnelheidsrichting (zie ook paragraaf 4.2.2) zo verdeeld dat er enkel verticale vervormingen zullen optreden t.g.v. intrinsieke tijdsafhankelijke seculaire rek. De horizontale spanningen hoeven zich nu niet meer aan te passen en er is een constante spanningssituatie ontstaan.

Voor spanningspunten waarbij  $K$  kleiner is dan  $K_0^{nc}$  neemt de horizontale spanning toe t.g.v. kruipstappen. In dergelijke situaties is het aandeel deviatorische reksnelheid 'te' groot. Hierdoor wil het monster expanderen in horizontale richting, dit wordt echter tegengegaan door de randvoorwaarde met horizontale spanningstoename tot gevolg.

In hoofdstuk 8 van Literatuur [15] is de horizontale spanningsafname t.g.v. kruip formule technisch beschreven. Verder wordt ingegaan op de tijd die nodig is voor de spanningsafname. Samengevat volgt hieruit dat  $K$  vanuit verschillende overgeconsolideerde spanningstoestanden in eerste instantie constant blijft. Deze periode varieert bij de uitgevoerde berekeningen tussen de 100 dagen en 3000 jaar en is mede afhankelijk van de waarde voor  $K$ .

### 4.3.3. OCR op 1 dagslijn

Tijdens verschillende gedraineerde 1-dimensionale vervormingsberekeningen viel op dat de  $OCR_{p'eq}$  op de 1 dagslijn regelmatig kleiner is dan 1 (ondergeconsolideerd). De 1 dagslijn wordt bereikt door de belastingen gedurende 1 dag aan te brengen. Intrinsieke tijdsafhankelijk seculaire rek zal in dergelijke gevallen overschat worden, omdat de initiële kruipsnelheid groter is. Een  $OCR_{p'eq}$  van 1 wordt bereikt als de verticale spanningstoename in verhouding staat met de ingevoerde  $OCR_{yy}$  of  $POP_{yy}$ .

Indien de initiële verticale spanning en verticale grensspanning respectievelijk 10 en 20 kN/m<sup>2</sup> zijn, kan worden gekozen voor een  $OCR_{yy}$  van 2 of een  $POP_{yy}$  van 10 kN/m<sup>2</sup>. De door het programma berekende,  $OCR_{p'eq}$  van 1 wordt bereikt als de verticale spanning wordt verhoogd van 10 kN/m<sup>2</sup> naar 20 kN/m<sup>2</sup>. Wordt de verticale spanning echter verder verhoogd dan kan de  $OCR_{p'eq}$  kleiner worden dan 1. Om een  $OCR_{p'eq}$  van 1 te bereiken dient de tijdsduur verhoogd te worden. De intrinsieke tijdsafhankelijke seculaire rek neemt daardoor toe, hetgeen gepaard gaat met een toename van de  $OCR_{p'eq}$ .

De oorzaak achter de onderschatting van de OCR bij gedraineerde berekeningen is onbekend. Het ligt i.i.g. niet aan het aantal iteraties. Kleinere waarden voor de tolerated error geven geen betere resultaten. Er dient daarom met voorzichtigheid te worden omgegaan met gedraineerde berekeningen. De benodigde OCR kan bereikt worden door de tijdsduur te vergroten.

De ontwikkeling van de  $OCR_{p'eq}$  bij consolidatieberekeningen verloopt goed. Een  $OCR_{p'eq}$  van 1 wordt bereikt op de 1 dagslijn.

## 4.4. Simulatie samendrukkingsproef

In paragraaf 4.2.3 zijn verschillende modeleigenschappen beschreven. In deze paragraaf wordt het model gevalideerd a.d.h.v. een echte samendrukkingsproef. Onderzoeksvraag 3, *verificatie van de gevonden oorzaken bij onderzoeksvraag 1 a.d.h.v. samendrukkingsproeven en bestaande projecten*, wordt hierbij deels beantwoord. De verificatie a.d.h.v. bestaande projecten zal bij de case study (hoofdstuk 5) aan bod komen. Hier wordt alleen ingegaan op de verificatie a.d.h.v. een samendrukkingsproef.

Er is gekozen voor een proef waarbij de voorbelast-, herbelast- en ontlasttakken ongeveer dezelfde richtingcoëfficiënt ( $\kappa^*$ ) hebben. De modelparameter  $\kappa^*$  kan dan nauwkeurig bepaald worden. Bij veel samendrukkingsproeven wordt er een verschil in richtingcoëfficiënt ( $\kappa^*$ ) gevonden bij voorbelast-, herbelast- en ontlasttakken. Het betreft een klei monster uit Nigeria met proefnummer 3aWAXA-NIG-BR.

Naast de meetwaarde en SSC berekening wordt er een berekening gemaakt in MSettle met het a,b,c-Isotachenmodel.

Aangezien het beschreven modelgedrag uit paragraaf 4.2.3 bij het maken van berekeningen in het achterhoofd moet worden gehouden, worden deze onderstaand nogmaals opgesomd.

- De verhouding  $a / \kappa^*$  is conform paragraaf 3.4 niet constant indien K niet constant is.
- Een ontlasttak is beperkt m.b.t. het Mohr-Coulomb bezwijkcriterium. Ontlasten tot de Mohr-Coulomb bezwijklijn geeft een vreemd zettingsverloop.
- Horizontale spanningsverandering tijdens kruip.

M.b.v. Oedometer\_v1.10b.xls, een parameterextractie programma, zijn de 1-dimensionale modelparameters (a, b en c),  $c_v$ - en k-waarde bepaald. In Bijlage 11 is het belastingschema en de parameter bepaling uitvoerig beschreven.

Uit de opgedane kennis uit paragraaf 3.3.1.2.1 en 3.4 kan beredeneerd worden dat een samendrukkingsproef het beste gesimuleerd wordt door  $v_{ur}$  te berekenen m.b.v. Vergelijking 85 (de wet van Hooke voor v).

$$v_{ur} = \frac{K_0^{nc}}{1 + K_0^{nc}}$$

### Vergelijking 85

$v$  is nu gelijk aan  $v_{ur}$  en daarmee is K constant bij belasten, ontlasten en herbelasten. Dit betekent dat de verticale, isotrope en equivalente spanningsverhoudingen constant zijn. De SSC parameters kunnen nu ook beschreven worden in een verticale spannings – rek grafiek. De verhouding  $a / \kappa^*$  wordt dan beschreven door Vergelijking 76. Vergelijking 85 mag alleen gebruikt worden voor 1-dimensionale berekeningen! De verticale / horizontale spanningsverhouding zal bij dergelijke waarden voor  $v_{ur}$  niet realistisch zijn tijdens ontlasten- herbelasttrappen.

$$\kappa^* = a \text{ (indien K constant is)}$$

### Vergelijking 76

Voor de samendrukkingcoëfficiënt ( $\lambda^*$ ) en seculaire rek coëfficiënt ( $\mu^*$ ) geldt in alle omstandigheden dat de verhouding met de 1-dimensionale parameters (b en c) gelijk is aan 1. In verticale spannings – rek grafieken kan het a,b,c-Isotachenmodel rechtstreeks met het SSC model worden vergeleken. Een ander bijkomend voordeel is dat het onwaarschijnlijk is dat het Mohr-Coulomb bezwijkcriterium bereikt wordt bij ontlasttrappen. De ontlast curve gaat immers richting de oorsprong in een  $\sigma'_{yy}$  -  $\sigma'_{xx}$  grafiek (indien  $c \approx 0 \text{ kN m}^2$ ).

Op basis van de hierboven beschreven modeleigenschappen wordt verwacht dat in een verticale spannings – rek grafiek de SSC en a,b,c-Isotachen berekeningen dezelfde resultaten geven.

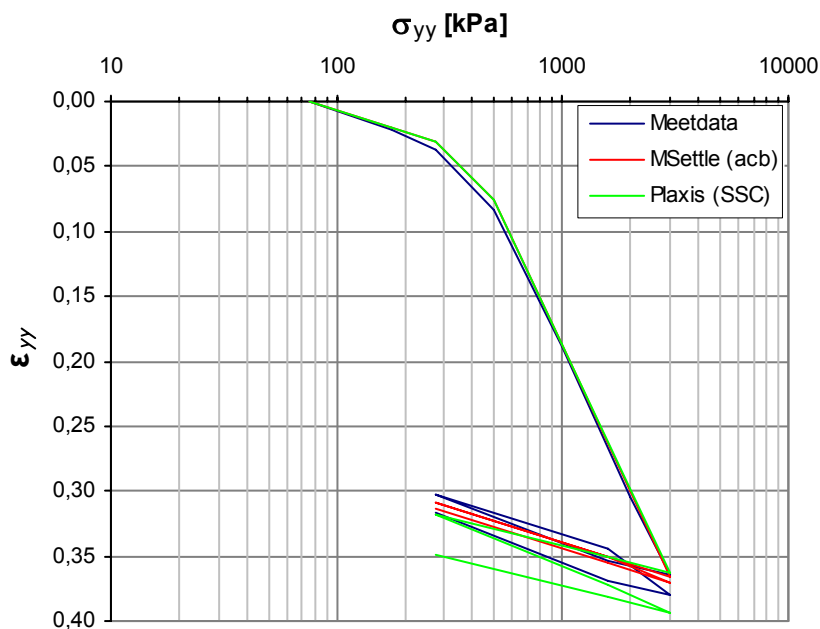
In Tabel 5 zijn voor beide modellen de belangrijkste modelparameters opgenomen.

| a,b,c-isotachenmodel  |                            | SSC model   |              |
|-----------------------|----------------------------|-------------|--------------|
| a                     | 0,0234                     | $\kappa^*$  | 0,0234       |
| b                     | 0,1606                     | $\lambda^*$ | 0,1606       |
| c                     | 0,0072                     | $\mu^*$     | 0,0072       |
| $c_v$                 | 3,62E-08 m <sup>2</sup> /s | $v_{ur}$    | 0,33         |
| $\sigma_{yy;p}$       |                            | $K_0^{nc}$  | 0,5          |
| 400 kN/m <sup>2</sup> |                            | k           | 1,00E-05 m/d |

Tabel 5: modelparameters, simulatie samendrukkingsproef<sup>5</sup>

### Resultaten met interpretatie

In Figuur 21 zijn in een  $\sigma'_{yy} - \epsilon_{yy}$  grafiek de meetresultaten en berekeningsresultaten weergegeven.



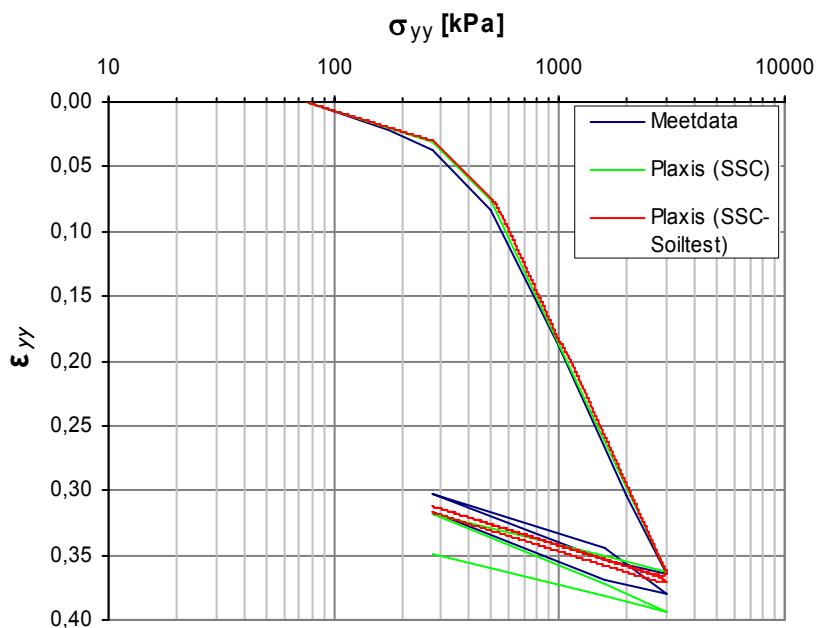
Figuur 21:  $\sigma'_{yy} - \epsilon_{yy}$  grafiek, simulatie samendrukkingsproef met meetresultaten a,b,c-Isotachen en SSC resultaten voor  $v_{ur} = 0,33$

<sup>5</sup> De MSettle berekening is gemaakt met de consolidatiecoëfficiënt i.p.v. de permeabiliteit. Dit omdat de permeabiliteit in m/s buiten de range van de invoerwaarde ligt. Samendrukkingsproef simulaties in MSettle zijn daardoor vaak niet mogelijk in combinatie met de permeabiliteit in m/s. De permeabiliteit is dan vaak een orde te klein.

Interpretatie Figuur 21:

- In het voorbelaste gebied komen de a,b,c-Isotachen resultaten exact overeen met de SSC resultaten. De resultaten wijken verwaarloosbaar af van de meetresultaten. De herberekende  $a$  en  $\kappa^*$  zijn gelijk aan de ingevoerde waarde.
- In het maagdelijke gebied (de 1 dagslijn) blijven beide modellen hetzelfde pad volgen. De afwijking m.b.t. de meetresultaten is wederom verwaarloosbaar.
- De meetresultaten laten kleine verschillen zien tussen de richtingscoëfficiënten van de ontlast- en herbelasttakken. Dit fenomeen treedt bij meerdere samendrukkingsproefresultaten op, daarentegen zijn de modelbeschrijvingen voor zowel ontlasten als herbelasten gebaseerd op dezelfde richtingscoëfficiënt ( $\kappa^*$ ). Het a,b,c-Isotachenmodel benadert dit correct;  $a = 0,0234$  zoals ingevoerd. In de laatste herbelaststap treedt enige zichtbare intrinsieke tijdsafhankelijke seculaire rek op (de 1 dagslijn wordt bereikt), waardoor er een afwijking ontstaat in de richtingscoëfficiënt. Het SSC model geeft beduidend grotere afwijkingen in de richtingscoëfficiënten van de ontlast- en herbelasttrappen. Voor de ontlast- en herbelasttakken geldt respectievelijk  $\kappa^* = 0,0186$  en  $0,0316$ . De niet natuurlijke verhouding tussen  $v_{ur}$  en  $K_0^{nc}$  én de grootte van de belastingstappen zijn in dit geval de oorzaak van deze significante afwijkingen. In Bijlage 12 is dit uitvoerig beschreven.

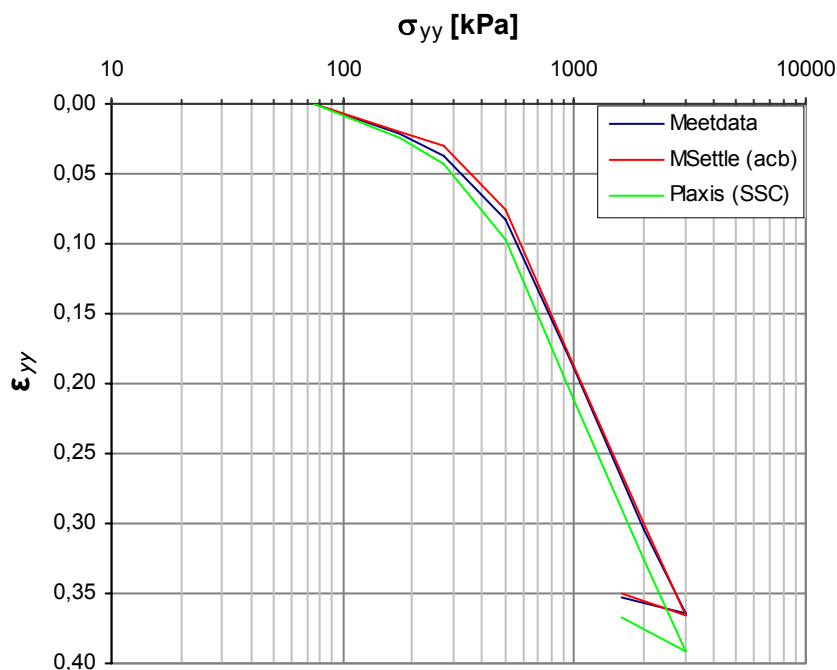
Naast de bovenstaande SSC berekening is een berekening gemaakt met de Soiltest optie in Plaxis. De Soiltest is een single point method waarbij triaxiaal- of samendrukkingsproeven kunnen worden gesimuleerd. De resultaten van deze berekening zijn weergegeven in Figuur 22.



**Figuur 22:  $\sigma'_{yy}$  -  $\epsilon_{yy}$  grafiek, simulatie samendrukkingsproef met meetresultaten, SSC en SSC-soiltest resultaten voor  $K$  is constant ( $v_{ur} = 0,33$ )**

Uit de figuur blijkt dat de Soiltest het spannings-rek verloop goed beschrijft. In tegenstelling tot de SSC berekening waarbij een mesh is gedefinieerd, verlopen de ontlast- en herbelaststappen in de Soiltest zoals het model deze beschrijft, volgens hetzelfde spannings – rek pad.

In de twee voorafgaande berekeningen is  $v_{ur}$  berekend m.b.v. Vergelijking 85. Er wordt nu nog een berekening gemaakt met een meer realistische waarde voor  $v_{ur}$  ( $v_{ur} = 0,15$ ).  $K$  is nu niet constant in overgeconsolideerde spanningssituaties. Voor het voorbelaste traject geldt dat het gemiddelde van  $K$ , 1,5 is.  $\kappa^*$  is nu  $3a$ , dit volgt uit Vergelijking 77,  $\kappa^* = 0,0702$ . De ontlast- en herbelasttrappen aan het einde van de proef zijn niet gesimuleerd, omdat het monster bezweek. Bezwijken geeft een vreemd verloop in spannings – rek curven (zie paragraaf 4.3.1).



**Figuur 23:  $\sigma'_{yy}$  -  $\epsilon$  grafiek, simulatie samendrukkingsproef met meetresultaten, a,b,c-Isotachen en SSC resultaten voor  $\nu_{ur} = 0,15$  en  $K_{gem} = 1,5$**

#### Interpretatie Figuur 23:

- In dit geval overschat het SSC model de rek bij gebruik van realistische waarden voor  $\nu_{ur}$ . Dit komt doordat de directe rek overschat wordt. Bij kleinere (meer voorkomende) OCR-waarde zal het verschil afnemen. De OCR in deze berekening is 5,33. Het rekverschil is normaliter verwaarloosbaar.
- De 1 dagslijnen van het SSC model en a,b,c-Isotachenmodel lopen parallel aan elkaar. Dit is logisch, omdat de helling van de 1 dagslijn bepaald wordt door de samendrukkingsparameter ( $\lambda^*$ ), welke constant is gebleven. Verder is de verticale / isotrope spanningsverhouding constant, de spanningsafhankelijke rek kan met willekeurige spanningen worden beschreven.

### **Conclusie**

Geconcludeerd kan worden dat de samendrukkingsproef het beste benaderd wordt door het a,b,c-Isotachenmodel en de Soiltest van het SSC model. De gemodelleerde samendrukkingsproef in het SSC model met een constante waarde voor  $K$  geeft correcte resultaten voor het voorbelaste en maagdelijke gebied. Bij herbelasten treden er echter grote afwijkingen op t.o.v. de verwachte richtingscoëfficiënt ( $\kappa^*$ ). Dit komt mede door de onrealistische waarde van  $\nu_{ur}$ . Er wordt daarom aangeraden een samendrukkingsproef te simuleren m.b.v. de Soiltest waarbij  $\nu_{ur}$  is berekend volgens Vergelijking 85.  $K$  blijft daardoor constant tijdens het hele belastingstraject.

Voor het berekenen van 1-dimensionale verticale vervormingen van een meerlagensysteem dient een geometrie aangemaakt te worden, de Soiltest is daarvoor ongeschikt. Bij ontlasten-herbelasten dient het verschil in richtingscoëfficiënt van de herbelast- ontlastcurve in de gaten te worden gehouden.

Met nadruk moet opgemerkt worden dat een berekening met een constante waarde voor  $K$  alleen gemaakt mag worden indien het om een 1-dimensionale berekening gaat. Bij 2D en 3D berekeningen dient  $\nu_{ur}$  zorgvuldig bepaald te worden.

De onderzoeksvraag 4, *verificatie van de gevonden oorzaken bij onderzoeksvraag 1 a.d.h.v. samendrukkingsproeven en bestaande projecten*, is hiermee deels beantwoord. Voor 1-dimensionale samendrukking is de verticale vervorming van het SSC model gelijk aan de verticale vervorming van het a,b,c-Isotachenmodel,  $K$  dient dan wel constant te zijn. Indien  $K$  niet constant is ontstaan er normaliter te verwaarlozen verschillen tussen de twee modellen.

## 4.5. Simulatie triaxiaalproef

In deze paragraaf wordt het model gevalideerd a.d.h.v. een geconsolideerde ongedraineerde triaxiaalproef (CU triaxiaalproef).

Onderzoeksvraag 5, *Het model valideren aan 2-dimensionale grondvervormingen. Dit zal gebeuren a.d.h.v. een triaxiaalproef en een case study*, wordt hiermee deels beantwoord. De validatie a.d.h.v. de case study komt in hoofdstuk 5 aan bod.

De triaxiaalproef is verricht op een 3,99 m diep liggende siltige kleilaag ter plaatse van de No-Recess case in 's Gravendeel (NL). Er is voor deze locatie gekozen, omdat later in dit rapport een case study wordt verricht met de gegevens van dezelfde test locatie. Naast de triaxiaalproef is er een samendrukkingsproef verricht op dezelfde laag, op ongeveer dezelfde diepte. Uit deze samendrukkingsproef volgen de verticale permeabiliteit, verticale grensspanning,  $\kappa^*$ ,  $\lambda^*$  en  $\mu^*$ . Zowel de samendrukkings- als triaxiaalproef monsters hebben de codering B01-9.

De verrichte triaxiaalproeven voor de No-Recess case betreffen allen multi-stage proeven op klei of veen. Een deviatorisch spanningspad wordt hiermee gesimuleerd door het monster met een voorgeschreven constante verticale vervormingssnelheid te belasten. Voorafgaande aan het deviatorische spanningspad wordt het monster in een consolidatiefase alzijdig belast.

Er is gekozen voor een kleimonster. Dit omdat veen heterogener is en daarmee anisotroop gedrag vertoont. Zoals eerder beschreven valt anisotroop gedrag niet met het SSC model te simuleren. Niettemin bevat de klei veensporen en is zeer siltig, heterogeen gedrag is daardoor niet uitgesloten.

Verder is de keuze gebaseerd op de samendrukkingsproef resultaten. Uit de samendrukkingsproef, verricht op dezelfde laag als de gekozen triaxiaalproef, volgen aannemelijke verhoudingen tussen  $\kappa^*$ ,  $\lambda^*$  en  $\mu^*$  (zie ook paragraaf 3.3.1.2.2). De resultaten uit de samendrukkingsproef zijn in Tabel 6 opgenomen.

|                   |                      |
|-------------------|----------------------|
| $\kappa^* = 1,5a$ | 0,057                |
| $\lambda^*$       | 0,1392               |
| $\mu^*$           | 0,0078               |
| $k$               | 5,184E-05 m/d        |
| $\sigma'_{yy;p}$  | 40 kN/m <sup>2</sup> |

**Tabel 6: samendrukkingsproefresultaten horende bij gesimuleerde triaxiaalproef**

De hoek van inwendige wrijving volgend uit de triaxiaalproef is  $17^\circ$  (bij een verticale rek van 2%). Volgens de vuistregel van Jaky is  $K_0^{nc}$  dan gelijk aan 0,707.  $\sigma'_{xx;p}$  is dan gelijk aan 28,3 kN/m<sup>2</sup>. Dit resulteert in een equivalente grensspanning van; 32 kN/m<sup>2</sup>.

In de eerste consolidatiefase van de triaxiaalproef wordt de celdruk opgevoerd tot 16 kN/m<sup>2</sup> dit resulteert in een equivalente spanning van 16 kN/m<sup>2</sup> (die gelijk is aan de isotrope spanning). Deze isotrope spanningsverhoging bevindt zich beneden de equivalente grensspanning. Dit resulteert voor de consolidatie fase van de 1<sup>ste</sup> stap in stijf vervormingsgedrag. De spanningsverhoging bevindt zich op de stijve directe rek tak ( $\kappa^*$ ). Conform homogeen / isotroop gedrag mogen er geen verschillen optreden tussen de horizontale en verticale rek t.g.v. deze belastingsverhoging. De verhouding tussen de opgetreden verticale en horizontale rek is 1,54. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de metingen regelmatig onbetrouwbaar zijn.

De mate van anisotropie valt helaas niet op een betrouwbare manier uit de eerste consolidatie fase van de triaxiaalproeven af te leiden. Dit kan naast onnauwkeurige metingen te maken hebben met monsterverstoring.

In Bijlage 1 is een gedachtegang weergegeven waarbij de mate van anisotropie in een triaxiaalproef bepaald kan worden. Daarnaast is in deze bijlage beschreven op welke manier de equivalente grensspanning zoals deze door het SSC model beschreven wordt, overeenkomt met de praktijk.

In theorie zijn de initiële spanningen praktisch 0 kN/m<sup>2</sup>. De initiële spanningen bestaan immers alleen uit de spanningen volgend uit het eigen gewicht. Voor dit monster zou  $p'$  beneden in het monster 0,26 kN/m<sup>2</sup> zijn. Boven in het monster is  $p'$  gelijk aan 0 kN/m<sup>2</sup>. Voor dergelijk kleine initiële spanningen worden de rekken, wanneer deze worden berekend volgens de formules, extreem overschat. Uitgaande van een gemiddelde  $p'$  van 0,16 kN/m<sup>2</sup> wordt een rek berekend van 26%. Deze rek ligt ver boven de gemeten waarde van 4%.

Gebaseerd op de hierboven beschreven beperking m.b.t. de initiële spanning is ervoor gekozen de eerste consolidatiefase niet te simuleren.

Na de eerste deviatorische belastingsfase wordt het monster verticaal ontlast, de celdruk blijft daarbij constant. Door deze ontlaststap zal het monster zwellen. De mate van zwel is onbekend, omdat deze niet gemeten is. Verder is het monster deviatorisch vervormd, waarbij de vorm onbekend is. Door deze beperkingen is besloten alleen de eerste deviatorische fase te simuleren.

Het deviatorische deel van stap 1 kan zowel met de soiltest als met een gedefinieerd mesh gesimuleerd worden. Beide varianten hebben zo hun voor- en nadelen, welke in Tabel 7 zijn beschreven.

|          | Voordelen                                                                                                                                        | Nadelen                                                                                                                                                                                                                            |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Soiltest | Tot maximaal 500 rekenstappen kunnen ingevoerd worden. Dit zijn genoeg stappen om de kruipcontour en daarmee wateroverspanningen te ontwikkelen. | Grensspanning dient ingevoerd te worden als een isotrope spanning.                                                                                                                                                                 |
|          |                                                                                                                                                  | Vervormingssnelheid is onbekend.                                                                                                                                                                                                   |
|          |                                                                                                                                                  | Er is slechts 1 consolidatiefase per proef mogelijk.                                                                                                                                                                               |
| Mesh     | Grensspanning is anisotroop in te voeren.                                                                                                        | Het aantal rekenstappen is niet rechtstreeks te bepalen en het tijdsinterval in een triaxiaalproef is erg klein. Bij weinig stappen of een klein tijdsinterval wordt de ontwikkeling van wateroverspanningen onnauwkeurig bepaald. |

**Tabel 7: Voor- en nadelen Soiltest en gedefinieerd mesh bij simulatie CU triaxiaalproef**

Bij de simulatie van het deviatorische deel van stap 1 is de initiële equivalente spanning kleiner dan de geschatte equivalente grensspanning. De verwachte equivalente grensspanning aan het einde van de deviatorische stap zal de equivalente grensspanning niet overschrijven. Aangezien het monster ook tijdens de deviatorische fase overgeconsolideerd blijft, wordt verwacht dat de ontwikkeling van wateroverspanningen niet gedomineerd wordt door intrinsieke tijdsafhankelijke seculaire rek. Deze stap kan daarmee door zowel de Soiltest als een gedefinieerd Mesh gesimuleerd worden.

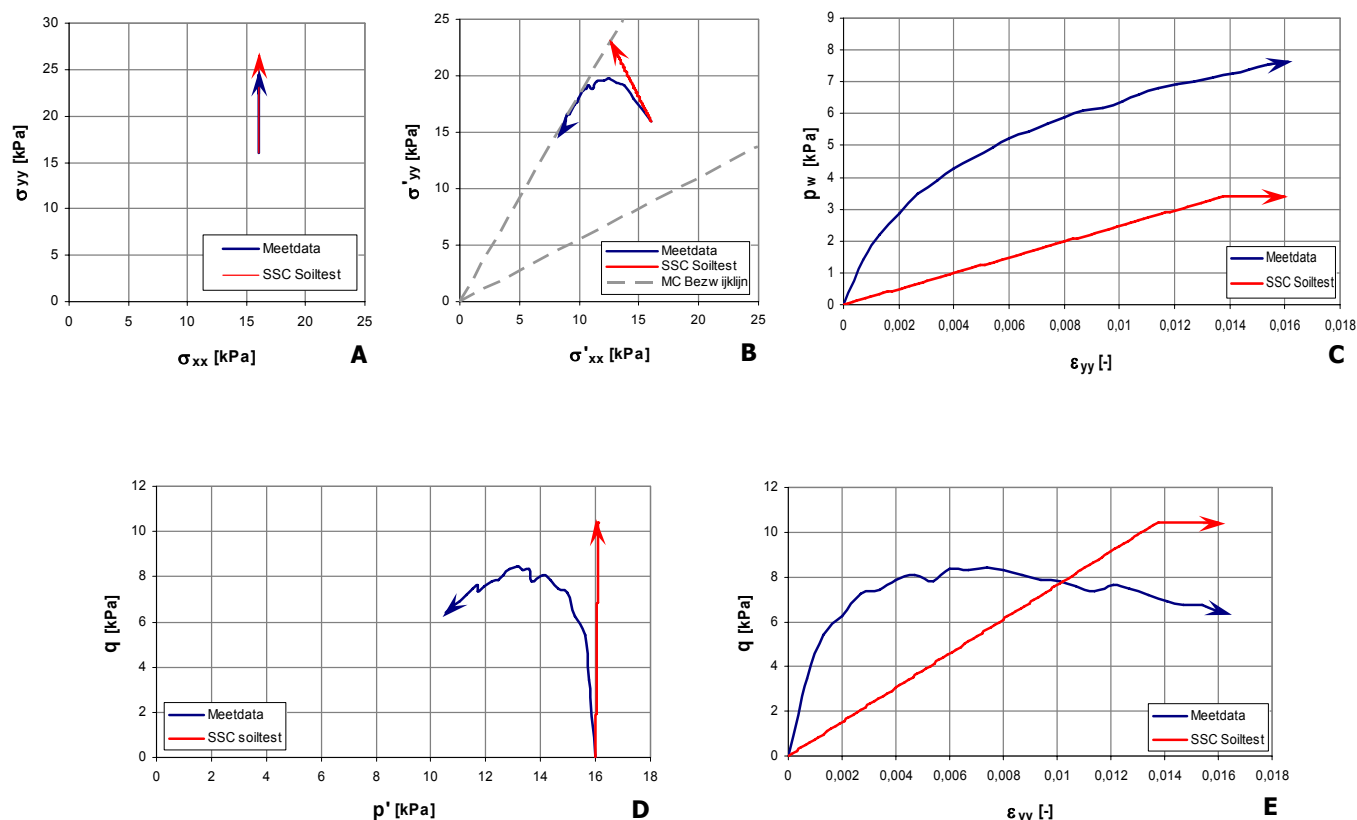
Er is willekeurig gekozen voor de Soiltest. De isotrope grensspanning is berekend a.d.h.v het gemiddelde van de horizontale en verticale grensspanningen ( $p'_p = 32 \text{ kN/m}^2$ ). In Tabel 8 zijn de resterende materiaal eigenschappen gegeven.

|                   |       |                     |
|-------------------|-------|---------------------|
| $\gamma$          | 0,00  | $\text{kN/m}^3$     |
| $c$               | 0,00  | $\text{kN/m}^2$     |
| $\varphi$         | 17,00 | $^\circ$            |
| $\psi$            | 0,00  | $^\circ$            |
| $K_0^{\text{nc}}$ | 0,71  | <i>Volgens Jaky</i> |
| $M$               | 0,91  |                     |
| $\nu_{\text{ur}}$ | 0,15  | <i>Aangenomen</i>   |
| Skempton-B        | 0,97  |                     |

**Tabel 8: modelparameters, gesimuleerde triaxiaalproef**

## Resultaten met interpretatie

De meetresultaten zullen a.d.h.v. de onderstaande grafieken worden vergeleken met de SSC Soiltest resultaten.



**Figuur 24A, B, C, D en E: spanningen en spanning-rek grafieken deviatorische belasting stap 1, gesimuleerde triaxiaalproef**

### Algemene interpretatie:

Uit alle grafieken blijkt dat de meetresultaten en de SSC resultaten in slechte mate met elkaar overeenkomen. De rede hiervan is dat het monster zich normaal geconsolideerd gedraagt. De SSC berekening gedraagt zich daarentegen, vanwege de hoge mate van overconsolidatie, overgeconsolideerd. Hieruit mag niet geconcludeerd worden dat het SSC model een CU triaxiaalproef fout benaderd. Externe factoren als monsterverstoring kunnen een belangrijke oorzaak zijn van de verschillen. Bij andere monsters bleek de SSC berekening beter overeen te komen met de meetresultaten. Niettemin wordt verder gegaan met deze resultaten. Er zal daarbij besproken worden waaruit blijkt dat het monster zich volgens de meetresultaten normaal geconsolideerd gedraagt en volgens de SSC simulatie overgeconsolideerd gedraagt.

### Interpretatie Figuur 24A:

- De horizontale spanning blijft naar verwachting voor zowel de meetresultaten als de SSC berekening constant.
- De uiteindelijke verticale spanning is groter in de SSC berekening. Het SSC monster bezwijkt na meer vervorming en een grotere schuifspanning dan de meetresultaten (Figuur 24E). Hierdoor neemt het SSC monster meer spanning op.

Interpretatie Figuur 24B:

- Uit de meetresultaten volgt dat de verticale opgelegde vervorming doorgaat na bezwijken, waardoor de spanningsveranderingen zich volgens de Mohr-Coulomb bezwijklijn voortzetten. Dit in tegenstelling tot de resultaten van de SSC berekening, het spanningspad raakt de Mohr-Coulomb bezwijklijn net. De mate van overconsolidatie speelt hierbij een belangrijke rol. De oorzaak van het verschil in bezwijken is te wijten aan de ontwikkeling van wateroverspanning. De horizontale effectieve spanningen nemen significant meer af dan bij de SSC berekening.
- In tegenstelling tot het spanningspad van de meetresultaten verloopt de SSC berekening nagenoeg volgens een Mohr-Coulomb spanningspad tijdens een CU triaxiaalproef. De effectieve isotrope spanning blijft constant (zie ook Figuur 24D), totdat het Mohr-Coulomb bezwijkcriterium wordt bereikt. De horizontale spanningen nemen af t.g.v. het ontwikkelen van wateroverspanningen. Daarentegen nemen de verticale spanningen 2 keer zo veel toe t.g.v. verticaal belasten. De mate van overconsolidatie is de oorzaak van dit verloop. T.g.v. de relatief hoge OCR, ook aan het einde van de stap, treden er vrijwel geen intrinsieke tijdsafhankelijke seculaire rekken op. Doordat er vrijwel geen intrinsieke tijdsafhankelijke seculaire rekken optreden, treedt er nagenoeg geen extra verhoging van de waterspanning op. De ontwikkelde wateroverspanningen zijn het gevolg van belasten.
- Het spanningspad van de meetresultaten verloopt, voordat het monster bezwijkt, niet volgens een Mohr-Coulomb spanningspad bij een CU triaxiaalproef. Dit omdat er wateroverspanningen ontstaan die niet enkel het gevolg zijn van de opgelegde verticale vervorming. Uit de meetresultaten volgt dat het monster zich normaal geconsolideerd gedraagt. Uit de samendrukkingsproef volgt echter het tegendeel. Waardoor het verschil optreedt is onbekend.

Interpretatie Figuur 24C:

- Zoals reeds beschreven in de interpretatie van Figuur 24B is de ontwikkeling van de wateroverspanningen bij de proef significant groter dan bij de simulatie met het SSC model. Dit wordt bevestigd door deze figuur.
- Bij de resultaten van het SSC model blijkt dat na ongeveer 0,0135 rek de wateroverspanningen constant blijven. De oorzaak hiervan heeft te maken met bezwijken.

Interpretatie Figuur 24D:

- Zoals reeds beschreven blijft de effectieve isotrope spanning bij de SSC berekening constant. Bij de meetresultaten neemt de effectieve isotrope spanning aanzienlijk af, doordat de toename van de wateroverspanningen groter is dan de toename van de totaalspanningen (normaal geconsolideerd gedrag).
- Doordat de effectieve isotrope spanningen constant blijven bij de simulatie met het SSC model kan geconcludeerd worden dat er enkel schuifrekken ontstaan.

