



BETERE ZETTINGS VOORSPELLINGEN

LEVEREN FORSE BESPARING OP

Dat stelt Kees van der Veeke, manager van de Waardse Alliantie. Dit samenwerkingsverband van de Projectorganisatie Betuweroute en de aannemerscombinatie HBSC (Heijmans, Boskalis, Structon en het Belgische CFE) is verantwoordelijk voor de aanleg van het tracé Sliedrecht - Gorinchem van de Betuweroute. "Vooraf was bekend dat de bouw van dit deel van de Betuweroute lastig zou zijn. De ondergrond is slecht, de bouwtijd kort en er gelden strenge restzettingseisen. Alles wijst er echter op dat we aan de eisen gaan voldoen en het tracé in november 2003 kunnen opleveren."

Scherp ontwerp

Volgens Van der Veeke is het vermogen om zettingen nauwkeurig te kunnen voorspellen bepalend voor het

succesvolle verloop van de uitvoering. "Door goed inzicht in het zettingsgedrag van de grond konden we een scherp ontwerp maken. Vervolgens hebben we tijdens de bouw de zettingsvoorspellingen verder weten te verbeteren, onder meer door gebruik te maken van de vele meetgegevens die we hebben verzameld. Dat heeft geleid tot een groot aantal optimalisaties. Zo hebben we bij de aanleg van de aardebaan vrij exact de benodigde overhoogte kunnen berekenen. Dat heeft ertoe geleid dat we 25% minder zand hebben gebruikt: drie in plaats van vier miljoen kubieke meter. Ook bleek het mogelijk om de fundering van een aantal kunstwerken lichter te maken, duikers niet te onderheien maar op staal te funderen en een aantal aanvullende maatregelen achterwege te laten, zoals het plaatsen van damwanden of het ophogen met EPS."

Flexibel

"Het goed kunnen voorspellen van de zettingen maakte het ook mogelijk om flexibel om te gaan met de werkplanning. Zo gingen we voor het opspuiten van het zand in eerste instantie uit van een werkwijze waarbij we per ophoogslag van west naar oost zouden werken.

We konden echter nog niet overal aan de slag, omdat vergunningen nog niet rond waren of grond nog moest worden onteigend. Daarom hebben we gekozen voor een andere aanpak en zijn we op diverse plekken aanmerkelijk later begonnen met het aanbrengen van het zandbed dan oorspronkelijk gepland. Met de geavanceerde zettingsmodellen konden we in dergelijke gevallen berekenen wat dat betekende voor de zettingen. Moesten we bijvoorbeeld maatregelen nemen om het zettingsproces te versnellen, zoals het aanbrengen van extra overhoogte of het plaatsen van extra verticale drains?"

Besparingen

Van Veeke vervolgt: "Beslissingen om bepaalde optimalisaties door te voeren en met ontwerpen 'dichter tegen de grens te gaan zitten' zijn steeds gepaard gegaan met een uitgebreide *on line* monitoring van de optredende fenomenen en het achter de hand hebben van terugvalopties. Dat heeft de nodige extra kosten met zich meegebracht. Die kosten vallen echter ruimschoots weg tegen de besparingen die zijn gerealiseerd. Onder andere door de optimalisaties zijn de uiteindelijke projectkosten circa tien procent lager dan bij de start begroot."

Samenvatting:

Het *a,b,c*-isotachenmodel: hoeksteen van een nieuwe aanpak van zettingsberekeningen

Decennialang heeft het zettingsmodel van Buisman-Koppejan het alleenrecht gehad in Nederland. Buiten de lage landen is het echter onbekend gebleven. Het alternatief van de NEN-normen, bedoeld om meer in de pas te gaan lopen met het buitenland, heeft geen wortels geschoten. Beide methoden hebben gemeen dat ze een beschrijving geven van zettingsasymptoten, die voor een gegeven belasting, het zettings-tijdgedrag beschrijven. De combinatie met afstroming van overspannen poriënwater wordt daarmee niet afgedekt. Het *a,b,c*-isotachenmodel beschrijft het grondgedrag meer fundamenteel, en is gemakkelijk te combineren met afstroming. In het praktisch gebruik is het model eerder eenvoudiger dan moeilijker dan de bestaande modellen, en het sluit aan op internationaal breed gedragen inzichten. Reden genoeg voor Nederland om over te schakelen op het nieuwe isotachenmodel.

