

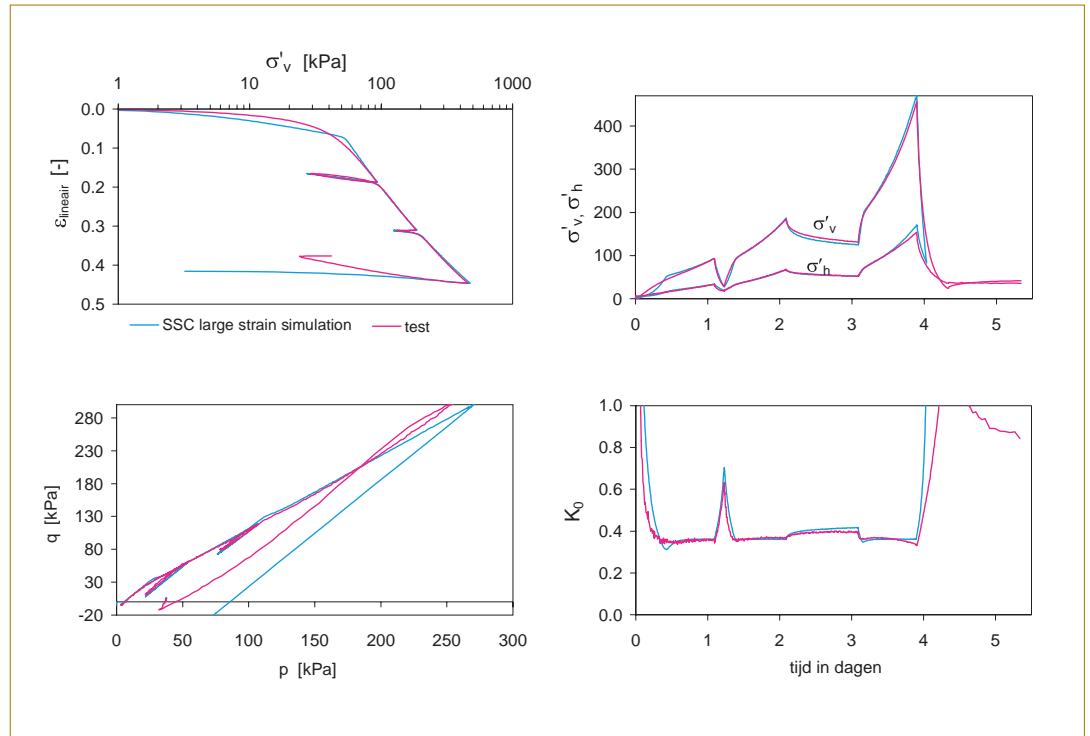
uitgezet tegen de volumieke massa en bestrijken een scala aan slappe Nederlandse grondsoorten. Uitgezet zijn M verkregen uit de K_0 -C.R.S. proef en de triaxiaalproef, en de gemeten $K_{0,nc}$ waarde in de K_0 -C.R.S. proef. Verder is met de Jáky vergelijking ook een M -waarde bepaald, nl. via $K_{0,nc} = 1 - \sin \phi'_{cv}$.

De hoge waarden van M en ϕ' vallen op, en bevestigen de hoge ϕ' waarden in figuur 1 (de relatie tussen ϕ' en M is $\sin \phi' = 3M/(6+M)$; zie ook de ϕ' -as in figuur 3). De overeenstemming tussen triaxiaal- M en M uit de K_0 -C.R.S. proef is niet exact. Met name het veen en de zeer humeuze Gorcum klei benadert in triaxiale compressie al gauw de waarde $M = 3$, hetgeen overeenkomt met de $\phi' = 90^\circ$ conditie. Exacte overeenstemming mag ook niet verwacht worden in deze indirecte vergelijking. Duidelijk is verder dat Jáky veel lager uitpakt, en er kan worden geconcludeerd dat Jáky niet opgaat in Nederlands' slappe grond. Dat is weer eens een bevestiging van het afwijkende gedrag van onze slappe humeuze grond.