Interpretatie Figuur 24E:

- Zowel bij de proefresultaten als bij de SSC resultaten bezwijkt het monster. Bij de SSC berekening gebeurt dit echter pas na een aanzienlijk grotere vervorming. Uit de meetresultaten volgt bij een rek van 0,0015 een stijfheid van 3867 kN/m<sup>2</sup>. Uit de SSC berekening volgt een stijfheid van 765 kN/m<sup>2</sup>. De orde grootte van de stijfheid in het SSC model kan berekend worden a.d.h.v. Vergelijking 86. Deze vergelijking is overgenomen uit Literatuur [7], vergelijking 6.27.

$$E_{ur} = 3(1 - 2\nu_{ur}) \frac{p'}{\kappa^*}$$

**Vergelijking 86**

De ontlast-herbelast stijfheidmodule is hier van kracht, doordat er naar overgeconsolideerde spanningstoestanden wordt gekeken. De berekende stijfheid is 590 kN/m<sup>2</sup> en is in dezelfde orde grootte als de stijfheid volgend uit de grafiek. Een grotere stijfheid in het SSC model is te bereiken door  $\nu_{ur}$  te verlagen of  $\kappa^*$  te verhogen. De invloed van  $\nu_{ur}$  is gering en de waarde voor deze parameter zal normaliter niet veel lager zijn dan 0,15.  $\kappa^*$  beïnvloed de stijfheid één op één, bij een halvering van  $\kappa^*$  verdubbeld de stijfheid. Uit de samendrukkingsproef volgt een  $\kappa^*$  van 0,057. Om de stijfheid uit de proef bij een rek van 0,0015 te simuleren dient  $\kappa^*$  gelijk te zijn aan 0,011, mits  $\nu_{ur}$  constant blijft. De  $\kappa^*$  volgend uit de samendrukkingsproef is dan met

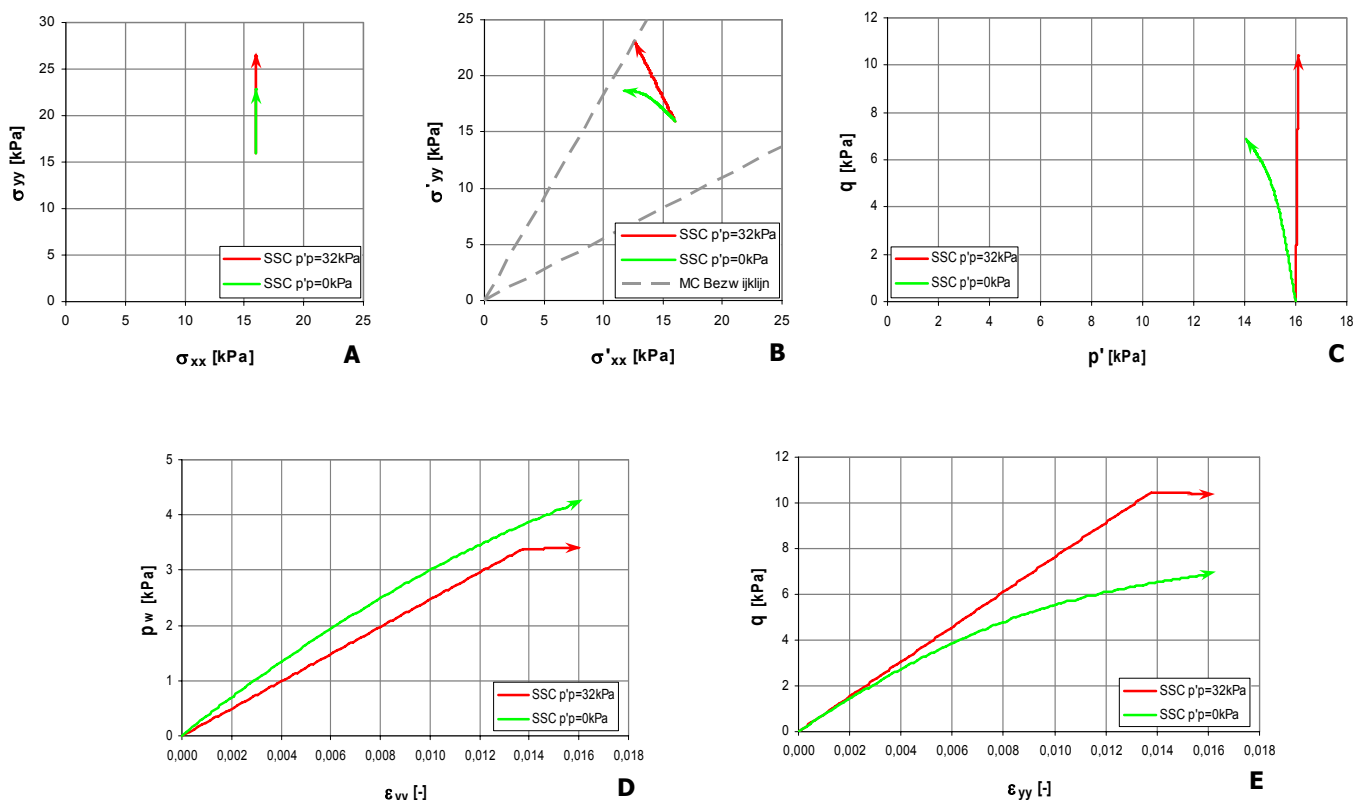
een factor 0,198 vermenigvuldigd. De verhouding  $\frac{\lambda^* - \kappa^*}{\mu^*}$  verandert, maar blijft realistisch. Niettemin lijkt dit

verschil tussen de gevonden  $\kappa^*$ -waarden tijdens verschillende proeven onrealistisch. De mate van overconsolidatie heeft hier een te verwaarlozen invloed op (zie ook Figuur 25E).

Bij meerdere triaxiaalproeven is terug gevonden dat met de  $\kappa^*$  volgend uit de bijbehorende samendrukkingsproef, de stijfheid in de simulatie kleiner is dan de stijfheid volgend uit de meetresultaten. De verschillen zijn echter beduidend kleiner dan uit bovenstaande simulatie volgt. Heterogeniteit / anisotropie gedrag kan hiervan de oorzaak zijn.

Theoretisch gezien lijkt het SSC model het deviatorische pad in overgeconsolideerde grond goed te benaderen. Indien de resultaten vergeleken worden met de meetresultaten volgt echter dat deze twee aanzienlijk andere paden volgen in de verschillende grafieken. Hierbij valt op dat de stijfheid van de nagebootste proef lager is dan de stijfheid op basis van de meetresultaten. Verder lijkt het op basis van de spanningspaden, welke volgen uit de meetresultaten, dat het monster normaal geconsolideerd is. Terwijl uit de samendrukkingsproef resultaten wel duidelijk volgt dat de equivalente grensspanning groter is dan de equivalente spanning die bereikt is tijdens de triaxiaalproef.

In de interpretatie van de meetresultaten en de SSC simulatie komt regelmatig aan de orde dat de verschillen te maken kunnen hebben met het normaal geconsolideerde gedrag dat volgt uit de meetresultaten en het overgeconsolideerde gedrag van de simulatie. Om een indicatie te krijgen van de verschillen die optreden bij normaal en overgeconsolideerd gedrag is hetzelfde monster in de Soiltest nagebootst met een isotrope grensspanning van 0 kN/m<sup>2</sup>. Hierdoor zullen er wateroverspanningen ontstaan t.g.v. intrinsieke tijdsafhankelijke seculaire rek. In de onderstaande grafieken is een grafische weergave getoond van de gevonden verschillen voor het normaal- en overgeconsolideerde monster.



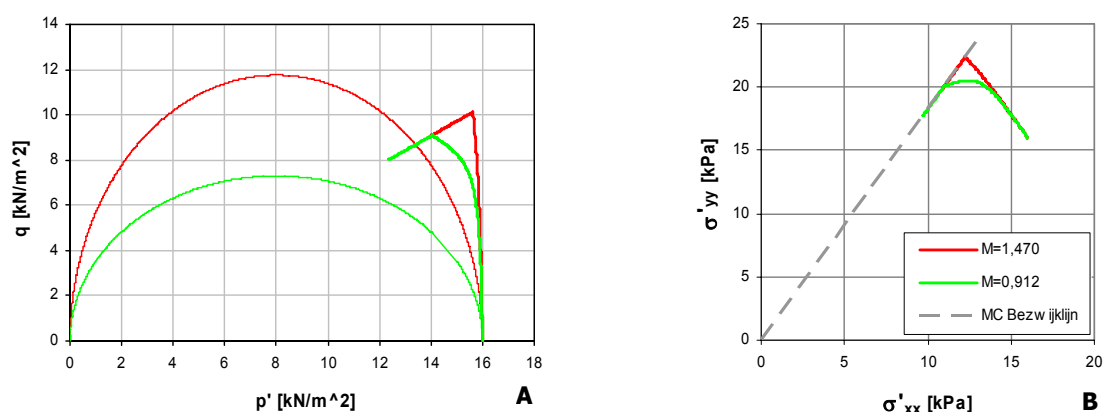
**Figuur 25A, B, C en D: spanningen en spanningen-tek spanningen deviatorische belasting stap 1 triaxiaalproef voor normaal en overgeconsolideerde grond**

#### Interpretatie Figuur 25:

- De bereikte verticale totaalspanning is na het aanbrengen van de voorgeschreven verplaatsing kleiner indien de isotrope grensspanning gelijk is aan 0 kN/m<sup>2</sup>. Er zullen meer wateroverspanningen worden ontwikkeld (Figuur D), waardoor het monster minder verticale spanning kan opnemen. De verschillen in waterspanningen zijn klein, maar zorgt toch voor significante veranderingen in de spanningsspaden van figuur B en C.
- Uit grafiek C volgt dat het normaal geconsolideerde monster nog niet bezwiken is bij de opgelegde verplaatsing. Het bereiken van de Mohr-Coulomb bezwijklijn gaat gepaard met een grotere afname van de effectieve horizontale spanningen bij kleinere effectieve verticale spanningen.
- Bij grotere vervormingen, waardoor het monster bezwijkt, zal softening waargenomen worden. De oorzaak hiervan is te wijten aan het ontstaan van wateroverspanningen t.g.v. intrinsieke tijdsafhankelijke seculaire rek.
- Over de sterkte (figuur E) kan gezegd worden dat deze afneemt naarmate het monster in mindere mate overgeconsolideerd is.
- De stijfheid (Figuur E) is in eerste instantie gelijk aan de stijfheid van het normaal geconsolideerde monster, maar neemt af naarmate de vervormingen toenemen.

Bij het maken van de berekening met het normaal geconsolideerde grondmonster is de invloed van verschillende parameters op de verschillende spanningspaden bekeken. De resultaten hiervan zijn hieronder opgesomd.

- Mits het Mohr-Coulomb bezwijkcriterium niet wordt bereikt zal de hoek van inwendige wrijving ( $\varphi$ ) geen invloed hebben op de spanningspaden.  $\varphi$  heeft alleen invloed op de uiteindelijke sterkte.
- De dilatantiehoek ( $\psi$ ) heeft invloed op de spanningspaden tijdens bezwijken. Na bezwijken zal contractant gedrag gepaard gaan met een toename van de wateroverspanningen. Hierdoor wordt het materiaal minder sterk (softening). Dilatant gedrag gaat gepaard met een afname van de wateroverspanning, waardoor het materiaal sterker wordt (hardening).
- Een grotere waarde voor de  $K_0^{nc}$ -afhankelijke M parameter resulteert in hogere sterkte en een constantere stijfheid tijdens belasten. Een lagere waarde voor M resulteert daarmee in een geleidelijker verloop van de stijfheid naarmate de sterkte bereikt wordt. Verder blijft  $p'$  constanter naarmate M toeneemt. Er ontstaan hierdoor in verhouding meer schuifspanningen. Een verklaring hiervoor kan gezocht worden in de ontwikkeling van de kruipcontour. De ontwikkeling hiervan kost tijd. Indien de equivalente spanning snel groter wordt dan zou er onderconsolidatie op kunnen treden. De equivalente grensspanning neemt minder snel toe dan de equivalente spanning. Dit betekent dat de OCR kleiner is dan 1, waardoor de ontwikkeling van wateroverspanningen t.g.v. intrinsieke tijdsafhankelijke seculaire rek aanzienlijk toeneemt. Dit heeft tot resultaat dat effectieve spanningen afnemen. In Figuur 26A en B is dit grafisch weergegeven.



**Figuur 26A en B: spanningspad verschillen bij verschillende M ( $K_0^{nc}$ )-waarde in normaal geconsolideerde grond deviatorische belasting stap 1, gesimuleerde triaxiaalproef**

#### Interpretatie Figuur 26A:

De ellipsen staan voor de initiële equivalente grensspanning. A.d.h.v. de grafieken valt duidelijk op dat de afstand van het spanningspad horende bij  $M=0,912$  tot de bijbehorende initiële equivalente grensspanningsellips groter is dan geldt voor de afstand van het spanningspad horende bij  $M=1,470$  tot de bijbehorende initiële equivalente grensspanningsellips. De equivalente spanning neemt sneller toe naarmate M afneemt, de afstand tot de grensspanningsellips wordt groter.

#### Interpretatie Figuur 26B:

De spanningspaden geven duidelijk aan dat naarmate M in waarde afneemt, er meer wateroverspanningen ontstaan. De effectieve spanningen nemen namelijk in waarde af.

In deze studie wordt geen onderzoek gedaan naar de invloed van de vervormingssnelheid op de ontwikkeling van intrinsieke tijdsafhankelijke seculaire rek op normaal geconsolideerde monsters. Wel is belangrijk te vermelden dat bij snellere vervormingen minder intrinsieke tijdsafhankelijke seculaire rek kan ontstaan en daarmee dus ook minder wateroverspanningen worden ontwikkeld. De sterkte en stijfheid zullen daardoor toenemen. Voor meer informatie over dit onderwerp wordt verwezen naar literatuur [7].

**Conclusie**

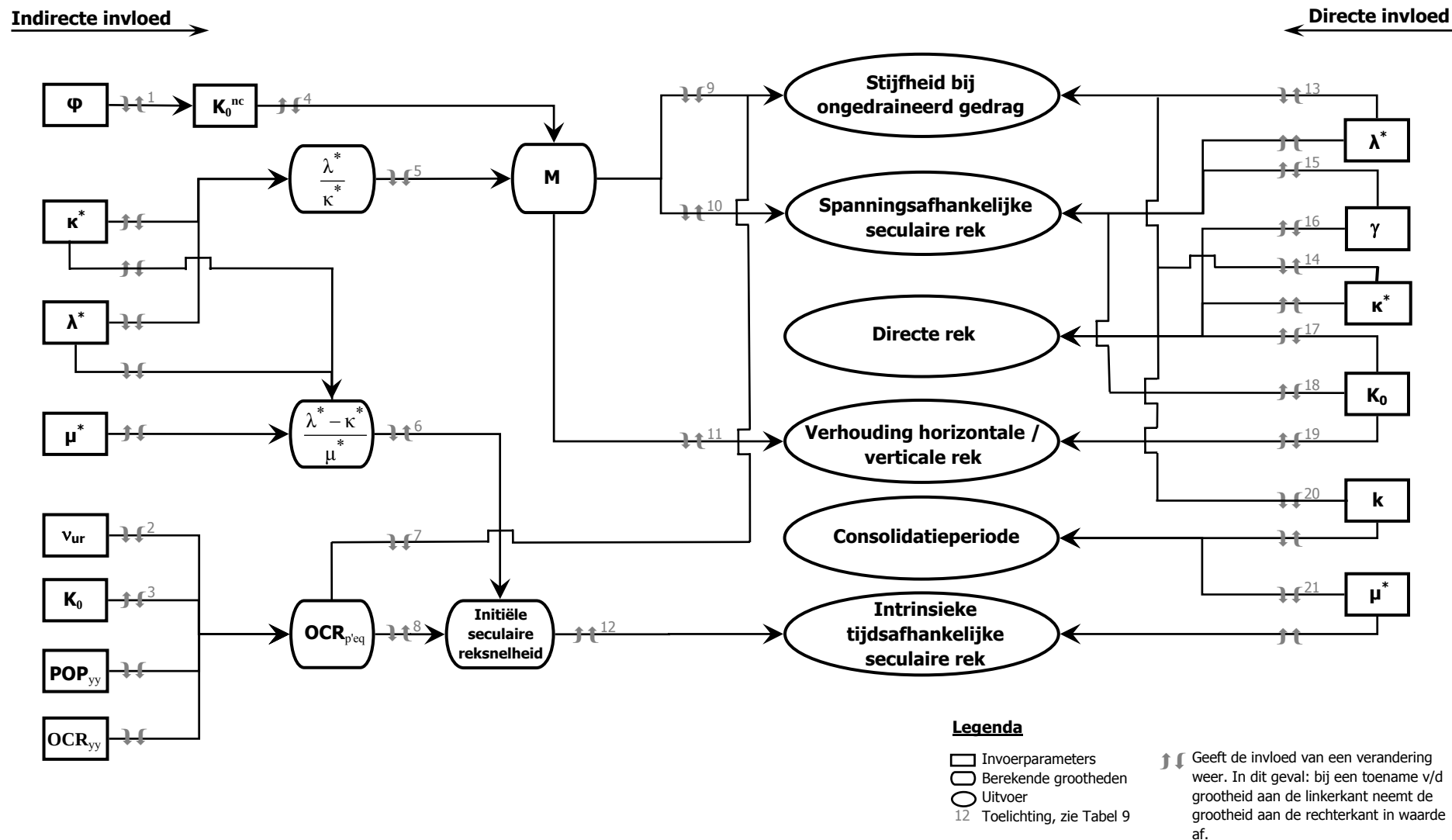
Op onderzoeksvraag 5, *Het model valideren aan 2-dimensionale grondvervormingen. Dit zal gebeuren a.d.h.v. een triaxiaalproef en een case study*, is nu deels afgerond. Het model is gevalideerd a.d.h.v. een geconsolideerde ongedraineerde triaxiaalproef. Ondanks dat de resultaten van de simulatie slecht overeenkomen met meetresultaten, kan het gedrag verklaard worden.

## 4.6. Samenvatting

In de beschreven deelonderzoeken volgt dat de invoerparameters van het SSC model invloed hebben op verschillende resultaten. De invloed van de parameters is daarmee niet eenduidig. Met de verschillende resultaten worden de verhouding horizontale / verticale vervormingen, consolidatieperiode, stijfheid bij ongedraineerd gedrag, directe, spannings- en intrinsieke tijdsafhankelijke seculaire rekken bedoeld. Vanwege de veelzijdige invloed van de invoerparameters is gekozen een samenvatting<sup>6</sup> te geven, voorafgaande aan de in hoofdstuk 5 behandelde No-Recess case. Deze samenvatting is weergegeven a.d.h.v. een flowchart (Figuur 27) met toelichting (Tabel 9). M.b.v. deze flowchart is de invloed van invoerparameters op de verschillende resultaten voor de gebruiker van het SSC model eenvoudig te achterhalen. Het gaat hierbij op de invloed tijdens 2- of 3- dimensionale vervorming. De gevolgen van parameterverandering kan hiermee voorzien worden. Verder zijn een aantal aandachtspunten beschreven.

---

<sup>6</sup> De samenvatting is berust op de voorafgaande paragrafen. Daarnaast is er informatie in de flowchart verwerkt die afkomstig is uit literatuur.



**Figuur 27: flowchart, invloed parameters op vervormingsgerelateerde resultaten bij 2- en 3-dimensionale vervorming**

| Voet-<br>noot | Toelichting                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Verwijzing                |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| 1             | Het SSC model rekent een default waarde uit voor $K_0^{nc}$ welke is gebaseerd op $\phi_{cv}$ ( $\phi + 0,1$ ). De default $K_0^{nc}$ van het SS model blijkt volgens literatuur [4] realistischer te zijn dan de default M-waarde uit het SSC model. $K_0^{nc}$ wordt in het SS model bepaald m.b.v. de vuistregel van Jaky ( $K_0^{nc} = 1 - \sin \phi$ ), de default $K_0^{nc}$ -waarde van het SSC model dient dan aangepast te worden. Bij wijzigingen van $\phi$ wordt de default waarde voor $K_0^{nc}$ geactiveerd. Een aangepaste $K_0^{nc}$ -waarde is dan niet meer actief en dient opnieuw ingevoerd te worden! |                           |
| 2             | Bij ontlasten bepaald $v_{ur}$ de helling in een $\sigma'_{xx} - \sigma'_{yy}$ grafiek. Bij een kleinere waarde voor $v_{ur}$ is de helling steiler, $\sigma'_{xx}$ neemt daardoor minder af. Ook de equivalente spanning zal daardoor minder afnemen, waardoor $OCR_{p'eq}$ kleiner wordt. Hierdoor zal het verschil tussen $OCR_{yy}$ en $OCR_{p'eq}$ toenemen.                                                                                                                                                                                                                                                           | Par. 3.3.1.3 en 3.5       |
| 3             | Als $K_0$ toeneemt, neemt $\sigma'_{xx0}$ toe. Hierdoor zal de initiële equivalente spanning ook toenemen (mits K niet te groot wordt), $OCR_{p'eq}$ neemt daardoor af, waardoor ook het verschil tussen $OCR_{yy}$ en $OCR_{p'eq}$ toeneemt.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Par. 3.3.1.3 en 3.5       |
| 4             | Uit Vergelijking 34 volgt dat bij een toename van $K_0^{nc}$ , M in waarde afneemt. In deze vergelijking is $K_0^{nc}$ dominant.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Par. 3.3.1.1              |
| 5             | Uit Vergelijking 34 volgt dat bij een afname van de verhouding $\lambda^*/\kappa^*$ , M in waarde afneemt. De invloed van deze verhouding op M is bij realistische verhoudingen ( $\lambda^*/\kappa^* = 3-7$ ) beduidend lager dan de invloed van $K_0^{nc}$ . Niettemin dient de invloed van deze verhouding in de gaten te worden gehouden.                                                                                                                                                                                                                                                                               | Par. 3.3.1.1 en 3.3.1.2.2 |
| 6             | Uit Vergelijking 59 volgt dat een afname van de verhouding $(\lambda^* - \kappa^*)/\mu^*$ een grotere initiële seculaire reksnelheid tot gevolg heeft, mits $OCR > 1$ . Bij de keuze van $\kappa^*$ op basis van a dient hiermee rekening te worden gehouden. De verhouding $(\lambda^* - \kappa^*)/\mu^*$ ligt normaliter tussen 10 en 20.                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Par. 4.1                  |
| 7             | Een afname van $OCR_{p'eq}$ heeft tot gevolg dat de stijfheid bij ongedraineerd gedrag afneemt naarmate de vervormingen toenemen. De op te nemen sterkte neemt daardoor ook af.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Par. 4.5                  |
| 8             | Uit Vergelijking 59 volgt dat een toename van de verhouding $p^{eq}/p^{eq}_p$ en daarmee een afname van $OCR_{p'eq}$ een grotere initiële seculaire reksnelheid tot gevolg heeft. De toename van $OCR_{yy}$ is beduidend anders dan de toename van $OCR_{p'eq}$ .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Par. 4.1                  |
| 9             | Een afname van M heeft tot gevolg dat de stijfheid bij ongedraineerd gedrag afneemt naarmate de vervorming toeneemt. De op te nemen sterkte is daardoor ook lager.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Par. 4.5                  |
| 10            | Een afname van M heeft bij spanningsverhogingen tot gevolg dat de equivalente spanningsverhouding ( $p^{eq}_2/p^{eq}_1$ ) bij een verticale spanningsverhoging toeneemt. Hierdoor zal de spanningsafhankelijke seculaire volumieke rek toenemen.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Par. 4.2.2                |
| 11            | Een afname van M heeft tot gevolg dat de verhouding deviatorisch over volumieke seculaire reksnelheid toeneemt, waardoor de verhouding horizontale over verticale rek toeneemt.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Par. 4.2.2                |
| 12            | Bij toenemende initiële seculaire reksnelheden zal ook de intrinsieke tijdsafhankelijke seculaire rek toenemen, indien de spanning niet wordt verhoogd tot $OCR_{p'eq} = 1$ . Bij een grondmootje dat geen spanningsveranderingen ondergaat, blijft deze initiële seculaire reksnelheid actief. Dit komt voor aan weerszijde van een ophoging.                                                                                                                                                                                                                                                                              | Par. 4.1                  |
| 13+14         | Een toename van $\lambda^*$ en/of $\kappa^*$ heeft tot gevolg dat de stijfheid bij ongedraineerd gedrag afneemt. De sterkte is echter onafhankelijk van $\lambda^*$ en $\kappa^*$ .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Par. 4.5                  |
| 15+16         | Bij een lager aanname voor het eigen gewicht ( $\gamma$ ) zullen de directe en spanningsafhankelijke seculaire rekken t.g.v. een spanningsverhoging groter worden. Dit omdat de spanningsverhoudingen ( $p'_2/p'_1$ en $p^{eq}_2/p^{eq}_1$ ) toenemen.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                           |
| 17+18         | Bij kleinere $K_0$ -waarde is de initiële isotrope spanning kleiner. Bij spanningstoename heeft dit tot gevolg dat de verhoudingen $p'_2/p'_1$ en $p^{eq}_2/p^{eq}_1$ toenemen. De optredende direct en spanningsafhankelijke seculaire rekken zijn hierdoor groter.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Par. 4.2.1                |
| 19            | Bij kleinere $K_0$ -waarde is de initiële horizontale spanning kleiner. Bij verticale spanningstoename heeft dit tot gevolg dat de verhouding $\sigma'_{xx,2}/\sigma'_{xx,1}$ groter wordt. De verhouding horizontale / verticale vervorming zal hierdoor groter zijn.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Par. 3.3.1.3 en 4.2.1     |
| 20            | Bij een afname van k zal de grond minder snel draineren, waarmee de invloed van ongedraineerd gedrag toeneemt. Tijdens ongedraineerd gedrag worden er meer schuifspanningen ontwikkeld dan tijdens gedraineerd gedrag. Wanneer de consolidatie minder snel verloopt neemt de stijfheid af, er worden immers meer schuifspanningen ontwikkeld, waardoor de verticale en horizontale vervormingen groter zullen zijn.                                                                                                                                                                                                         | Lit. [4]                  |
| 21            | Bij grotere waarden voor $\mu^*$ zal er meer intrinsieke tijdsafhankelijke seculaire rek optreden. Dit gaat gepaard met meer ontwikkeling van wateroverspanningen, hetgeen het consolidatieproces vertraagt.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Lit. [4]                  |

Tabel 9: toelichting Figuur 27; flowchart

Opmerkingen Figuur 27 en Tabel 9:

- Naast de directe invloed van het eigen gewicht ( $\gamma$ ) op de directe en spanningsafhankelijke seculaire rek, heeft  $\gamma$  invloed bij het bepalen van  $OCR_{\gamma\gamma}$ .
- De freatisch grondwaterstand heeft bij slappe gronden significante invloed op de bepaling van de effectieve spanningen en daarmee ook de  $OCR_{\gamma\gamma}$ .
- De default  $K_0$ -waarde geeft initiële overgeconsolideerde spanningen volgens ontlasten. Indien  $K_0$  wordt aangepast voor een waarde die gelijk is aan  $K_0^{nc}$  dan resulteert dit in initiële spanningen als gevolg van aging.
- Zoals ook vermeld bij voetnoot 9 neemt de ongedraineerde sterkte af naarmate  $M$  afneemt. Hierdoor kunnen er meer spanningspunten bezwijken waardoor ook de vervormingen toe kunnen nemen. De sterkte kan daarmee bepalend zijn voor de vervormingen.
- Zoals bovenstaand vermeld kan de sterkte invloed hebben op de vervormingen. Indien een aanpassing van  $\phi$  gevolgen heeft voor het aantal spanningspunten dat bezwijkt dan kan dit ook gevolgen hebben voor de optredende vervormingen. Bij (gedeeltelijk) bezwijken van een cohesieve lagen kan overwogen worden toch cohesie in rekening te nemen.
- Bij effectieve spanningsafname t.g.v. de ontwikkeling van wateroverspanningen (ongedraineerd gedrag) zal naast  $\kappa^*$ ,  $v_{ur}$  invloed hebben op de stijfheid. Een afname van  $v_{ur}$  resulteert in stijver grondgedrag. De invloed is beduidend minder dan de invloed van  $\kappa^*$  en is daarom niet in de flowchart opgenomen.
- Grote waarden voor de cohesie dienen vermeden te worden. Cohesie is een sterkteparameter die daarnaast invloed heeft op de stijfheid (zie ook paragraaf 3.3.1.1).

**Aandachtspunten tijdens het rekenen met Plaxis SSC:**

- Bij rekken groter dan 20% dient met Updated Mesh en Updated Waterpressures te worden gerekend (zie ook paragraaf 4.3).
- Voor de tijdseenheid bij general settings in Plaxis Input dient te allen tijde dagen te worden ingevoerd (zie ook paragraaf 4.3).
- Tijdens gedraineerde berekeningen dient in de gaten te worden gehouden of de ontwikkeling van de OCR naar verwachting verloopt (zie ook paragraaf 4.3.3).
- Berekeningen waarbij gerekend wordt met de optie ignore undrained behaviour dienen een minimale tijdsduur van 1 dag te hebben.

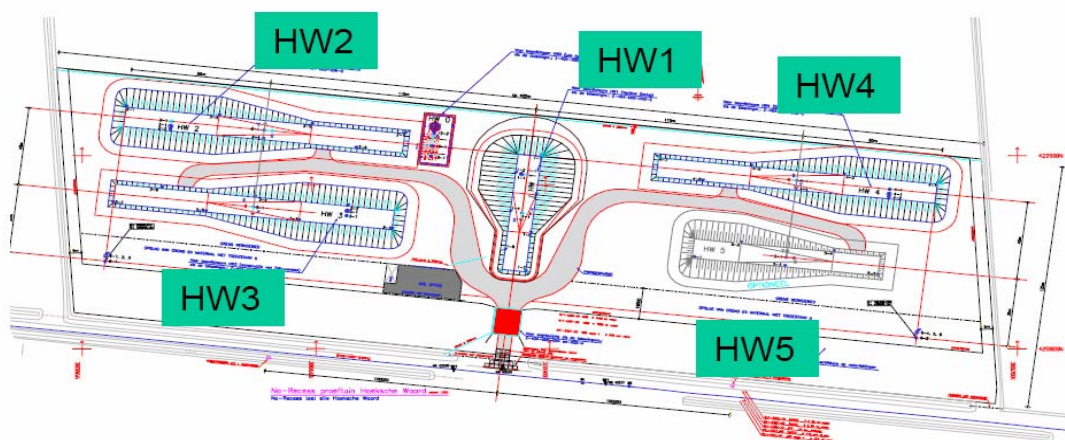


## 5. No-Recess case

### 5.1. Inleiding

In het voorgaande hoofdstuk is het SSC model beschreven en gevalideerd a.d.h.v. verschillende deelonderzoeken. In de praktijk komt het er echter op neer dat eindige elementen berekeningen veelvuldig gebruikt worden om voorspellingen te maken m.b.t. vervormingen, spanningen, grondwaterstromingen etc. op daarvoor aangewezen locaties. Om het SSC model te valideren op praktijk situaties is ervoor gekozen één aardebaan van de No-Recess case (New Options for Rapid and Easy Construction of Embankments on Soft Soils) te simuleren. Onderzoeksvraag 5, *het model valideren aan 2-dimensionale grondvervormingen. Dit zal gebeuren a.d.h.v. een triaxiaalproef en een case study*, wordt daarmee afgerond. Verder zal onderzoeksvraag 2, *verificatie van de gevonden oorzaken bij onderzoeksvraag 1 a.d.h.v. samendrukkingsproeven en bestaande projecten*, afgerond worden. De gevonden oorzaken van de verschillen tussen de verticale vervorming van het SSC- en a,b,c-Isotachenmodel wordt hier geverifieerd a.d.h.v. een bestaand project, de No-Recess case.

De No-Recess case betreft een (demonstratie-) onderzoek naar, voor Nederlandse begrippen niet conventionele funderingswijzen voor aardebanen van rail- en weginfrastructuur. Het bouwrijpmaken hiervan is gestart in januari 1998 in Hoeksche Waard en negen maanden later waren 5 aardebanen gerealiseerd (Figuur 28). Aardebaan HW1 is bedoeld als referentie baan, terwijl de overige banen aangebracht zijn ter validatie van de verschillende funderingswijzen die t.p.v. de banen zijn aangebracht. In deze studie wordt verder alleen gekeken naar HW1. Tijdens de proef zijn metingen verricht op: verticale en horizontale grondverplaatsingen, waterspanningen en gronddrukken. De metingen zijn in juni 2000 gestopt.



**Figuur 28: bovenaanzicht proefterrein No-Recess case**

In de hierop volgende paragrafen zal eerst de geometrie van proefvak HW1 worden beschreven, waarna de grondopbouw met grondeigenschappen wordt beschreven. Voordat de 2D simulatie gemaakt wordt, worden er met MSettle (a,b,c-Isotachenmodel) en Plaxis (SSC) 1D berekeningen gemaakt. In paragraaf 3.4 en 4.4 is aangetoond dat bij een samendrukkingsproef de resultaten van het a,b,c-Isotachenmodel en het SSC model bij constante K-waarden met elkaar overeen moeten komen. A.d.h.v. deze case wordt getoetst of bij een meerlagensysteem, waarbij consolidatie een grote rol speelt, het a,b,c-Isotachenmodel en het SSC model nog steeds dezelfde resultaten geven.

De 2D simulatie zal vervolgens verricht worden a.d.h.v. axisymmetrische en plane strain consolidatieberekeningen. Er is gekozen voor zowel axisymmetrische als plane strain berekeningen, omdat de geometrie niet gezien kan worden als een 100% nauwkeurige axisymmetrische of 100% nauwkeurige plane strain weergave. T.g.v. spreiding, dempen axisymmetrische berekeningen vervormingen en spanningen sneller uit dan plane strain berekeningen.

Naast deze berekeningen wordt een gedraineerde berekening uitgevoerd om de invloed van ongedraineerd gedrag bij de consolidatieberekening te onderzoeken. Verder wordt er gevarieerd met parameters, om de invloed van verschillende parameters zoals deze in paragraaf 4.6 zijn beschreven te toetsen.

## 5.2. Geometrie proefvlak HW1

In deze paragraaf wordt de geometrie beschreven zoals deze ook voor de modellering toegepast wordt. De gegeven dimensies van de ophoging zijn de gerealiseerde dimensies en kunnen daarmee afwijken van de ontwerp dimensies.

De geometrie van de aardebaan HW1 is gebaseerd op de grondopbouw en het programma van eisen. In dit programma zijn de volgende grenzen gesteld aan de bouwtijd en restzetting:

- Korte bouw tijden: minder dan 1,5 jaar
- Kleine restzettingen: minder dan 3 cm
- Minimalisatie bouwrisico's
- Minimalisatie van het overschot op de grondbalans
- Voldoende stijf gedrag van de baan bij dynamische belasting
- Minimalisatie schade bij aanleg van (spoor)wegverbredingen

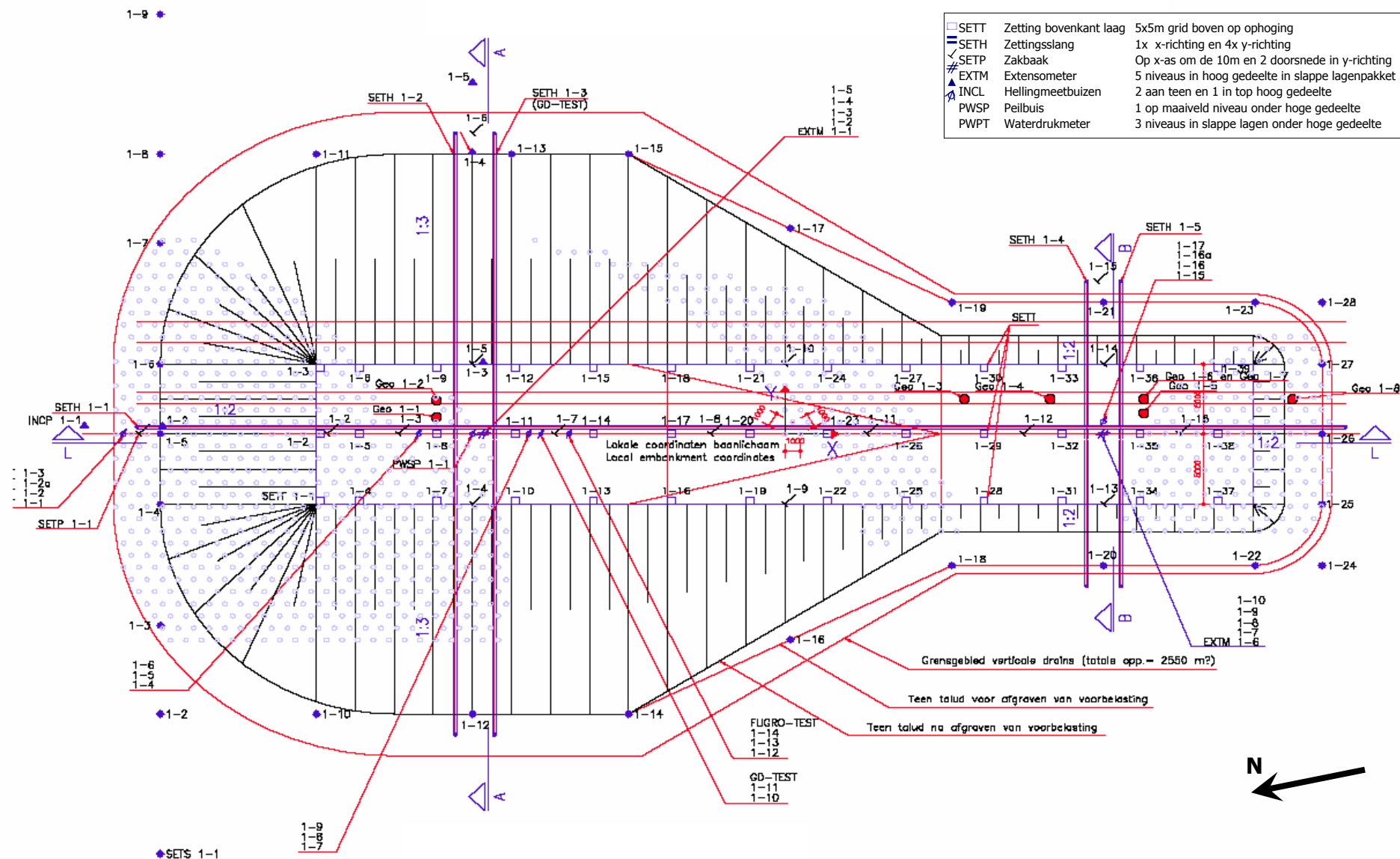
Dit in combinatie met de voorkennis van de ondergrond heeft geresulteerd in de in Tabel 10 opgenomen ophoog en drainage gegevens.

|                               | Lage aardebaan   | Hoge aardebaan   |                            |
|-------------------------------|------------------|------------------|----------------------------|
| Netto ophoging                | 1                | 5                | [m]                        |
| Bruto ophoging                | 1,2              | 7,5              | [m]                        |
| Extra overhoogte              | 0,4              | 0,3              | [m]                        |
| Weg verbetering (grindsplijt) | 0,1              | 0,1              | [m]                        |
| h.o.h. verticale drains       | 1                | 1                | [m]                        |
| Max. diepte drains            | 1                | 1                | [m boven pleistoceen zand] |
| Geometrie verticale drains    | driehoeksverband | driehoeksverband |                            |

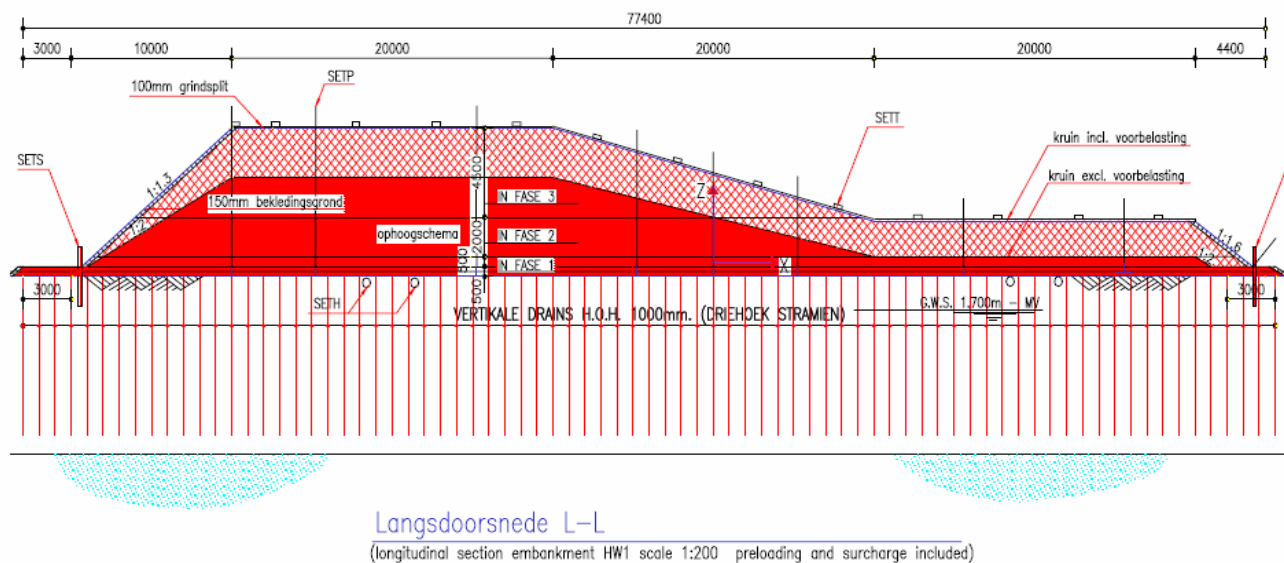
**Tabel 10: ophoog en drainage gegevens aardebaan HW1, No-Recess case**

De hoge en lage aardebanen zijn respectievelijk in 130 en 100 dagen op hoogte gebracht. Na ongeveer 330 dagen is de extra overhoogte op de lage aardebaan verwijderd. Na 380 dagen is 0,3 meter (ophoog)zand van de hoge aardebaan verwijderd.