HET *a,b,c*-ISOTACHENMODEL:

HOEKSTEEN VAN EEN NIEUWE AANPAK VAN ZETTINGSBEREKENINGEN

■ dr.ir. E.J. den Haan, GeoDelft

Inleiding

Decennialang heeft het zettingsmodel van Buisman - Koppejan het alleenrecht gehad in Nederland. Buiten de lage landen is het echter onbekend gebleven. Het alternatief van de NEN-normen, bedoeld om meer in de pas te gaan lopen met het buitenland, heeft geen wortels geschoten. Beide methoden hebben gemeen dat ze een beschrijving geven van zettingsasymptoten, die voor een gegeven belasting, het zettings - tijd gedrag beschrijven. De combinatie met afstroming van overspannen poriënwater wordt daarmee niet afgedekt. Het *a,b,c*-isotachenmodel beschrijft het grondgedrag meer fundamenteel en is gemakkelijk te combineren met afstroming. In het praktische gebruik is het model eerder eenvoudiger dan moeilijker dan de bestaande modellen, en het sluit aan op internationaal breed gedragen inzichten. Reden genoeg voor Nederland om over te schakelen op het nieuwe isotachenmodel. Dit artikel bevat eerst een korte historie van de ontwikkeling van samendrukkingsmodellen, en beschrijft daarna het *a,b,c*-isotachenmodel. Het nieuwe model is de hoeksteen geworden van een geheel nieuwe wijze van zettingsberekening en zowel dit artikel als de andere artikelen van deze serie gaan daar op in.

Superpositie verkeerd

Keverling Buisman constateerde dat het zettingsverloop van slappe klei en veen niet stopt na het "practische einde der hydrodynamische periode" maar, uitgezet op $\log(t)$ schaal, met een rechte lijn beschreven kan worden:

$$z_t = \alpha_p + \alpha_s \log_{10} t$$

De tweede term geeft de toename in de tijd van de zetting weer, en Buisman noemde dit het "seculaire effect". De eerste term noemde hij het "directe effect der belasting", en de index \dots_p duidt daarop: de verticale korrelspanning werd toentertijd met "p" aangegeven. Deze vergelijking heeft hem eeuwige roem verworven. Een tweede bijdrage van Buisman, zijn superpositieregel, heeft buiten Nederland echter geen navolging gekregen. Deze regel bepaalt hoe het zettingsverloop is voor elke belastingsstap in een samendrukkingsproef afzonderlijk, zonder de invloed van de voorgaande stappen. Buisman schreef hierover:

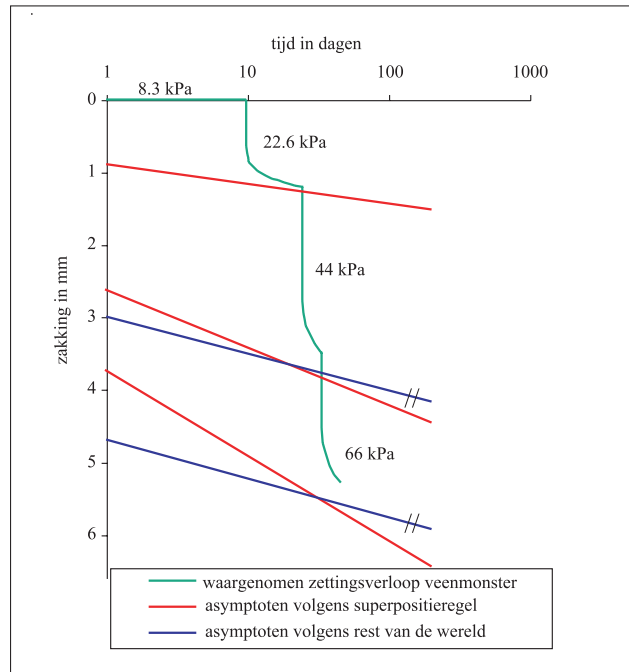
Indien men op een dun laagje, dat aan een samendrukkingsproces onderworpen is, en nadat dit gedurende zekeren tijd voortgang heeft gevonden, een nieuwe belastingsverhoging aanbrengt, kan men

veronderstellen, dat ingevolge deze extra belasting een nieuw zettingsproces zal intreden, dat op het reeds in gang zijnde proces 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 α_p en α_s als ook voor het in gang zijnde proces gelden.