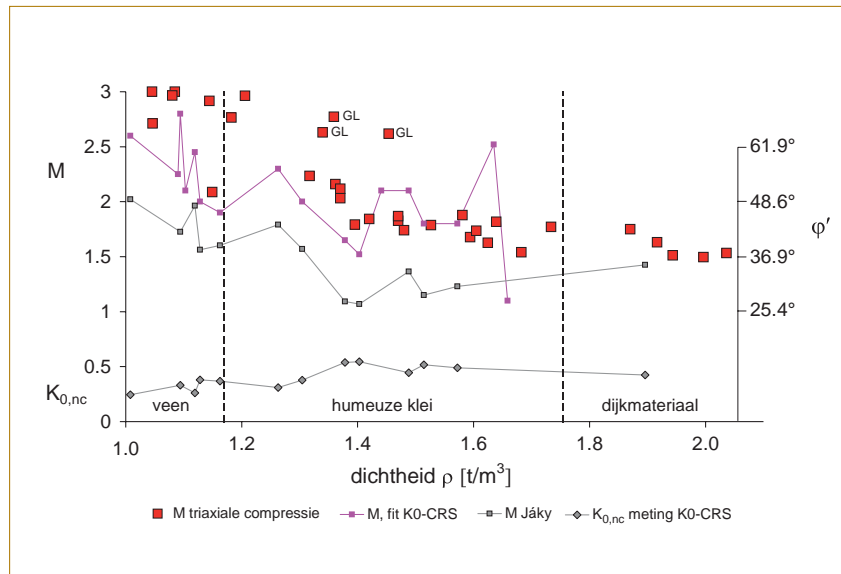
De overeenstemming wordt voldoende goed geacht om de K_0 -C.R.S. parameters inclusief M toe te passen in het Soft Soil Creep model. K_0 -C.R.S. parametersets zijn bepaald voor twee projecten en toegepast in Plaxis. De ϕ' -waarde die in Plaxis als afkapping kan worden gebruikt (om een relatief steilere vloeiooppervlak te krijgen), wordt 0.1° lager genomen dan de hoek van de M -lijn, overeenkomstig de default-instelling in Plaxis. M en ϕ' zijn veel hoger dan gebruikelijk is in slappe grond. Anderzijds is $c' = 0$ genomen. Het CamClay model verwacht geen cohesie in normaalgeconsolideerde omstandigheden, en in triaxiaalproeven wordt ook weinig cohesie gemeten.

Aardebaan Betuwelijn

De metingen aan de aardebaan van de Betuwelijn ter hoogte van km. 16.7 bij Sliedrecht, zijn geanalyseerd in het kader van het CUR project 'door grond horizontaal belaste palen'. De in Plaxis gebruikte dwarsdoorsnede was als in figuur 4. Per slappe laag is een K_0 -C.R.S. oedometerproef uitgevoerd. De proef levert hoge M -waarden, die negatief correleren met het volumieke gewicht. De volumieke gewichten variëren tussen 10 en 15 kN/m³; de M -waarden tussen 2.2 en 1.6. Deze zijn gebruikt in berekeningsvariant 14, waarbij de cohesie op nul werd gesteld. Deze variant leverde goede postdicties op van de horizontale en verticale deformaties. Figuur 5 geeft de horizontale deformaties ter plaatse van de hellingmeter in de teen van de