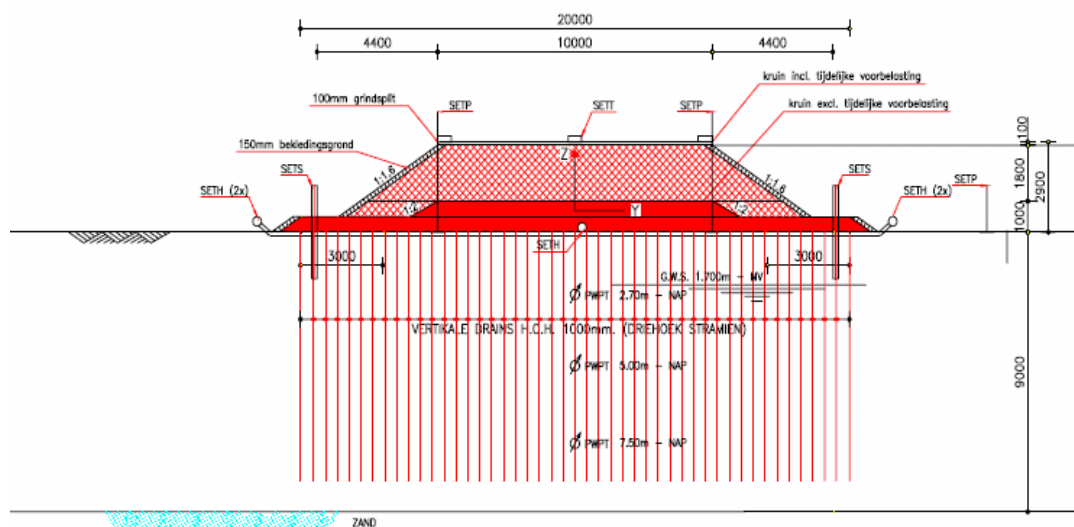
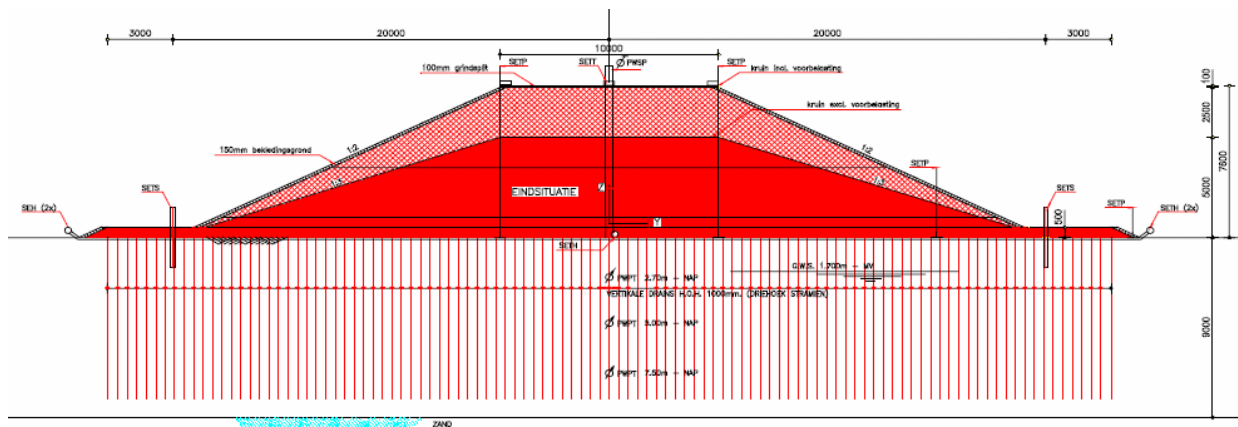
Een bovenaanzicht van HW1 met locaties van monitoringssystemen is gegeven in Figuur 29. Verder zijn in Figuur 30, Figuur 31 en Figuur 32 langs- en dwarsdoorsneden gegeven.



**Figuur 29: plattegrond met monitoringslocaties HW1**



**Figuur 30: HW1 langsdoorsnede (L) met hoog en laag gedeelte (x-richting)**

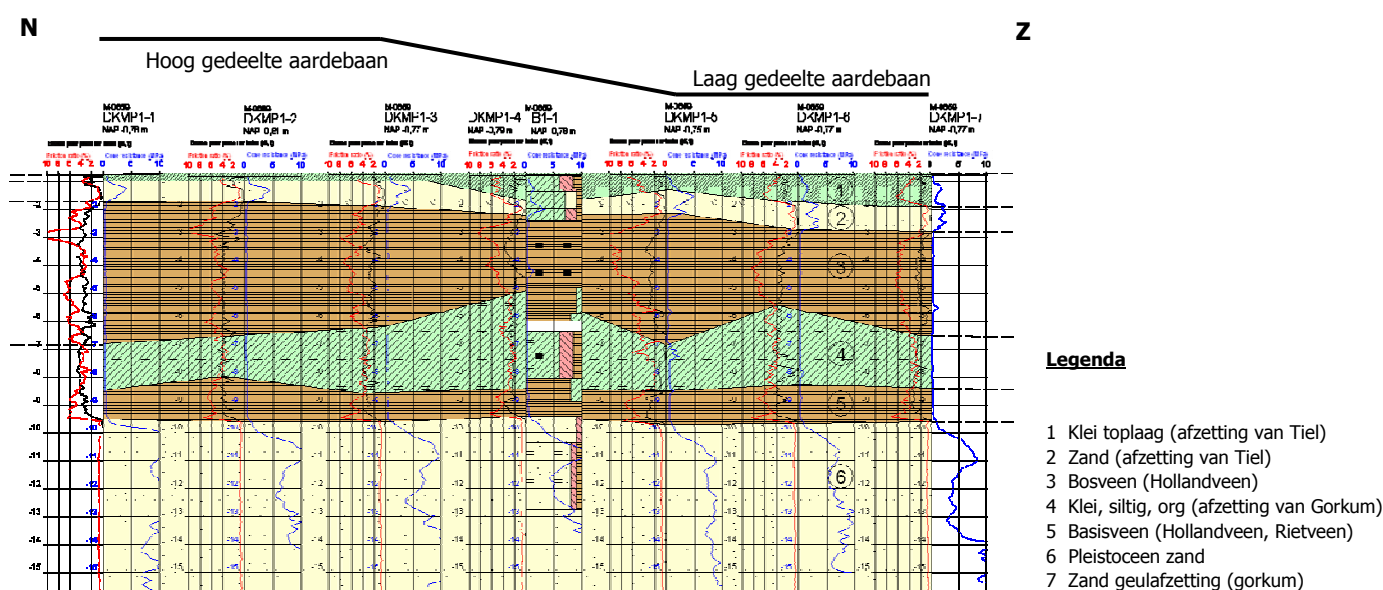


### 5.3. Bodemopbouw en grondeigenschappen

Voor het bepalen van de bodemopbouw en grondeigenschappen zijn de beschikbare gegevens over het gehele terrein gebruikt. De modellering van de aardebaan is gebaseerd op het hoge gedeelte. Dit omdat aan de teen en 5 meter uit de teen van de hoge aardebaan metingen zijn gedaan m.b.t. horizontale vervormingen. De horizontale vervormingen zijn gemeten aan de noord- en oostkant van de ophoging. De bodemopbouw zoals deze gehanteerd wordt bij de modellering zal daarom gebaseerd worden op de grondopbouw zoals deze t.p.v. horizontale metingen aan de teen van de hoge aardebaan wordt verwacht.

Als eerste zal de grondopbouw voor HW1 worden beschreven. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de door Fugro in 1998 gerealiseerde grondprofielen onder de verschillende aardebanen (zie bijlage 13.2). De locaties van sonderingen en boringen zijn terug te vinden in bijlage 13.1.

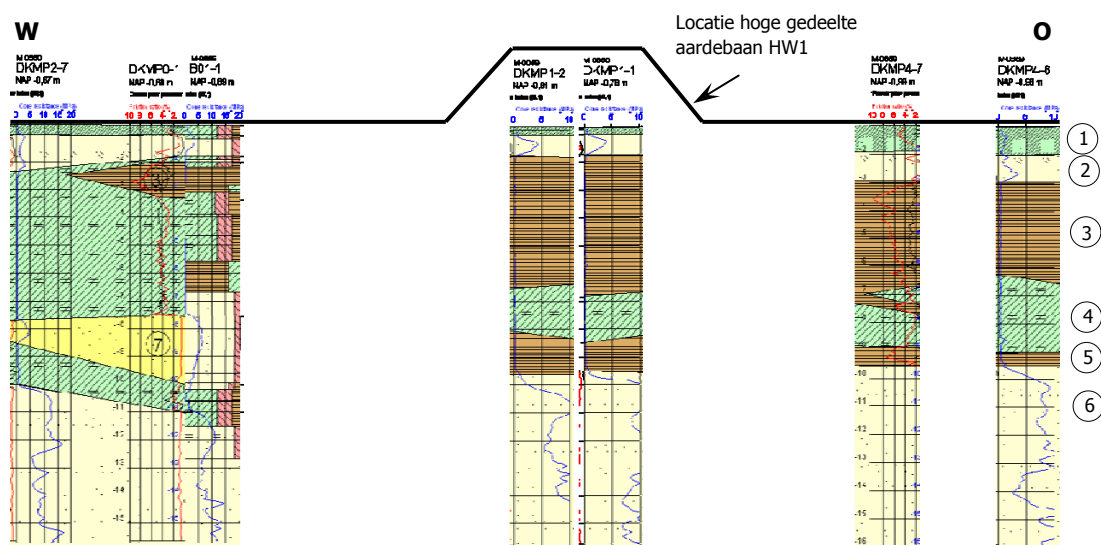
In Figuur 33 en Figuur 34 zijn respectievelijk de noord-zuid en west-oost georiënteerde grondprofielen gegeven.



**Figuur 33: grondprofiel HW1 noord-zuid georiënteerd, inclusief locatie aardebaan**

#### Interpretatie Figuur 33:

- De veenlagen (3 en 5) en siltige organische kleilaag (4) fluctueren vooral in het zuidelijke gedeelte in dikte. Onder het hoge gedeelte van de aardebaan is de fluctuaties te verwaarlozen. Verder in deze paragraaf zal blijken dat de samendrukkingsparameters van de Bosveen, Basisveen en Klei (siltig, organisch) in beperkte mate van elkaar verschillen. Bij de modellering wordt niet verwacht dat de fluctuaties significante invloed heeft op vervormingen. Heterogeniteit / anisotroop gedrag zou ervoor kunnen zorgen dat de horizontale grondeigenschappen van de twee lagen significantere verschillen geven, waardoor de metingen wel invloed ondervinden van de fluctuaties in de twee lagen.
- De dikte van de toplaagen t.p.v. de teen van de ophoging zijn helaas niet bekend.
- De bovenkant van het Pleistocene zand bevindt zich op NAP -9,7m en is constant over de lengte van het profiel.
- Het maaiveld ligt op NAP -0,8m en is constant over de lengte van het profiel.



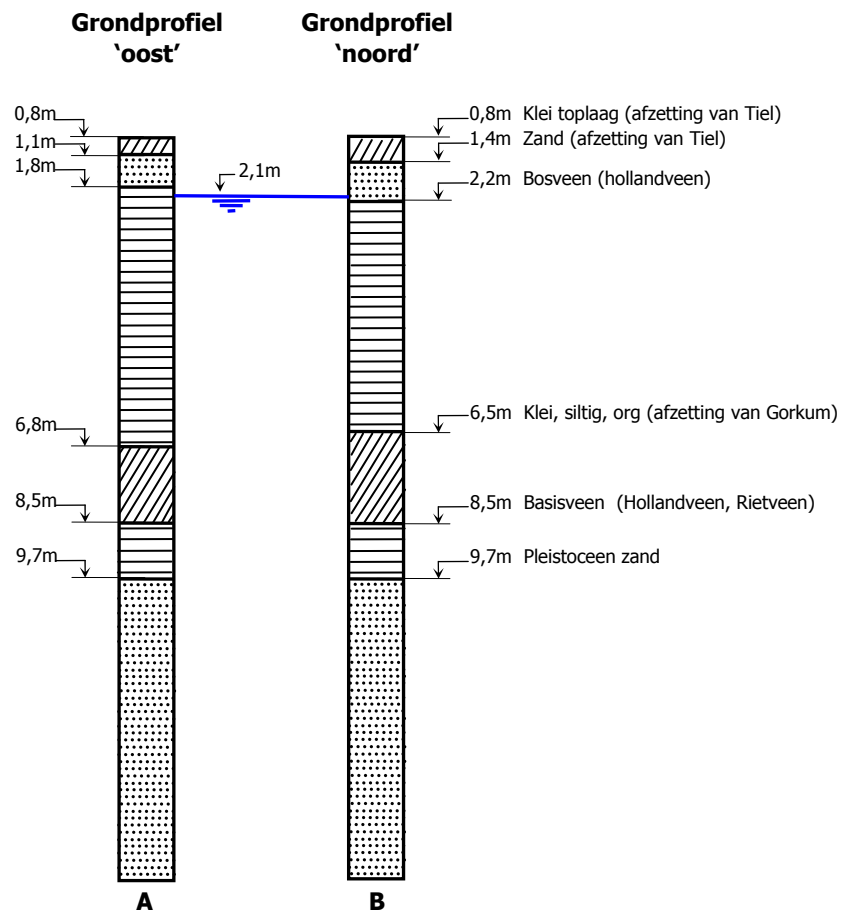
**Figuur 34: grondprofiel HW1 west-oost georiënteerd inclusief locatie aardebaan**

Interpretatie Figuur 34:

- Ook in dit profiel is fluctuatie te zien in de veenlagen (3 en 5) en siltige organische klei laag (4). Tevens nemen de toplagen (klei en zand) naar het oosten in dikte toe.
- In het westelijke deel van het profiel wordt duidelijk een zandgeul aangetroffen. Onder de zandgeul bevinden zich weer slappe lagen en het lijkt daarmee uit te sluiten dat het hier en rivierduin betreft. Bij het bestuderen van alle andere sonderingen en boringen blijkt het dat deze zandgeul alleen t.p.v. boring 01-1, sonderingen 0-1 en 2-7 wordt aangetroffen. Deze boring en sonderingen liggen zoals dat ook uit het grondprofiel blijkt dicht bij elkaar. Geologisch gezien komen zandgeulen in deze streek geregeld voor en hebben normaliter een langwerpige vorm. Het lijkt daarmee niet onwaarschijnlijk dat de geul zich doorzet in het beproefde gebied, maar net niet getraceerd is door de andere boringen en sonderingen.  
De zandinsluiting bevindt zich aan de andere kant van de aardebaan dan de metingen op horizontale vervormingen. Zettingsslang gegevens (zie ook bijlage 13.8) tonen niet aan dat de ophoging aan de westkant significant meer zakt dan aan de oostkant. De invloed van de zandgeul op de zettingen en vervormingen wordt daarom verwaarloosd (voor het gedimensioneerde gebied).
- De bovenkant van het pleistocene zand bevindt zich op NAP -9,7m en is behalve ter plaatse van de zandgeul constant over de lengte van het profiel.
- Het maaiveld loopt naar het oosten enigszins af, maar dit is verwaarloosbaar. Ter plaatse van de aardebaan ligt het maaiveld op NAP -0,8m.

Naast deze interpretaties is een blik geworpen op de gemeten horizontale vervormingen (zie ook bijlage 13.9). De horizontale vervormingen aan het maaiveld zijn aan de noordkant van de ophoging (INCP 1-1 en 1-2) aanzienlijk kleiner dan aan de oostkant van de ophoging (INCP 1-4 en 1-5). De oorzaak hiervan kan de dikte van de 'stijve' toplagen (klei toplaag en zand) zijn. Er is er daarom voor gekozen de toplagen aan de noordkant dikker te modelleren dan aan de oostkant.

Op basis van de bovenstaande interpretaties is voor de simulatie aan de oostkant van de hoge aardebaan gekozen voor de het grondprofiel 'oost' weergegeven in Figuur 35A. Voor de simulatie van de horizontale vervormingen aan de noordkant van de aardebaan is gekozen voor de dimensionering zoals deze is weergegeven in Figuur 35B. Het voornaamste verschil van de twee profielen is het verschil in de dikte van de toplagen.



**Figuur 35A en B: grondprofielen 'oost' en 'noord' met bijbehorende laagscheidingen in m-NAP**

Er is ervoor gekozen een geometrie aan te nemen met horizontale homogeniteit. De gemodelleerde lagen zijn horizontaal en consistent over de as van de berekening.

Voor de simulatie worden de klei- en veenlagen gemodelleerd met het SSC model. In Tabel 11 zijn de invoerparameters opgenomen. Voor de parameter bepaling wordt verwezen naar bijlage 13.3 (OCR sterkte en samendrukbaarheid), 13.4 (k-waarde) en 13.5 (volumieke gewichten).

| Grondsoort      | $\gamma_{sat}$<br>[kPa] | $\gamma_d$<br>[kPa] | $c'$<br>[kPa] | $\phi'_{(2\%)}$<br>[°] | $\phi'_{(5\%)}$<br>[°] | $\psi$<br>[°] | $v_{ur}$<br>[-] | $\kappa^*=a$<br>[-] | $\lambda^*=b$<br>[-] | $\mu^*=c$<br>[-] | $\lambda^*/\kappa^*$<br>[-] | $\lambda^*-\kappa^*/\mu^*$<br>[-] | $K_0$ en $K_0^{nc}$ (2%)<br>[-] | $K_0$ en $K_0^{nc}$ (5%)<br>[-] | $M_{(2\%)}$<br>[-] | $M_{(5\%)}$<br>[-] | $k_{yy}$ (zonder drainage)<br>[m/d] | $k_{yy}$ (met drainage)<br>[m/d] | $k_{xx}$<br>[m/d] | $OCR_{yy}$<br>[-] |
|-----------------|-------------------------|---------------------|---------------|------------------------|------------------------|---------------|-----------------|---------------------|----------------------|------------------|-----------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------|-------------------|
| Klei toplaag    | 17,58                   | 13,52               | 1             | 22,5                   | 22,5                   | 0             | 0,15            | 0,025               | 0,100                | 0,0039           | 4,00                        | 19,23                             | 0,617                           | 0,617                           | 1,23               | 1,23               | 4,83E-04                            | 2,42E-02                         | 4,83E-04          | 1,30              |
| Bosveen         | 10,9                    | 3,26                | 1             | 18                     | 27,5                   | 0             | 0,15            | 0,036               | 0,208                | 0,0117           | 5,71                        | 14,64                             | 0,691                           | 0,538                           | 1,07               | 1,49               | 2,90E-03                            | 1,45E-01                         | 5,80E-03          | 1,40              |
| Klei (silt,org) | 13,91                   | 7,29                | 1             | 23                     | 33                     | 0             | 0,15            | 0,047               | 0,152                | 0,0074           | 3,25                        | 14,26                             | 0,609                           | 0,455                           | 1,22               | 1,68               | 4,83E-04                            | 2,42E-02                         | 4,83E-04          | 1,47              |
| Basisveen       | 11,79                   | 4,58                | 1             | 19                     | 29,5                   | 0             | 0,15            | 0,034               | 0,218                | 0,0102           | 6,43                        | 18,06                             | 0,674                           | 0,508                           | 1,12               | 1,59               | 1,95E-03                            | -                                | 3,90E-03          | 1,96              |

**Tabel 11: invoerparameters SSC model, No-Recess case**

Opmerkingen Tabel 11:

- Zoals reeds opgemerkt in paragraaf 4.5 (simulatie triaxiaalproef), is het bij de uitgevoerde triaxiaalproeven niet mogelijk iets zinnigs te zeggen over de anisotropie. De samendrukkingsparameters zijn bepaald in verticale richting.
- Op de klei toplaag zijn geen proeven verricht. De parameters van deze laag zijn bepaald a.d.h.v. tabel 1 NEN 6740-2005, sonderingen en volumieke gewichtsbepalingen. Op basis hiervan is gekozen deze laag aan te nemen als een slappe laag met classificatie klei zwak zandig.
- Voor de cohesie is in eerste instantie 1 kN/m<sup>2</sup> aangehouden. Dit omdat zoals meerdere malen eerder besproken, de cohesie klein moet zijn t.o.v. het spanningsniveau.
- Voor  $OCR_{yy}$  is aangenomen dat deze het gevolg is van aging en niet het gevolg van ontlasten. Dit omdat de locatie niet bereikt is door ijs uit de ijstijd en er geen aantoonbare grondwaterstand verlagingen hebben plaatsgevonden. Dit laatste is bepaald a.d.h.v. de samendrukkingsparameters, sonderingen en boringen. A.d.h.v. sonderingen kan een grondprofiel worden gemaakt. Als de grondwaterstand in het verleden gedurende lange periode significant lager is geweest dan kan dit uitdroging tot gevolg hebben. Vooral voor kleilagen betekent dit dat de conusweerstand aanzienlijk hoger is dan verwacht wordt in klei ( $q_c = 0,5 - 2$  kPa). De grondwaterstand ligt momenteel in of net beneden de klei toplaag. T.g.v. capillaire werking en neerslag zal deze kleilaag niet uitdrogen. Als in het verleden droge perioden zijn aangebroken waardoor zowel de grondwaterstand lager is en de neerslag minder, dan kan deze laag uitgedroogd zijn. Dit zorgt voor een structuurverandering waardoor de conusweerstand hoger is dan in klei wordt verwacht. De klei toplaag heeft echter geen hoge conusweerstand ( $q_c < 2$  kPa).
- Aangezien is aangenomen dat de  $OCR_{yy}$  is ontstaan t.g.v. aging is  $K_0$  gelijk gekozen aan  $K_0^{nc}$ . De horizontale spanning in een overgeconsolideerde spanningstoestand t.g.v. aging is gelijk aan de horizontale spanning in een normaalgeconsolideerde spanningstoestand (zie hiervoor ook paragraaf 3.3.1.3).
- De waarde van de  $v_{ur}$  ligt normaliter tussen 0,1 en 0,25. In eerste instantie is voor alle lagen 0,15 aangehouden. Bij een  $K_0$ -waarde gelijk aan  $K_0^{nc}$ , wordt verwacht dat de invloed van deze parameter verwaarloosbaar is. Herbelasten vanuit een overgeconsolideerde beginsituatie verloopt dan nagenoeg volgens de  $K_0^{nc}$ -lijn. Tevens resulteert het verwijderen van de overhoogte in kleine mate van overconsolidatie.
- De zwelcoëfficiënt ( $\kappa^*$ ) is gelijk aan de uit de samendrukkingsproef bepaalde a parameter. Dit omdat is aangenomen dat de overconsolidatie het gevolg is van aging.  $K_0$  is constant en gelijk aan  $K_0^{nc}$ .  $\kappa^*$  is dan gelijk aan a.
- Voor de lagen met verticale drains, is de verticale permeabiliteit omgerekend om het effect van de drainage in rekening te brengen. Voor een verdere toelichting wordt verwezen naar bijlage 13.4. De horizontale permeabiliteit is voor de kleilagen gelijk aan de verticale permeabiliteit zonder drainage. Voor de veenlagen is deze gelijk aan 2 maal de verticale permeabiliteit zonder drainage.

- Normaliter wordt  $K_0^{nc}$  in de praktijk bepaald met de vuistregel  $K_0^{nc} = 1 - \sin \varphi$  (vuistregel van Jaky). In de tabel is  $\varphi$  bepaald bij twee verticale rek niveaus (2 en 5 %) bij de triaxiaalproef. Hieruit volgen beduidend verschillende waarden voor  $\varphi$ . Indien de vuistregel van Jaky wordt gehanteerd volgen vervolgens verschillende waarden voor  $K_0^{nc}$ . De keuze voor  $K_0^{nc}$  is maatgevend voor de numerieke waarde van  $M$ . Zoals eerder beschreven is  $M$  een belangrijke modelparameter, welke maatgevend is voor de vervormingen in verschillende richtingen. Aangezien de vuistregel van Jaky geen wetmatigheid is en  $\varphi$  niet constant is tijdens een triaxiaalproef, is het aan te raden  $K_0^{nc}$ -waarden op een andere manier te bepalen welke de werkelijkheid beter benaderd.

Realistische  $K_0^{nc}$ -waarden volgen uit een  $K_0$ -c.r.s. proeven. Op basis van ervaringen bij Geodelft (Literatuur verwijzing [20]) volgen voor veen en klei respectievelijk  $K_0^{nc}$ -waarden tussen 0,3 - 0,4 en 0,4 - 0,5. Dit zijn aanzienlijk lagere waarden dan op basis van de vuistregel van Jaky bij  $\varphi$ -waarden bepaald bij 2 en 5% verticale rek wordt verwacht. De berekeningen worden daarom gebaseerd op realistische  $K_0^{nc}$ -waarden (0,4 voor alle slappe lagen). Daarnaast zal een variant worden doorgerekend waarbij de  $K_0^{nc}$ -waarden worden bepaald met de vuistregel van Jaky bij  $\varphi$ -waarden bepaald bij 2% rek. De invloed van  $M(K_0^{nc})$  wordt zodoende weergegeven.

De berekening met een  $K_0^{nc}$ -waarde van 0,4 is gecombineerd met een  $\varphi$  horende bij 5% verticale rek. Berekeningen met een  $\varphi$  horende bij 2% verticale rek resulteerden in plastische punten in de initiële toestand. De initiële spanningsverhouding ( $K_0 = K_0^{nc}$ ) bevindt zich buiten de Mohr-Coulomb bezwijkomhullende, hetgeen nooit het geval kan zijn. Het wordt daarom aangeraden bij vervormingsgerichte berekeningen een  $\varphi$  te kiezen die ervoor zorgt dat een normaal geconsolideerd spanningspad volgens  $K_0^{nc}$  ruim binnen de Mohr-Coulomb bezwijkomhullende ligt.

De zandlagen zijn gemodelleerd met het HS Model (Tabel 12). Dit omdat kruip bij dergelijke grondsoorten verwaarloosbaar is en daarom moeilijk te modelleren is met het SSC model (zie ook Vergelijking 40). De ophoging is gemodelleerd met het MC model (Tabel 13). De parameters van de zandlagen en ophoging zijn overgenomen uit literatuur [8]. Niettemin is het gedrag van deze lagen tijdens de berekening in de gaten gehouden.

| Grondsoort       | $\gamma_{sat}$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | $\gamma_d$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | $c'$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $\varphi'$<br>[°] | $\psi$<br>[°] | $v_{ur}$<br>[-] | $E_{so}^{ref}$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $E_{oed}^{ref}$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $E_{ur}^{ref}$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $m$<br>[-] | $p_{ref}$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $K_0$<br>[-] | $K_0^{nc}$<br>[-] |
|------------------|----------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|-------------------|---------------|-----------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|------------|-----------------------------------|--------------|-------------------|
| Zand             | 20                                     | 18                                 | 1                            | 32,5              | 2,5           | 0,15            | 30000                                  | 30000                                   | 90000                                  | 0,5        | 100                               | 0,46         | 0,46              |
| Pleistoceen zand | 21                                     | 19                                 | 1                            | 34                | 4             | 0,15            | 35000                                  | 35000                                   | 105000                                 | 0,5        | 100                               | 0,44         | 0,44              |

Tabel 12: invoerparameters HS model, No-Recess case

| Grondsoort | $\gamma_{sat}$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | $\gamma_d$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | $c'_{ref}$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $\varphi'$<br>[°] | $\psi$<br>[°] | $v$<br>[-] | $E_{ref}$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $E_{incr}$<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | $\gamma_{ref}$<br>[m] |
|------------|----------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------|---------------|------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------|
| Zand (oph) | 20                                     | 18                                 | 1                                  | 32,5              | 2,5           | 0,32       | 5000                              | 1000                               | 7                     |

Tabel 13: invoerparameters MC model, No-Recess case

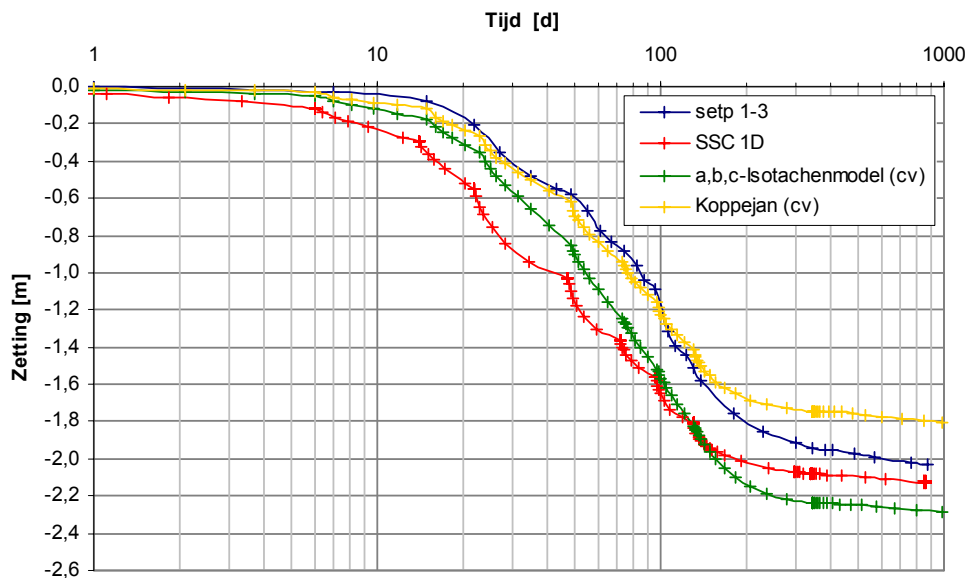
Voor de zandlagen is de dilatantiehoek ( $\psi$ ) bepaald a.d.h.v. de vuistregel:  $\psi = \varphi - 30^\circ$ . Voor de dilatantiehoek van veen en klei wordt  $0^\circ$  aangehouden.

## 5.4. 1-dimensionale SSC, a,b,c-Isotachenmodel en Koppejan simulatie

In Plaxis is met het SSC model een 1-dimensionale berekening gemaakt om deze vervolgens te vergelijken met een MSettle a,b,c-Isotachen en Koppejan berekening. Voorafgaande aan de berekening dient opgemerkt te worden dat de MSettle berekeningen zijn gemaakt m.b.v. de  $c_v$ -waarde i.p.v. de  $k$ -waarde. Een berekening met permeabiliteit ( $k$ ) werd om onbekende redenen afgebroken tijdens het rekenproces. Verder dient er rekening mee gehouden te worden dat MSettle onderwaterzakken van grondlagen niet in rekening brengt. Plaxis neemt onderwaterzakken van grondlagen wel in rekening, indien gerekend wordt met Updated Waterpressures. Kleine verschillen tussen de twee modellen kunnen om deze redenen verwacht worden.

In MSettle is gerekend met de optie submerging (onderwaterzakken van de belasting). De samendrukkingsparameters van de slappe lagen zijn voor de a,b,c-Isotachenberekening gehanteerd zoals deze in Tabel 11 zijn opgenomen. Voor de Koppejan berekening zijn de parameters rechtstreeks bepaald uit de samendrukkingsproeven (zie ook bijlage 13.3). De zandlagen zijn gedraineerde lagen (optie: drained) en voor de samendrukkingsparameters zijn bij de a,b,c-Isotachenberekening de laagst mogelijke waarden ingevoerd (in de orde van  $1 \cdot 10^{-6}$ ). De gedraineerde slappe lagen (klei toplaag, Bosveen en klei siltig organisch) hebben een  $c_v$ -waarde van  $4,3 \cdot 10^{-1}$  m/d en de Basisveenlaag heeft een  $c_v$ -waarde van  $2,09 \cdot 10^{-2}$  m/d (zie hiervoor ook bijlage 13.4). Voor de SSC berekening zijn de parameters aangehouden zoals deze in Tabel 11 tot en met Tabel 13 zijn opgenomen. Voor de hoek van inwendige wrijving met 'bijbehorende'  $K_0$ ,  $K_0^{nc}$  en  $M$  zijn de waarden aangehouden die bepaald zijn bij 2% verticale rek. Niettemin maakt het voor een 1-dimensionale berekening niet veel uit welke waarden voor deze parameters worden gehanteerd (zie ook paragraaf 4.2.1).

In Figuur 36 zijn de meetresultaten van zakbaak 1-3 (midden hoge gedeelte ophoging), SSC, a,b,c-Isotachen en Koppejan berekening weergegeven.



Figuur 36: 1D berekening met de meetresultaten, SSC en a,b,c-Isotachen- en Koppejan model, No-Recess case

Interpretatie Figuur 36:

In paragraaf 3.4 en 4.4 is aangetoond dat bij 1D samendrukking de resultaten van een a,b,c-Isotachen- en SSC berekening met constante K-waarden met elkaar overeenkomen. In deze case is  $K_0$  gelijk aan  $K_0^{nc}$  (K is constant). Op basis hiervan worden geen verschillen verwacht tussen de twee modellen. Toch wijken de SSC en a,b,c-Isotachen resultaten noemenswaardig van elkaar af. Dit verschil is niet te verklaren door het verschil in rekenen met k of  $c_v$ -waarden of het onderwaterniveau van de grondlagen (hetgeen niet in rekening wordt genomen bij de MSettle berekening). De oorzaak hiervan is het op een andere wijze in rekening brengen van het onderwaterniveau van belastingen in de vorm van grondlagen (bij de samendrukkingstoets speelt onderwaterniveau geen rol). In Plaxis is onderwaterniveau opgenomen in het iteratieproces, waardoor onderwaterniveau correct in rekening wordt genomen. MSettle gaat uit van de eindzetting. Bij het aanbrengen van de eerste belastingstap wordt een correctie voor het onderwaterniveau toegepast weke uitgaat van de eindzetting. De spanningsverhoging wordt daardoor onderschat. Geodelft is momenteel bezig dit te verbeteren en het onderwaterniveau op te nemen in het iteratieproces. Onderwaterniveau van grondlagen wordt dan ook in rekening genomen.

Naast het verschil tussen de verschillende modellen kan opgemerkt worden dat beide modellen de zetting overschatten. Verder onderschatten beide modellen de kruiptak (helling aan het einde van de metingen). De Koppejan modellering geeft duidelijk weer dat met dit vertrouwde zettingsmodel de zetting aan het begin van de gefaseerde ophoging beter ingeschat wordt dan berekeningen met het a,b,c-Isotachen- en het SSC model. De eindzetting en kruiptak worden echter ietwat onderschat. Later in paragraaf 5.5.1.2 zal de SSC berekening gefit worden aan de meetdata.

## 5.5. 2-Dimensionale SSC simulatie

In deze paragraaf wordt het SSC model gevalideerd m.b.t. 2 dimensionale vervormingen. In eerste instantie zal het profiel 'oost' gesimuleerd worden. Bij de simulatie worden verschillende varianten doorerekend, waarbij in wordt gegaan op de gevoeligheid van verschillende parameters. Tot slot wordt een variant doorerekend waarbij het tijd-zettingsverloop gefit wordt.

Na de simulatie van profiel 'oost' wordt profiel 'noord' doorerekend met verschillende varianten.

### 5.5.1. Profiel 'oost'

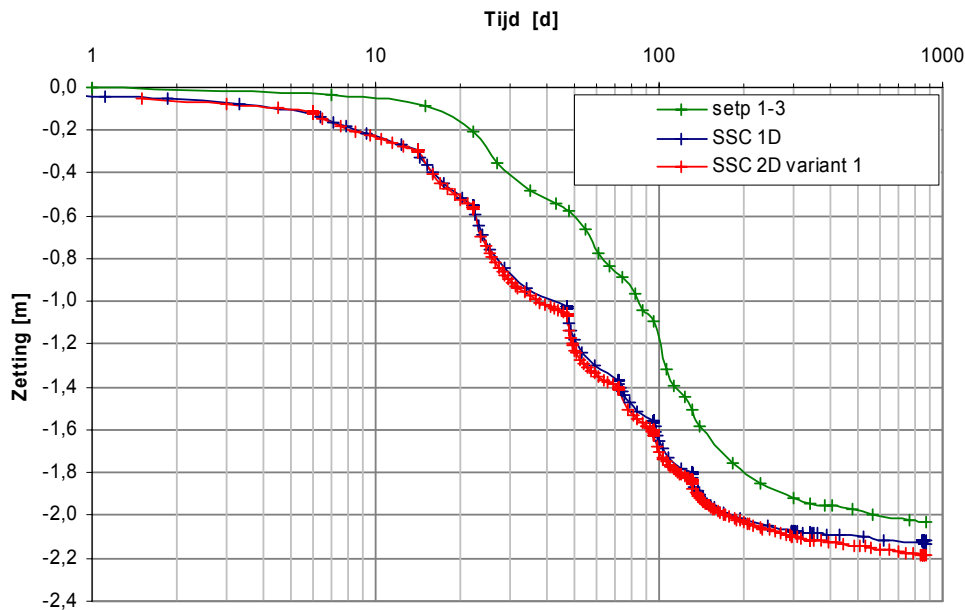
De verschillende varianten van profiel 'oost' zijn onderverdeeld in 2 basis varianten, 6 parameter gevoeligheids varianten en een variant die gemaakt is om het tijd-zettingsverloop en de horizontale vervormingen te fitten. In Tabel 14 zijn de varianten opgenomen en is een korte beschrijving gegeven. Bij de basis varianten wordt gerekend met de realistische  $K_0^{nc}$ -waarden van 0,4, hierbij wordt gevarieerd met een axisymmetrische en plane strain berekening. Bij de parameter gevoeligheidsvarianten worden berekeningen gemaakt met de  $K_0^{nc}$ -waarden bepaald met de vuistregel van Jaky horende bij een  $\phi$  bepaald bij 2% verticale rek (zoals dit tot op heden in de praktijk vaak gedaan wordt). Met deze varianten wordt de invloed van de  $K_0^{nc}$ -afhankelijke M parameter weerspiegeld. Verder worden een gedraineerde berekening gemaakt en zal gerekend worden met een permeabiliteit die 15 maal kleiner is dan de permeabiliteit zoals opgenomen in Tabel 11. Tot slot wordt een berekening gemaakt met de default  $k_0$ -waarde en een berekening met een OCR van 1 (voor alle lagen).