In *figuur 1*, die ontleend is aan een figuur (nr. 69) uit het boek "Grondmechanica" van Keveling Buisman, is deze regel toegepast voor een samendrukkingsproef op veen. Per belastingsstap wordt een zettingsasymptoot gevonden die beschreven werd met de samendrukkingsconstanten α_p en α_s . Buisman veronderstelde dat deze constanten evenredig waren met p . Koppejan paste dat aan aan de logaritmische samendrukkingswet van Terzaghi en schreef

$$\varepsilon = \frac{1}{C_p} \ln(\sigma'_v / \sigma'_{v0}) + \frac{1}{C_s} \ln(\sigma'_v / \sigma'_{v0}) \log_{10} t$$

maar het superpositiebeginsel liet hij intact. Ook zijn formule kreeg buiten Nederland geen navolging. Daar werd al snel gevonden dat de helling van de zettingsasymptoten constant is, dus onafhankelijk van de opgelegde spanning, als elke nieuwe stap in een samendrukkingsproef onafhankelijk van de vorige stappen wordt behandeld. Dus de tijd na belasten wordt ook als de tijd op de zettingsasymptoot gezien. In Buisman's proef worden dan inderdaad evenwijdige asymptoten gevonden voor de 2 laatste



■ **Figuur 1:** Vergelijking asymptoten volgens de superpositieregel van Keveling Buisman en volgens de conventionele interpretatie in de "Rest van de Wereld". Samendrukkingsproef op veen, genomen uit Buisman (1940).

stappen, zie *figuur 1*. De Rijk (1977, 1978) vond hiermee (zie *figuur 2*) uitstekende voorspellingen voor het zettingsgedrag over lange tijd (l_{72}), terwijl het superpositie-

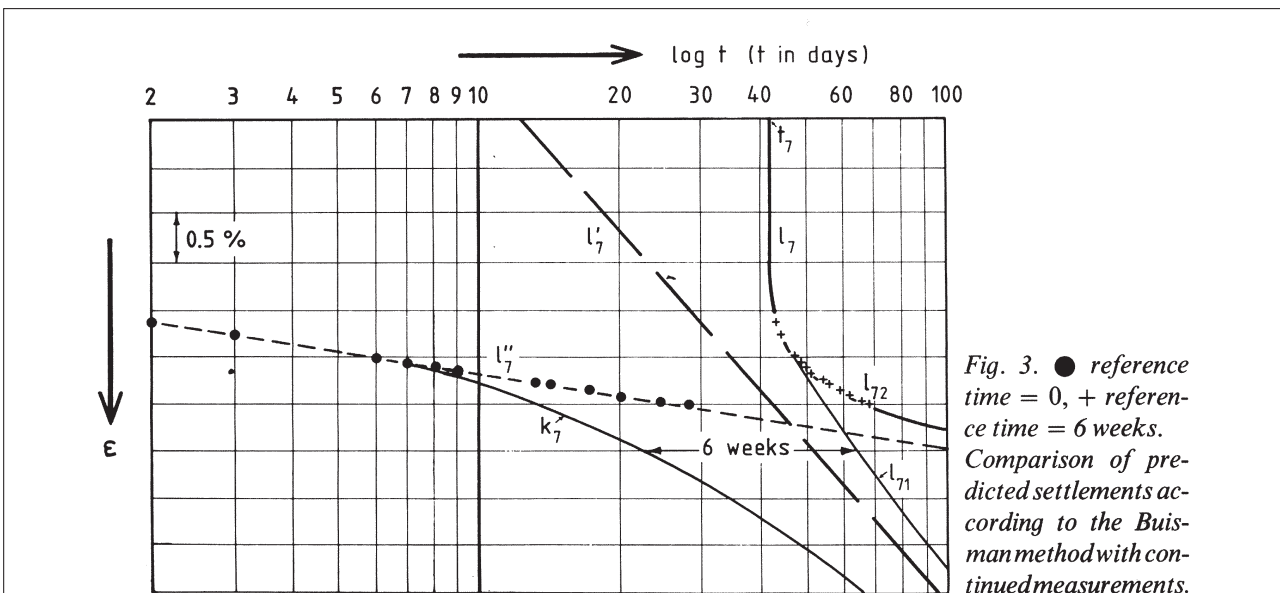
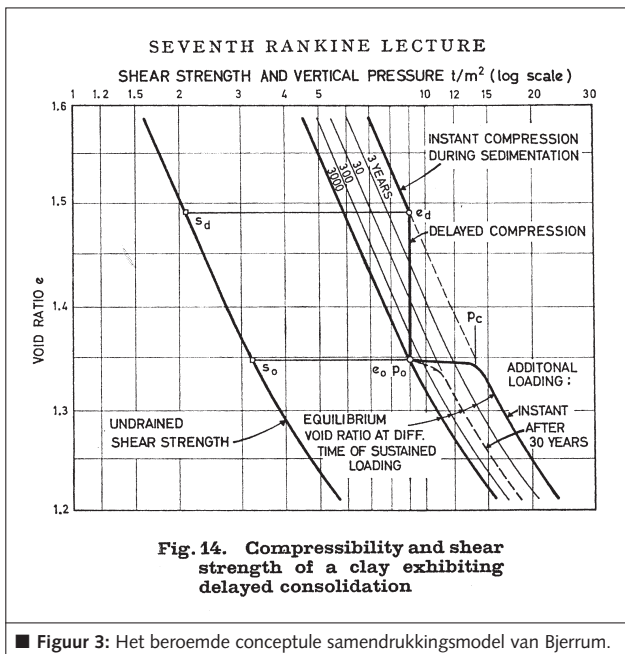