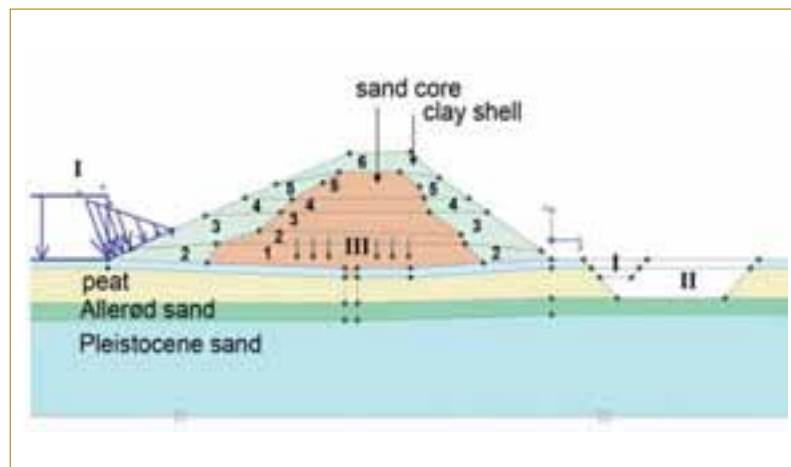
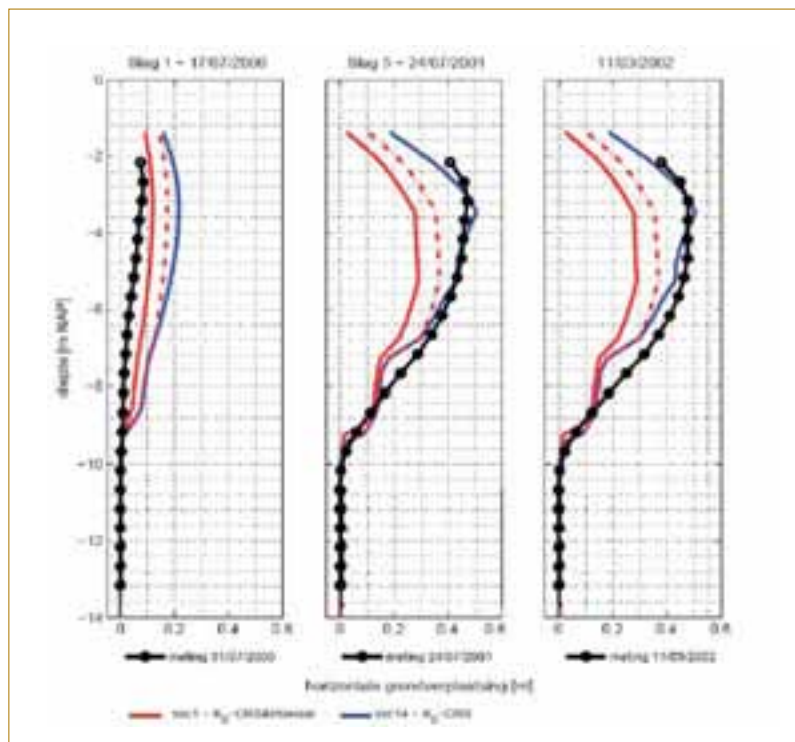
Figuur 2 Fit en meting, K_0 -C.R.S. proef op Oostvaardersplassenklei ($\gamma_{nat} = 12.5 \text{ kN/m}^3$, $\kappa^* = 0.033$, $\lambda^* = 0.24$, $\mu^* = 0.022$, $M = 2.1$, $v_{ur} = 0.18$, $p_{c0} = 32 \text{ kPa}$, $K_{0,nc} = 0.36$).



Figuur 3 M_{nc} en $K_{0,nc}$ uit triaxiale compressieproeven en K_0 -C.R.S. proeven, Markermeerdijk en Lekdijk, en M zoals bepaald met het Soft Soil Creep model en met Jáky's formule.



Figuur 4 Dwarsdoorsnede aardebaan Betuwelijn, km. 16.7 nabij Sliedrecht



Figuur 6 Dijkdoorsnede, IJkdijk Macrostabieliteitsexperiment 2008.

Figuur 5 Horizontale deformaties in de teen, aardebaan Betuwelijn, km. 16.7.

ophoging. De metingen (zwarte lijn) en variant 14 (blauwe lijn) liggen dicht bij elkaar.