Naast de verschillende varianten wordt ingegaan op de zettingen bij een 1- en 2-dimensionale berekeningen.

| Variant                       | Beschrijving                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Basis</b>                  | <b>1</b> Plane strain consolidatie berekening, $\phi$ is bepaald bij 5% verticale rek, $K_0^{nc}=0,4$ , de rest van de modelparameters zijn aangehouden zoals opgenomen in de parameter tabellen.                                                                                                                                                  |
|                               | <b>2</b> Axisymmetrische consolidatie berekening, $\phi$ is bepaald bij 5% verticale rek, $K_0^{nc}=0,4$ , de rest van de modelparameters zijn aangehouden zoals opgenomen in de parameter tabellen.                                                                                                                                               |
| <b>Parameter gevoeligheid</b> | <b>3</b> Plane strain consolidatie berekening, $\phi$ en $K_0^{nc}$ zijn bepaald bij 2% verticale rek, de rest van de modelparameters zijn aangehouden zoals opgenomen in de parameter tabellen.                                                                                                                                                   |
|                               | <b>4</b> Axisymmetrische consolidatie berekening, $\phi$ en $K_0^{nc}$ zijn bepaald bij 2% verticale rek, de rest van de modelparameters zijn aangehouden zoals opgenomen in de parameter tabellen.                                                                                                                                                |
|                               | <b>5</b> Gedraineerde plane strain berekening, $\phi$ is bepaald bij 5% verticale rek, $K_0^{nc}=0,4$ , de rest van de modelparameters zijn aangehouden zoals opgenomen in de parameter tabellen.                                                                                                                                                  |
|                               | <b>6</b> Plane strain consolidatie berekening, $\phi$ is bepaald bij 5% verticale rek, $K_0^{nc}=0,4$ , de doorlatendheid (k) is 15 keer zo klein (de k-waarden zijn nu gelijk aan de k-waarden welke rechtstreeks volgen uit de samendrukkingsproeven), de rest van de modelparameters zijn aangehouden zoals opgenomen in de parameter tabellen. |
|                               | <b>7</b> Plane strain consolidatie berekening, $\phi$ is bepaald bij 5% verticale rek, $K_0^{nc}=0,4$ , OCR t.g.v. ontlasten: voor de $K_0$ wordt default waarde gehanteerd, de rest van de modelparameters zijn aangehouden zoals opgenomen in de parameter tabellen.                                                                             |
|                               | <b>8</b> Plane strain consolidatie berekening, $\phi$ is bepaald bij 5% verticale rek, $K_0^{nc}=0,4$ , de OCR is voor alle lagen 1, de rest van de modelparameters zijn aangehouden zoals opgenomen in de parameter tabellen.                                                                                                                     |
| <b>Fit</b>                    | <b>9</b> Plain strain consolidatie berekening, $\phi$ is bepaald bij 5% verticale rek, $K_0^{nc}=0,65$ , OCR=3,5, $\lambda^* = 1,35$ maal $\lambda^*$ (uit proeven), $\mu^* = 1,2 \mu^*$ (uit proeven), de rest van de modelparameters zijn aangehouden zoals opgenomen in de parameter tabellen.                                                  |

**Tabel 14: varianten profiel 'oost' No-Recess case**

### 5.5.1.1. Vergelijking tijd-zettingsverloop 1D en 2D SSC berekening



**Figuur 37: tijd-zettingsverloop midden top ophoging meetresultaten, SSC 1D en 2D berekening, No-Recess case**

Het tijd-zettingsverloop van variant 1 (2-dimensionaal) in het midden van de top van de ophoging is vergeleken met de 1-dimensionale SSC berekening en de meetresultaten. De 2-dimensionale berekening is een plane strain consolidatieberekening met een  $K_0^{nc}$ -waarde van 0,4. Een gedraineerde of axisymmetrische berekening geeft een vergelijkbaar tijd-zettingsverloop. Daarnaast is een berekening gemaakt met het Soft Soil model, welke tot  $t = 144$  dagen een overeenkomend tijd-zettingsverloop geeft.

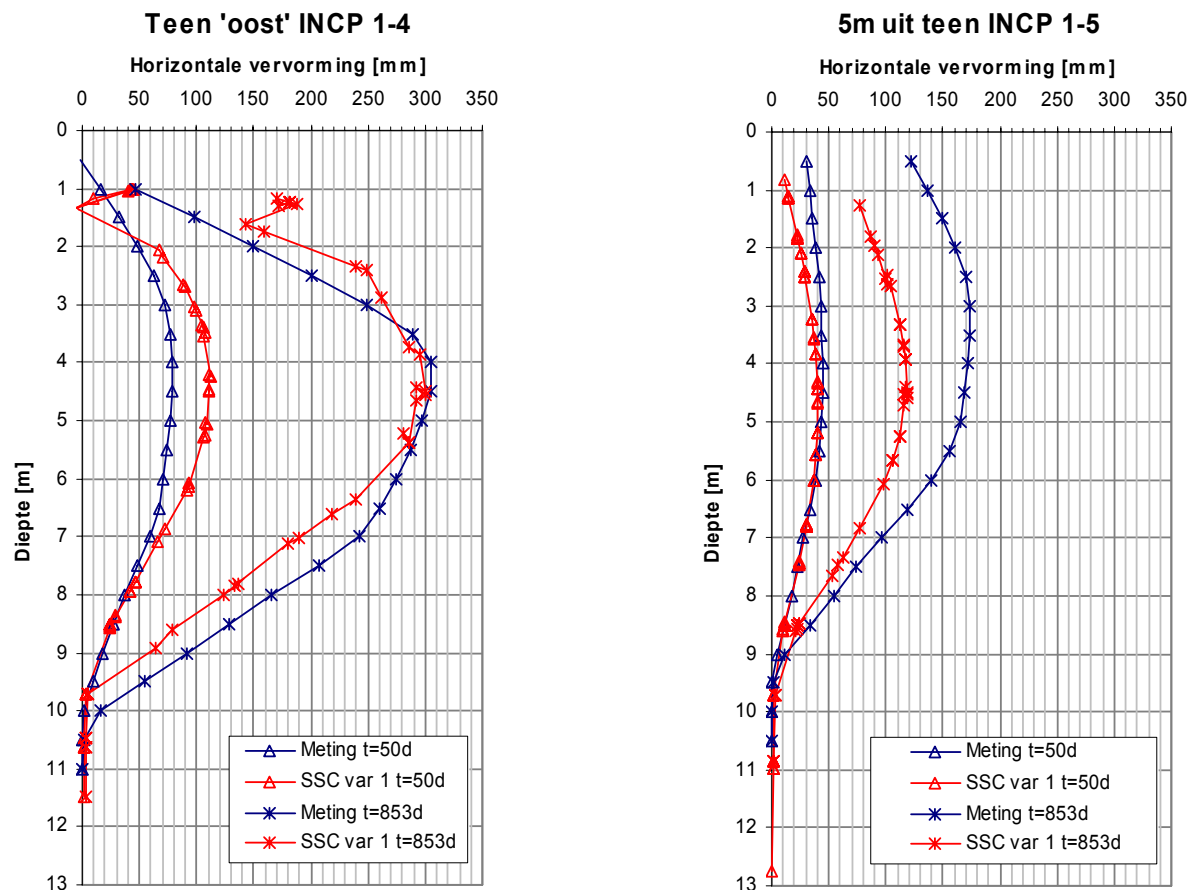
#### Interpretatie Figuur 37:

- Naast de 1D berekening overschat ook de 2D berekening de zetting in het begin van de gefaseerde ophoging significant. Later zal het tijd-zettingsverloop gefit worden (variant 9). Hieruit volgt welke parameters anders gekozen hadden moeten worden om het tijd-zettingsverloop correct te simuleren.
- De afwijkingen tussen de 1D en 2D berekening tijdens het aanbrengen van de gefaseerde ophoging is te verwaarlozen. Hieruit kan geconcludeerd worden dat in dit geval het 'positieve' effect van belasting spreiding wordt opgeheven door het 'negatieve' effect van horizontale vervorming op de verticale stijfheid.
- De kruiptak laat een noemenswaardig verschil zien. De 1D berekening heeft een minder steile kruiptak dan de 2D berekening (na 10000 dagen is het verschil 0,1 meter). De kruiptak van de 2D berekening komt beter overeen met de kruiptak van de meetresultaten. Hieruit volgt dat de ontwikkeling van de verticale kruip significant beïnvloed wordt door de horizontale kruip.
- Een 2D gedraineerde plane strain berekening met een  $K_0^{nc}$  van 0,4 (niet weergegeven in de figuur) geeft een vergelijkbaar tijd-zettingsverloop als de consolidatieberekening. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de slappe lagen snel genoeg draineren om instabiliteit t.g.v. ongedraineerd gedrag in de 'consolidatie' fase tegen te gaan. Daarnaast heeft de ongedraineerde stijfheid t.g.v. de snelle consolidatieperiode, nauwelijks invloed op de zetting.

### 5.5.1.2. 2-dimensionale varianten

In Tabel 15 en Tabel 16 zijn de resultaten van berekeningen en metingen voor respectievelijk de zetting en horizontale vervorming van de verschillende varianten opgenomen. De zettingen zijn bepaald aan de rand van de bovenkant van de ophoging (kruinrand) en 1,3 meter uit de teen. De horizontale vervormingen zijn bepaald aan de teen en 5 meter uit de teen.

Om een indicatie te krijgen van de horizontale vervorming als functie van de diepte is dit in Figuur 38, voor de meetresultaten en variant 1, uitgezet voor 50 en 853 dagen na de start realisatie ophoging.



**Figuur 38: horizontale vervorming als functie van de diepte profiel 'oost', variant 1 en meetresultaten**

#### Interpretatie Figuur 38:

- De SSC variant 1 overschat de horizontale vervorming aan het maaiveld t.p.v. de teen. De oorzaak hiervan is plastisch gedrag en is moeilijk te vermijden. Op de overige horizontale vervormingen heeft dit een te verwaarlozen invloed.
- De SSC berekening geeft een overeenkomend verloop van de horizontale vervorming in de diepte als de gemeten vervorming. De dikte van het totale slappe lagenpakket en de onderlinge eigenschappen tussen de verschillende lagen lijken daarmee correct gekozen.

|                           |   |                                                                                                                  | Zetting [m]          |                             |                        |       |                          |                             |                        |       | Verhouding<br>295d / 869d |                  |
|---------------------------|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-----------------------------|------------------------|-------|--------------------------|-----------------------------|------------------------|-------|---------------------------|------------------|
|                           |   |                                                                                                                  | kruinrand (SETP 1-5) |                             |                        |       | 1,3m uit teen (SETP 1-6) |                             |                        |       |                           |                  |
|                           |   |                                                                                                                  | 50d                  | 137d<br>(eind<br>aanbr oph) | 295d<br>(eind<br>cons) | 869d  | 50d                      | 137d<br>(eind<br>aanbr oph) | 295d<br>(eind<br>cons) | 869d  | kruin<br>rand             | 1,3m uit<br>teen |
|                           |   | Veld meting                                                                                                      | -0,58                | -1,52                       | -1,84                  | -1,96 | -0,05                    | -0,14                       | -0,20                  | -0,25 | 1,07                      | 1,25             |
| Basis                     | 1 | consolidatie; $\varphi_{(5\%)}^{\text{nc}}; K_0^{\text{nc}}=0,4$ ; plane strain                                  | -1,05                | -1,88                       | -2,06                  | -2,18 | -0,13                    | -0,24                       | -0,29                  | -0,33 | 1,06                      | 1,14             |
|                           | 2 | consolidatie; $\varphi_{(5\%)}; K_0^{\text{nc}}=0,4$ ; axisymmetrische                                           | -1,08                | -1,82                       | -2,00                  | -2,12 | -0,13                    | -0,20                       | -0,25                  | -0,28 | 1,06                      | 1,12             |
| Parameter<br>gevoeligheid | 3 | consolidatie; $\varphi_{(2\%)}; K_0^{\text{nc}}_{(2\%)}; \text{plane strain}$                                    | -1,08                | -2,00                       | -2,22                  | -2,35 | -0,08                    | -0,15                       | -0,18                  | -0,19 | 1,06                      | 1,06             |
|                           | 4 | consolidatie; $\varphi_{(2\%)}; K_0^{\text{nc}}_{(2\%)}; \text{axisymmetrisch}$                                  | -1,15                | -2,02                       | -2,27                  | -2,41 | -0,10                    | -0,15                       | -0,18                  | -0,20 | 1,06                      | 1,11             |
|                           | 5 | gedraineerde; $\varphi_{(5\%)}; K_0^{\text{nc}}=0,4$ ; plane strain                                              | -1,05                | -1,83                       | -2,01                  | -2,10 | -0,16                    | -0,26                       | -0,31                  | -0,35 | 1,04                      | 1,13             |
|                           | 6 | consolidatie; $\varphi_{(5\%)}; K_0^{\text{nc}}=0,4$ ; plane strain; $k=15 \times$ kleiner                       | -0,72                | -1,91                       | -2,26                  | -2,39 | 0,08                     | 0,08                        | -0,01                  | -0,10 | 1,06                      | 10,00            |
|                           | 7 | consolidatie; $\varphi_{(5\%)}; K_0^{\text{nc}}=0,4$ ; plane strain; $K_0$ default                               | -1,04                | -1,87                       | -2,06                  | -2,15 | -0,11                    | -0,24                       | -0,28                  | -0,31 | 1,04                      | 1,11             |
|                           | 8 | consolidatie; $\varphi_{(5\%)}; K_0^{\text{nc}}=0,4$ ; plane strain; OCR=1                                       | -1,19                | -2,02                       | -2,20                  | -2,30 | -0,23                    | -0,25                       | -0,26                  | -0,31 | 1,05                      | 1,19             |
| Fit                       | 9 | fit tijd-zettings verloop; $K_0^{\text{nc}}=0,65$ ; OCR=3,5; $\lambda^*$ en $\mu^*$ resp<br>1,35x en 1,2x groter | -0,48                | -1,53                       | -1,81                  | -1,94 | -0,27                    | -0,03                       | -0,01                  | -0,01 | 1,07                      | 1,00             |

|                           |         |                                                                              | Maximale horizontale verplaatsing [m] met bijbehorende diepte [m-NAP]                                     |        |                                                  |        |                                    |        |            |        |                       |        |                                                  |        |                                    |        |            |        |                                  |      |      |      |                           |                |      |  |     |  |      |  |      |  |
|---------------------------|---------|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------------------------------------------------|--------|------------------------------------|--------|------------|--------|-----------------------|--------|--------------------------------------------------|--------|------------------------------------|--------|------------|--------|----------------------------------|------|------|------|---------------------------|----------------|------|--|-----|--|------|--|------|--|
|                           |         |                                                                              | Teen (INCL1-4)                                                                                            |        |                                                  |        |                                    |        |            |        | 5m uit teen (INCL1-5) |        |                                                  |        |                                    |        |            |        |                                  |      |      |      |                           |                |      |  |     |  |      |  |      |  |
|                           |         |                                                                              | 50d                                                                                                       |        | 144d<br><small>(eind<br/>aanbrengen oph)</small> |        | 295d<br><small>(eind cons)</small> |        | 853d       |        | 50d                   |        | 144d<br><small>(eind<br/>aanbrengen oph)</small> |        | 295d<br><small>(eind cons)</small> |        | 853d       |        | Verhouding teen / 5m uit<br>teen |      |      |      | Verhouding<br>295d / 853d |                |      |  |     |  |      |  |      |  |
|                           |         |                                                                              | verpl                                                                                                     | diepte | verpl                                            | diepte | verpl                              | diepte | verpl      | diepte | verpl                 | diepte | verpl                                            | diepte | verpl                              | diepte | verpl      | diepte | 50d                              | 144d | 295d | 853d | teen                      | 5m uit<br>teen |      |  |     |  |      |  |      |  |
| Basis                     | Variant |                                                                              | Veld meting                                                                                               |        | 0,08 (3,8)                                       |        | 0,26 (3,6)                         |        | 0,29 (3,8) |        | 0,31 (3,8)            |        | 0,05 (3,5)                                       |        | 0,12 (3,8)                         |        | 0,16 (3,7) |        | 0,17 (3,8)                       |      | 1,6  |      | 2,2                       |                | 1,8  |  | 1,8 |  | 1,07 |  | 1,06 |  |
|                           | 1       | consolidatie; $\varphi_{(5\%)}; K_0^{nc}=0,4$ ; plane strain                 | 0,11                                                                                                      | (4,5)  | 0,24                                             | (4,4)  | 0,27                               | (4,4)  | 0,30       | (4,4)  | 0,04                  | (4,7)  | 0,09                                             | (4,6)  | 0,11                               | (4,4)  | 0,12       | (4,4)  | 2,8                              | 2,7  | 2,5  | 2,5  | 1,11                      | 1,09           |      |  |     |  |      |  |      |  |
| Parameter<br>gevoeligheid | 2       | consolidatie; $\varphi_{(5\%)}; K_0^{nc}=0,4$ ; axisymmetrische              | 0,09                                                                                                      | (4,5)  | 0,17                                             | (4,4)  | 0,19                               | (4,4)  | 0,21       | (4,5)  | 0,03                  | (5,0)  | 0,05                                             | (4,8)  | 0,06                               | (4,7)  | 0,07       | (4,6)  | 3,0                              | 3,4  | 3,2  | 3,0  | 1,11                      | 1,17           |      |  |     |  |      |  |      |  |
|                           | 3       | consolidatie; $\varphi_{(2\%)}; K_0^{nc}{}_{(2\%)}; plane strain$            | 0,18                                                                                                      | (4,2)  | 0,43                                             | (4,3)  | 0,51                               | (3,9)  | 0,56       | (4,1)  | 0,06                  | (3,0)  | 0,16                                             | (2,2)  | 0,21                               | (1,2)  | 0,25       | (1,1)  | 3,0                              | 2,7  | 2,4  | 2,2  | 1,10                      | 1,19           |      |  |     |  |      |  |      |  |
|                           | 4       | consolidatie; $\varphi_{(2\%)}; K_0^{nc}{}_{(2\%)}; axisymmetrisch$          | 0,14                                                                                                      | (4,1)  | 0,28                                             | (4,5)  | 0,33                               | (4,2)  | 0,38       | (4,3)  | 0,04                  | (3,8)  | 0,08                                             | (3,5)  | 0,09                               | (3,8)  | 0,11       | (3,6)  | 3,5                              | 3,5  | 3,7  | 3,5  | 1,15                      | 1,22           |      |  |     |  |      |  |      |  |
|                           | 5       | gedraineerde; $\varphi_{(5\%)}; K_0^{nc}=0,4$ ; plane strain                 | 0,11                                                                                                      | (4,4)  | 0,23                                             | (4,4)  | 0,26                               | (4,4)  | 0,29       | (4,4)  | 0,04                  | (4,7)  | 0,10                                             | (4,6)  | 0,11                               | (4,5)  | 0,12       | (4,5)  | 2,8                              | 2,3  | 2,4  | 2,4  | 1,12                      | 1,09           |      |  |     |  |      |  |      |  |
|                           | 6       | consolidatie; $\varphi_{(5\%)}; K_0^{nc}=0,4$ ; plane strain; k=15 x kleiner | 0,17                                                                                                      | (3,9)  | 0,37                                             | (3,9)  | 0,41                               | (3,5)  | 0,45       | (3,8)  | 0,10                  | (0,8)  | 0,13                                             | (2,4)  | 0,14                               | (2,3)  | 0,15       | (2,5)  | 1,7                              | 2,8  | 2,9  | 3,0  | 1,10                      | 1,07           |      |  |     |  |      |  |      |  |
|                           | 7       | consolidatie; $\varphi_{(5\%)}; K_0^{nc}=0,4$ ; plane strain; $K_0$ default  | 0,10                                                                                                      | (4,1)  | 0,23                                             | (4,3)  | 0,26                               | (4,2)  | 0,28       | (4,4)  | 0,03                  | (4,7)  | 0,07                                             | (4,3)  | 0,09                               | (4,3)  | 0,11       | (4,3)  | 3,3                              | 3,3  | 2,9  | 2,5  | 1,08                      | 1,22           |      |  |     |  |      |  |      |  |
|                           | 8       | consolidatie; $\varphi_{(5\%)}; K_0^{nc}=0,4$ ; plane strain; OCR=1          | 0,14                                                                                                      | (4,6)  | 0,29                                             | (4,6)  | 0,33                               | (4,6)  | 0,36       | (4,6)  | 0,05                  | (5,0)  | 0,11                                             | (4,8)  | 0,14                               | (4,6)  | 0,16       | (4,2)  | 2,8                              | 2,6  | 2,4  | 2,3  | 1,09                      | 1,14           |      |  |     |  |      |  |      |  |
|                           | Fit     | 9                                                                            | fit tijd-zettings verloop; $K_0^{nc}=0,65$ ; OCR=3,5; $\lambda^*$ en $\mu^*$<br>resp 1,35x en 1,2x groter | 0,06   | (4,3)                                            | 0,25   | (3,8)                              | 0,29   | (3,5)      | 0,32   | (3,5)                 | 0,03   | (3,4)                                            | 0,14   | (2,3)                              | 0,17   | (2,3)      | 0,18   | (4,3)                            | 2,0  | 1,8  | 1,7  | 1,8                       | 1,10           | 1,06 |  |     |  |      |  |      |  |

Algemene interpretatie Tabel 15 en Tabel 16:

- Behalve variant 9 overschat elke andere variant de zetting aan de kruinrand. Vooral bij  $t = 50$  dagen is dit verschil procentueel gezien erg groot (overschatting van ongeveer 200%). Dit is in overeenstemming met Figuur 37, waarbij de zetting in het midden van de kruin is uitgezet als functie van de tijd.
- De zetting 1,3 meter uit de teen is verschillend bij de verschillende varianten. De zetting wordt sterk beïnvloed door plastische gedrag. De bovenste klei- en zandlagen hebben de neiging zich plastisch te gedragen. De mate van dit plastisch gedrag is bepalend voor de zetting van het maaiveld. In extreme gevallen kan zwel ontstaan (variant 6). Daarnaast heeft squeezing invloed op de verticale vervorming naast de ophoging. De zetting aan de rand van een ophoging is meestal in de orde van decimeters en daarmee klein voor zettingen. Doordat de zetting op deze locaties moeilijk te berekenen is, vanwege de bovenstaande factoren, is een nauwkeurige bepaling van deze zetting niet eenvoudig.
- De verhouding tussen de horizontale vervorming aan de teen en 5 meter uit de teen komen bij de plane strain berekeningen beter overeen met de meetresultaten dan voor de axisymmetrische berekeningen. Vergelijk hiervoor variant 1 met 2 en variant 3 met 4. Hieruit kan geconcludeerd worden dat een plane strain berekening bij de beschreven geometrie de beste resultaten geeft als het gaat om de spreiding van de spanningen en daarmee ook vervormingen in het gebied van interesse.
- De verhouding tussen de zetting t.p.v. de kruinrand op  $t = 295$  en  $869$  dagen is bij alle varianten in de orde grote van de gemeten verhouding. Het verticale kruipaandeel wordt daardoor door alle varianten redelijkerwijs benaderd.
- De diepten van de gemeten maximale horizontale vervormingen, volgend uit de berekeningen, komen redelijk overeen met de gemeten diepten.

**Basis en parameter gevoeligheidsvarianten**Interpretatie basisvarianten 1 en 2 (plane strain en axisymmetrische berekening met  $K_0^{nc}=0,4$ ):

- De basis varianten verschillen van elkaar m.b.t. de geometrie. Variant 1 is een plane strain berekening en variant 2 is een axisymmetrische berekening. Bij de algemene interpretatie is reeds geconcludeerd dat een plane strain berekening bij de beschouwde geometrie de beste resultaten geeft m.b.t. de spreiding van spanningen en daarmee ook vervormingen, in het gebied van interesse. Daarnaast komen de individuele horizontale vervormingsresultaten van de plane strain berekening (variant 1) beduidend beter overeen met de meetresultaten dan de resultaten van de axisymmetrische berekening. Niettemin dient opgemerkt te worden dat de berekende horizontale vervormingen 5 meter uit de teen achter blijven op de gemeten waarden. De horizontale vervorming aan de teen komt daarentegen bijna exact overeen met de gemeten waarden.
- De horizontale kruip wordt door beide varianten goed benaderd.

De plane strain modellering geeft een beduidend beter beeld van de horizontale vervormingen dan de axisymmetrische modellering.

Interpretatie parameter gevoeligheidsvarianten 3 en 4 (plane strain en axisymmetrische berekening met een  $K_0^{nc}$ -waarde horende bij een  $\phi$  bepaald bij 2% verticale rek):

Er dient hierbij opgemerkt te worden dat het verschil in de sterkteparameter  $\phi$  (bepaald bij 2 of 5% verticale rek) in dit geval een te verwaarlozen invloed heeft op de vervormingen. De vervormingsverschillen tussen deze varianten en variant 1 en 2 zijn het gevolg van verschillen in  $M(K_0^{nc})$ -waarden.

- Variant 3 overschat de horizontale verplaatsing zowel aan de teen als 5 meter uit de teen. De oorzaak hiervan zit in een te hoge  $K_0^{nc}$ -waarde (gemiddeld 0,65) en daarmee een te lage M-waarde. Zoals eerder aangetoond is M bepalend voor de verhouding horizontale / verticale vervorming (paragraaf 4.2.2).
- Variant 4 overschat de horizontale vervorming aan de teen en onderschat de horizontale vervorming 5 meter uit de teen. De spanningen en daarmee vervormingen spreiden zich te snel vanwege de axisymmetrische modellering.
- De grotere horizontale vervormingen reduceren de verticale stijfheid. De zetting t.p.v. de rand van de ophoging wordt daardoor meer overschat dan bij de basisvarianten.
- De horizontale kruip wordt door beide varianten overschat.

De relatief hoge  $K_0^{nc}$ -waarden en daarmee lage M-waarden resulteert in slechte resultaten voor de zettingen en horizontale vervormingen.

Interpretatie parameter gevoeligheidsvariant 5 (als variant 1 maar dan gedraineerd, consolidatieproces is niet in beschouwing genomen):

- De zettingen en vervormingen komen overeen met de zettingen en horizontale vervormingen van variant 1. Hieruit kan geconcludeerd worden dat het consolidatieproces bij variant 1 voldoende snel verloopt. De ongedraineerde stijfheid is dus niet maatgevend voor de zettingen en horizontale vervormingen.

Interpretatie parameter gevoeligheidsvariant 6 (als variant 1 maar met een 15 maal kleinere k-waarde):

- Doordat de ongedraineerde stijfheid noemenswaardige invloed krijgt op de vervormingen, zijn de horizontale vervormingen groter dan bij variant 1.
- De grotere horizontale vervormingen reduceren de verticale stijfheid t.o.v. variant 1. De zetting onder de ophoging is hierdoor groter.
- De zetting 1,3 meter uit de teen is bij  $t = 50$  en  $144$  dagen positief (zwellen). De oorzaak hiervan is plastisch gedrag.

Interpretatie parameter gevoeligheidsvariant 7 (als variant 1 maar met een default  $K_0$ -waarde):

- Het verschil in de zettingen en vervormingen van deze variant en variant 1 is te verwaarlozen. Het in paragraaf 3.3.1.3 beschreven verschil tussen een initiële overgeconsolideerde spanningsconditie t.g.v. aging of ontlasten heeft vrijwel geen invloed op de zettingen en horizontale vervormingen. Daarbij dient opgemerkt te worden dat bij een hogere OCR, grotere  $K_0^{nc}$ -waarde en/of meer invloed van ongedraineerd gedrag de verschillen groter worden. Niettemin dient bij een correcte berekening de zwelcoëfficiënt  $\kappa^*$  bij een niet constante K-waarde (hetgeen het geval is bij een default aanname voor  $K_0$ ), berekend te worden volgens Vergelijking 77.

$$\kappa^* = \frac{(1 - \nu_{ur})(1 + 2K)}{(1 + \nu_{ur})} \alpha \quad (\text{indien } K \text{ niet constant is})$$

**Vergelijking 77**

Het directe rekaandeel neemt dan toe, waardoor de verschillen kleiner worden.

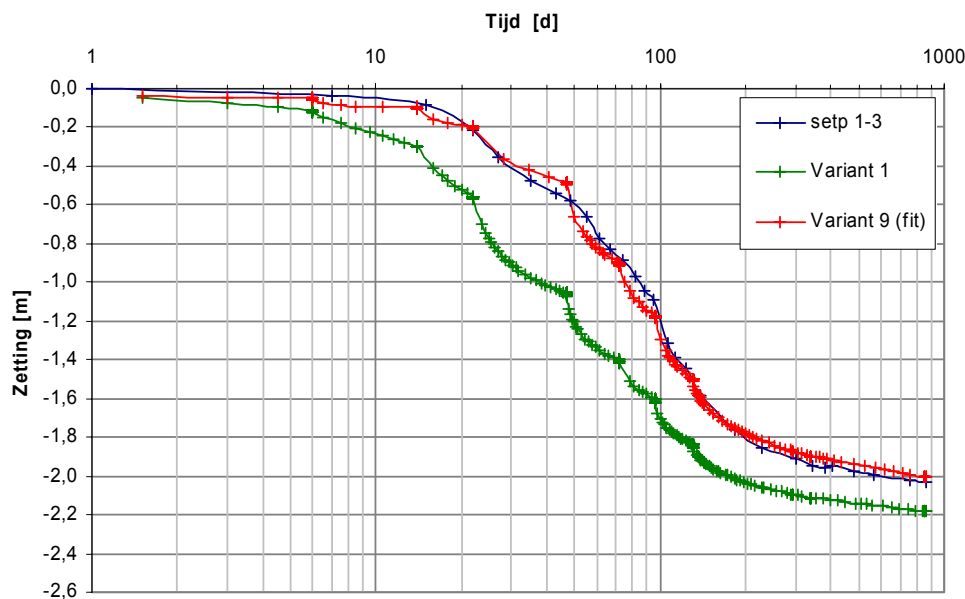
De keuze van het rekenen met een default  $K_0$ -waarde of een aangepaste  $K_0^{nc}$ -waarde heeft weinig invloed op zettingen en vervormingen. Bij een groot aandeel van de ongedraineerde stijfheid op de vervormingen kan de invloed significant toenemen.

Interpretatie parameter gevoeligheidsvariant 8 (als variant 1 maar de OCR is voor alle lagen 1):

- Alle zettingen en horizontale vervormingen zijn logischerwijs groter dan bij variant 1.
- De verhouding tussen de horizontale vervorming aan de teen en 5 meter uit de teen komen nagenoeg overeen met de verhoudingen van variant 1. De OCR heeft daarmee geen invloed op de spreiding. Bij variant 9 zal blijken dat een hoge OCR wel invloed heeft op de spreiding.

**Variant 9 (fitten van het tijd-zettingsverloop en horizontale vervorming)**

Voorafgaande aan de interpretatie van variant 9 wordt het gefitte tijd-zettingsverloop weergegeven. Daarnaast wordt beschreven waarom ervoor is gekozen de OCR,  $\lambda^*$ ,  $\mu^*$  en  $K_0^{nc}$  aan te passen om tot het resultaat te komen. In Figuur 39 zijn de meetresultaten van zakbaak 1-3, variant 1 en variant 9 (fit) weergegeven.



**Figuur 39: gefitte tijd-zettingsverloop profiel 'oost' (variant 9)**

Om ervoor te zorgen dat het tijd-zettingsverloop beter aansluit bij de gemeten zettingen is er in eerste instantie voor gekozen de OCR te verhogen. Dit omdat de zetting in het begin overschat wordt. Een hogere OCR zorgt er vooral voor dat de zetting in het begin gereduceerd wordt.

Om bij 50 dagen de zetting van de fit overeen te laten komen met de meetresultaten dient de zetting met 0,5 meter gereduceerd te worden. Dit zal er echter voor zorgen dat de eindzetting en kruiptak onderschat worden. Om een correctie aan te brengen voor de onderschatting m.b.t. de kruiptak en de eindzetting is ervoor gekozen de samendrukkingcoëfficiënt ( $\lambda^*$ ) en de seculaire rekcoëfficiënt ( $\mu^*$ ) te verhogen. Door deze parameters te verhogen wordt het tijd-zettingsverloop gefit. De horizontale vervorming wordt dan echter onderschat. Om dit te corrigeren wordt de  $K_0^{nc}$ -waarde verhoogd. Tot slot volgt dit tot de in Tabel 17 opgenomen parameters. De parameters wijken sterk af van de werkelijkheid. Een andere mogelijkheid m.b.t. het fitten van het tijd-zettingverloop is echter niet gevonden.

| Grondsoort        | $\lambda^*$<br>[-] | $\mu^*$<br>[-] | $K_0$ en $K_0^{nc}$<br>[-] | M<br>[-] | OCR <sub>yy</sub><br>[-] |
|-------------------|--------------------|----------------|----------------------------|----------|--------------------------|
| Klei toplaag      | 0,135              | 0,0047         | 0,65                       | 1,14     | 3,5                      |
| Bosveen           | 0,280              | 0,0140         | 0,65                       | 1,18     | 3,5                      |
| Klei (siltig.org) | 0,206              | 0,0089         | 0,65                       | 1,11     | 3,5                      |
| Basisveen         | 0,294              | 0,0122         | 0,65                       | 1,19     | 3,5                      |

**Tabel 17: aangepaste parameters t.b.v. fit profiel 'oost' (variant 9)**

Interpretatie Tabel 15 en Tabel 16 parameter gevoeligheidsvariant 9 (fitten van het tijd zettingsverloop en horizontale vervorming):

- De zettingen aan de kruinrand komen bijna exact overeen met de gemeten zettingen. Daarentegen worden de zettingen 1,3 meter uit de teen sterk onderschat.
- De horizontale vervorming komt op beide locaties bijna exact overeen met de gemeten waarden. De verhoudingen tussen de horizontale vervorming aan de teen en 5 meter uit de teen komen daarmee ook overeen.
- De verhouding tussen de horizontale vervorming aan de teen en 5 meter uit de teen komt goed overeen met de verhoudingen uit de meetresultaten.
- Het kruipaandeel van de zettingen komt slecht overeen met de metingen. Daarentegen komt het kruipaandeel van de horizontale vervormingen goed overeen met het kruipaandeel volgend uit de meetresultaten.

### **Conclusie**

De resultaten van variant 1 t/m 4 laten duidelijk zien dat de horizontale vervormingen aan de oostkant van de ophoging het beste gemodelleerd kunnen worden met een plane strain berekening. Verder geven deze varianten weer dat de keuze van een realistische  $K_0^{nc}$ -waarde van 0,4 het horizontale vervormingsgedrag beter benadert dan de hoge waarden die volgen uit de vuistregel van Jaky.

Variant 5 geeft duidelijk weer dat een consolidatie berekening hier achteraf gezien niet nodig was. Ongedraineerd gedrag bij variant 1 heeft geen significante invloed op de vervormingen.

Het tijd-zettingsverloop van de varianten 1 t/m 8 is niet in overeenstemming met de gemeten zettingen. Hoge 'onrealistische' OCR en  $K_0^{nc}$ -waarde zijn nodig om het tijd-zettingsverloop in combinatie met de horizontale vervorming te fitten. Aanbevelingen m.b.t. een betere parameterkeuze worden daarom achterwege gelaten.

## 5.5.2. Profiel 'noord'

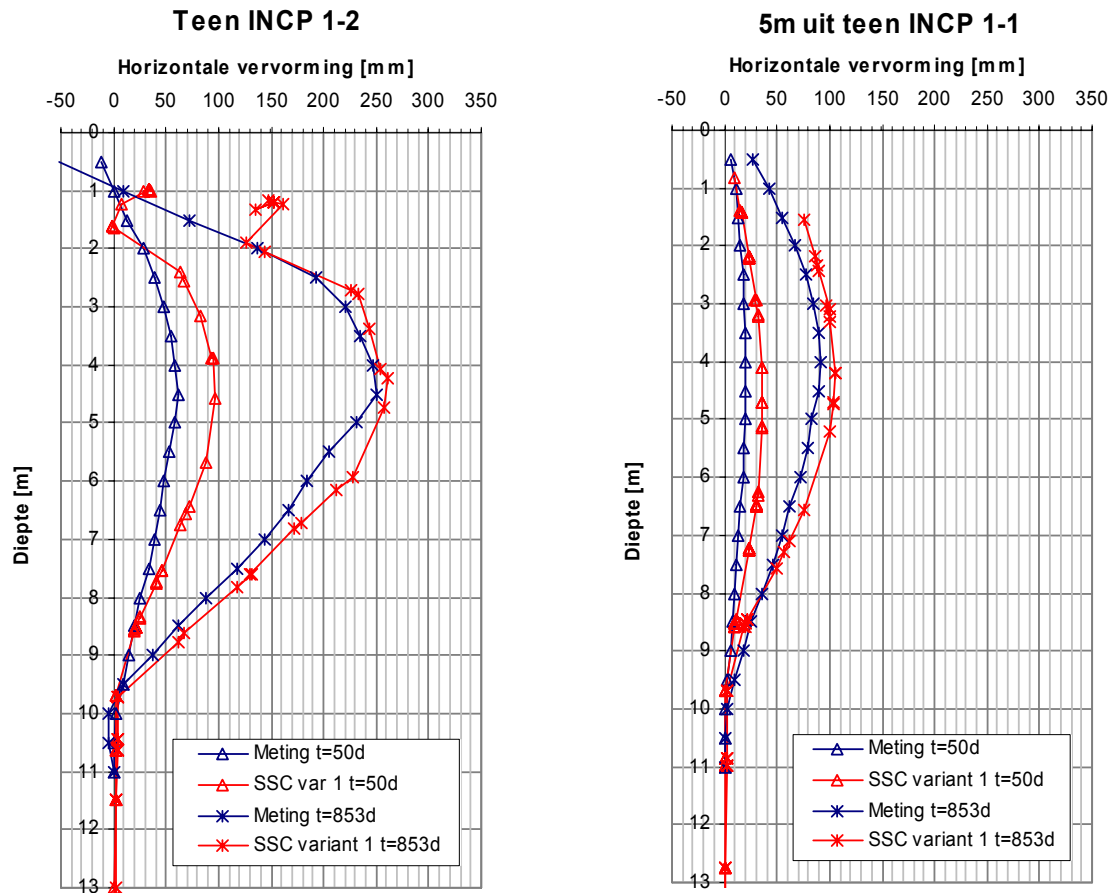
Voor de simulatie van profiel 'noord' is ervoor gekozen 4 varianten door te rekenen. Het betreffen twee axisymmetrische en twee plane strain berekeningen. In Tabel 18 zijn deze varianten opgenomen en beschreven.

| Variant |   | Beschrijving                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|---------|---|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Basis   | 1 | Plane strain consolidatie berekening, $\phi$ is bepaald bij 5% verticale rek, $K_0^{nc}=0,4$ , de rest van de modelparameters zijn aangehouden zoals opgenomen in de parameter tabellen.                                                                                                     |
|         | 2 | Axisymmetrische consolidatie berekening, $\phi$ is bepaald bij 5% verticale rek, $K_0^{nc}=0,4$ , de rest van de modelparameters zijn aangehouden zoals opgenomen in de parameter tabellen.                                                                                                  |
|         | 2 | Axisymmetrische consolidatie berekening, $\phi$ is bepaald bij 5% verticale rek, $K_0^{nc}=0,6$ , de rest van de modelparameters zijn aangehouden zoals opgenomen in de parameter tabellen.                                                                                                  |
| Fit     | 4 | Plane strain consolidatie berekening, $\phi$ is bepaald bij 5% verticale rek, $K_0^{nc}=0,55$ , $OCR=2,9$ , $\lambda^* = 1,4$ maal $\lambda^*$ (uit proeven), $\mu^* = 1,2$ $\mu^*$ (uit proeven), de rest van de modelparameters zijn aangehouden zoals opgenomen in de parameter tabellen. |

**Tabel 18: varianten profiel 'noord'**

In Tabel 15 en Tabel 16 zijn de resultaten van berekeningen en metingen voor respectievelijk de zettingen en horizontale vervormingen van de verschillende varianten opgenomen. De zettingen zijn bepaald aan de rand van de bovenkant van de ophoging (kruinrand) en 1,3 meter uit de teen. De horizontale vervormingen zijn bepaald aan de teen en 5 meter uit de teen.

Om een indicatie te krijgen van de horizontale vervorming als functie van de diepte is dit in Figuur 40, voor de meetresultaten en variant 1, uitgezet voor 50 en 853 dagen.