Fig. 3. ● reference time = 0, + reference time = 6 weeks. Comparison of predicted settlements according to the Buisman method with continued measurements.

■ **Figuur 2:** Laatste stap van een samendrukkingsproef door De Rijk (1978). De laatste, zevende stap is langer doorgezet om de voorspellingskracht van de methode van Buisman te vergelijken met de methode "tijd na belasten is tijd op de asymptoot".
 l_7 : meting laatste stap, eerste week, en voortgezette meting tot 70 dagen
 l_7' : Buisman asymptoot op basis metingen t/m eerste week
 l_{71} : voorspelling methode Buisman
 l_7'' : asymptoot met "tijd na belasten is tijd op de asymptoot"
 l_{72} : voorspelling met l_7''
 k_7 : voorspelling l_{72} in termen van tijd na belasten



beginsel van Buisman tot grove overschattingen leidde (I_{71}). De conclusie moet zijn dat die regel verkeerd is en verlaten moet worden. Buisman schreef zelf al

“Loads not applied at the same time, but with a certain time interval between them would, if further a superposition that takes into account the different timescale might prove to be justified, cause log t-s diagrams as represented in Fig. ...”

Met andere woorden, er was nog geen rechtvaardiging voor de superpositie: het was een tijdelijke aanname. Die rechtvaardiging is er nooit gekomen.

Bjerrum

Figuur 3 is afkomstig uit de Rankine Lecture van Bjerrum, een Deen die in Zwitserland promoveerde en directeur van het Noorse N.G.I. werd. Het was een doorbraak in het begrijpen van het samendrukkingsgedrag van slappe grond, en maakte expliciet wat al aan kennis rondzweefde. Er zijn lijnen van gelijke kruiptijd in te herkennen, alle min of meer recht en evenwijdig, en aan de bovenzijde begrensd door de sedimentatielijne. Als de sedimentatie stopt bij e_d vindt kruip plaats bij constante spanning, in de figuur gedurende 3000 jaar naar e_o , de toestand waarin de ingenieur de grond aantreft. Bij verhoging van de belasting blijkt er dan door de kruip (“ageing”) een grenspanning p_c ontstaan te zijn en het gedrag tot aan p_c is stijf. Daarboven wordt de sedimentatielijne gevolgd, gevolgd door nieuwe kruip. Bjerrum schreef

“.. to any given value of the *overburden pressure* and *void ratio* there corresponds an *equivalent time* of sustained loading and a certain *rate of delayed consoli-*

ation, independent of the way in which the clay has reached these values.”

Feitelijk legt hij een uniek verband tussen σ'_v , e of ϵ , en kruiptijd of kruipsnelheid $d\epsilon_s/dt$, en de getoonde lijnen beschrijven dat verband. Intuïtief verbindt hij kruiptijd aan kruipsnelheid. Bij de unieke kruiptijd van elke lijn in *figuur 3* hoort dan een unieke kruipsnelheid. Het zijn dus tegelijk lijnen van gelijke kruiptijd en gelijke kruipsnelheid d.w.z. isotachen (Grieks: tachos = snelheid). Isotachenmodellen nu beschrijven het conceptuele gedrag van *figuur 3* wiskundig.