IJkdijk

Het project 'Macrostabieliteitsexperiment' van Stichting IJkdijk is opgezet om innovatieve dijk-monitoringstechnieken te beproeven. Er is een 6m hoge en 100m lange dijk gebouwd te Booneschans, op een ondergrond met een dunne top-laag van klei, gevolgd door 1 - 3m veen, een dunne Allerød zandlaag (humeus zand) en Pleistoceen zand. De dijk is tot bezwijken gebracht door eerst een teensloot te graven, die vervolgens te verdiepen en verbreden, en daarna de zandkern met water te vullen. De dijk bezweek enkele uren na het begin van het vullen van de kern. Extra bezwijkstappen werden achter de hand gehouden: legen van de sloot, en vullen met water van een rij containers die op de kruin waren geplaatst.

Bij de IJkdijk is vooral de veenlaag bepalend voor de deformaties en de stabiliteit. Het veen is met Soft Soil Creep gemodelleerd. Gemiddelde parameters zijn genomen van een aantal van 6 K_0 -C.R.S. proeven op het veen. De M -waarde is 2.6 en is dus zeer hoog. De OCR in het veen is bepaald door ijking van de berekening aan de oedometerproeven: de eerste slag is aangebracht, berekende verticale effectieve spanning en rek in het veen zijn bepaald en vergeleken met de oedometerproef, en OCR is aangepast tot overeenstemming werd bereikt.

Plaxis levert een goede simulatie van de gemeten verticale deformaties en waterspanningen tijdens de bouw – zie *figuur 7*. De afwijking ten aanzien van de waterspanningen in de topklei onder de kruin is een gevolg van de aangenomen freatische lijn, die dicht bij het niveau van de opnemer ligt. De freatische conditie brengt de berekende wateroverspanning daarom na elke slag onmiddellijk terug naar nul. Kennelijk is er sprake van een hogere of hoger wordende freatische niveau in de top klei.

De horizontale deformaties in de teen tijdens de bezwijkfasen worden onderschat. Met ongedraineerde $c'-\phi'$ reductie wordt voor het geconstateerde moment van bezwijken $FS=1.17$ berekend. Hier moet nog 10 - 15% extra bijkomen voor het 3D effect van de zijanten van de afschuiving. Gedacht wordt dat het bezwijken ontstaan is door hydraulische grondbreuk, ergens verticaal onder de kruin. Dat is vermoedelijk gebeurd door de hoge infiltratiedrukken rondom de horizontale drains tijdens het vullen van de zandkern. Kernzand zal in de breuk zijn gevloeid en zal eveneens een hoge horizontale druk op de slappe lagen hebben uitgeoefend. Grondbreuk is echter nog niet door veldonderzoek bevestigd en het modelleren van de latere fasen tijdens het bezwijken is dus ongewis en daarom achterwege gelaten.