**Figuur 40: horizontale vervorming als functie van de diepte profiel 'noord', variant 1 en meetresultaten**

Interpretatie Figuur 40:

- Overeenkomend met de horizontale vervorming aan de oostkant van de ophoging overschat de SSC variant 1 'noord' de horizontale vervorming aan het maaiveld t.p.v. de teen. De oorzaak hiervan is plastisch gedrag en is moeilijk te vermijden. Op de overige horizontale vervormingen heeft dit een te verwaarlozen invloed.
- Ook weer overeenkomend met de horizontale vervorming aan de oostkant geeft de SSC berekening een overeenkomend verloop van de horizontale vervorming in de diepte als de gemeten vervorming. De dikte van het totale slappe lagenpakket en de onderlinge eigenschappen tussen de verschillende lagen lijken daarmee correct gekozen.

|       |   |                                                                                                       | Zetting [m]          |       |       |                       |                          |       |       |                       | Verhouding 295d / 869d |      |
|-------|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-------|-------|-----------------------|--------------------------|-------|-------|-----------------------|------------------------|------|
|       |   |                                                                                                       | kruinrand (SETP 1-2) |       |       |                       | 1,3m uit teen (SETP 1-1) |       |       |                       |                        |      |
|       |   |                                                                                                       | Variant              |       | 50d   | 137d (eind aanbr oph) | 295d (eind cons)         | 869d  | 50d   | 137d (eind aanbr oph) | 295d (eind cons)       | 869d |
| Basis |   | Veld meting                                                                                           | -0,49                | -1,36 | -1,67 | -1,79                 | -0,05                    | -0,14 | -0,20 | -0,25                 | 1,07                   | 1,25 |
|       | 1 | consolidatie; $\varphi_{(5\%)}; K_0^{nc}=0,4$ ; plane strain                                          | -0,96                | -1,73 | -1,91 | -2,00                 | -0,11                    | -0,21 | -0,26 | -0,31                 | 1,05                   | 1,19 |
|       | 2 | consolidatie; $\varphi_{(5\%)}; K_0^{nc}=0,4$ ; axisymmetrisch                                        | -0,98                | -1,67 | -1,84 | -1,96                 | -0,11                    | -0,19 | -0,22 | -0,27                 | 1,07                   | 1,23 |
|       | 3 | consolidatie; $\varphi_{(5\%)}; K_0^{nc}=0,6$ ; axisymmetrisch                                        | -1,03                | -1,79 | -2,00 | -2,14                 | -0,11                    | -0,19 | -0,23 | -0,26                 | 1,07                   | 1,13 |
| Fit   | 4 | fit tijd-zettings verloop; $K_0^{nc}=0,55$ ; OCR=2,9; $\lambda^*$ en $\mu^*$ resp 1,4x en 1,2x groter | -0,54                | -1,51 | -1,75 | -1,86                 | -0,03                    | -0,03 | -0,04 | -0,04                 | 1,06                   | 1,00 |

Tabel 19: zettingsresultaten profiel 'noord', metingen en berekeningen

|         |   |                                                                                                       | Maximale horizontale verplaatsing [m] met bijbehorende diepte [m-NAP] |        |                            |        |                  |        |            |        |                       |        |                            |        |                  |        | Verhouding teen / 5m uit teen |        |     |      | Verhouding 295d / 853d |      |      |             |     |  |      |  |      |  |
|---------|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|--------|----------------------------|--------|------------------|--------|------------|--------|-----------------------|--------|----------------------------|--------|------------------|--------|-------------------------------|--------|-----|------|------------------------|------|------|-------------|-----|--|------|--|------|--|
|         |   |                                                                                                       | Teen (INCL1-2)                                                        |        |                            |        |                  |        |            |        | 5m uit teen (INCL1-1) |        |                            |        |                  |        |                               |        |     |      |                        |      |      |             |     |  |      |  |      |  |
|         |   |                                                                                                       | 50d                                                                   |        | 144d (eind aanbrengen oph) |        | 295d (eind cons) |        | 853d       |        | 50d                   |        | 144d (eind aanbrengen oph) |        | 295d (eind cons) |        | 853d                          |        |     |      |                        |      |      |             |     |  |      |  |      |  |
|         |   |                                                                                                       | verpl                                                                 | diepte | verpl                      | diepte | verpl            | diepte | verpl      | diepte | verpl                 | diepte | verpl                      | diepte | verpl            | diepte | verpl                         | diepte | 50d | 144d | 295d                   | 853d | teen | 5m uit teen |     |  |      |  |      |  |
| Variant |   |                                                                                                       | 0,06 (4,4)                                                            |        | 0,20 (4,6)                 |        | 0,23 (4,8)       |        | 0,25 (4,7) |        | 0,02 (4,1)            |        | 0,07 (4,1)                 |        | 0,08 (4,1)       |        | 0,09 (4,2)                    |        | 3,0 |      | 2,9                    |      | 2,9  |             | 2,8 |  | 1,09 |  | 1,13 |  |
| Basis   | 1 | consolidatie; $\varphi_{(5\%)}; K_0^{nc}=0,4$ ; plane strain                                          | 0,10 (4,5)                                                            |        | 0,21 (4,4)                 |        | 0,24 (4,0)       |        | 0,26 (4,1) |        | 0,04 (4,5)            |        | 0,09 (4,4)                 |        | 0,09 (4,3)       |        | 0,11 (4,0)                    |        | 2,9 |      | 2,3                    |      | 2,7  |             | 2,4 |  | 1,08 |  | 1,22 |  |
|         | 2 | consolidatie; $\varphi_{(5\%)}; K_0^{nc}=0,4$ ; axisymmetrisch                                        | 0,08 (4,5)                                                            |        | 0,15 (4,3)                 |        | 0,17 (4,4)       |        | 0,18 (4,3) |        | 0,03 (4,9)            |        | 0,05 (4,6)                 |        | 0,05 (4,7)       |        | 0,06 (4,6)                    |        | 2,7 |      | 3,0                    |      | 3,4  |             | 3,0 |  | 1,06 |  | 1,20 |  |
|         | 3 | consolidatie; $\varphi_{(5\%)}; K_0^{nc}=0,6$ ; axisymmetrisch                                        | 0,10 (4,7)                                                            |        | 0,20 (4,2)                 |        | 0,24 (4,4)       |        | 0,27 (4,2) |        | 0,03 (4,5)            |        | 0,06 (4,2)                 |        | 0,08 (4,0)       |        | 0,09 (4,1)                    |        | 3,3 |      | 3,3                    |      | 3,0  |             | 3,0 |  | 1,13 |  | 1,13 |  |
| Fit     | 4 | fit tijd-zettings verloop; $K_0^{nc}=0,55$ ; OCR=2,9; $\lambda^*$ en $\mu^*$ resp 1,4x en 1,2x groter | 0,06 (4,5)                                                            |        | 0,18 (3,8)                 |        | 0,21 (3,8)       |        | 0,22 (2,7) |        | 0,03 (2,7)            |        | 0,09 (3,6)                 |        | 0,11 (3,1)       |        | 0,11 (3,0)                    |        | 2,0 |      | 2,0                    |      | 1,9  |             | 2,0 |  | 1,05 |  | 1,00 |  |

Tabel 20: resultaten horizontale vervormingen profiel 'noord', metingen en berekeningen

Opmerking tabellen:

De verhouding 295d / 853d of 295d / 869d geeft een indicatie van het kruipaandeel. Na 295 dagen is de consolidatie beëindigd (zie hiervoor ook bijlage 13.7) en op t = 853 / 869 dagen is de laatste meting verricht.

**Basis varianten**Interpretatie basisvarianten 1 en 2 (plane strain en axisymmetrische berekening met  $K_0^{nc}=0,4$ ):

- De horizontale vervormingen komen bij de plane strain modellering beter overeen met de meetresultaten dan bij de axisymmetrische modellering. De axisymmetrische geometrie onderschat de vervormingen.
- De verhouding tussen de horizontale vervorming aan de teen en 5 meter uit de teen komen zowel bij de plane strain als de axisymmetrische berekeningen redelijk overeen met de meetresultaten. Hieruit kan geconcludeerd worden de spreiding van de spanningen en daarmee ook de vervormingen door beide berekeningen redelijkerwijs benaderd worden. De plane strain modellering onderschat de spreiding en de axisymmetrische modellering overschat de spreiding.
- De verticale kruiptak wordt door beide varianten goed ingeschat
- De horizontale kruiptak wordt door beide varianten redelijk ingeschat.

Op basis van de verhouding horizontale vervorming aan de teen en 5 meter uit de teen kan niet geconcludeerd worden of een axisymmetrische of plane strain berekeningen de werkelijkheid beter benaderd. De individuele horizontale vervorming worden door de plane strain berekening correct ingeschat terwijl axisymmetrische modellering deze onderschat. Door de  $K_0^{nc}$  bij de axisymmetrische modellering te verhogen zullen de vervormingen toenemen. Er is bij variant 3 onderzocht bij welke  $K_0^{nc}$ -waarde de horizontale vervormingen overeenkomen met de gemeten vervormingen. De  $K_0^{nc}$ -waarde van 0,6 geeft overeenkomstige horizontale vervormingen. Deze waarde is aan de lage kant t.o.v. realistische  $K_0^{nc}$ -waarden.

Interpretatie basisvariant 3 (Als variant 2 maar dan met een  $K_0^{nc}$ -waarde van 0,6):

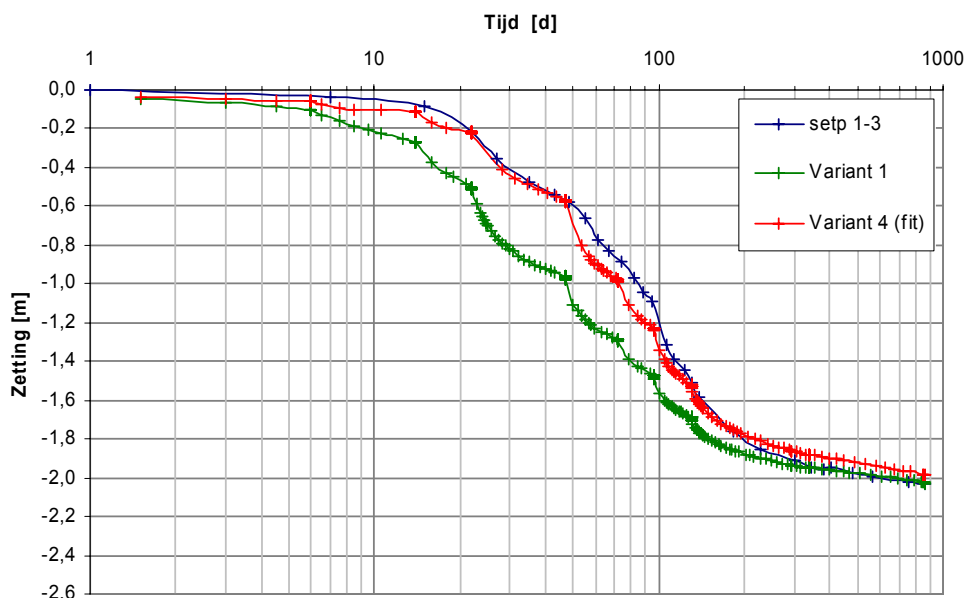
- De horizontale vervormingen sluiten goed aan bij de metingresultaten.
- De verhoudingen tussen de horizontale vervorming aan de teen en 5 meter uit de teen komt goed overeen met de gemeten verhouding.
- De verticale vervorming aan de kruinrand wordt door deze variant het meeste overschat.

De keuze van een axisymmetrische modellering bij een niet volledig axisymmetrische geometrie, met realistische  $K_0^{nc}$ -waarde, leidt tot een onderschatting van de vervormingen. De keuze van  $K_0^{nc}$  in combinatie met axisymmetrische of plane strain berekening dient goed overwogen te worden.

Lage  $K_0^{nc}$ -waarde, in combinatie met een axisymmetrische modellering van een niet volledig axisymmetrische geometrie, onderschatten de horizontale vervormingen.

### Variant 4 (fitten van het tijd-zettingsverloop en horizontale vervorming)

Voorafgaande aan de interpretatie van variant 4 wordt het gefitte tijd-zettingsverloop weergegeven (Figuur 41). Bij deze fit zijn dezelfde parameters aangepast als bij de fit van profiel 'oost' (variant 9). Bij een berekening met dezelfde parameters werden de zettingen en horizontale vervormingen onderschat.



Figuur 41: gefitte tijd-zettingsverloop profiel 'noord' (variant 4)

Dit resultaat is tot stand gekomen door de parameters te hanteren zoals opgenomen in Tabel 21.

| Grondsoort        | $\lambda^*$<br>[-] | $\mu^*$<br>[-] | $K_0$ en $K_0^{nc}$<br>[-] | $M$<br>[-] | $OCR_{yy}$<br>[-] |
|-------------------|--------------------|----------------|----------------------------|------------|-------------------|
| Klei toplaag      | 0,140              | 0,0047         | 0,55                       | 1,41       | 2,9               |
| Bosveen           | 0,291              | 0,0140         | 0,55                       | 1,45       | 2,9               |
| Klei (siltig,org) | 0,213              | 0,0089         | 0,55                       | 1,38       | 2,9               |
| Basisveen         | 0,305              | 0,0122         | 0,55                       | 1,46       | 2,9               |

Tabel 21: aangepaste modelparameters t.b.v. fit profiel 'noord' (variant 4)

De zetting wordt bij variant 1 (noord) iets minder overschat dan bij variant 1 (oost). Dit komt doordat bij profiel 'noord' de 'stijve' toplaag, dikker zijn, dan bij profiel 'oost'. De toename van de OCR hoeft daardoor minder groot te zijn dan bij het fitten van profiel 'oost'. Door de lagere OCR neemt de horizontale stijfheid minder toe,  $K_0^{nc}$  hoeft daarom minder aangepast te worden.

#### Interpretatie variant 4:

- De zettingen t.p.v. de kruinrand komen goed overeen met de metingen. De zettingen 1,3 meter uit de teen worden daarentegen sterk onderschat.
- De horizontale vervormingen sluiten redelijk goed aan bij de metingen. De horizontale vervorming bij 50 dagen wordt beduidend beter ingeschat dan bij de ander varianten.
- De verhoudingen tussen de horizontale vervormingen aan de teen en 5 meter uit de teen zijn kleiner dan de verhoudingen volgend uit de metingresultaten. De plane strain modellering onderschat in dit geval de spreiding.

**Conclusie**

De resultaten van variant 1 en 2 laten duidelijk zien dat de horizontale vervormingen aan de noordkant van de ophoging het beste gemodelleerd kunnen worden met een plane strain berekening. Daarnaast dient opgemerkt te worden dat zowel de axisymmetrische als plane strain modellering de spreiding redelijk inschatten.

Het tijd-zettingsverloop van de varianten 1 t/m 3 is niet in overeenstemming met de gemeten zettingen. Overeenkomend met profiel 'oost' is een 'onrealistisch' hoge OCR nodig om het tijd-zettingsverloop te fitten. Daarnaast wijkt de aangepaste  $K_0^{nc}$ -waarde af van de realistische waarden. Aanbevelingen m.b.t. een betere parameterkeuze worden daarom achterwege gelaten.

## 5.6. Invloed parameters

In Figuur 27 van paragraaf 4.6 is een flowchart weergegeven, welke de invloed van de parameters van het SSC model op verschillende resultaten weergeeft. In deze paragraaf is in tabelvorm weergegevens welke parameters significante invloed hebben op de verschillende vervormingen.

In Tabel 22 is de invloed van parameters op de vervormingen weergegeven waarbij ongedraineerd gedrag te verwaarlozen is. Variant 1 van profiel 'oost' is hierbij gehandhaafd als basis berekening, t.o.v. deze variant zijn de parameters aangepast. Er zijn daarnaast berekeningen gemaakt waarbij parameters zijn aangepast t.o.v. variant 6 van profiel 'oost'. Bij deze variant heeft ongedraineerd gedrag significante invloed op de vervormingen. In Tabel 23 is de invloed van parameters op vervormingen weergegevens, waarbij ongedraineerd gedrag significante invloed heeft op de vervormingen.

A.d.h.v. de tabellen met opmerkingen is het voor de ingenieurspraktijk eenvoudig te achterhalen welke parameter significante invloed heeft op welke resultaten. De resultaten zijn opgesplitst in horizontale vervorming (vooral aan de teen van de ophoging), zetting (onder ophoging), verhouding horizontale / verticale vervorming, verticale kruip en horizontale kruip. Voor het achterhalen van de invloed op de kruip is gekeken tot 10000 dagen na het aanbrengen van de ophoging.

| Invoer parameter                 | Horizontale vervorming | Zetting (onder ophoging) | Verhouding hor/vert vervorming | Verticale kruip | Horizontale kruip |
|----------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------------|-----------------|-------------------|
| afname $k$                       | toename                | toename                  | toename                        | -               | -                 |
| afname $\varphi$                 | toename                | -                        | toename                        | -               | -                 |
| toename $\varphi$                | -                      | -                        | -                              | -               | -                 |
| toename $\kappa^*$               | toename                | -                        | toename                        | -               | -                 |
| toename $\lambda^*$              | toename                | toename                  | afname                         | -               | -                 |
| toename $\mu^*$                  | toename                | toename                  | toename                        | toename         | toename           |
| toename $K_0^{nc}$ (afname $M$ ) | toename                | toename                  | toename                        | toename         | toename           |
| toename OCR of POP               | afname                 | afname                   | afname                         | afname          | afname            |
| toename $k_0$                    | -                      | -                        | -                              | -               | -                 |

**Tabel 22: invloed parameters op verschillende resultaten, waarbij ongedraineerd gedrag geen invloed heeft op de vervormingen**

### Opmerkingen Tabel 22:

Veranderingen in  $\kappa^*$  en  $\lambda^*$  hebben invloed op  $M$  (zie hiervoor ook Vergelijking 34). Indien de verhoudingen tussen de samendrukkingsparameters realistisch zijn (zoals beschreven in paragraaf 3.3.1.2.2) is de invloed van  $\kappa^*$  en  $\lambda^*$  op  $M$  te verwaarlozen. Bij het realiseren van deze tabel zijn de verhoudingen te allen tijde realistisch (ook na verandering van verschillende parameters). Zodoende wordt alleen de invloed van de betreffende parameter in rekening genomen en niet de invloed van  $M$ .

Afname  $k$ : Zoals eerder opgemerkt heeft ongedraineerd gedrag geen invloed op de resultaten van variant 1, profiel 'oost'. Indien  $k$  afneemt krijgt ongedraineerd gedrag invloed op de vervormingen, zoals weergegeven in de tabel.

Toename  $\varphi$ : Een toename van  $\varphi$  heeft geen gevolgen voor de vervormingen. Plastische punten zijn niet dominerend voor de vervormingen van variant 1.

Toename  $\kappa^*$ : Een toename van  $\kappa^*$  heeft vrijwel geen invloed op zetting onder de ophoging, omdat de grensspanning onder de ophoging in sterke mate overschreden wordt. Onder de ophoging is het aandeel spanningsafhankelijke seculaire rek op de totale rek vele malen groter dan het aandeel directe rek. Indien de grensspanning in mindere mate overschreden wordt (doordat de OCR hoger is of de spanningstoename kleiner) resulteert dit bij een toename van  $\kappa^*$  in significant meer zetting.

Voor de horizontale vervormingen aan weerszijde van de teen geldt daarentegen dat deze voornamelijk optreden in een overgeconsolideerde toestand. Een toename van de directe rek parameter ( $\kappa^*$ ) resulteert daarmee in een toename van de vervorming.

- Toename  $\lambda^*$ : Een toename van  $\lambda^*$  resulteert in een grotere procentuele toename in zetting dan in horizontale vervorming. De verhouding horizontale / verticale vervorming neemt af. De oorzaak hiervan is de mate van het overschrijden van de grensspanning. onder de ophoging wordt de grensspanning in sterke mate overschreden. Aan weerszijde van de ophoging is deze overschrijding gering. Het aandeel spanningsafhankelijke seculaire rek ( $\lambda^*$ ) is groter voor de zetting dan voor de horizontale vervorming. Een toename van  $\lambda^*$  resulteert daardoor in een afname van de horizontale / verticale vervormingsverhouding.
- Toename OCR: Kleine toe- of afnamen van de OCR of POP hebben geen gevolg voor de verticale en horizontale kruip. De spanningsverhoging wist de geschiedenis volledig uit waardoor de OCR na belastingen geen invloed meer heeft op de vervormingen. Indien de OCR in een dergelijke mate verhoogd wordt dat de initiële OCR ook na belastingen nog invloed heeft dan resulteert dit in een afname van de kruip, hetgeen in de tabel is weergegeven.
- $K_0$ : Bij de mate van overconsolidatie in deze berekening wijkt een default  $K_0$ -waarde beperkt af van  $K_0^{nc}$ . Er treden daardoor geen significante veranderingen op in vervormingen tussen een berekening met een default  $K_0$ -waarde en een  $K_0$ -waarde die gelijk zijn aan  $K_0^{nc}$ . Bij hoge mate van overconsolidatie kan  $K_0$  significante invloed krijgen op vooral de horizontale vervormingen.

| Invoer parameter                 | Horizontale vervorming | Zetting (onder ophoging) | Verhouding hor/vert vervorming | Verticale kruip | Horizontale kruip |
|----------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------------|-----------------|-------------------|
| toename $k$                      | afname                 | afname                   | afname                         | -               | -                 |
| toename $\phi$                   | afname                 | -                        | afname                         | -               | -                 |
| toename $\kappa^*$               | toename                | -                        | toename                        | -               | -                 |
| toename $\lambda^*$              | toename                | toename                  | afname                         | -               | -                 |
| toename $\mu^*$                  | toename                | toename                  | toename                        | toename         | toename           |
| toename $K_0^{nc}$ (afname $M$ ) | toename                | toename                  | toename                        | toename         | toename           |
| toename OCR of POP               | afname                 | afname                   | afname                         | afname          | afname            |
| toename $K_0$                    | afname                 | -                        | afname                         | -               | toename           |
| toename $v_{ur}$                 | toename                | -                        | toename                        | -               | -                 |

**Tabel 23: invloed parameters op verschillende resultaten, waarbij ongedraineerd gedrag significante invloed heeft op de vervormingen**

Opmerkingen Tabel 23:

De tabel komt in grote lijnen overeen met Tabel 22. Verschillen tussen de tabellen bevinden zich bij de invloed van  $\phi$ ,  $K_0$  en  $v_{ur}$ . Wanneer ongedraineerd gedrag significante invloed heeft op de vervormingen neemt de invloed van  $\phi$ ,  $K_0$  en  $v_{ur}$  toe. Hierbij dient opgemerkt te worden dat  $v_{ur}$  alleen invloed heeft indien  $K_0$  niet gelijk is aan  $K_0^{nc}$ . De invloed van  $v_{ur}$  zoals weergegeven in de tabel is dan ook geldig indien  $K_0$  niet gelijk is aan  $K_0^{nc}$ .

## 5.7. Conclusie

Uit beide modelleringen (profiel 'oost' en 'noord') volgt dat de realistische  $K_0^{nc}$ -waarden in combinatie met een plane strain berekening de gemeten horizontale vervormingen het beste benaderen. Bij modelleringen dient goed overwogen te worden of er axisymmetrisch of plane strain gerekend wordt, vooral bij geometrisch niet volledige axisymmetrische of plain strain situaties. Uit deze case volgt dat de vervormingen tot 5m uit de teen van de ophoging, bij realistische  $K_0^{nc}$ -waarden, het beste benaderd wordt door plane strain berekeningen (de rechte zijden van het hoge gedeelte van de terp zijn 18 en 10 meter). Verder van de teen wordt verwacht dat de axisymmetrische modellering de werkelijkheid beter benadert. Naarmate de afstand tot de teen toeneemt, neemt de horizontale vervorming af en zullen de absolute verschillen tussen een plane strain en axisymmetrische berekening afnemen. Niettemin neemt het procentuele verschil tussen een plane strain en axisymmetrische modellering toe naarmate de afstand tot de teen toeneemt. De afstand van het punt van interesse tot de teen, in combinatie met de lengte van de rechte zijde van een terp, is bepalend voor de keuze tussen plane strain of axisymmetrisch.

Het verschil in bodemopbouw tussen profiel 'oost' en 'noord' resulteert bij profiel noord in stijver gedrag vanwege de dikkere 'stijve' toplagen (klei toplaag en zand). De keuze m.b.t. de verschillen in toplagen tussen de twee profielen lijkt hier correct gekozen. Profiel 'noord' geeft zoals ook volgt uit de metingen kleinere zettingen en horizontale vervormingen.

Het tijd-zettingsverloop wordt niet goed benaderd door het SSC model. In dit geval wordt de zetting aan het einde van de gefaseerde ophoging redelijk goed ingeschat. De zetting aan het begin wordt echter aanzienlijk overschat. Niettemin lijkt de verhouding horizontale over verticale vervorming redelijk overeen te komen met de gemeten verhoudingen.

Om het tijd-zettingsverloop en vervolgens de horizontale vervorming bij beide profielen te fitten aan de gemeten zettingen dienen de OCR,  $K_0^{nc}$ ,  $\lambda^*$  en  $\mu^*$  verhoogd te worden. Dit resulteert in parameters die de werkelijkheid slecht benaderen. Aanbevelingen m.b.t. een betere parameterkeuze worden daarom achterwege gelaten.

Er wordt aanbevolen om naast een SSC berekening een berekening te maken met een vertrouwd zettingsmodel. De berekening met een vertrouwd zettingsmodel geeft een beter (vertrouwder) inzicht in het tijd-zettingsverloop. Zodoende volgt of de SSC berekening de zetting op het tijdstip van interesse correct inschat. Indien dit niet het geval is dient overwogen te worden in hoeverre de horizontale vervormingen volgend uit de SSC berekening overeen zullen komen met de werkelijkheid.



## 6. Slotanalyse

### 6.1. Conclusies

De termen isotroop en anisotroop in de titel van deze scriptie, *Plaxis Soft Soil Creep: de toepassing van een isotroop kruipmodel op de anisotrope ondergrond*, verwijzen naar het grondgedrag (het modelleren van de anisotrope ondergrond met een isotroop kruipmodel). De termen isotroop en anisotroop hebben eveneens betrekking op de spanningen. Het SSC model is gebaseerd op isotrope spanningscondities terwijl de spanningen in de ondergrond zich normaliter anisotroop verhouden.

Bij isotrope spanningscondities is de gronddrukcoëfficiënt  $K$  constant ( $K=1$ ) tijdens belasten, ontlasten en herbelasten. Daarentegen is  $K$ , bij anisotrope spanningscondities niet constant bij ontlasten en herbelasten. Bij een constante  $K$ -waarde zijn alle modelvergelijkingen in elkaar om te schrijven. Indien  $K$  niet constant is, zoals in de meeste praktijksituaties, zijn de modelvergelijkingen niet meer in elkaar om te schrijven. Dit is het gevolg van de directe rek beschrijving a.d.h.v. de isotrope spanning ( $p'$ ) en de seculaire rek beschrijving a.d.h.v. de equivalente spanning ( $p^{eq}$ ). De verhouding tussen deze twee spanningen is variabel bij niet constante  $K$ -waarden. De formele modelvergelijkingen gaan echter uit van een constante verhouding. De rekverschillen die hierdoor ontstaan hebben over het algemeen geen significante invloed op de totale rekken. Het verschil treedt op bij overgeconsolideerde grond. Spanningsverhogingen in overgeconsolideerde grond resulteren in kleinere rekken t.o.v. spanningsverhogingen bij normaal geconsolideerde grond.

Onderstaand zal in worden gegaan op de onderzoeksvragen die bij de doelstellingen zijn geformuleerd. Voorafgaande aan elke sub-conclusie wordt de bijbehorende onderzoeksvraag cursief en vetgedrukt herhaald.

***Het achterhalen van de oorzaken van de verschillen in de verticale vervorming tussen het SSC- en a,b,c-Isotachenmodel, bij 1-dimensionale vervorming. Daarnaast onderzoeken of er relaties te vinden zijn tussen deze verschillen.***

*Formule technisch gezien komen bij 1-dimensionale vervormingsberekeningen met constante  $K$ -waarden de zettingen van een SSC berekening exact overeen met de zettingen van het a,b,c-Isotachenmodel. Indien  $K$  niet constant is zullen er normaliter te verwaarlozen verschillen ontstaan tussen de zettingen berekend met de verschillende modellen, omdat de omrekening van  $a$  naar  $\kappa^*$  niet exact is.*

De a,b,c-Isotachenparameters zijn gebaseerd op verticale spanningen en de SSC parameters op equivalente en isotrope spanningen. De verhoudingen tussen willekeurige spanningen zijn constant bij constante  $K$ -waarden.

Bij spanningstoename zijn de equivalente, isotrope en verticale spanningsverhoudingen gelijk aan elkaar. De parameters kunnen bij gelijke spanningsverhoudingen in verschillende spannings-rek grafieken uitgezet worden. De zwelcoëfficiënt  $\kappa^*$  van het SSC model is nu gelijk aan de directe samendrukkingcoëfficiënt  $a$  van het a,b,c-Isotachenmodel. Aangezien de samendrukkingcoëfficiënt  $\lambda^*$  en de natuurlijke samendrukkingcoëfficiënt  $b$  in een samendrukkingproef bepaald worden op de 1 dagslijn kunnen deze altijd rechtstreeks in elkaar worden omgeschreven. Op de 1 dagslijn is  $K$  immers constant. De tot nu toe beschreven parameters zijn spanningsafhankelijk, er resten nu echter nog de intrinsieke tijdsafhankelijke parameters. De seculaire rekcoëfficiënt  $\mu^*$  en de natuurlijke seculaire samendrukkingcoëfficiënt  $c$  worden bepaald a.d.h.v. de opgetreden rek t.g.v. een intrinsieke tijdstoename. Deze parameters kunnen daardoor altijd één op één in elkaar worden omgerekend.

Om een ontlaststap in het SSC model overeen te laten komen met een ontlaststap in het a,b,c-Isotachenmodel, dient  $v_{ur}$  gelijk te zijn aan  $v$ ,  $K$  is dan constant.  $K$  is ook constant wanneer vanuit een initiële spanningstoestand, waarbij  $K_0$  gelijk is aan  $K_0^{nc}$ , wordt herbelast.

Bij  $K$ -waarden die niet constant zijn, is de omrekening tussen  $a$  en  $\kappa^*$  afhankelijk van  $v_{ur}$  en  $K$ .  $K$  is niet constant tijdens ontlasten en herbelasten,  $\kappa^*$  wordt dan berekend a.d.h.v. een gemiddelde  $K$  waardoor er normaliter te verwaarlozen verschillen ontstaan tussen het SSC- en a,b,c-Isotachenmodel.

**Verificatie van de gevonden oorzaken bij onderzoeksvraag 1 a.d.h.v. samendrukkingsproeven en bestaande projecten.**

De simulatie van de samendrukkingsproef (waarbij  $v_{ur}$  gelijk is aan  $v$ ) bevestigt dat zowel het SSC- als het a,b,c-Isotachenmodel, hetzelfde spannings-rek verloop geven.

Uit de simulatie van de No-Recess case volgt dat een 1-dimensionale Plaxis SSC berekening niet overeenkomt met een MSettle a,b,c-Isotachenberekening. De oorzaak hiervan is het op een andere wijze in rekening brengen van het onderwaterzakken van belastingen in de vorm van grondlagen (bij de samendrukkingsproef speelt onderwaterzakken geen rol). In Plaxis is onderwaterzakken opgenomen in het iteratieproces. MSettle gaat uit van de eindzetting, waardoor onderwaterzakken minder nauwkeurig in rekening wordt genomen.

**Het achterhalen van een fundamentele verklaring waarom geadviseerd wordt de OCR in het SSC model groter dan of gelijk aan 1,3 à 1,4 te kiezen.**

*Het SSC model berekent bij 1-dimensionale vervorming en OCR-waarden groter dan 1 grotere initiële seculaire reksnelheden dan het a,b,c-Isotachenmodel indien  $\kappa^*$  groter is dan  $a$  en/of  $K_0$  groter is dan  $K_0^{nc}$ . Bij berekeningen waarbij  $\kappa^*$  groter is dan  $a$  en de initiële seculaire reksnelheid grote invloed heeft op de zetting kan ervoor gekozen worden de OCR bij SSC berekeningen groter aan te nemen dan bij a,b,c-Isotachenberekeningen.*

In de literatuur wordt regelmatig terug gevonden dat de OCR bij SSC berekeningen groter dan of gelijk aan 1,3 à 1,4 moet zijn aangezien anders de initiële seculaire reksnelheid en daarmee de zetting t.g.v. een kruiptijd overschat wordt. Ook bij het a,b,c-Isotachenmodel speelt dit fenomeen.

Voor een correcte benadering van de zetting dient een hogere OCR ingevoerd te worden dan volgt uit een samendrukkingsproef. Om te onderzoeken of het SSC model de zetting bij 1-dimensionale vervorming in dezelfde mate overschat als het a,b,c-Isotachenmodel, zijn de initiële seculaire reksnelheidsvergelijkingen van het SSC- en a,b,c-Isotachenmodel met elkaar vergeleken.

Hieruit volgt dat in overgeconsolideerde spanningsituaties waarbij  $\kappa^*$  groter is dan  $a$  de initiële seculaire reksnelheid van het SSC model significant groter kan zijn dan de initiële seculaire reksnelheid van het a,b,c-Isotachenmodel. Voor een 10 meter dikke slappe laag met realistische parameters kan dit bij een kruiptijd van 10000 dagen oplopen tot 0,08 meter zettingsverschil (op een SSC zetting van 0,29 meter).

Daarnaast is de initiële seculaire reksnelheid van het SSC model groter dan de initiële seculaire reksnelheid van het a,b,c-Isotachenmodel bij overgeconsolideerde spanningssituatie waarbij  $K_0$  groter is dan  $K_0^{nc}$ . Voor een 10 meter dikke slappe laag met realistische parameters kan dit bij een kruiptijd van 10000 dagen oplopen tot 0,04 meter zettingsverschil (op een SSC zetting van 0,09 meter).

Er kunnen geen harde conclusies worden getrokken m.b.t. een correcte keuze voor de OCR. Dit is afhankelijk van de situatie. Bij belastingen beïnvloedt de OCR naast de initiële seculaire reksnelheid ook de eindzetting.

***De werking van het SSC model a.d.h.v. praktische voorbeelden uitvoerig beschrijven, waarbij in het bijzonder aandacht zal worden besteed aan de invloed van de  $K_0^{nc}$ -afhankelijke M parameter.***

*Bij 1-dimensionale samendrukking wordt de zetting nauwelijks door de M-waarde beïnvloed. Bij 2- en 3-dimensionale vervorming wordt de invloed van M noemenswaardig voor zowel de zetting als horizontale vervorming. Een grotere waarde voor M (kleinere waarde voor  $K_0^{nc}$ ) resulteert voornamelijk in kleinere horizontale vervormingen maar ook in kleinere zettingen. Correcte aannamen voor  $K_0^{nc}$  zijn daarom belangrijk bij het bepalen van de horizontale vervormingen met het SSC model. De veelgebruikte vuistregel van Jaky geeft bij klei en veen vaak te hoge waarden voor  $K_0^{nc}$ . Beter kunnen gemeten waarden van een  $K_0$ -c.r.s. proef gebruikt worden, die veel realistischer zijn.*

Bij 1-dimensionale samendrukking beïnvloedt M alleen beneden de grensspanning de equivalente spanningsverhouding bij spanningsverhogingen. De grond is dan overgeconsolideerd en de invloed op de verhoudingen is klein, waardoor de invloed op de totale rek bij belasten tot boven de grensspanning normaliter verwaarloosbaar is.

De M parameter is bepalend voor de steilheid van de equivalente spanningsellips (kruipfunctie). Naarmate M toeneemt is de ellips steiler en de numerieke waarde voor de equivalente spanning kleiner. Bij kleinere equivalente spanningen is het bij 2- en 3-dimensionale vervorming normaliter zo dat de verhouding tussen twee equivalente spanningen t.g.v. een spanningstoename kleiner is. De seculaire volumieke rek is daardoor ook kleiner. Daarnaast bepaald de steilheid van de ellips de richting van de seculaire reksnelheid in een p'-q vlak. Bij een steilere ellips is het deviatorische aandeel van de seculaire reksnelheid kleiner, hetgeen vooral merkbaar zal zijn voor de horizontale vervormingen. Indien M toeneemt nemen vooral de horizontale vervormingen in waarde af.

De invloed van M is het grootste naarmate spanningspunten in een p'-q grafiek zich verder van de p'-as bevinden en/of een spanningspad steiler verloopt. Voor default  $M(K_0^{nc})$ -waarde van het SS of SSC model resulteert dit voor een 'steil' spanningspad, volgend uit een geconsolideerde gedraineerde triaxiaalproef, in vervormingsverschillen die op kunnen lopen tot honderden procenten. Dit verschil is beduidend kleiner aan weerszijde van een ophoging, omdat M in dergelijke situaties invloed heeft op de spanningspaden (vooral de horizontale spanningen zijn afhankelijk van M). Niettemin geldt ook aan weerszijde van een ophoging dat vooral de horizontale vervormingen noemenswaardig beïnvloed wordt door M.

***Het model valideren aan 2-dimensionale grondvervormingen a.d.h.v. een geconsolideerde triaxiaalproef.***

*Uit de simulatie van de geconsolideerde ongedraineerde triaxiaalproef kunnen geen harde conclusies getrokken worden. De resultaten van de gesimuleerde triaxiaalproef komen allesbehalve overeen met de meetresultaten uit de werkelijke triaxiaalproef. Dit lijkt te komen door externe factoren (b.v. monsterverstoring). Het werkelijke monster reageert volgens de meetresultaten als een normaal geconsolideerd monster. Dit terwijl uit de samendrukkingproef horende bij de triaxiaalproef wel degelijk volgt dat het monster overgeconsolideerd is.*

### **Het model a.d.h.v. een case study valideren aan 2-dimensionale grondvervormingen**

Aan de hand van een praktijkmeting, de No-Recess case, is het SSC model gevalideerd m.b.t. 2-dimensionale vervormingen. Verder zijn bij deze case de invloeden van de  $K_0^{nc}$ -afhankelijke M parameter, doorlatendheid, OCR, hoek van inwendige wrijving, samendrukkingsparameters,  $K_0$ ,  $v_{ur}$  en de wijze van modelleren (axisymmetrische of plane strain) onderzocht. *De case heeft voornamelijk inzicht gegeven in problemen m.b.t. het tijd-zettingsverloop en de keuze van  $K_0^{nc}$ , doorlatendheid en de manier van modelleren (axisymmetrische of plane strain). De laatste twee wijken af van het doel van dit onderzoek, maar zijn vanwege de impact toch behandeld.*

Zoals hiervoor al opgemerkt dienen realistische  $K_0^{nc}$ -waarden te worden gekozen om te voorkomen dat de horizontale vervorming overschat wordt. De case bevestigt dit, bij een simulatie met realistische  $K_0^{nc}$ -waarden (0,4 voor de veen- en kleilagen) worden de horizontale vervormingen en verhoudingen tussen horizontale vervorming t.p.v. de teen en 5 meter uit de teen goed ingeschat. Bij een simulatie met  $K_0^{nc}$ -waarden gebaseerd op de vuistregel van Jaky ( $K_0^{nc} \approx 0,6$  à  $0,7$ ) zijn de horizontale vervormingen een factor 2 te groot.

Hoewel de eindzetting en verticale kruiptak volgens het SSC model redelijk overeenstemt met de gemeten waarde, is het tijd-zettingsverloop niet juist: in werkelijkheid komt de zetting langzamer tot ontwikkeling dan berekend. Om het berekende verloop aan de meetdata te fitten zou de OCR onrealistisch hoog gekozen moeten worden. Dit leidt echter weer tot andere problemen (de eindzetting, kruip en horizontale vervorming worden onderschat) en wordt daarom afgeraden. Wel dient opgemerkt te worden dat zowel de verticale als horizontale kruip en de verhouding horizontale / verticale vervorming bij een juiste parameterkeuze correct worden ingeschat.