Bjerrum combineert concepten die in de loop van de decenia zijn ontstaan. Het verband tussen kruiptijd en kruipsnelheid is bijv. terug te vinden in het werk van Taylor (1940) en Šuklje (1957), en de laatste bedacht ook de term “isotachen”. De term “isotachenmodel” is betrekkelijk kort in omloop. Veel oudere modellen vallen in deze categorie zonder dat de bedenkers die term gebruikten. Na Bjerrum is het concept op diverse wijzen wiskundig vertaald. Eerst nog in termen van kruiptijd (Garlanger, 1972) maar gaandeweg vaker in termen van kruipsnelheid. De Rijk (1977, 1978) was er tamelijk vroeg bij, maar zijn werk heeft geen navolging gekregen. De bijdrage van Den Haan (1994, 1996) heeft bestaan in de combinatie van isotachen met natuurlijke rek, een formulering voor het herbelastgedrag, een formulering van de “collapse” van quick clays voorbij de grensspanning, parameterbepaling met het K_o -C.R.S. apparaat, en diverse parametercorrelaties. Hier wordt alleen ingegaan op de natuurlijke rek - isotachenformulering.

Kruiptijd

De kruiplijnen in de figuur van Bjerrum liggen op gelijke afstand voor steeds een factor 10 toename in de kruiptijd. Daaruit is de kruipparameter C_α te halen: zie hierna-volgend kader.

C_α , C_c en de NEN

De definitie in NEN 5118 voor de kruipparameter C_α is gebaseerd op verandering van rek:

$$C_\alpha = \frac{\Delta \epsilon}{\Delta \log t} = \frac{-\Delta e}{(1 + e_o) \Delta \log t}$$

De definitie voor de maagdelijke compressibiliteit C_c daarentegen is gebaseerd op verandering van poriëngetal:

$$C_c = \frac{-\Delta e}{\Delta \log \sigma'_v} = \frac{\Delta \epsilon (1 + e_o)}{\Delta \log \sigma'_v}$$

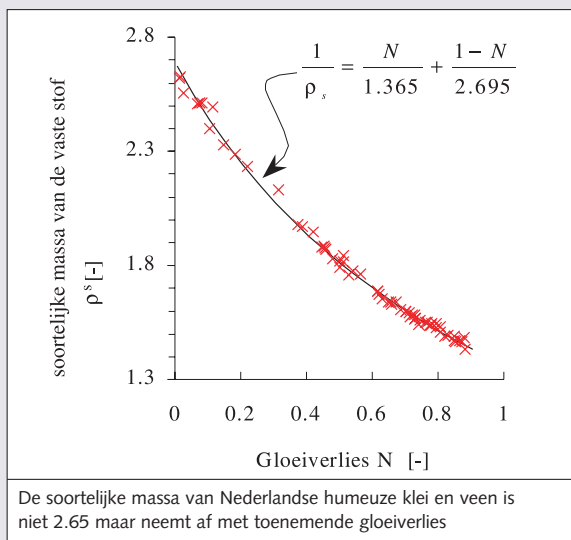
Dat moge onhandig zijn, het is wel correct. De ISSMFE publiceerde in 1977 een aanbevolen lijst van grond-mechanische symbolen en definities waar dat zo is afgesproken, en de NEN-norm sluit daar netjes bij aan. Het poriëngetal is echter een onnodige parameter in

zettingsberekeningen. Het moet apart bepaald worden om C_c te berekenen maar in de zettingsberekening gaat het alleen om $\Delta \epsilon$. Een oplossing is om $C_c/(1+e_o)$ in z'n totaliteit als parameter te gebruiken, en dat met het symbool C_{ce} aan te geven. Waarschijnlijk zal dit in de nieuwe "Tabel 1" van de aanstaande tweede druk van NEN 6740 zo ook gebeuren.