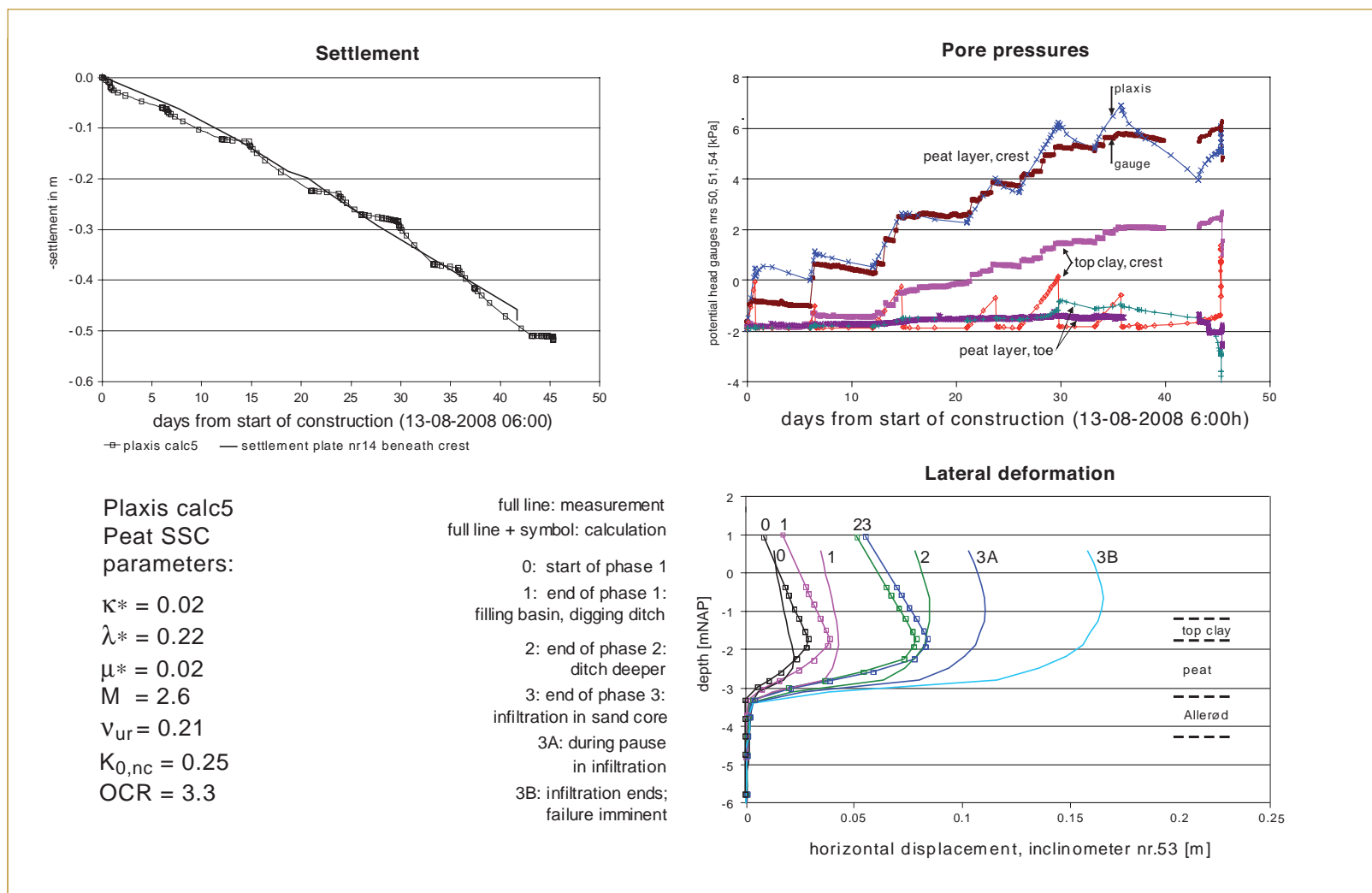
Dijkveiligheid

Beide cases zijn berekend met Soft Soil Creep en met parameters afgeleid uit de K_0 -C.R.S. oedo-

meterproef. Kenmerkend zijn de hoge M -waarden en de afwezigheid van cohesie. Er zijn hierbij geen ondoorzichtige keuzes gemaakt. De sommen verlopen snel: de IJkdijk som vergde slechts enkele minuten rekentijd. De overeenstemming met betrekking tot deformaties en wateroverspanningen is goed. Slappe Nederlandse grond, de K_0 -C.R.S. proef en het Soft Soil Creep model verdragen elkaar kennelijk goed.

Voor de toetsing van dijkveiligheid mag de sterkte bij grote vervorming worden gebruikt, omdat immers niet de gebruikstoestand in het geding is, maar het overleven van extreme belastingen (Van Duinen en Calle, 2007). De K_0 -C.R.S. proef levert feitelijk een hoge, bij grote rek behorende waarde van de sterkte, en voldoet daarmee aan deze conditie. Het Soft Soil Creep model heeft nog het voordeel dat het netjes omgaat met het verschijnsel van kruipversteving ('ageing') en pre-shearing. De ondergrond van een dijk bouwt door visceuze processen over de tijd een extra weerstand op tegen vervorming (kruipversteving), en als de nieuwe belasting dezelfde richting heeft als de oude, is de kruipversteving des te effectiever (pre-shearing).