#### Axisymmetrische of plane strain modellering?

Een terp welke normaliter bestaat uit een aantal rechte zijden met afgeronde hoeken is niet 100% axisymmetrisch, maar ook niet 100% plane strain. Er bestaat daardoor geen eenduidigheid over de juiste manier van modelleren. Bij de No-Recess case zijn aan de teen en 5 meter uit de teen, horizontale vervormingen gemeten. De verhouding van deze vervormingen zeggen meer over de correcte manier van modelleren. Bij deze case zijn de verhoudingen tussen de twee monitoringslocaties en de absolute waarden het beste te simuleren met een plane strain berekening. De axisymmetrische berekening dempt de spanningen en vervormingen te snel uit. Verwacht wordt dat op grotere afstanden van de teen de horizontale vervormingen met een axisymmetrische berekening beter overeenkomen. Afstand tot de teen, lengte van de rechte zijde en dikte van het slappe lagen pakket worden hierbij gezien als afhankelijke factoren. Bij deze case is de monitoringsafstand tot de teen maximaal 5 meter, de lengte van de rechte zijde tussen 10 en 18 meter en de dikte van het slappe lagenpakket ongeveer 8 meter.

#### Bepalen van de doorlatendheid

De bepaling van een constante doorlatendheid ( $k$ ) uit de samendrukkingsproef ( $k = c_v * m_v * \gamma_w$ ) blijkt vaak niet correct. De oorzaak hiervan is de bepaling van  $m_v$  welke een grove benadering is van de werkelijkheid. Het berekenen van de consolidatieperiode a.d.h.v. de doorlatendheid of  $c_v$ -waarde resulteert in beduidend verschillende consolidatieperiodes. Bij deze case zijn de doorlatendheden met een factor 15 verhoogd, waardoor de consolidatieperiodes overeenkomen. De invloed van de doorlatendheid is bestudeerd door de case door te rekenen met de doorlatendheid zoals deze volgt uit de samendrukkingsproeven. Dit resulteert in beduidend grotere horizontale vervormingen, vooral aan de teen van de ophoging. De ongedraineerde stijfheid krijgt een noemenswaardige invloed op de vervormingen.

*De doorlatendheid dient niet rechtstreeks uit samendrukkingsproeven bepaald te worden, maar dient gefit of gecontroleerd te worden aan de consolidatieperiode welke volgt uit de  $c_v$ -waarde.*

*Bij de No-Recess case is de anisotrope ondergrond gemodelleerd met het isotrope SSC model. De gevonden horizontale vervormingen en horizontale en verticale kruip sluiten bij een juiste parameter- en geometriekeuze goed aan bij de gemeten verplaatsingen. Voor de zettingen geldt dit echter niet. Het model overschat de zettingen vooral in het begin van de ophoofphase. Niettemin lijkt het model de horizontale / verticale vervormingsverhouding goed in te schatten. Bij de gekozen parameters is de anisotrope ondergrond daarmee goed met het isotrope SSC model te simuleren.*

## 6.2. Aanbevelingen

De eerste onderzoeksvraag: *het achterhalen van de oorzaken van de verschillen in de verticale vervorming tussen het SSC- en a,b,c-Isotachenmodel, bij 1-dimensionale vervorming. Daarnaast onderzoeken of er relaties te vinden zijn tussen deze verschillen*, is er op gericht de oorzaken tussen de verschillen in de verticale vervorming tussen het SSC- en a,b,c-Isotachenmodel, bij 1-dimensionale vervorming te achterhalen.

Er wordt aanbevolen om a.d.h.v. de beschreven omrekenformules in paragraaf 3.4 de SSC parameters op basis van de a,b,c-Isotachenparameters te berekenen. Dit omdat het fitten van de parameters a.d.h.v. een MSettle en een 1D SSC berekening (zoals dat tot op heden wordt gedaan) in de weg wordt gestaan door de verschillen die ontstaan m.b.t. het in rekening brengen van onderwaterzakken van belastingen in de vorm van grondlagen. Plaxis neemt onderwaterzakken correct in rekening.

Uit de No-Recess case volgt dat realistische  $K_0^{nc}$ -waarden, welke volgen uit  $K_0$ -c.r.s. proeven, de waarde voor M beter inschat. Hierdoor worden de horizontale vervorming beter benaderen dan met  $K_0^{nc}$ -waarden welke bepaald zijn a.d.h.v. de vuistregel van Jaky. Het is daarom aan te raden de keuze van  $K_0^{nc}$ -waarden te baseren op realistische waarden i.p.v. op basis van de vuistregel van Jaky. Het vaker toepassen van  $K_0$ -c.r.s. proeven voor het bepalen van parameters lijkt daarmee van belang.

Verder volgt uit de No-Recess case dat er geen eenduidigheid bestaat over axisymmetrische of plane strain modelleringen (dit behoort niet tot het doel van dit onderzoek, maar is vanwege de impact toch behandeld). Uit deze case volgt dat plane strain modelleringen betere resultaten geven dan axisymmetrische modelleringen. Dit is echter afhankelijk van de afstand tot de teen, vorm van de ophoging en dikte van het slappe lagen pakket. A.d.h.v. 3D berekeningen kan onderzocht worden wanneer 2D plane strain of axisymmetrische modelleringen gehanteerd kunnen worden en wanneer 3D berekeningen vereist zijn.

In Bijlage 1 zijn gedachtegangen beschreven op welke manier de consolidatiefase van een triaxiaalproef inzicht kan geven in de mate van anisotropie en de correctheid m.b.t. de beschrijving van de equivalente grensspanning. Vooral de tweede gedachtegang: *verbetering procedure voor de consolidatiefase van de triaxiaalproef ter bepaling van de anisotropie*, lijkt zonder al te veel aanpassingen aan de bestaande triaxiaalproef haalbaar. Aanbevolen wordt deze gedachtegangen te toetsen m.b.v. triaxiaalproeven om zodoende een beter beeld te krijgen van het grondgedrag.

Uit de No-Recess case volgt dat zowel het SSC als a,b,c-Isotachenmodel de zettingen in het begin significant overschatten. Om deze zetting correct te simuleren zou de OCR verhoogd moeten worden tot onrealistisch hoge waarden. Aanbevolen wordt uitgebreid onderzoek te verrichten naar dit fenomeen. Dit door een vergelijking te maken tussen veldmetingen, het Koppejan model (een vertrouwd zettingsmodel), SSC- en a,b,c-Isotachenmodel.

Verder resten er nog een aantal aanbevelingen welke puntsgewijs opgesomd kunnen worden:

- Bij SSC berekeningen waarbij vervormingen normaliter een belangrijke rol spelen wordt te allen tijde aangeraden te rekenen met de opties Updated Mesh en Updated Waterpressures.
- Cohesie is een sterkteparameter die daarnaast invloed heeft op de stijfheid (dit is een modelbeperking). De cohesie dient daarom te allen tijde klein te zijn in relatie tot het spanningsniveau.
- De doorlatendheid dient niet rechtstreeks uit samendrukkingsproeven bepaald te worden, maar dient gefit te worden aan de consolidatieperiode welke volgt uit de  $c_v$ -waarde volgend uit samendrukkingsproeven.
- Voor de tijdseenheid bij general settings in Plaxis Input dient altijd 'dagen' te worden ingevoerd.
- Tijdens gedraineerde berekeningen dient te worden gecontroleerd of de ontwikkeling van de OCR naar verwachting verloopt. Bij consolidatie berekeningen ontwikkelt de OCR zich wel naar verwachting. Indien mogelijk wordt aangeraden de berekeningen uit te voeren inclusief consolidatie berekeningen

Tot slot kunnen er nog een aantal aanbevelingen gedaan worden welke van toepassing zijn op het verbeteren van het SSC model, of de implementatie hiervan in Plaxis.

- Tijdens de simulatie van een triaxiaalproef m.b.v. de "soiltest" wordt het aanbevolen de vervormingssnelheid aan te geven. Nog beter is, de vervormingssnelheid handmatig in te kunnen voeren.
- De soiltest geschikt maken voor multistage triaxiaalproeven.
- Berekeningen met een andere tijdseenheid dan dagen mogelijk maken.
- De stijfheid onafhankelijk maken van de cohesie, zodoende kunnen vervormingsgerichte en sterkte berekeningen verantwoord in één berekening gemaakt worden.
- Het rekenproces tijdens gedraineerde berekeningen verbeteren, waardoor de ontwikkeling van de OCR (grensspanning) correct in rekening wordt genomen.

## Referenties

### ***Gebruikte literatuur***

- [1] van Baars, S., (2003), Het Koppejan Incrementeel Model: een verbetering van een vertrouwd zettingsmodel. *Geotechniek 1-2003*, pp. 62-67.
- [2] Brinkgreve, R.B.J., (1994). Geomaterial Models and Numerical Analyses of Softening. Thesis Geotechnical Laboratory of the Faculty of Civil Engineering of Delft University of Technology.
- [3] Brinkgreve, R.B.J., (2004). Lesmateriaal Materiaalmodellen (CT4360). Sectie Geotechniek, TU Delft.
- [4] Brinkgreve, R.B.J., (2004). Time-dependent behaviour of soft soils during embankment construction – a numerical study. G.N. Pande and S. Pietruszczak, NUMOG IX, pp. 631-637. A.A. Balkema.
- [5] Brinkgreve, R.B.J., (1999). On the use of Plaxis (SSC parameter determination). PAO course (14-17 march), experienced Plaxis users.
- [6] Brinkgreve, R.B.J., (2002). Plaxis manual version 8, Material Models chapter 3 Mohr-Coulomb model. A.A. Balkema
- [7] Brinkgreve, R.B.J., (2002). Plaxis manual version 8, Material Models chapter 6 Soft Soil Creep model. A.A. Balkema
- [8] Cherqaoui, I., (2006). Door grond horizontaal belaste palen. Afstudeerwerk masteropleiding Civiele Techniek en Geowetenschappen, Sectie Geotechniek, TU Delft.
- [9] CROW, (2004). CROW-publicatie 204, betrouwbaarheid van zettingsprognoses.
- [10] CUR, (2005). CUR-Aanbeveling 101, uitvoering en interpretatie samendrukkingsproef.
- [11] CUR, (2002). CUR 162, Construeren met grond: grondconstructies op en in weinig draagkrachtige en sterk samendrukbare ondergrond.
- [12] CUR, (1997). CUR 191, achtergronden bij numerieke modellering van geotechnische constructies deel 2, hoofdstuk 2 Kruipgedrag.
- [13] Desai, C.S., et al., (2001). An evaluation of soft soil models based on trial embankments. *Computer Methods and Advances in Geomechanics volume 1*, pp. 373-378. A.A. Balkema.
- [14] den Haan, E.J., (1994). Vertical compression of soils. Thesis Geotechnical Laboratory of the Faculty of Civil Engineering of Delft University of Technology.
- [15] den Haan, E.J., van den Berg, P., (2001). Evaluation of Creep Models for Soft Soils (under axially symmetric conditions). Geodelft report CO-710203/21, September.
- [16] den Haan, E.J., Kamao, S., (2003). Obtaining isotache parameters from a c.r.s.  $K_0$ -oedometer. *Soils and Foundations*, vol. 43, No. 4, pp. 203-214.
- [17] den Haan, E.J., (2003). Hoeksteen van een nieuwe aanpak van zettingsberekeningen. *Geotechniek 4-2003*, pp. 28-35.
- [18] den Haan, E.J., van Essen, H.M., (2004). Isotachenmodellen: help, hoe kom ik aan de parameters? *Geotechniek 1-2003*, pp. 62-68.
- [19] den Haan, E.J., The, B.H.P.A.M., Van, M.A., (2001). De  $K_0$ -c.r.s. samendrukkingsproef. *Geotechniek 4-2001*, pp. 56-63.
- [20] Greeuw, G., Geodelft. Gecontacteerd.
- [21] Koehorst, B., (2000). Eurosoilstab Task 5 Back analyses test embankments Hoeksche Waard and Abcoude. Fugro Rapport M-0476/030.R05, April.
- [22] Sipkema, D., (2006). a,b,c-Isotachenmodel; van a,b,c tot zetting. Afstudeerwerk masteropleiding Civiele Techniek en Geowetenschappen, Sectie Geotechniek, TU Delft.
- [23] Verruit, A., van Baars, S., (2004). Grondmechanica. DUP Blue Print
- [24] Waterman, D & Broere, W. (2004). Practical applications of the Soft Soil Creep model. *Plaxis Bulletin* maart 2004, pp. 14-15.
- [25] Waterman, D & Broere, W. (2005). Practical applications of the Soft Soil Creep model – Part III. *Plaxis Bulletin* maart 2005, pp. 22.

### ***Gebruikte programma's en spreadsheets***

- [A] Fugro, (1995) verticale drains + ophoogschema
- [B] Geodelft, (2005). MSettle version 7.1.
- [C] Plaxis B.V. (2006). Plaxis version 8.3.
- [D] Vervoorn, R., (2006), Fugro. Oedometer\_v1.13b.

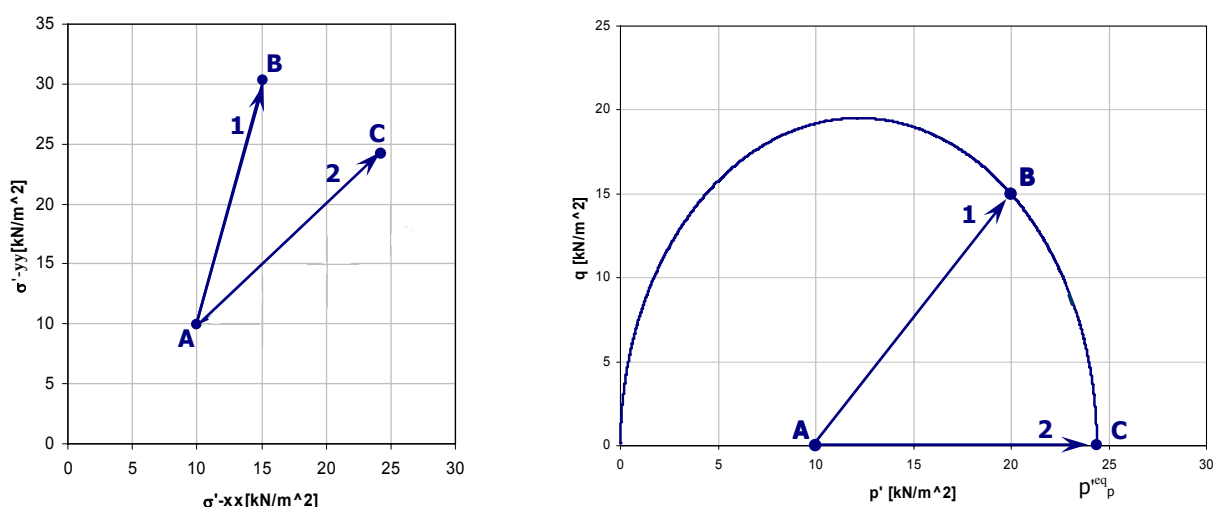


## Bijlage 1 Aanbeveling uitbreiding triaxiaalproef

In deze bijlage wordt beschreven op welke manier de consolidatie fase van een triaxiaalproef inzicht kan geven in de (equivalente) grensspanning zoals deze in een monster terug gevonden wordt. Hierbij zullen  $K_0$ -c.r.s. proefresultaten met triaxiaalproefresultaten vergeleken worden. Verder wordt beschreven op welke manier de mate van anisotropie beschreven kan worden a.d.h.v. een triaxiaalproef.

Er dient hierbij opgemerkt te worden dat het gedachtegangen betreffen. Of het daadwerkelijk haalbaar is zal moeten volgen uit proefresultaten.

In paragraaf 3.3.1.1 is beschreven op welke manier het SSC model omgaat met de grensspanning en wat het nut hiervan is. M.b.v. de onderstaande figuren is nogmaals weergegeven op welke manier de grensspanning gedefinieerd is. Verder is weergegeven hoe deze grensspanning door verschillende spanningspaden wordt bereikt.



Spanningspad 1 is een spanningspad volgend uit een  $K_0$ -c.r.s. proef. Spanningspad 2 is een spanningspad volgend uit de consolidatie fase van een triaxiaalproef.

Het komt erop neer dat de equivalente grensspanning het mogelijk maakt een grensspanning te definiëren die onafhankelijk is van het te doorlopen spanningspad. Zowel spanningspad 1 als spanningspad 2, bereiken de grensspanningsellips (equivalente grensspanning). Na het bereiken van de grensspanningsellips wordt modelmatig, bij het verhogen van de horizontale en verticale spanning, door zowel de verticale als horizontale rek, de slappe tak betreden. Voor spanningspad 1 betekent dit bij een andere combinatie van spanningen (verticaal en horizontaal) dan voor spanningspad 2.

Voor een uitgebreidere beschrijving wordt verwezen naar paragraaf 3.3.1.1.

Uit de  $K_0$ -c.r.s. proef volgt een verticale grensspanning. Op basis van deze verticale grensspanning en een  $K$ , kan vervolgens de horizontale (grens)spanning berekend worden (welke hoort bij deze verticale grensspanning). A.d.h.v. deze twee spanningen,  $\kappa^*$ ,  $\lambda^*$ ,  $v_{ur}$  en  $K_0^{nc}$  kan  $M$  berekend worden. Vervolgens kan a.d.h.v.  $M$  en de twee spanningen (verticale en horizontale spanning), de equivalente grensspanning bepaald worden.

Vaak wordt op 'hetzelfde' monster een triaxiaalproef uitgevoerd. Normaliter worden geen interpretaties verricht op de resultaten van de consolidatie fase. Hieronder wordt beschreven op welke manier de consolidatie fase inzicht kan geven in de grensspanning (eerste gedachtegang). Verder wordt beschreven op welke manier de consolidatie fase van een triaxiaalproef inzicht kan geven in de mate van anisotropie (tweede gedachtegang).

Eerste gedachtegang: verificatie parameter  $M$  door middel van  $K_0$ -c.r.s. en triaxiaalproeven

Indien een isotroop spanningspad (spanningspad 2; consolidatie fase van een triaxiaalproef) wordt betreden is de equivalente grensspanning gelijk aan de isotrope spanning die bij deze equivalente grensspanning hoort. Het spanningspad volgt immers de  $p'$ -as.

Als de consolidatie fase van de eerste stap uit een triaxiaalproef wordt doorgezet totdat een spanning boven de equivalente grensspanning is bereikt, dan kan de equivalente grensspanning bepaald worden (bij de overgang van de stijve naar de slappe tak). Theoretisch gezien zou deze equivalente grensspanning overeen moeten komen met de equivalente grensspanning uit de  $K_0$ -c.r.s. proef. Praktisch gezien kunnen fenomenen als monster verstoring en heterogeniteit verschillen tot gevolg hebben. Niettemin lijkt het niet onrealistisch. Op deze manier kan vervolgens a.d.h.v. een serie proefresultaten bestudeerd worden of de waarde voor  $M$  correct gekozen is. De equivalente grensspanning uit de  $K_0$ -c.r.s. proef (gebaseerd op  $M$ ) zou overeen moeten komen met de equivalente / isotrope grensspanning uit de consolidatie fase van de triaxiaalproef.

Verder kan bij een dergelijke consolidatie fase bekeken worden of zowel de horizontale als verticale rek op het zelfde moment (bij het bereiken van de grensspanning) de slappe tak betreden.

Tweede gedachtegang: verbetering procedure voor de consolidatiefase van de triaxiaalproef ter bepaling van de anisotropie

Theoretisch gezien kunnen de samendrukkingsparameters, indien verschillende belastingstappen worden ingevoerd, uit de consolidatie fase van een triaxiaalproef volgen. Dit kan gebeuren a.d.h.v. de  $\ln p' - \varepsilon_v$  grafiek. Op deze manier worden gemiddelde waarden voor  $\kappa^*$ ,  $\lambda^*$  en  $\mu^*$  bepaald. Het gemiddelde betreft een gemiddelde tussen de verticale en horizontale parameters. Indien het monster isotroop en homogeen is zijn de samendrukkingsparameters in alle richtingen gelijk. De gemiddelde waarden gelden nu voor alle richtingen. Bij anisotropie zullen de verticale samendrukkingsparameters niet gelijk zijn aan de horizontale samendrukkingsparameters. A.d.h.v. een  $\sigma'_{yy} - \varepsilon_{yy}$  grafiek kunnen vervolgens de samendrukkingsparameters in verticale richting bepaald worden. Een  $\sigma'_{xx} - \varepsilon_{xx}$  grafiek geeft daarnaast inzicht in de horizontale samendrukkingsparameters. Al kan anisotropie niet met het SSC model gemodelleerd worden, een gevoel voor de mate van anisotropie van verschillende grondsoorten bij complexe 2D vervormingsberekeningen lijkt geen overbodige luxe. Indien een grondsoort in horizontale richting 2 keer zo stijf is dan in de verticale richting, dan kan bij correcte isotrope berekening i.i.g. geconcludeerd worden dat de vervormingen overschat worden en er dus veilig gerekend wordt.

In hoeverre deze gedachtegangen in de praktijk haalbaar zijn, zal moeten volgen uit proeven. Niettemin lijkt het een nuttige zaak. Zeker bij berekeningen waarbij horizontale vervorming een grote rol speelt, kan het inzicht in de mate van anisotropie, en de equivalente grensspanning belangrijk zijn.

De laatste gedachtegang (mate van anisotropie) is eenvoudig te implementeren. Voor de bepaling dient de eerste consolidatie fase in stappen uitgevoerd te worden. Indien deze eerste consolidatie fase zich voor de grensspanning bevindt geven de vervormingen in de verschillende richtingen de mate van anisotropie weer. Momenteel is het niet mogelijk om de mate van anisotropie te bepalen. De celdruk t.b.v. de consolidatie fase wordt in 1 keer aangebracht. De beginspanning is hierdoor heel klein t.o.v. de eindspanning, hetgeen het moeilijk maakt de rek te bepalen. Vaak wordt de rek a.d.h.v. formules overschat bij lage initiële spanningen. Indien de 1<sup>ste</sup> consolidatie fase in verschillende stappen wordt aangebracht is monsterverstoring inbegrepen in vooral de eerste stappen. De latere stappen van de 1<sup>ste</sup> consolidatie fase lijken goed bruikbaar voor de bepaling van de mate van anisotropie. De kleine beginspanning en monsterverstoring is nu verholpen. Verder dient de verticale vervorming nauwkeurig bepaald te worden. Uit de triaxiaalproeven van de No-Recess case volgde dat de verticale vervorming niet nauwkeurig genoeg bepaald was.

De eerste gedachtegang (grensspanningsbeschrijving) is alleen mogelijk indien de deviatorische belastingfase ingezet wordt na de grensspanning.

## Bijlage 2 Afleidingen reksnelheden en $\frac{\partial p^{eq}}{\partial \sigma'_1} + \frac{\partial p^{eq}}{\partial \sigma'_2} + \frac{\partial p^{eq}}{\partial \sigma'_3} = \frac{\partial p^{eq}}{\partial p'}$ , SSC model

In deze bijlage worden afleidingen van verschillende SSC vergelijkingen uit het hoofdrapport gegeven.

### 2.1 Afleiding seculaire volumieke reksnelheid op basis van twee referentiespanningen

In deze paragraaf is de afleiding van de volumieke seculaire reksnelheid, Vergelijking 59 gegeven.

$$-\dot{\varepsilon}_{v;s} = \frac{\mu^*}{\tau} \left( \frac{p^{eq}}{p^{eq}_0} \right)^{\frac{\lambda^* - \kappa^*}{\mu^*}}$$

**Vergelijking 59**

#### *Afleiding*

Vergelijking 59 volgt uit Vergelijking 54.

$$-\Delta \varepsilon_{v;s} = (\lambda^* - \kappa^*) \ln \left( \frac{p^{eq}}{p^{eq}_0} \right) - \mu^* \ln \left( \frac{-\dot{\varepsilon}_{v;s}}{-\dot{\varepsilon}_{v;s;0}} \right) \text{ (indien K constant is)}$$

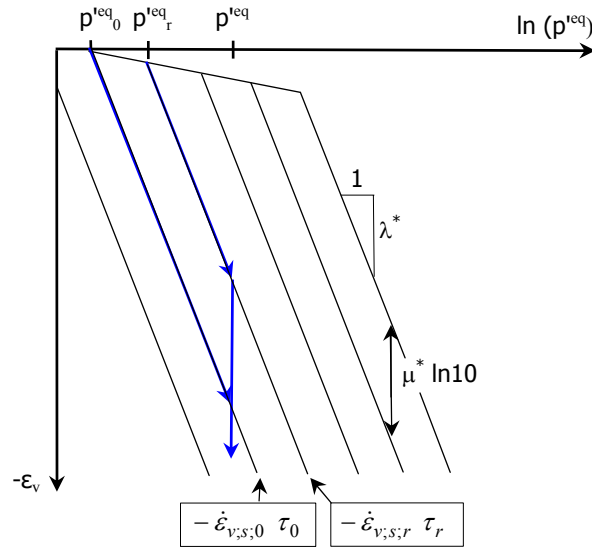
**Vergelijking 54**

Als eerste wordt  $\dot{\varepsilon}_{v;s}$  uit Vergelijking 54 geïsoleerd, hieruit volgt Vergelijking 87:

$$\begin{aligned} \ln \left( \frac{-\dot{\varepsilon}_{v;s}}{-\dot{\varepsilon}_{v;s;0}} \right) &= \frac{\lambda^* - \kappa^*}{\mu^*} \ln \left( \frac{p^{eq}}{p^{eq}_0} \right) + \frac{\Delta \varepsilon_{v;s}}{\mu^*} \\ \frac{-\dot{\varepsilon}_{v;s}}{-\dot{\varepsilon}_{v;s;0}} &= \left( \frac{p^{eq}}{p^{eq}_0} \right)^{\frac{\lambda^* - \kappa^*}{\mu^*}} \exp \left( \frac{\Delta \varepsilon_{v;s}}{\mu^*} \right) \\ -\dot{\varepsilon}_{v;s} &= -\dot{\varepsilon}_{v;s;0} \left( \frac{p^{eq}}{p^{eq}_0} \right)^{\frac{\lambda^* - \kappa^*}{\mu^*}} \exp \left( \frac{\Delta \varepsilon_{v;s}}{\mu^*} \right) \end{aligned}$$

**Vergelijking 87**

De initiële seculaire volumieke reksnelheid  $(-\dot{\varepsilon}_{v;s;0})$  kan bepaald worden door de volumieke rek te beschrijven m.b.v. twee verschillende referentiespanningen. In Figuur 1 zijn de twee referentiespanningen ( $p^{eq}_0$  en  $p^{eq}_r$ ) met bijbehorende intrinsieke tijd en seculaire volumieke reksnelheid weergegeven. De optredende seculaire rek is bij beide referentiespanningen hetzelfde.



**Figuur 1: bepaling initiële volumieke seculaire reksnelheid ( $-\dot{\epsilon}_{v;s;0}$ ) a.d.h.v. twee verschillende referentiespanningen**

Met de onderstaande vergelijkingen voor de seculaire volumieke rek wordt  $-\dot{\epsilon}_{v;s;0}$  beschreven met de twee eerder genoemde referentiespanningen.

$$-\Delta \epsilon_{v;s} = (\lambda^* - \kappa^*) \ln \left( \frac{p^{eq}}{p^{eq}_0} \right) - \mu^* \ln \left( \frac{-\dot{\epsilon}_{v;s}}{-\dot{\epsilon}_{v;s;0}} \right) \quad \text{en} \quad -\Delta \epsilon_{v;s} = (\lambda^* - \kappa^*) \ln \left( \frac{p^{eq}}{p^{eq}_r} \right) - \mu^* \ln \left( \frac{-\dot{\epsilon}_{v;s}}{-\dot{\epsilon}_{v;s;r}} \right)$$

Na gelijkstelling van de seculaire volumieke rekken wordt  $\dot{\epsilon}_{v;s;0}$  geïsoleerd:

$$(\lambda^* - \kappa^*) \ln \left( \frac{p^{eq}}{p^{eq}_0} \right) - \mu^* \ln \left( \frac{-\dot{\epsilon}_{v;s}}{-\dot{\epsilon}_{v;s;0}} \right) = (\lambda^* - \kappa^*) \ln \left( \frac{p^{eq}}{p^{eq}_r} \right) - \mu^* \ln \left( \frac{-\dot{\epsilon}_{v;s}}{-\dot{\epsilon}_{v;s;r}} \right)$$

$$(\lambda^* - \kappa^*) \ln p^{eq} - (\lambda^* - \kappa^*) \ln p^{eq}_0 - \mu^* \ln(-\dot{\epsilon}_{v;s}) + \mu^* \ln(-\dot{\epsilon}_{v;s;0}) = (\lambda^* - \kappa^*) \ln p^{eq} - (\lambda^* - \kappa^*) \ln p^{eq}_r - \mu^* \ln(-\dot{\epsilon}_{v;s}) + \mu^* \ln(-\dot{\epsilon}_{v;s;r})$$

$$-(\lambda^* - \kappa^*) \ln p^{eq}_0 + \mu^* \ln \dot{\epsilon}_{v;s;0} = -(\lambda^* - \kappa^*) \ln p^{eq}_r + \mu^* \ln \dot{\epsilon}_{v;s;r}$$

$$\ln \frac{-\dot{\epsilon}_{v;s;0}}{-\dot{\epsilon}_{v;s;r}} = \frac{\lambda^* - \kappa^*}{\mu^*} \ln \frac{p^{eq}_0}{p^{eq}_r}$$

$$-\dot{\epsilon}_{v;s;0} = -\dot{\epsilon}_{v;s;r} \left( \frac{p^{eq}_0}{p^{eq}_r} \right)^{\frac{\lambda^* - \kappa^*}{\mu^*}}$$

$$-\dot{\epsilon}_{v;s;0} = \frac{\mu^*}{\tau_r} \left( \frac{p^{eq}_0}{p^{eq}_r} \right)^{\frac{\lambda^* - \kappa^*}{\mu^*}}$$

### Vergelijking 88

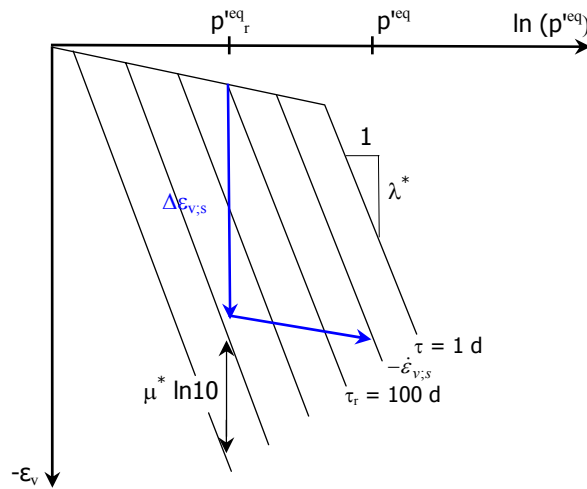
Door Vergelijking 87 met Vergelijking 88 samen te voegen volgt (Vergelijking 89).

$$-\dot{\varepsilon}_{v;s} = \frac{\mu^*}{\tau_r} \left( \frac{p^{eq}_0}{p^{eq}_r} \right)^{\frac{\lambda^* - \kappa^*}{\mu^*}} \left( \frac{p^{eq}}{p^{eq}_0} \right)^{\frac{\lambda^* - \kappa^*}{\mu^*}} \exp \left( \frac{\Delta \varepsilon_{v;s}}{\mu^*} \right)$$

$$-\dot{\varepsilon}_{v;s} = \frac{\mu^*}{\tau_r} \left( \frac{p^{eq}}{p^{eq}_r} \right)^{\frac{\lambda^* - \kappa^*}{\mu^*}} \exp \left( \frac{\Delta \varepsilon_{v;s}}{\mu^*} \right)$$

#### Vergelijking 89

In Figuur 2 zijn de verschillende symbolen die in Vergelijking 89 worden gebruikt grafisch weergegeven.



**Figuur 2: bepaling initiële volumieke seculaire reksnelheid a.d.h.v. 1 referentiespanning in combinatie met de opgetreden seculaire volumieke rek**

De 1 dagslijn volgt normaliter uit een samendrukkingsproef. Het is daarom nuttig Vergelijking 89 in een vorm te schrijven die geldig is voor spanningen op de 1 dagslijn (Vergelijking 59). De intrinsieke referentie tijd ( $\tau_r$ ) is nu gelijk aan 1 dag ( $\tau$ ). De opgetreden seculaire rek is 0.

$$-\dot{\varepsilon}_{v;s} = \frac{\mu^*}{\tau} \left( \frac{p^{eq}}{p^{eq}_p} \right)^{\frac{\lambda^* - \kappa^*}{\mu^*}}$$

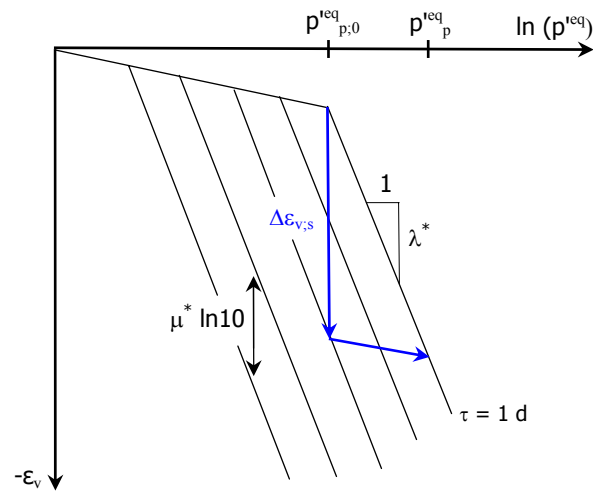
#### Vergelijking 59

De actuele equivalente spanning is  $p^{eq}$ . De equivalente grensspanning op de 1 dagslijn is aangegeven met ( $p^{eq}_p$ ). Deze spanning is afhankelijk van de opgetreden seculaire volumieke rek (Vergelijking 90). De initiële equivalente grensspanning wordt hierbij aangeduid met  $p^{eq}_{p;0}$ .

$$p^{eq}_p = p^{eq}_{p;0} \exp \left( \frac{-\Delta \varepsilon_{v;s}}{\lambda^* - \kappa^*} \right)$$

#### Vergelijking 90

In Figuur 3 zijn de verschillende symbolen die in Vergelijking 59 en Vergelijking 90 worden gebruikt grafisch weergegeven.



**Figuur 3: beeldvorming bepaling equivalente 1 dags grensspanning ( $p^{eq}_p$ ), Vergelijking 90**

## 2.2 Afleiding directe volumieke reksnelheid

In deze paragraaf is de afleiding van de volumieke seculaire reksnelheid, Vergelijking 58 gegeven.

$$-\dot{\varepsilon}_{v;d} = \frac{\kappa^*}{p'} \dot{p}'$$

### Vergelijking 58

De afleiding is gebaseerd op Vergelijking 65 en Vergelijking 66.

$$-\dot{\varepsilon}_d = \underline{\underline{D}}^{-1} \underline{\dot{\sigma}}'$$

### Vergelijking 65

$$\underline{\underline{D}}^{-1} = \frac{\kappa^*}{3p'(1-2\nu_{ur})} \begin{bmatrix} 1 & -\nu_{ur} & -\nu_{ur} \\ -\nu_{ur} & 1 & -\nu_{ur} \\ -\nu_{ur} & -\nu_{ur} & 1 \end{bmatrix}$$

### Vergelijking 66

### Afleiding

$$\begin{aligned} -\dot{\varepsilon}_d &= \frac{\kappa^*}{3p'(1-2\nu_{ur})} \begin{bmatrix} 1 & -\nu_{ur} & -\nu_{ur} \\ -\nu_{ur} & 1 & -\nu_{ur} \\ -\nu_{ur} & -\nu_{ur} & 1 \end{bmatrix} \underline{\dot{\sigma}}' \\ -\dot{\varepsilon}_{1;d} &= \frac{\kappa^*}{3p'(1-2\nu_{ur})} \dot{\sigma}'_1 - \nu_{ur} \frac{\kappa^*}{3p'(1-2\nu_{ur})} \dot{\sigma}'_2 - \nu_{ur} \frac{\kappa^*}{3p'(1-2\nu_{ur})} \dot{\sigma}'_3 \\ -\dot{\varepsilon}_{2;d} &= -\nu_{ur} \frac{\kappa^*}{3p'(1-2\nu_{ur})} \dot{\sigma}'_1 + \frac{\kappa^*}{3p'(1-2\nu_{ur})} \dot{\sigma}'_2 - \nu_{ur} \frac{\kappa^*}{3p'(1-2\nu_{ur})} \dot{\sigma}'_3 \\ -\dot{\varepsilon}_{3;d} &= -\nu_{ur} \frac{\kappa^*}{3p'(1-2\nu_{ur})} \dot{\sigma}'_1 - \nu_{ur} \frac{\kappa^*}{3p'(1-2\nu_{ur})} \dot{\sigma}'_2 + \frac{\kappa^*}{3p'(1-2\nu_{ur})} \dot{\sigma}'_3 \end{aligned}$$

De volumieke reksnelheid  $-\dot{\varepsilon}_{v;d}$  volgt uit de sommatie van de hierboven beschreven reksnelheden in de 3 hoofdrichtingen.

$$\begin{aligned} -\dot{\varepsilon}_{v;d} &= \frac{\kappa^*}{3p'(1-2\nu_{ur})} (\dot{\sigma}'_1 (1-2\nu_{ur}) + \dot{\sigma}'_2 (1-2\nu_{ur}) + \dot{\sigma}'_3 (1-2\nu_{ur})) \\ -\dot{\varepsilon}_{v;d} &= \frac{\kappa^*}{3p'} (\dot{\sigma}'_1 + \dot{\sigma}'_2 + \dot{\sigma}'_3) \\ -\dot{\varepsilon}_{v;d} &= \frac{\kappa^*}{3p'} (3\dot{p}') \\ -\dot{\varepsilon}_{v;d} &= \frac{\kappa^*}{p'} \dot{p}' \end{aligned}$$

### Vergelijking 58

## 2.3 Afleiding $\frac{\partial p^{eq}}{\partial \sigma'_1} + \frac{\partial p^{eq}}{\partial \sigma'_2} + \frac{\partial p^{eq}}{\partial \sigma'_3} = \frac{\partial p^{eq}}{\partial p'}$

In deze paragraaf is de afleiding van  $\frac{\partial p^{eq}}{\partial \sigma'_1} + \frac{\partial p^{eq}}{\partial \sigma'_2} + \frac{\partial p^{eq}}{\partial \sigma'_3} = \frac{\partial p^{eq}}{\partial p'}$  beschreven.