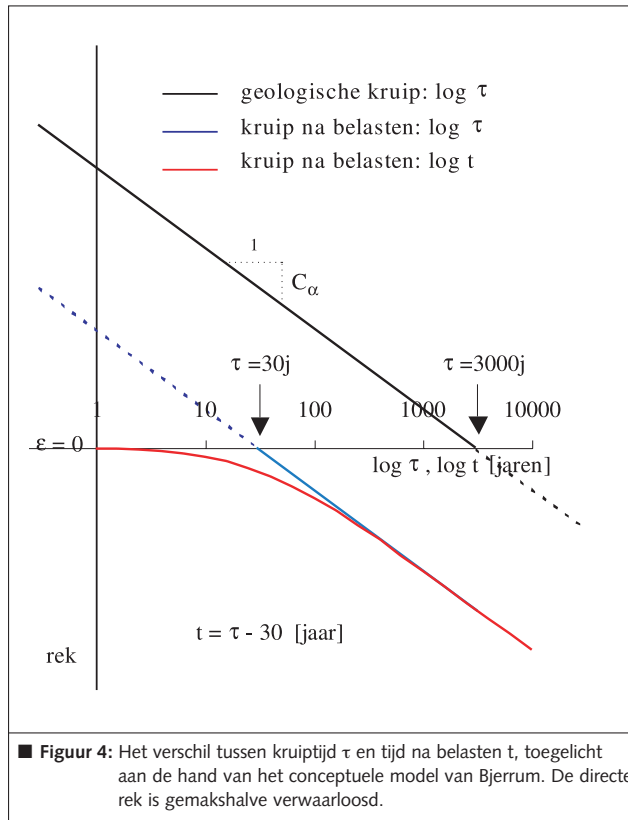
Om e_o te bepalen moet in elk geval de volumieke massa van de vaste stof ρ_s bekend zijn:

$$e_o = \frac{\rho_s w_o}{S_r} = \frac{\rho_s - \rho_{nat}}{\rho_{nat} - S_r}$$

We nemen daar meestal 2.65 voor maar in humeuze klei en veen correleert ρ_s met het gloeiverlies N en kan daarvoor aanzienlijk lager zijn.



In *figuur 3* is door de factor 10 verschil in kruiptijd tussen de kruiplijnen, $\Delta \log t = 1$, en C_α is dus eenvoudig de verticale afstand (rek) tussen twee opeenvolgende kruiplijnen. De kruiplijnen zijn overal min of meer evenwijdig en equidistant zodat C_α min of meer constant is. Een echte grondconstante dus. Dat is dan ook het uitgangspunt van de C_c - C_α methode van NEN 5118 en NEN 6744. Het is echter niet juist de NEN-methode aan Bjerrum toe te schrijven. De parameters bestonden al, en bovendien mag de kruiptijd van Bjerrum niet met de tijd na belastingen worden verward. Het onderscheid in deze verschillende tijdmaten is de basis van het isotachenmodel. Stel dat vanaf (e_o, p_o) een kleine belasting wordt aangebracht waardoor het stijve gedrag wordt gevolgd tot bijvoorbeeld de 30-jaars lijn. De projecttijd t wordt door de ingenieur vanaf (e_o, p_o) gemeten en de aanpassing t_e is aanzienlijk korter dan 30 jaar. De kruip onder de nieuwe belasting is in termen van kruiptijd τ wel logaritmisches maar er geldt $t - t_e = \tau - 30$ (tijd in jaren). De tijdsverschuiving $t_r = t - \tau = t_e - 30$ vertekent de logaritme waardoor het kruipverloop in termen van



projecttijd t versteilt, zie *figuur 4*, waar gemakshalve $t_e=0$ is verondersteld. Omgekeerd, bij een grote belasting, is de kruiptijd na aanpassing wellicht kleiner dan de aanpassings-tijd, en is de verschuiving positief van teken. Dan wordt een verflauwing van het kruipverloop gevonden.