Een logische aanpak is daarom een dijk vanuit het verleden op te bouwen om zo de huidige toestand te reconstrueren, die te onderwerpen aan de maatgevende belastingen, en tenslotte met ongedraineerde reductie van ϕ' de FS te bepalen.



Figuur 7 Resultaten Plaxis berekening, IJkdijk. Macro stabiliteitsexperiment 2008.

De eindige elementenmethode heeft moeite om de bezwijktoestand van een dijk goed te modelleren, en dat blijft een zwak aspect van de verkregen FS. Verbetering van de $(c')-\varphi'$ -reductie methode is zeker aan te bevelen, maar valt buiten het bestek van dit artikel. Van belang hier is de constatering dat het Soft Soil Creep model in combinatie met de K_0 -C.R.S. oedometerproef, in staat lijkt om de deformatie van constructies op slappe Nederlandse grond getrouw én snel te simuleren, en dat dit een handvat geeft voor het verrekenen van de effecten van de sterkte bij grote vervorming, kruipverstevinging en pre-shearing op de veiligheid van dijken.

Tijdens de bouw van dijken en ophogingen kan deze aanpak worden toegepast voor bewaking van wateroverspanningen en uitvoeringsbegeleiding.

Het is een merkwaardige kronkel dat de celproef, die inmiddels is afgeschreven, in principe overeenkomt met de K_0 -C.R.S. proef, die wij hier

propageren. In beide wordt zowel de horizontale als de verticale spanning en verticale deformatie gemeten en wordt de K_0 conditie (nagenoeg) opgelegd. En in beide wordt de belasting langzaam opgevoerd. De interpretatie van de celproef kwam er echter op neer dat de veronderstelde bezwijklijn nauwelijks boven de K_0 -lijn uitkwam, en er was geen theorie beschikbaar om de link te leggen met de sterkte. Die link is de sleutel van de hier geschetste aanpak en wordt gegeven door het Soft Soil Creep model.

Anisotropic Creep Model

Plaxis ontwikkelt momenteel een anisotrope versie van het Soft Soil Creep model. Hierbij bepalen de optredende spanningen en rekken en de richtingen daarvan, de grootte en oriëntatie van het vloeiooppervlak. Verwacht mag worden dat hierdoor het effect van pre-shearing beter wordt gemodelleerd. Er hoeft echter niet op deze ontwikkeling gewacht te worden: het Soft Soil Creep model is voldoende toegesneden op Nederlandse slappe grond.

Literatuur

- E.J. den Haan. *Theme report on Special Problem Soils, Part I Peats and Organic Soils. XI Eur. Conf. SMFE, Kopenhagen, 9:139-156, 1995.*
- E.J. den Haan & S. Kamao. *Obtaining isotache parameters from a C.R.S. K_0 -Oedometer. Soils And Foundations, 43:4:203-214, aug. 2003.*
- E.J. den Haan. *Ongedraineerde stabiliteitsanalyse. Geotechniek, 58-63, juli 2006.*
- E.J. den Haan & G.A.M. Kruse. *Characterisation and Engineering Properties of Dutch Peats. In: Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils - Tan, Phoon, Hight & Leroueil (eds). Taylor & Francis, London, 2007, 2101-2133.*
- T.A. van Duinen & E.O.F. Calle. *Bezwijksterkte van grond in stabiliteitsanalyses voor waterkeringen. Geotechniek, 28-31, juli 2007. ■*

Reageren op dit artikel?

Stuur dan uw reactie vóór 31 oktober 2009 naar info@uitgeverijeducom.nl