### Afleiding

$$\frac{\partial p^{eq}}{\partial \sigma'_1} + \frac{\partial p^{eq}}{\partial \sigma'_2} + \frac{\partial p^{eq}}{\partial \sigma'_3} = \frac{\partial p^{eq}}{\partial p'}$$

$$\frac{\partial p^{eq}}{\partial p'} = 1 + \frac{q^2}{M^2} \frac{-1}{p'^2}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p^{eq}}{\partial \sigma'_1} &= \frac{\partial p^{eq}}{\partial p'} \frac{\partial p'}{\partial \sigma'_1} + \frac{\partial p^{eq}}{\partial q} \frac{\partial q}{\partial \sigma'_1} \\ &= \left( 1 + \frac{q^2}{M^2} \frac{-1}{p'^2} \right) \frac{1}{3} + \frac{q}{M^2 p'} \left[ \frac{1}{2} \left( (\sigma'_2 - \sigma'_1)^2 + (\sigma'_1 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_3 - \sigma'_2)^2 + 6(\sigma_{21}^2 - \sigma_{13}^2 - \sigma_{32}^2) \right) \right]^{-\frac{1}{2}} [(\sigma'_1 - \sigma'_2) + (\sigma'_1 - \sigma'_3)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p^{eq}}{\partial \sigma'_2} &= \frac{\partial p^{eq}}{\partial p'} \frac{\partial p'}{\partial \sigma'_2} + \frac{\partial p^{eq}}{\partial q} \frac{\partial q}{\partial \sigma'_2} \\ &= \left( 1 + \frac{q^2}{M^2} \frac{-1}{p'^2} \right) \frac{1}{3} + \frac{q}{M^2 p'} \left[ \frac{1}{2} \left( (\sigma'_2 - \sigma'_1)^2 + (\sigma'_1 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_3 - \sigma'_2)^2 + 6(\sigma_{21}^2 - \sigma_{13}^2 - \sigma_{32}^2) \right) \right]^{-\frac{1}{2}} [(\sigma'_2 - \sigma'_1) + (\sigma'_2 - \sigma'_3)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p^{eq}}{\partial \sigma'_3} &= \frac{\partial p^{eq}}{\partial p'} \frac{\partial p'}{\partial \sigma'_3} + \frac{\partial p^{eq}}{\partial q} \frac{\partial q}{\partial \sigma'_3} \\ &= \left( 1 + \frac{q^2}{M^2} \frac{-1}{p'^2} \right) \frac{1}{3} + \frac{q}{M^2 p'} \left[ \frac{1}{2} \left( (\sigma'_2 - \sigma'_1)^2 + (\sigma'_1 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_3 - \sigma'_2)^2 + 6(\sigma_{21}^2 - \sigma_{13}^2 - \sigma_{32}^2) \right) \right]^{-\frac{1}{2}} [(\sigma'_3 - \sigma'_1) + (\sigma'_3 - \sigma'_2)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p^{eq}}{\partial \sigma'_1} + \frac{\partial p^{eq}}{\partial \sigma'_2} + \frac{\partial p^{eq}}{\partial \sigma'_3} &= 1 + \frac{q^2}{M^2} \frac{-1}{p'^2} + \frac{q}{M^2 p'} \left[ \frac{1}{2} \left( (\sigma'_2 - \sigma'_1)^2 + (\sigma'_1 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_3 - \sigma'_2)^2 + 6(\sigma_{21}^2 - \sigma_{13}^2 - \sigma_{32}^2) \right) \right]^{-\frac{1}{2}} * \\ &\quad [(\sigma'_1 - \sigma'_2) + (\sigma'_1 - \sigma'_3) + (\sigma'_2 - \sigma'_1) + (\sigma'_2 - \sigma'_3) + (\sigma'_3 - \sigma'_1) + (\sigma'_3 - \sigma'_2)] \\ &= 1 + \frac{q^2}{M^2} \frac{-1}{p'^2} + \frac{q}{M^2 p'} \left[ \frac{1}{2} \left( (\sigma'_2 - \sigma'_1)^2 + (\sigma'_1 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_3 - \sigma'_2)^2 + 6(\sigma_{21}^2 - \sigma_{13}^2 - \sigma_{32}^2) \right) \right]^{-\frac{1}{2}} * 0 \\ &= 1 + \frac{q^2}{M^2} \frac{-1}{p'^2} \end{aligned}$$

## 2.4 Afleiding volumieke seculaire reksnelheid op basis van de totale reksnelheid

In bijlage 2.1 is de volumieke seculaire reksnelheid (Vergelijking 59) afgeleid m.b.v. twee referentiespanningen. In deze paragraaf is de volumieke seculaire reksnelheid afgeleid m.b.v. de totale seculaire reksnelheid (Vergelijking 69). De verschillende afleidingen zijn gemaakt om aan te tonen dat de vergelijkingen in verschillende richtingen in elkaar om te schrijven zijn. Op deze manier wordt de consistentie van het model aangetoond.

$$-\dot{\varepsilon}_{v,s} = \frac{\mu^*}{\tau} \left( \frac{p^{eq}}{p^{eq}_p} \right)^{\frac{\lambda^* - \kappa^*}{\mu^*}}$$

**Vergelijking 59**

$$-\dot{\varepsilon}_s = \frac{-\dot{\varepsilon}_{v,s}}{\alpha} \frac{\partial p^{eq}}{\partial \sigma'} = \frac{1}{\alpha} \frac{\mu^*}{\tau} \left( \frac{p^{eq}}{p^{eq}_p} \right)^{\frac{\lambda^* - \kappa^*}{\mu^*}} \frac{\partial p^{eq}}{\partial \sigma'}$$

**Vergelijking 69**

### Afleiding

$$\begin{aligned} -\dot{\varepsilon}_s &= \frac{1}{\alpha} \frac{\mu^*}{\tau} \left( \frac{p^{eq}}{p^{eq}_p} \right)^{\frac{\lambda^* - \kappa^*}{\mu^*}} \frac{\partial p^{eq}}{\partial \sigma'} \\ -\dot{\varepsilon}_s &= \frac{\partial p'}{\partial p^{eq}} \frac{\mu^*}{\tau} \left( \frac{p^{eq}}{p^{eq}_p} \right)^{\frac{\lambda^* - \kappa^*}{\mu^*}} \frac{\partial p^{eq}}{\partial \sigma'} \\ -\dot{\varepsilon}_s &= \frac{\partial p'}{\partial p^{eq}} \frac{\mu^*}{\tau} \left( \frac{p^{eq}}{p^{eq}_p} \right)^{\frac{\lambda^* - \kappa^*}{\mu^*}} \left( \frac{\partial p^{eq}}{\partial \sigma'_1} \frac{\partial p^{eq}}{\partial \sigma'_2} \frac{\partial p^{eq}}{\partial \sigma'_3} \right)^T \\ -\dot{\varepsilon}_{v,s} &= \frac{\partial p'}{\partial p^{eq}} \frac{\mu^*}{\tau} \left( \frac{p^{eq}}{p^{eq}_p} \right)^{\frac{\lambda^* - \kappa^*}{\mu^*}} \left( \frac{\partial p^{eq}}{\partial \sigma'_1} + \frac{\partial p^{eq}}{\partial \sigma'_2} + \frac{\partial p^{eq}}{\partial \sigma'_3} \right) \\ -\dot{\varepsilon}_{v,s} &= \frac{\partial p'}{\partial p^{eq}} \frac{\mu^*}{\tau} \left( \frac{p^{eq}}{p^{eq}_p} \right)^{\frac{\lambda^* - \kappa^*}{\mu^*}} \frac{\partial p^{eq}}{\partial p'} \\ -\dot{\varepsilon}_{v,s} &= \frac{\mu^*}{\tau} \left( \frac{p^{eq}}{p^{eq}_p} \right)^{\frac{\lambda^* - \kappa^*}{\mu^*}} \end{aligned}$$

**Vergelijking 59**



## Bijlage 3 Afleiding default K<sub>0</sub>-waarde

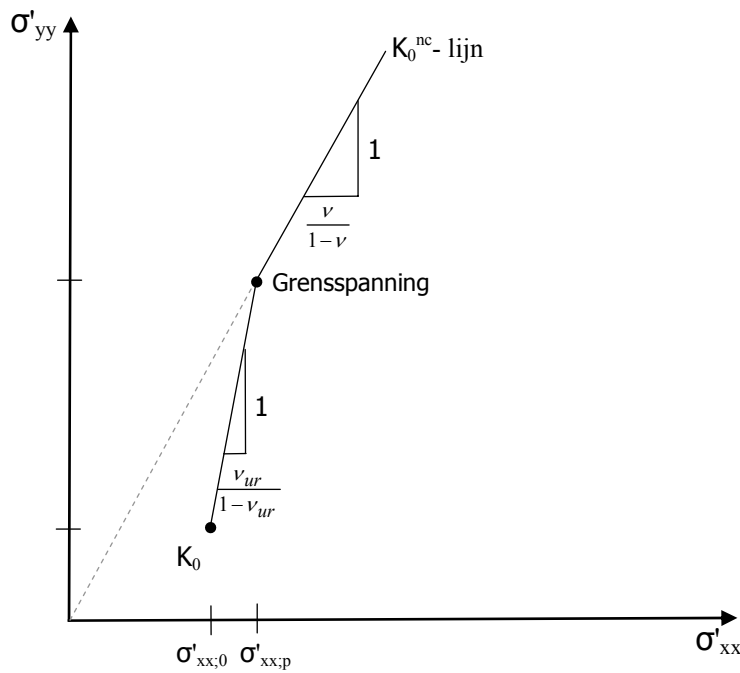
In deze bijlage is de formule voor het berekening van de default K<sub>0</sub>-waarde afgeleid (Vergelijking 71).

$$K_0 = OCR_{yy} \bullet K_0^{nc} - \frac{v_{ur}}{1-v_{ur}} (OCR_{yy} - 1)$$

### Vergelijking 71

Het subscript yy bij OCR duidt aan dat deze OCR gerelateerd is aan de verticale spanningen.

De afleiding is verduidelijkt a.d.h.v. Figuur 4.



Figuur 4: K<sub>0</sub> bepaling

### Afleiding

$$\begin{aligned} \frac{v_{ur}}{1-v_{ur}} &= \frac{\Delta \sigma'_{xx}}{\Delta \sigma'_{yy}} \\ \frac{v_{ur}}{1-v_{ur}} &= \frac{K_0^{nc} \sigma'_{yy;p} - \sigma'_{xx;0}}{\sigma'_{yy;p} - \sigma'_{yy;0}} \\ \frac{v_{ur}}{1-v_{ur}} &= \frac{K_0^{nc} OCR_{yy} \sigma'_{yy;0} - \sigma'_{xx;0}}{(OCR_{yy} - 1) \sigma'_{yy;0}} \\ \frac{\sigma'_{xx;0}}{\sigma'_{yy;0}} &= OCR_{yy} \bullet K_0^{nc} - \frac{v_{ur}}{1-v_{ur}} (OCR_{yy} - 1) \\ K_0 &= OCR_{yy} \bullet K_0^{nc} - \frac{v_{ur}}{1-v_{ur}} (OCR_{yy} - 1) \end{aligned}$$

### Vergelijking 71



## Bijlage 4 Afleidingen omrekenformules van a naar $\kappa^*$

In deze bijlage worden de afleidingen van de omrekenformules tussen de a,b,c-Isotachen parameter a en de SSC parameter  $\kappa^*$  gegeven. Het betreffen twee omrekenformules; één voor de omrekening bij een constante waarde voor K (Vergelijking 76), deze vergelijking wordt gebruikt indien overconsolidatie is ontstaan t.g.v. aging. De tweede (Vergelijking 77) wordt daarentegen gebruikt indien K niet constant is bij herbelasten. Dit is het geval indien de overconsolidatie het gevolg is van ontlasten.

$$\kappa^* = a \text{ (indien K constant is)}$$

### Vergelijking 76

$$\kappa^* = \frac{(1 - \nu_{ur})(1 + 2K)}{1 + \nu_{ur}} a \text{ (indien K niet constant is)}$$

### Vergelijking 77

#### Afleiding Vergelijking 76

Vergelijking 11 is de directe verticale rek vergelijking geldig voor het a,b,c-Isotachenmodel. Vergelijking 43 is de SSC vergelijking voor directe volumieke rek.

$$\Delta \varepsilon_{yy;d} = a \ln \left( \frac{\sigma'_{yy}}{\sigma'_{yy;0}} \right) \quad -\Delta \varepsilon_{v;d} = \kappa^* \ln \left( \frac{p'}{p'_0} \right)$$

### Vergelijking 11

### Vergelijking 43

De negatieve volumieke rek berekend in het SSC model ( $-\Delta \varepsilon_{v;d}$ ) is bij 1-dimensionale samendrukking gelijk aan de verticale rek ( $\Delta \varepsilon_{yy;d}$ ) berekend in het a,b,c-Isotachenmodel. Verder geldt in normaal geconsolideerde grond het volgende:

$$3p'_0 = (1 + 2K_0^{nc})\sigma'_{yy;0} \text{ en } 3p' = (1 + 2K_0^{nc})\sigma'_{yy}$$

Hieruit volgt dat:

$$\frac{p'}{p'_0} = \frac{\sigma'_{yy}}{\sigma'_{yy;0}}$$

Vergelijking 11 en Vergelijking 43 worden nu aan elkaar gelijk gesteld:

$$\kappa^* \ln \left( \frac{p'}{p'_0} \right) = a \ln \left( \frac{\sigma'_{yy}}{\sigma'_{yy;0}} \right)$$

Er volgt nu dat:

$$\kappa^* = a \text{ (indien K constant is)}$$

### Vergelijking 76

De omrekening van a naar  $\kappa^*$  in overgeconsolideerde toestanden wijkt aanzienlijk af van de bovenstaande omrekening.

Afleiding Vergelijking 77

Vergelijking 21 is de directe verticale reksnelheid vergelijking geldig voor het a,b,c-Isotachenmodel. Vergelijking 58 is de SSC vergelijking voor directe volumieke reksnelheid.

$$\dot{\epsilon}_{yy;d} = \frac{a}{\sigma'_{yy}} \dot{\sigma}'_{yy} \qquad -\dot{\epsilon}_{v;d} = \frac{\kappa^*}{p'} \dot{p}'$$

**Vergelijking 21****Vergelijking 58**

De verhouding tussen  $p'$  en  $\sigma'_{yy}$  is beschreven in de onderstaande vergelijking.

$$p' = \frac{1+2K}{3} \sigma'_{yy}$$

Voor de verhouding tussen  $\dot{p}'$  en  $\dot{\sigma}'_{yy}$  volgt nu:

$$\dot{p}' = \frac{1+2 \frac{\nu_{ur}}{1-\nu_{ur}}}{3} \dot{\sigma}'_{yy}$$

Er geldt nu dat:

$$-\dot{\epsilon}_{v;d} = \kappa^* \frac{\dot{p}'}{p'} = \kappa^* \frac{1+2 \frac{\nu_{ur}}{1-\nu_{ur}}}{3} \frac{3}{1+2K} \frac{\dot{\sigma}'_{yy}}{\sigma'_{yy}}$$

Deze vergelijking kan vereenvoudigd worden tot:

$$-\dot{\epsilon}_{v;d} = \frac{1+\nu_{ur}}{1-\nu_{ur}} \frac{\kappa^*}{1+2K} \frac{\dot{\sigma}'_{yy}}{\sigma'_{yy}}$$

De negatieve volumieke reksnelheid ( $-\dot{\epsilon}_{v;d}$ ) berekend in het SSC model is bij 1-dimensionale samendrukking gelijk aan de verticale reksnelheid ( $\dot{\epsilon}_{yy;d}$ ) berekend in het a,b,c-Isotachenmodel. Vergelijking 21 wordt nu gelijk gesteld aan de laatst afgeleide vergelijking, hieruit volgt de verhouding tussen a en  $\kappa^*$  (Vergelijking 77).

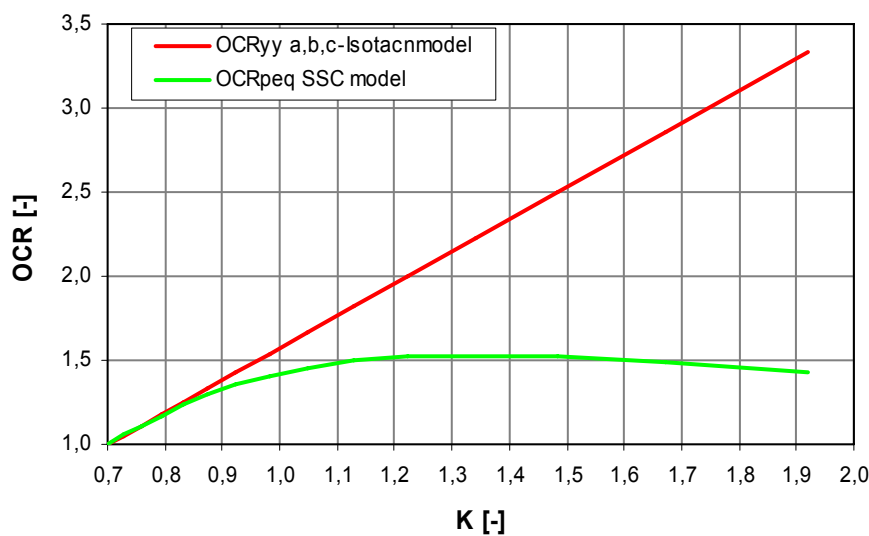
$$\frac{1+\nu_{ur}}{1-\nu_{ur}} \frac{\kappa^*}{1+2K} \frac{\dot{\sigma}'_{yy}}{\sigma'_{yy}} = a \frac{\dot{\sigma}'_{yy}}{\sigma'_{yy}}$$

$$\kappa^* = \frac{(1-\nu_{ur})(1+2K)}{1+\nu_{ur}} a \text{ (indien K niet constant is)}$$

**Vergelijking 77**

## Bijlage 5 Afname OCR<sub>p'eq</sub> t.g.v. ontlasten bij grote K-waarden

In deze bijlage wordt ingegaan op de oorzaken en gevolgen van de OCR<sub>p'eq</sub> afname t.g.v. ontlasten bij grote K-waarden. In de onderstaande figuur is deze afname weergegeven. Deze grafiek is tot stand gekomen met de volgende materiaaleigenschappen,  $\kappa^* = 0,02$ ;  $\lambda^* = 0,1$ ;  $\nu_{ur} = 0,15$ ;  $K_0^{nc} = 0,7$  en  $M = 1,039$ . K t.g.v. ontlasten is berekend volgens de correcte methode (Vergelijking 71). Het ontlasten is doorgezet tot bezwijken ( $\phi = 20^\circ$  en  $c = 0 \text{ kN/m}^2$ ).



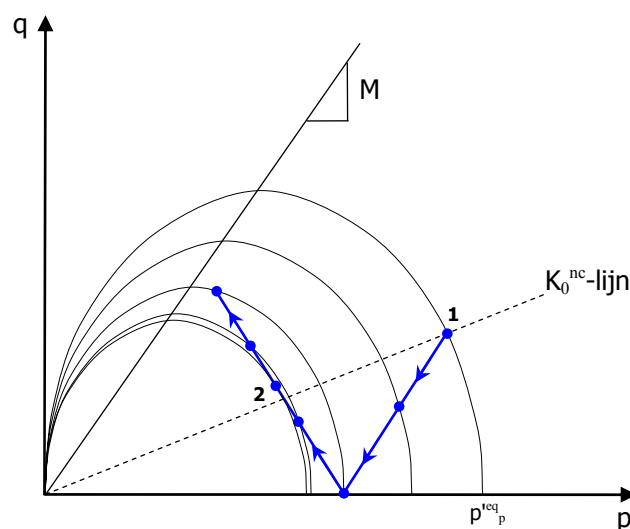
### Oorzaak

De OCR<sub>p'eq</sub> afname is het gevolg van een toename van  $p'^{eq}$  t.g.v. ontlasten bij grote waarden voor K.

In de onderstaande figuur is het verloop van  $p'^{eq}$  grafisch tijdens ontlasten weergegeven in een  $p' - q$  grafiek. De tijdsduur tijdens ontlaststappen is te verwaarlozen, hierdoor blijft de equivalente grensspanning onveranderd.

Als vanuit punt 1 (een normaal geconsolideerd spanningspunt) ontlast wordt, dan volgt een spanningspad de blauwe lijn. In eerste instantie zal  $p'^{eq}$  afnemen, de OCR<sub>p'eq</sub> neemt daardoor toe (de ellipsen worden kleiner). Vanaf punt 2 treedt er echter een verandering op. De ellipsen worden groter i.p.v. kleiner bij verder ontlasten waardoor de OCR<sub>p'eq</sub> zal afnemen, want  $p'^{eq}$  neemt toe. Deze afname vindt plaats totdat het Mohr-Coulomb bezwijk criterium wordt bereikt.

De toename van  $p'^{eq}$  t.g.v. ontlasten treedt op bij K-waarden die groter zijn dan 1.



## ***Gevolgen***

De afname van  $OCR_{p^{eq}}$  heeft bij 1-dimensionale vervorming tot gevolg dat de initiële seculaire reksnelheid groter wordt t.g.v. verder ontlasten (verticale spanningsafname) bij punt 2. Voor praktische doeleinden is dit niet interessant. De optredende intrinsieke tijdsafhankelijke seculaire vervormingen na een dergelijke mate van overconsolidatie zijn meestal verwaarloosbaar.

Naast de gevolgen op de initiële seculaire reksnelheid heeft de afname van  $OCR_{p^{eq}}$  en daarmee dus een toename van  $p^{eq}$  tot gevolg dat er spanningsafhankelijke seculaire compactie zal ontstaan t.g.v. ontlasten,  $p^{eq}$  neemt immers toe. Ten gevolge van ontlasten treedt hierdoor compactie op. Normaliter valt deze compactie buiten het invloedsgebied van de ingenieurspraktijk. Dergelijke mate van ontlasten komt zelden voor bij zettingsgerichte berekeningen.

## ***Conclusie***

De oorzaak met bijbehorende gevolgen van de afname van  $OCR_{p^{eq}}$  bij grote waarden voor K (dit geldt voor K-waarden die i.i.g. groter zijn dan 1) is nu achterhaald. De gevolgen voor de ingenieurspraktijk zijn te verwaarlozen. Dergelijke mate van ontlasten bij zettingsgerichte berekeningen komen zelden voor. Daarnaast zal de invloed op de resultaten te verwaarlozen zijn. Bij dergelijke mate van overconsolidatie speelt de intrinsieke tijdsafhankelijke seculaire rek een verwaarloosbare rol. De compactie die op kan treden t.g.v. ontlasten is normaliter significant kleiner dan de zetting die optreedt t.g.v. belasten (boven de grensspanning).

## Bijlage 6 Invloed M op overgeconsolideerd grondmonster tijdens 1-dimensionale samendrukking

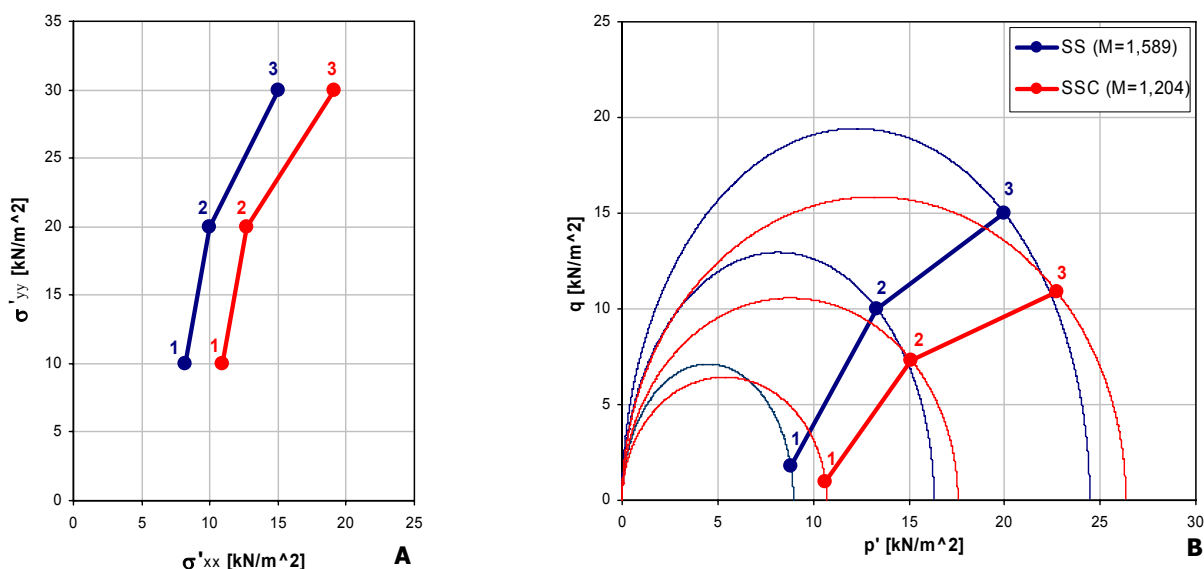
In deze bijlage wordt de invloed van M op spanningen en vervormingen bij 1-dimensionale samendrukking behandeld. Hierbij worden 2 situaties beschouwd; de eerste situatie betreft de invloed van M op een overgeconsolideerd grondmootje met een default  $K_0$ -waarde. De tweede situatie betreft de invloed van M op een overgeconsolideerd grondmootje met een aangepaste  $K_0$ -waarde.

Het gaat hierbij om een willekeurig spanningspunt in een geometrie. De geometrie wordt daarom ook niet beschreven.

### 6.1 Overgeconsolideerd grondmonster met default $K_0$ -waarde

M.b.v. een voorbeeldberekening wordt de invloed van M op spanningen tijdens 1-dimensionale samendrukking behandeld. Het grondmonster is overgeconsolideerd, de initiële spanningen zijn bepaald met de default  $K_0$ -waarde. De spanningspaden voor en na de grensspanning worden hierbij gescheiden van elkaar behandeld. Voor beide spanningspaden zijn de resultaten grafisch en numeriek weergegeven in respectievelijk Figuur 5 en Tabel 1.

Voor dit overgeconsolideerd grondmonster is de default  $K_0$ -waarde aangehouden. Verder is:  $\varphi$  30°,  $c$  0 kN/m<sup>2</sup>,  $v_{ur}$  0,15,  $\kappa^*$  0,02 en  $\lambda^*$  0,1. In Figuur 5A en B zijn de spanningspaden weergegeven. De verticale spanning is de variabele spanning en wordt vanuit zijn initiële verticale spanning ( $\sigma'_{yy,1} = 10$  kN/m<sup>2</sup>) met 20 kN/m<sup>2</sup> verhoogd naar  $\sigma'_{yy,3} = 30$  kN/m<sup>2</sup>. De ingevoerde OCR ( $OCR_{yy}$ ) is 2, de verticale grensspanning ( $\sigma'_{yy,2}$ ) is 20 kN/m<sup>2</sup>.



Figuur 5A en B: invloed M op spanningen in een overgeconsolideerde grond met default  $K_0$ -waarde

In Tabel 1A en B zijn de numerieke waarden van de verschillende spanningen opgenomen. In Tabel 1A staan de numerieke waarden voor het overgeconsolideerde spanningspad, van punt 1 naar 2. In tabel B staan de numerieke waarden voor het normaal geconsolideerde spanningspad, van punt 2 naar 3.

|                                   | Overgeconsolideerd<br>spanningspad |       |
|-----------------------------------|------------------------------------|-------|
|                                   | SS                                 | SSC   |
| M                                 | 1,589                              | 1,204 |
| $K_0^{nc}$ (default)              | 0,500                              | 0,636 |
| $K_0$ (default)                   | 0,824                              | 1,096 |
| $\sigma'_{yy;1}$                  | 10,00                              | 10,00 |
| $\sigma'_{yy;2}$                  | 20,00                              | 20,00 |
| $\sigma'_{yy;2} / \sigma'_{yy;1}$ | 2,00                               | 2,00  |
| $\Delta\sigma'_{yy}$              | 10,00                              | 10,00 |
| $\sigma'_{xx;1}$                  | 8,24                               | 10,96 |
| $\sigma'_{xx;2}$                  | 10,00                              | 12,72 |
| $\sigma'_{xx;2} / \sigma'_{xx;1}$ | 1,21                               | 1,16  |
| $\Delta\sigma'_{xx}$              | 1,76                               | 1,76  |
| $p'_1$                            | 8,82                               | 10,64 |
| $p'_2$                            | 13,33                              | 15,15 |
| $p'_2 / p'_1$                     | 1,51                               | 1,42  |
| $\Delta p'$                       | 4,51                               | 4,51  |
| $q'_1$                            | 1,76                               | 0,96  |
| $q'_2$                            | 10,00                              | 7,28  |
| $q'_2 / q'_1$                     | 5,68                               | 7,58  |
| $\Delta q'$                       | 8,24                               | 6,32  |
| $p^{req}_1$                       | 8,96                               | 10,70 |
| $p^{req}_2$                       | 16,31                              | 17,56 |
| $p^{req}_2 / p^{req}_1$           | 1,82                               | 1,64  |
| $\Delta p^{req}$                  | 7,35                               | 6,86  |

A

|                                   | Normaal<br>geconsolideerd |       |
|-----------------------------------|---------------------------|-------|
|                                   | SS                        | SSC   |
| M                                 | 1,589                     | 1,204 |
| $K_0^{nc}$ (default)              | 0,500                     | 0,636 |
| $K_0$ (default)                   | 0,824                     | 1,096 |
| $\sigma'_{yy;2}$                  | 20,00                     | 20,00 |
| $\sigma'_{yy;3}$                  | 30,00                     | 30,00 |
| $\sigma'_{yy;3} / \sigma'_{yy;2}$ | 1,50                      | 1,50  |
| $\Delta\sigma'_{yy}$              | 10,00                     | 10,00 |
| $\sigma'_{xx;2}$                  | 10,00                     | 12,72 |
| $\sigma'_{xx;3}$                  | 15,00                     | 19,08 |
| $\sigma'_{xx;3} / \sigma'_{xx;2}$ | 1,50                      | 1,50  |
| $\Delta\sigma'_{xx}$              | 5,00                      | 6,36  |
| $p'_2$                            | 13,33                     | 15,15 |
| $p'_3$                            | 20,00                     | 22,72 |
| $p'_3 / p'_2$                     | 1,50                      | 1,50  |
| $\Delta p'$                       | 6,67                      | 7,57  |
| $q'_2$                            | 10,00                     | 7,28  |
| $q'_3$                            | 15,00                     | 10,92 |
| $q'_3 / q'_2$                     | 1,50                      | 1,50  |
| $\Delta q'$                       | 5,00                      | 3,64  |
| $p^{req}_2$                       | 16,31                     | 17,56 |
| $p^{req}_3$                       | 24,46                     | 26,34 |
| $p^{req}_3 / p^{req}_2$           | 1,50                      | 1,50  |
| $\Delta p^{req}$                  | 8,15                      | 8,78  |

B

Tabel 1A en B: invloed M op spanningen in overgeconsolideerde grond met default  $K_0$ -waardeInterpretatie Figuur 1 en Tabel 1A:

- De isotrope spanningsverhouding ( $p'_2 / p'_1$ ) is groter bij een hogere M-waarde. De oorzaak hiervan zit in de horizontale spanningen. De verhouding van deze spanningen wordt groter naarmate de M-waarde toeneemt. De isotrope spanningsverhouding zal eveneens toenemen. De optredende directe rekken zijn hierdoor logischerwijs groter naarmate M zal toeneemt. De default M-waarde van het SS model geeft hierdoor grotere directe volumieke rekken dan het SSC model.
- De OCR, ofwel equivalente spanningsverhoudingen ( $p^{req}_p / p^{req}$ ) is bij herbelasten groter naarmate de M-waarde toeneemt. De initiële seculaire volumieke reksnelheid zal hierdoor kleiner worden naarmate de M-waarde toeneemt (zie Vergelijking 59). In overgeconsolideerde spanningstoestanden geven kleinere M-waarde grotere seculaire volumieke reksnelheden.

De verwachte volumieke rekverschillen zijn klein. Bij herbelasten is de grond overgeconsolideerd. Hierdoor zijn de volumieke rekken klein t.o.v. belasten in normaal geconsolideerde grond.

Interpretatie Figuur 5 en Tabel 1B:

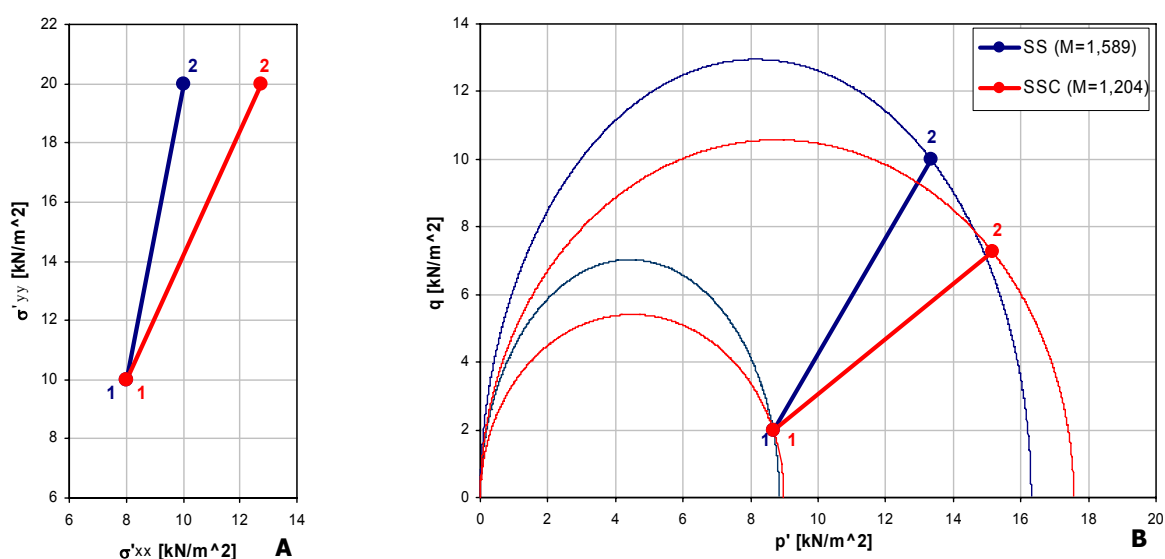
- De verhouding tussen de spanningen zijn constant; 1,5. De optredende volumieke rekken zijn hierdoor voor beide M-waarden gelijk.

De invloed van M op vervormingen tijdens 1-dimensionale samendrukking zijn klein.

## 6.2 Overgeconsolideerd grondmonster met aangepaste $K_0$ -waarde

In de vorige paragraaf is de default  $K_0$ -waarde aangehouden voor het berekenen van de initiële overgeconsolideerde spanningen. In deze paragraaf wordt deze default  $K_0$ -waarde aangepast door een kleinere waarde.

De initiële verticale spanningen ( $\sigma'_{yy;1}$ ) is 10 kN/m<sup>2</sup>. De verticale grensspanning ( $\sigma'_{yy;2}$ ) is 20 kN/m<sup>2</sup>.  $K_0$  is voor beide M-waarden 0,8. Verder geldt in het algemeen dat:  $c = 0$  kN/m<sup>2</sup>,  $\nu_{ur} = 0,15$ ,  $\kappa^* = 0,02$  en  $\lambda^* = 0,1$ . De spanningspaden zijn weergegeven in Figuur 6A en B.



Figuur 6A en B: invloed M op spanningen in overgeconsolideerd grond met aangepaste  $K_0$ -waarde

In Tabel 2 zijn de numerieke waarden van de verschillende spanningen opgenomen.

|                                   | SS    | SSC   |
|-----------------------------------|-------|-------|
| M                                 | 1,589 | 1,204 |
| $K_0^{nc}$ (default)              | 0,500 | 0,636 |
| $K_0$                             | 0,8   | 0,8   |
| $\sigma'_{yy;1}$                  | 10,00 | 10,00 |
| $\sigma'_{yy;2}$                  | 20,00 | 20,00 |
| $\sigma'_{yy;2} / \sigma'_{yy;1}$ | 2,00  | 2,00  |
| $\Delta\sigma'_{yy}$              | 10,00 | 10,00 |
| $\sigma'_{xx;1}$                  | 8,00  | 8,00  |
| $\sigma'_{xx;2}$                  | 10,00 | 12,72 |
| $\sigma'_{xx;2} / \sigma'_{xx;1}$ | 1,25  | 1,59  |
| $\Delta\sigma'_{xx}$              | 2,00  | 4,72  |

|                         | SS    | SSC   |
|-------------------------|-------|-------|
| $p'_1$                  | 8,67  | 8,67  |
| $p'_2$                  | 13,33 | 15,15 |
| $p'_2 / p'_1$           | 1,54  | 1,75  |
| $\Delta p'$             | 4,66  | 6,48  |
| $q'_1$                  | 2,00  | 2,00  |
| $q'_2$                  | 10,00 | 7,28  |
| $q'_2 / q'_1$           | 5,00  | 3,64  |
| $\Delta q'$             | 8,00  | 5,28  |
| $p'^{eq}_1$             | 8,85  | 8,99  |
| $p'^{eq}_2$             | 16,31 | 17,56 |
| $p'^{eq}_2 / p'^{eq}_1$ | 1,84  | 1,95  |
| $\Delta p'^{eq}$        | 7,46  | 8,57  |

Tabel 2: invloed M op spanningen in overgeconsolideerd grond met aangepaste  $K_0$ -waarde

Interpretatie Figuur 6 en Tabel 2:

- De  $K_0$ -waarden zijn voor beide M-waarde hetzelfde, hierdoor is er geen verschil in initiële spanningen.
- De isotrope spanningsverhouding ( $p'_2 / p'_1$ ) is kleiner naarmate de M-waarde toeneemt. De oorzaak hiervan zit in de kleinere horizontale spanningsverhouding bij grotere M-waarde. Door deze grotere isotrope spanningsverhouding zullen de directe volumieke rekken kleiner zijn bij grotere waarde voor M.
- De OCR oftewel equivalente spanningsverhouding ( $p'^{eq}_p / p'^{eq}$ ) is kleiner naarmate de M-waarde toeneemt. De initiële seculaire volumieke reksnelheid zal hierdoor groter zijn naarmate de M-waarde toeneemt. De default waarde van het SS model heeft hierdoor een grotere initiële seculaire volumieke reksnelheid tot gevolg dan het SSC model.

De bovenstaande spanningstoestand bevindt zich beneden de grensspanning. Hierdoor zullen de optredende volumieke rekken klein zijn. De volumieke rekverschillen bij verschillende M-waarde zijn daardoor ook klein.

Er kan geconcludeerd worden dat de invloed van M op vervormingen tijdens 1-dimensionale samendrukking op een overgeconsolideerd grondmonster met aangepaste  $K_0$ -waarde, klein zijn.

## Bijlage 7 Belastingschema's paragraaf 4.3.1

| Beschrijving     | Identification | Phase no. | Start from | Calculation      | Loading input       | Time        | Water | First | Last | Error      |
|------------------|----------------|-----------|------------|------------------|---------------------|-------------|-------|-------|------|------------|
|                  | Initial phase  | 0         | 0          | N/A              | N/A                 | 0,00 day    | 0     | 0     | 0    | N/A        |
| voorbelasten     | -70            | 31        | 0          | Plastic analysis | Staged construction | 1,00 day    | 31    | 1     | 4    | No errors. |
| seculaire stap   | -70            | 87        | 31         | Plastic analysis | Staged construction | 3,00 day    | 87    | 5     | 7    | No errors. |
| ontlaststap 1    | -20            | 3         | 31         | Plastic analysis | Staged construction | 1,00 day    | 3     | 8     | 12   | No errors. |
| herbelaststap 1  | -40            | 5         | 3          | Plastic analysis | Staged construction | 1,00 day    | 5     | 13    | 15   | No errors. |
| herbelaststap 1  | -60            | 72        | 5          | Plastic analysis | Staged construction | 1,00 day    | 72    | 16    | 18   | No errors. |
| primair belasten | -80            | 7         | 72         | Plastic analysis | Staged construction | 1,00 day    | 7     | 19    | 21   | No errors. |
| primair belasten | -160           | 9         | 7          | Plastic analysis | Staged construction | 1,00 day    | 9     | 22    | 25   | No errors. |
| seculaire stap   | -160           | 88        | 9          | Plastic analysis | Staged construction | 8,00 day    | 88    | 26    | 28   | No errors. |
| ontlaststap 2    | -80            | 43        | 9          | Plastic analysis | Staged construction | 1,00 day    | 43    | 29    | 32   | No errors. |
| ontlaststap 2    | -40            | 38        | 43         | Plastic analysis | Staged construction | 1,00 day    | 38    | 33    | 35   | No errors. |
| ontlaststap 2    | -20            | 44        | 38         | Plastic analysis | Staged construction | 1,00 day    | 44    | 36    | 38   | No errors. |
| ontlaststap 2    | -5             | 57        | 44         | Plastic analysis | Staged construction | 1,00 day    | 57    | 39    | 41   | No errors. |
| herbelaststap 2  | -20            | 59        | 57         | Plastic analysis | Staged construction | 1,00 day    | 59    | 42    | 44   | No errors. |
| herbelaststap 2  | -40            | 46        | 59         | Plastic analysis | Staged construction | 1,00 day    | 46    | 45    | 47   | No errors. |
| herbelaststap 2  | -80            | 39        | 46         | Plastic analysis | Staged construction | 1,00 day    | 39    | 48    | 50   | No errors. |
| herbelaststap 2  | -160           | 41        | 39         | Plastic analysis | Staged construction | 1,00 day    | 41    | 51    | 53   | No errors. |
| primair belasten | -320           | 11        | 41         | Plastic analysis | Staged construction | 1,00 day    | 11    | 54    | 57   | No errors. |
| seculaire stap   | -320           | 89        | 11         | Plastic analysis | Staged construction | 4,00 day    | 11    | 58    | 60   | No errors. |
| ontlaststap 3    | -160           | 82        | 11         | Plastic analysis | Staged construction | 1,00 day    | 82    | 61    | 64   | No errors. |
| ontlaststap 3    | -80            | 81        | 82         | Plastic analysis | Staged construction | 1,00 day    | 81    | 65    | 67   | No errors. |
| herbelaststap 3  | -160           | 80        | 81         | Plastic analysis | Staged construction | 1,00 day    | 80    | 68    | 70   | No errors. |
| herbelaststap 3  | -320           | 79        | 80         | Plastic analysis | Staged construction | 1,00 day    | 79    | 71    | 73   | No errors. |
| primair belasten | -640           | 78        | 79         | Plastic analysis | Staged construction | 1,00 day    | 78    | 74    | 78   | No errors. |
| seculaire stap   | -640           | 77        | 78         | Plastic analysis | Staged construction | 1000,00 day | 77    | 79    | 81   | No errors. |
| seculaire stap   | -640           | 90        | 77         | Plastic analysis | Staged construction | 4,00 day    | 77    | 82    | 84   | No errors. |
| ontlaststap 4    | -320           | 83        | 77         | Plastic analysis | Staged construction | 1,00 day    | 83    | 85    | 87   | No errors. |
| ontlaststap 4    | -160           | 84        | 83         | Plastic analysis | Staged construction | 1,00 day    | 84    | 88    | 90   | No errors. |
| herbelaststap 4  | -320           | 85        | 84         | Plastic analysis | Staged construction | 1,00 day    | 85    | 91    | 93   | No errors. |
| herbelaststap 4  | -640           | 86        | 85         | Plastic analysis | Staged construction | 1,00 day    | 86    | 94    | 96   | No errors. |



## Bijlage 8 Belastingschema's paragraaf 4.3.2.1

### *Belastingsschema spanningspad 1*

| Identification | Phase no. | Start from | Calculation      | Loading input       | Time     | Water | First | Last | Error      |
|----------------|-----------|------------|------------------|---------------------|----------|-------|-------|------|------------|
| Initial phase  | 0         | 0          | N/A              | N/A                 | 0,00 day | 0     | 0     | 0    | N/A        |
| -10            | 31        | 0          | Plastic analysis | Staged construction | 1,00 day | 0     | 1     | 3    | No errors. |
| -20            | 5         | 31         | Plastic analysis | Staged construction | 1,00 day | 0     | 4     | 7    | No errors. |
| -40            | 97        | 5          | Plastic analysis | Staged construction | 1,00 day | 0     | 8     | 12   | No errors. |
| -80            | 93        | 97         | Plastic analysis | Staged construction | 1,00 day | 93    | 13    | 17   | No errors. |
| -160           | 98        | 93         | Plastic analysis | Staged construction | 1,00 day | 98    | 18    | 22   | No errors. |
| -320           | 99        | 98         | Plastic analysis | Staged construction | 1,00 day | 99    | 23    | 28   | No errors. |

### *Belastingsschema spanningspad 2*

| Identification | Phase no. | Start from | Calculation      | Loading input       | Time        | Water | First | Last | Error      |
|----------------|-----------|------------|------------------|---------------------|-------------|-------|-------|------|------------|
| Initial phase  | 0         | 0          | N/A              | N/A                 | 0,00 day    | 0     | 0     | 0    | N/A        |
| -10            | 31        | 0          | Plastic analysis | Staged construction | 1000,00 day | 0     | 1     | 3    | No errors. |
| -20            | 5         | 31         | Plastic analysis | Staged construction | 1000,00 day | 0     | 4     | 7    | No errors. |
| -40            | 97        | 5          | Plastic analysis | Staged construction | 1000,00 day | 0     | 8     | 11   | No errors. |
| -80            | 93        | 97         | Plastic analysis | Staged construction | 1000,00 day | 93    | 12    | 16   | No errors. |
| -160           | 98        | 93         | Plastic analysis | Staged construction | 1000,00 day | 98    | 17    | 22   | No errors. |
| -320           | 99        | 98         | Plastic analysis | Staged construction | 1000,00 day | 99    | 23    | 28   | No errors. |

### *Belastingsschema spanningspad 3*

| Identification | Phase no. | Start from | Calculation      | Loading input       | Time       | Water | First | Last | Error      |
|----------------|-----------|------------|------------------|---------------------|------------|-------|-------|------|------------|
| Initial phase  | 0         | 0          | N/A              | N/A                 | 0,00 day   | 0     | 0     | 0    | N/A        |
| -10            | 31        | 0          | Plastic analysis | Staged construction | 1,00 day   | 0     | 1     | 3    | No errors. |
| -10 (kruip)    | 100       | 31         | Plastic analysis | Staged construction | 999,00 day | 0     | 4     | 6    | No errors. |
| -20            | 5         | 31         | Plastic analysis | Staged construction | 1,00 day   | 0     | 7     | 10   | No errors. |
| -20 (kruip)    | 101       | 5          | Plastic analysis | Staged construction | 999,00 day | 101   | 11    | 13   | No errors. |
| -40            | 97        | 5          | Plastic analysis | Staged construction | 1,00 day   | 0     | 14    | 18   | No errors. |
| -40 (kruip)    | 102       | 97         | Plastic analysis | Staged construction | 999,00 day | 0     | 19    | 24   | No errors. |
| -80            | 93        | 97         | Plastic analysis | Staged construction | 1,00 day   | 93    | 25    | 29   | No errors. |
| -80 (kruip)    | 103       | 93         | Plastic analysis | Staged construction | 999,00 day | 93    | 30    | 37   | No errors. |
| -160           | 98        | 93         | Plastic analysis | Staged construction | 1,00 day   | 98    | 38    | 42   | No errors. |
| -160 (kruip)   | 104       | 98         | Plastic analysis | Staged construction | 999,00 day | 98    | 43    | 49   | No errors. |
| -320           | 99        | 98         | Plastic analysis | Staged construction | 1,00 day   | 99    | 50    | 55   | No errors. |
| -320 (kruip)   | 105       | 99         | Plastic analysis | Staged construction | 999,00 day | 105   | 56    | 62   | No errors. |



## Bijlage 9 Parameter gevoeligheid op horizontale spanningsverandering tijdens kruipstappen

Chart 1

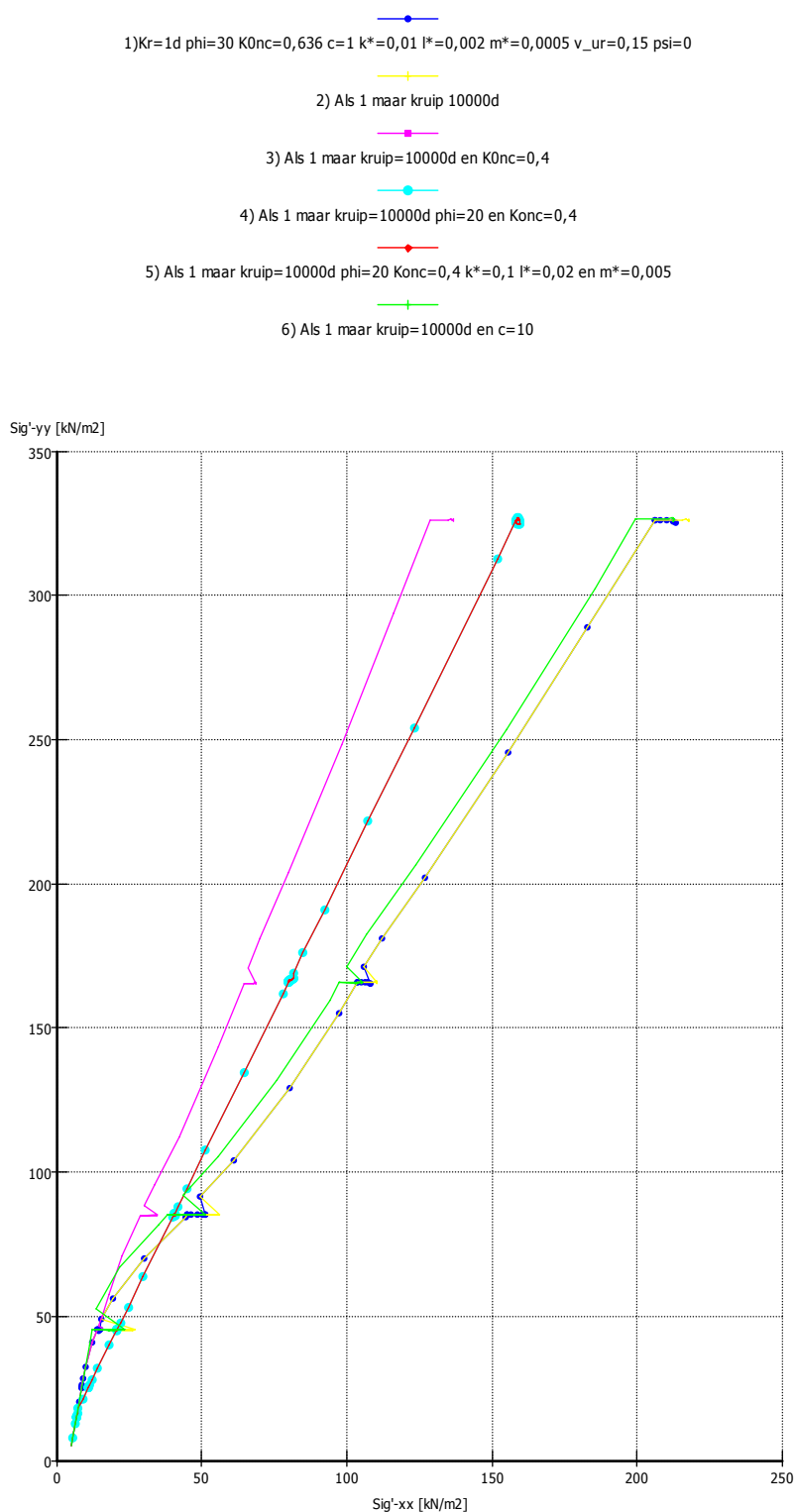
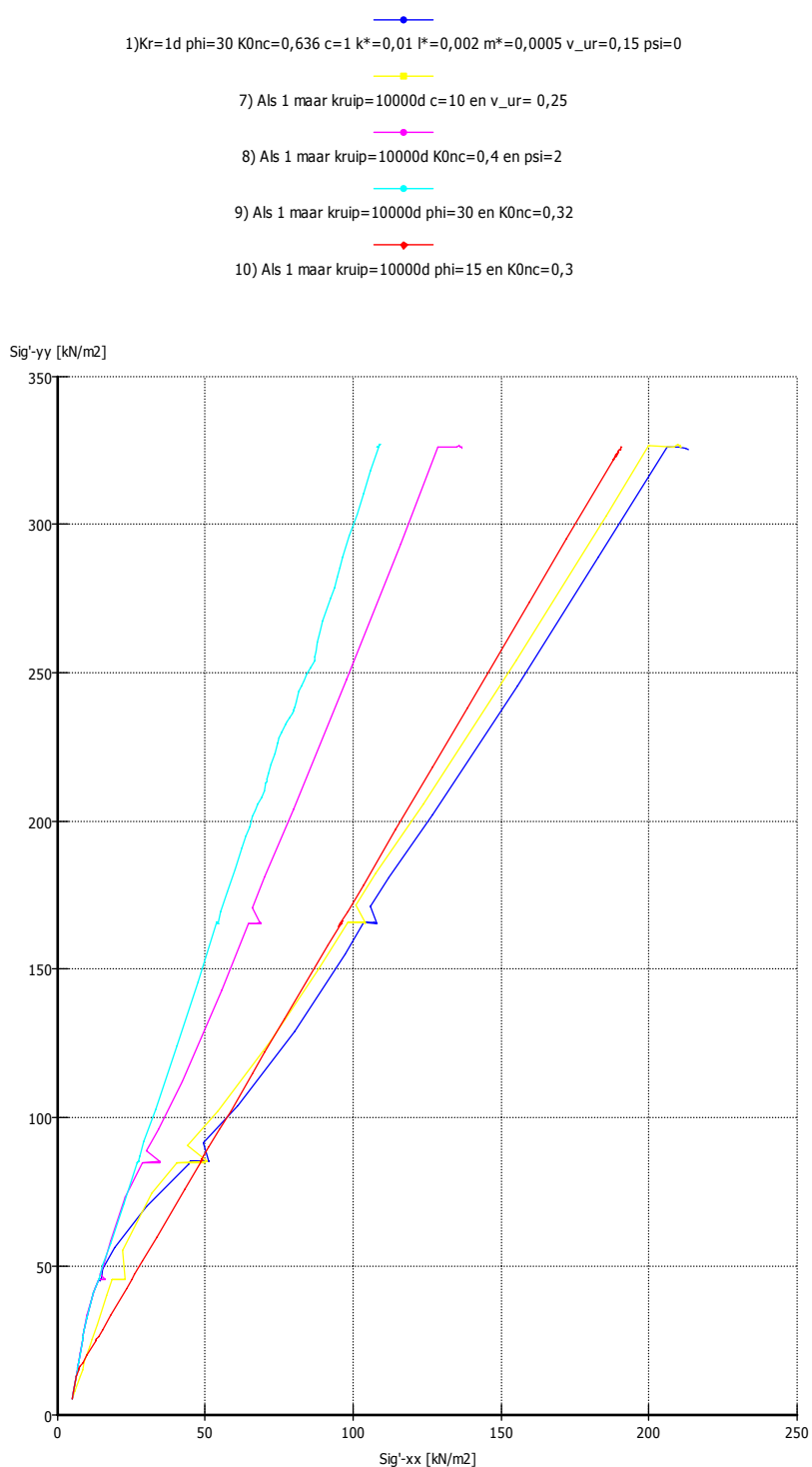


Chart 1



## Bijlage 10 Belastingschema's paragraaf 4.3.2.2

| Beschrijving                                       | Identificat<br>ion            | Phase<br>no. | Start<br>from | Calculati<br>on  | Loading input       | Time        | Water | First | Last | Error      |
|----------------------------------------------------|-------------------------------|--------------|---------------|------------------|---------------------|-------------|-------|-------|------|------------|
|                                                    | Initial phase                 | 0            | 0             | N/A              | N/A                 | 0,00<br>day | 0     | 0     | 0    | N/A        |
| Over-geconsolideerde spanningstoestand aanbrengen  | vert = -20,5 en hor = -16,1   | 101          | 0             | Plastic analysis | Staged construction | 1,00<br>day | 101   | 1     | 6    | No errors. |
| Punt A                                             | vert = -20,5 (kruip)          | 102          | 101           | Plastic analysis | Staged construction | 1E9<br>day  | 102   | 7     | 14   | No errors. |
| Onder-geconsolideerde spanningstoestand aanbrengen | vert = -60,1 en hor = -20,5   | 107          | 0             | Plastic analysis | Staged construction | 1,00<br>day | 107   | 15    | 34   | No errors. |
| Punt B                                             | vert = -60,1 (kruip)          | 106          | 107           | Plastic analysis | Staged construction | 1E9<br>day  | 106   | 35    | 56   | No errors. |
| Over-geconsolideerde spanningstoestand aanbrengen  | vert = -160,1 en hor = -177,6 | 112          | 0             | Plastic analysis | Staged construction | 1,00<br>day | 112   | 57    | 68   | No errors. |
| Punt C                                             | vert = -160,1 (kruip)         | 111          | 112           | Plastic analysis | Staged construction | 1E9<br>day  | 111   | 69    | 78   | No errors. |
| Onder-geconsolideerde spanningstoestand aanbrengen | vert = -320,1 en hor = -160   | 113          | 0             | Plastic analysis | Staged construction | 1,00<br>day | 113   | 79    | 90   | No errors. |
| Punt D                                             | vert = -320,1 (kruip)         | 114          | 113           | Plastic analysis | Staged construction | 1E9<br>day  | 114   | 91    | 103  | No errors. |



## Bijlage 11 Simulatie samendrukkingsproef

### Belastingschema

| Trap;i | $\sigma_v;i'$<br>[kPa] | $t_i$ ;begin<br>[s] | tijdsduur<br>[s] | tijdsduur<br>[d] |
|--------|------------------------|---------------------|------------------|------------------|
| 1      | 75                     | 1                   | 87399            | 1,0116           |
| 2      | 175                    | 87400               | 85561            | 0,9903           |
| 3      | 275                    | 172961              | 91583            | 1,0600           |
| 4      | 500                    | 264544              | 87863            | 1,0169           |
| 5      | 1000                   | 352407              | 87656            | 1,0145           |
| 6      | 2000                   | 440063              | 86920            | 1,0060           |
| 7      | 3000                   | 526983              | 84547            | 0,9786           |
| 8      | 1600                   | 611530              | 87338            | 1,0109           |
| 9      | 275                    | 698868              | 88317            | 1,0222           |
| 10     | 1600                   | 787185              | 87074            | 1,0078           |
| 11     | 3000                   | 874259              | 90631            | 1,0490           |
| 12     | 1600                   | 964890              | 89916            | 1,0407           |
| 13     | 275                    | 1054806             | 240662           | 2,7854           |

### Algemene monster gegevens

$$\gamma_n = 15,6 \text{ kN/m}^3$$

$$e_{\text{init}} = 1,44 \text{ (bij een verticale spanning van } 75 \text{ kN/m}^2\text{)}$$

### Parameter bepaling a.d.h.v. Oedometer\_v1.10b.xls

De grensspanning en a,b,c-Isotachen parameters zijn bepaald a.d.h.v de onderstaande figuren.

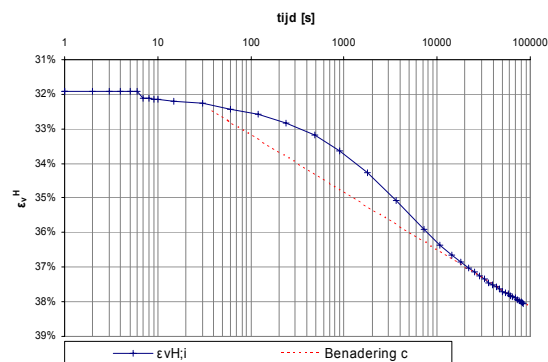
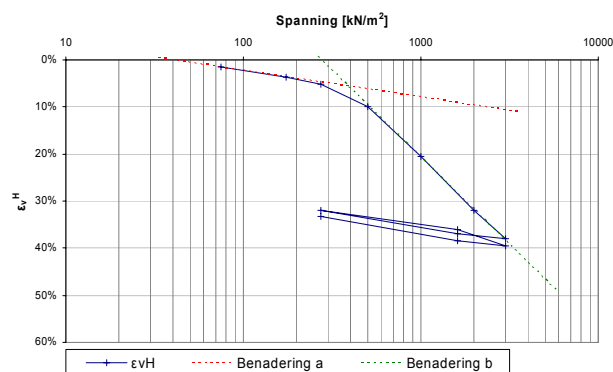
De grensspanning kan afgeleid worden uit de spannings – rek grafiek. Deze wordt bepaald a.d.h.v. het snijpunt van de benaderingslijnen a en b. Hier bedraagt de verticale grensspanning  $400 \text{ kN/m}^2$ .

Voor het bepalen van de parameter a is gekozen voor een gemiddelde van de voorbelast, ontlast- en herbelasttakken. Voor dit gemiddelde is gekozen, omdat ze nagenoeg dezelfde richtingscoëfficiënt hebben.

De numerieke waarde voor a is 0,234.

De parameter b is bepaald m.b.v. de 1 dagslijn. Deze 1 dagslijn wordt goed beschreven door trap 5, 6 en 7. De numerieke waarde voor b is 0,1606.

De parameter c is bepaald a.d.h.v. trap 7. De tijd – rek curve van deze stap is weergegeven in de onderstaande figuur. De numerieke waarde voor c is 0,0072.



De consolidatiecoëfficiënt ( $c_v$ ), permeabiliteit ( $k$ ) en verandering van permeabiliteit ( $c_k$ ) zijn bepaald a.d.h.v. van tijd - zettings grafieken van de trappen 3, 4, 5, 6 en 7. Deze trappen geven in tegenstelling tot de niet gebruikte trappen een betrouwbaar zettingsverloop in de tijd. De  $c_v$ - en  $k$ -waarde kunnen dan met de nodige nauwkeurigheid bepaald worden. De grafieken zijn niet weergegeven. Wel zijn de  $c_v$ -  $k$ - en  $c_k$ -waarde voor de beschreven trappen in Tabel opgenomen. De  $c_v$ -waarde zijn bepaald m.b.v. de methode van Taylor en Casagrande. M.b.v. de  $c_v$ - en  $m_v$ -waarde kan de  $k$ -waarde berekend worden. Uit de afname van de  $k$ -waarde t.g.v. samendrukking wordt de  $c_k$ -waarde bepaald (Vergelijking 93). Voor zowel de  $c_v$ - als  $c_k$ -waarde is een gemiddelde berekend. De  $m_v$ -waarde kan berekend worden a.d.h.v. Vergelijking 91. In deze vergelijking staat  $\Delta h$  voor de hoogte verandering aan het einde van de consolidatieperiode t.o.v. het begin van de trap.  $h_\infty$  staat voor de hoogte aan het einde van de consolidatieperiode.

$$m_v = \frac{\Delta h}{h_\infty \cdot \Delta \sigma'_{yy}}$$

#### Vergelijking 91

$$k = \gamma_w m_v c_v$$

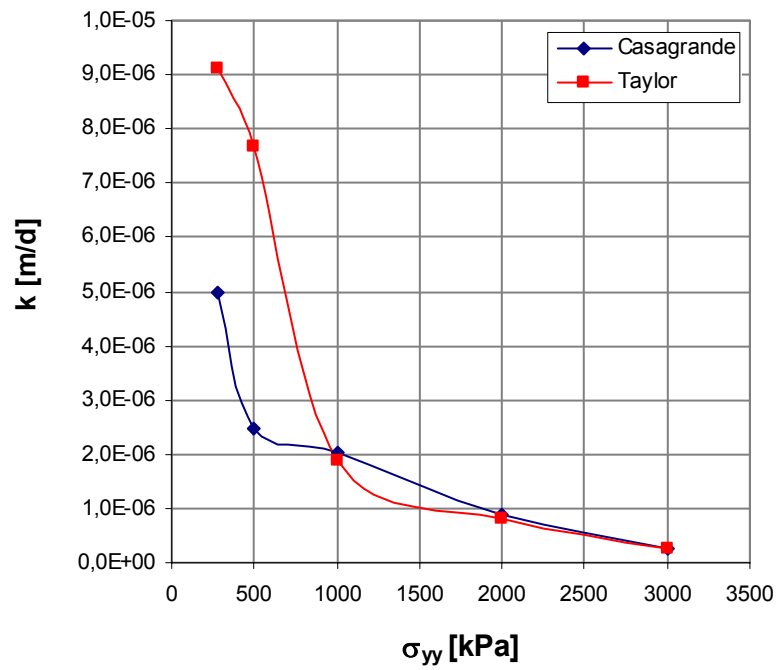
#### Vergelijking 92

$$c_k = \frac{\Delta e}{\log \frac{k}{k_0}}$$

#### Vergelijking 93

| Trap;i     |   | $c_v$               | $m_v$                | $k$      | $e$  | $c_k$ |
|------------|---|---------------------|----------------------|----------|------|-------|
|            |   | [m <sup>2</sup> /s] | [m <sup>2</sup> /kN] | [m/s]    |      |       |
| Casagrande | 3 | 6,57E-08            | 8,77E-05             | 5,76E-11 | 1,45 |       |
|            | 4 | 1,95E-08            | 1,47E-04             | 2,87E-11 | 1,31 | 0,46  |
|            | 5 | 1,10E-08            | 2,14E-04             | 2,35E-11 | 0,93 | 4,40  |
|            | 6 | 8,75E-09            | 1,19E-04             | 1,05E-11 | 0,45 | 1,38  |
|            | 7 | 5,36E-09            | 5,73E-05             | 3,07E-12 | 0,10 | 0,64  |
| Taylor     | 3 | 1,24E-07            | 8,50E-05             | 1,05E-10 | 1,45 |       |
|            | 4 | 9,61E-08            | 9,23E-05             | 8,87E-11 | 1,34 | 1,45  |
|            | 5 | 1,39E-08            | 1,57E-04             | 2,18E-11 | 0,99 | 0,58  |
|            | 6 | 1,06E-08            | 8,75E-05             | 9,31E-12 | 0,50 | 1,32  |
|            | 7 | 7,47E-09            | 4,01E-05             | 3,00E-12 | 0,13 | 0,75  |
| Gemiddelde |   | 3,62E-08            |                      |          |      | 1,37  |

De  $k$ -waarden bij de verschillende spanningen kunnen uitgezet worden tegen de verticale spanning (zie onderstaande figuur). De  $k$ -waarde kan nu bepaald worden bij de initiële spanning. In de berekeningen is de initiële verticale spanning 75 kN/m<sup>2</sup>. De bijbehorende  $k$ -waarde is  $1 \cdot 10^{-05}$  m/d





## Bijlage 12 Verschil in richtingscoëfficiënten tijdens ontlast-herbelaststappen

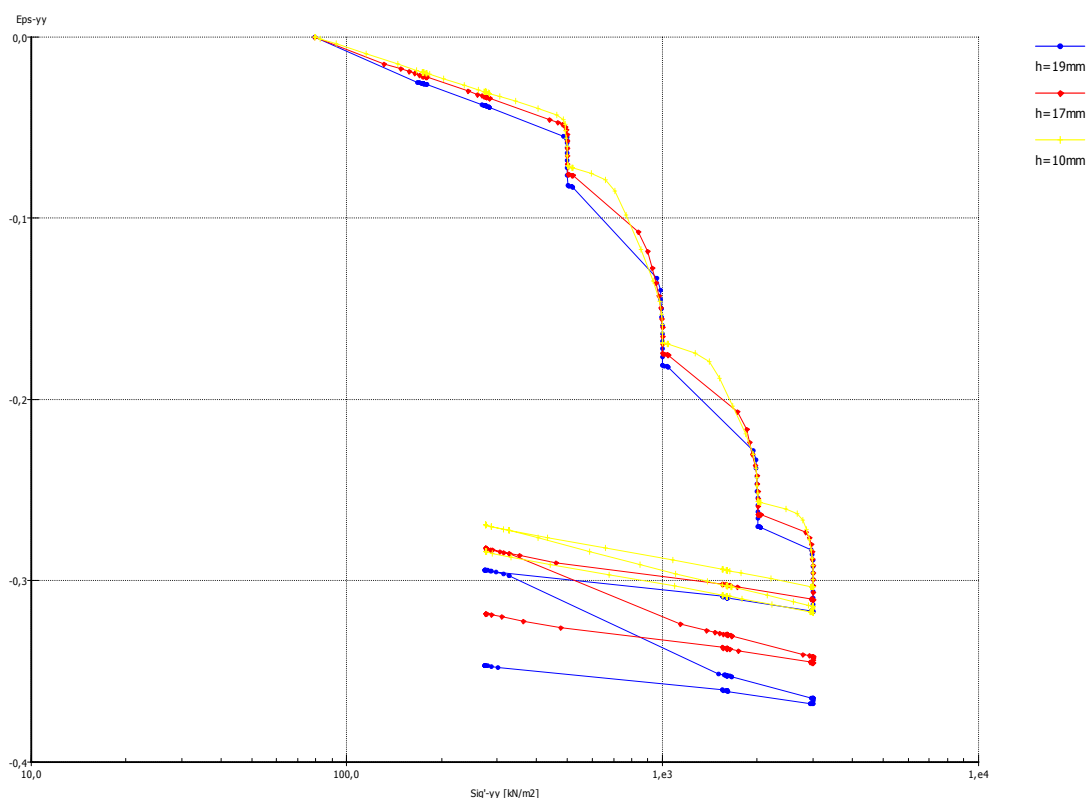
Uit paragraaf 4.4 is gebleken dat er een groot verschil in de richtingscoëfficiënten van de ontlast-herbelaststappen ontstaat bij de gesimuleerde samendrukkingsproef. Dit fenomeen is in deze bijlage onderzocht.

Als eerste is bekeken of de tolerated error en number of additional steps invloed heeft op het verschil in de richtingscoëfficiënt. Dit is niet het geval. Bij een tolerated error van 0,00001 is het verschil in richtingscoëfficiënt gelijk aan het verschil bij een tolerated error van 0,001. Voor de additional steps geldt dat bij 250 additional steps het verschil hetzelfde is als bij 1000 additional steps.

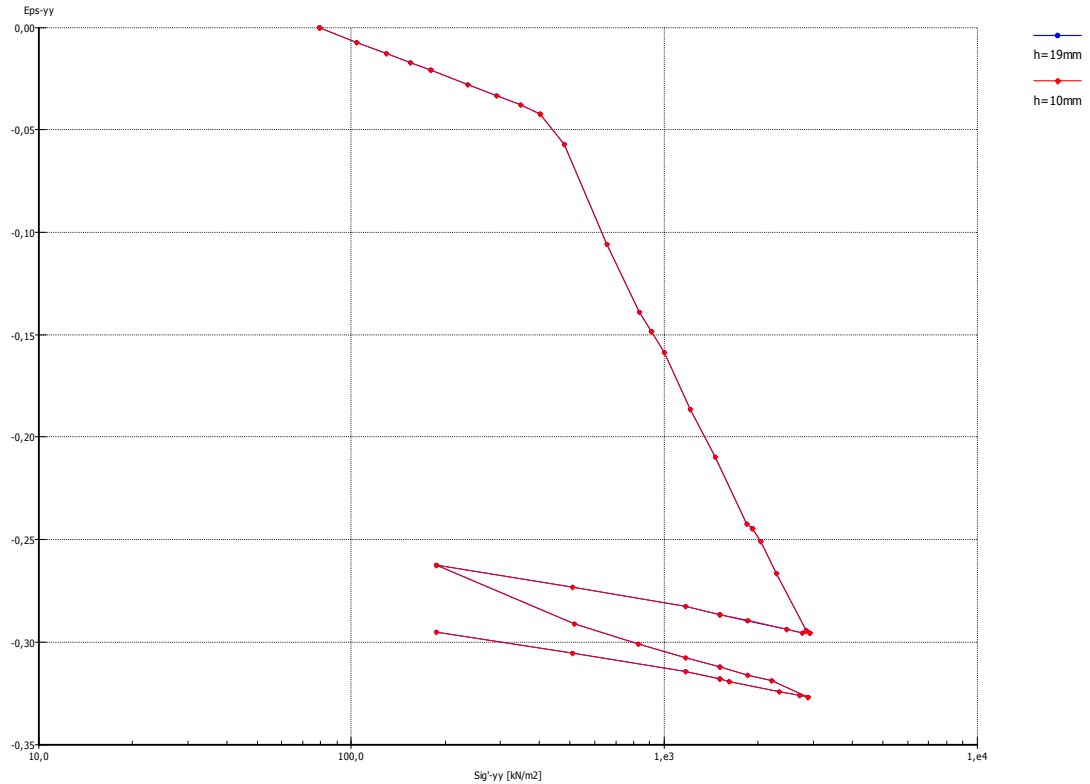
In het Soft Soil en Modified Cam-Clay model is een soortgelijke berekening gemaakt. Bij beide modellen was het verschil in richtingscoëfficiënt te verwaarlozen. De modellen nemen geen intrinsieke tijdsafhankelijke seculaire rek in rekening, daarom is de invloed van de seculaire rek coëfficiënt  $\mu^*$  bekeken in het SSC model. Na een aantal berekeningen met verschillende waarde voor  $\mu^*$  volgt dat de waarde van deze parameter geen invloed heeft op het verschil van de richtingscoëfficiënt.

Een numeriek probleem m.b.t. de consolidatie kan ook de oorzaak zijn van de verschillen. In deze richting is gezocht, omdat in spannings – rek grafieken aan de gedraineerde randen de grootste verschillen ontstaan in de richtingscoëfficiënt van de ontlast- herbelaststappen. In het midden van het monster is het verschil het kleinst (zie hiervoor ook de onderstaande figuur). In deze figuur zijn van drie verschillende knooppunten in het mesh de spannings – rek curve weergegeven. Horizontaal gezien bevindt ieder punt zich in het midden van het mesh. De verticale locatie van ieder punt is weergegeven in de legenda.

Ook helemaal beneden in het mesh (waar de rand gedraineerd is) treedt een groot verschil op. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de gedraineerde randen invloed hebben op de verschillen.



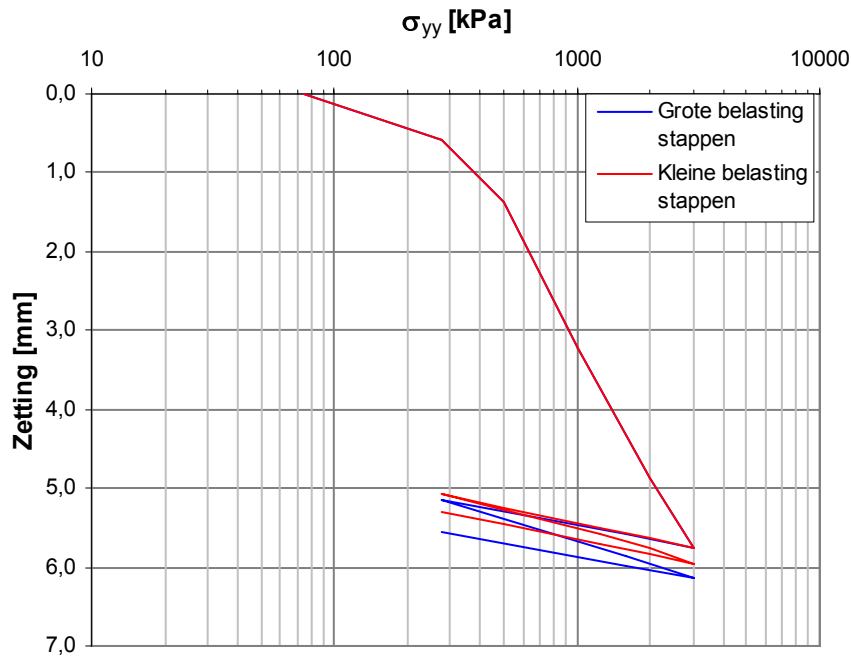
Om consolidatie te verwaarlozen zijn de ontlast- herbelaststappen gedraineerd doorgerekend d.m.v. de ignore undrained behaviour optie. Hieruit volgt dat de verschillen in richtingscoëfficiënt op elke verticale locatie in het mesh hetzelfde zijn (zie ook de onderstaande figuur). Dit in tegenstelling tot de consolidatieberekening waarbij de verschillen afhankelijk zijn van de afstand tot één van de gedraineerde randen.



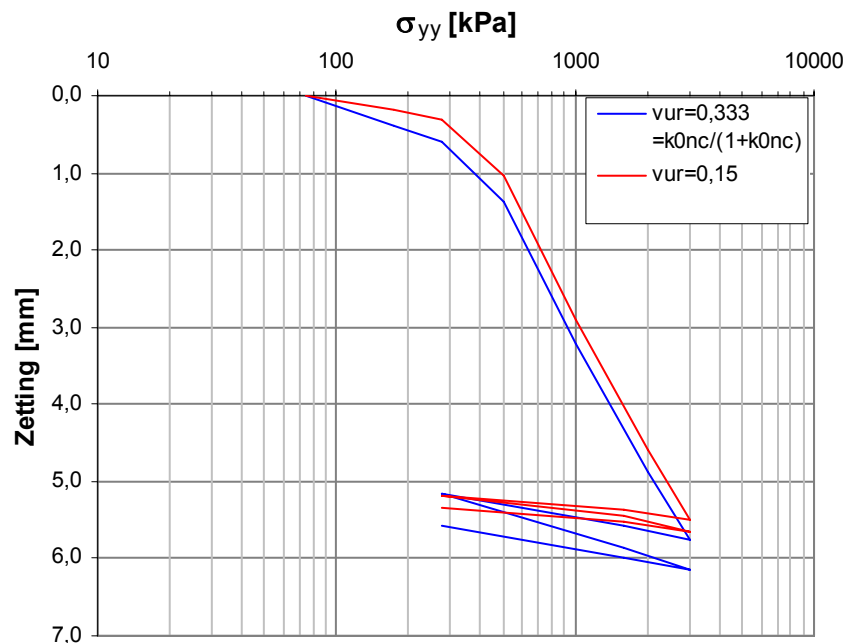
Er kan nu geconcludeerd worden dat de verschillen in een gedraineerde berekening in tegenstelling tot een geconsolideerde berekening constant zijn over de diepte. Het ontstane verschil in de diepte bij de consolidatie berekening lijkt dan ook een numeriek afwijking m.b.t. het consolidatieproces .

De verschillen in richtingscoëfficiënt van de ontlast – herbelast curven zijn bij een gedraineerde berekening echter nog steeds significant.

Voor het achterhalen van de oorzaak kan ook gezocht worden in de grootte van de ontlast en herbelaststappen. Er is een berekening uitgevoerd waarbij 2 keer zoveel stappen zijn gebruikt bij ontlasten en herbelasten. De eindwaarde van deze stappen zijn gelijk gebleven. Kleinere belastingstappen geven kleinere verschillen in de richtingscoëfficiënt (Zie onderstaande figuur).



Voor de simulatie van de samendrukkingsproef is  $v_{ur}$  zo bepaald dat  $K$  constant is bij ontlasten en gelijk is aan  $K_0^{nc}$ . Er blijkt nu dat bij reële waarden voor  $K_0^{nc}$  en  $v_{ur}$  de verschillen in richtingscoëfficiënten beduidend lager zijn (zie onderstaande figuur). Waardoor dit komt is onbekend. Gezegd kan worden dat er geen sprake is van het bereiken van het Mohr-Coulomb bezwijkcriterium. De hoek van inwendige wrijving ( $\varphi$ ) is zodanig aangepast dat het monster niet bezwijkt tijdens ontlasten.



Er kan nu geconcludeerd worden dat de richtingscoëfficiënt van de ontlast- herbelaststappen beïnvloed wordt door de stapgrootte en de keuze van  $K_0^{nc}$  en  $v_{ur}$ .

Bij de keuze van  $K_0^{nc}$  en  $v_{ur}$  zoals deze is gemaakt in paragraaf 4.4 zal de stapgrootte aangepast moeten worden wil de richtingscoëfficiënt van de ontlast- en herbelaststappen met elkaar overeenkomen. De stapgrootte moet aanzienlijk afnemen voordat de richtingscoëfficiënt van de ontlast- en herbelaststappen met elkaar overeenkomen. Een onderzoek naar het aantal benodigde stappen is niet verricht.

Normaliter zal de keuze van  $K_0^{nc}$  en  $v_{ur}$  gebaseerd zijn op realistischere waarden. Conform de laatste figuur wordt dan verwacht dat het optredende verschil in richtingcoëfficiënt te verwaarlozen is.