Kruiptijd / kruipsnelheid

Samenvattend geldt dus voor de kruip

$$\epsilon = \epsilon_e + C_\alpha \log(\tau / \tau_o)$$

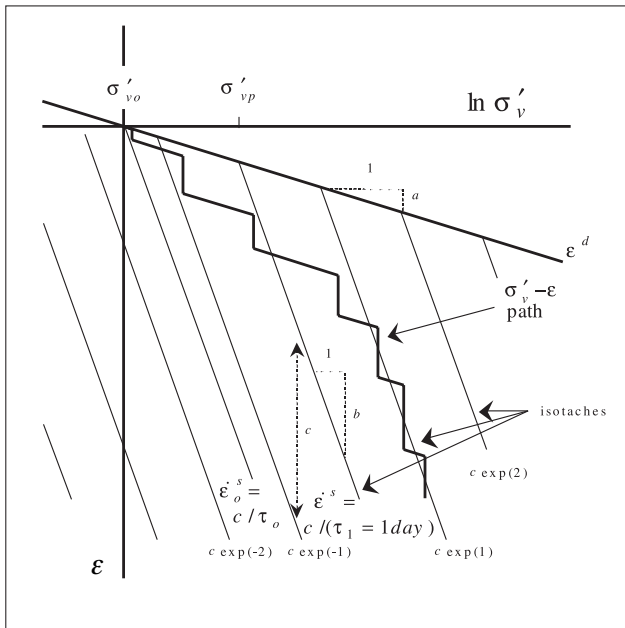
waarin ϵ_e de rek is bij $\tau = \tau_o$. Hierin is τ de kruiptijd. In incrementele berekeningen is het handig met reksnelheden te werken en daarom wordt de vergelijking naar de tijd gedifferentieerd:

$$d\epsilon / dt = \dot{\epsilon} = C_\alpha \ln(10) / \tau$$

Aan elke kruiplijn is dus een kruipreksnelheid toe te kennen, en daarmee worden de kruiplijnen tevens kruipisotachen, dat wil zeggen lijnen van gelijke kruipsnelheid. De kruipsnelheid is daarmee een unieke, bekende functie van de effectieve spanning en de rek geworden. De bijbehorende kruiptijd τ is een intrinsieke grootte in die zin dat het onafhankelijk is van welke gekozen starttijd dan ook.

Het a,b,c-isotachenmodel

Het wordt tijd de historie te verlaten en het a,b,c-isotachenmodel ten tonele te voeren. *Figuur 5* geeft het model schematisch weer. Allereerst zij opgemerkt dat als maat van



■ **Figuur 5:** Principeschets van het a,b,c-isotachenmodel. (n.b. natuurlijke rek is getoond)

de vervorming, natuurlijke rek wordt gebruikt. Zie hierna-
volgend kader. Het H-tje ter aanduiding van de natuurlijke
rek wordt echter verder achterwege gelaten.

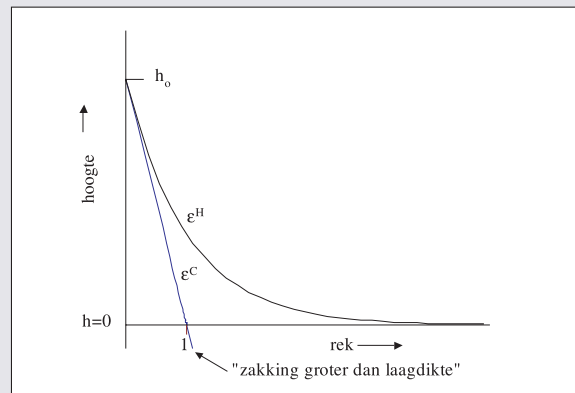
Natuurlijke rek

De gebruikelijke rekmaat in de civiele techniek is de
lineaire of Cauchy rek waarin de rek wordt gemeten ten
opzichte van de uitgangstoestand:

$$\epsilon^c = \frac{h_o - h}{h_o}$$

De natuurlijke rekmaat wordt aan Hencky toegeschreven
en bepaalt de rek incrementeel ten opzichte van de
actuele toestand. De gesommeerde rek is dan een
integraal tussen de uitgangstoestand en de vervormde
toestand:

$$\epsilon^H = \int_{h=h_o}^{h=h} \frac{-dh}{h} = -\ln(h/h_o) = -\ln(1 - \epsilon^c)$$



Uitgezet tegen de hoogte, blijkt dat ϵ^c groter dan 1 kan
zijn: zettingen groter dan de laagdikte. Elke geotechnicus
heeft dat weleens vol verbazing geconstateerd als het
argument van een logaritme in de zettingsformule al te
groot werd. Dat probleem kent ϵ^H niet: als de hoogte
naar nul tendeert, gaat de rek naar ∞ . Het blijkt dat
samendrukkingskrommen op logschaal prachtig lineair
worden over grote spanningsbereiken als ϵ^H gebruikt
wordt. In de figuur van Bjerrum bijvoorbeeld buigen de
kruiplijnen af bij grote spanning. Met natuurlijke rek
zouden rechte lijnen gevonden zijn. Gebruik van
natuurlijke rek is weliswaar pas echt nodig bij grotere
rekken, maar is ook bij kleinere rekken erg handig.

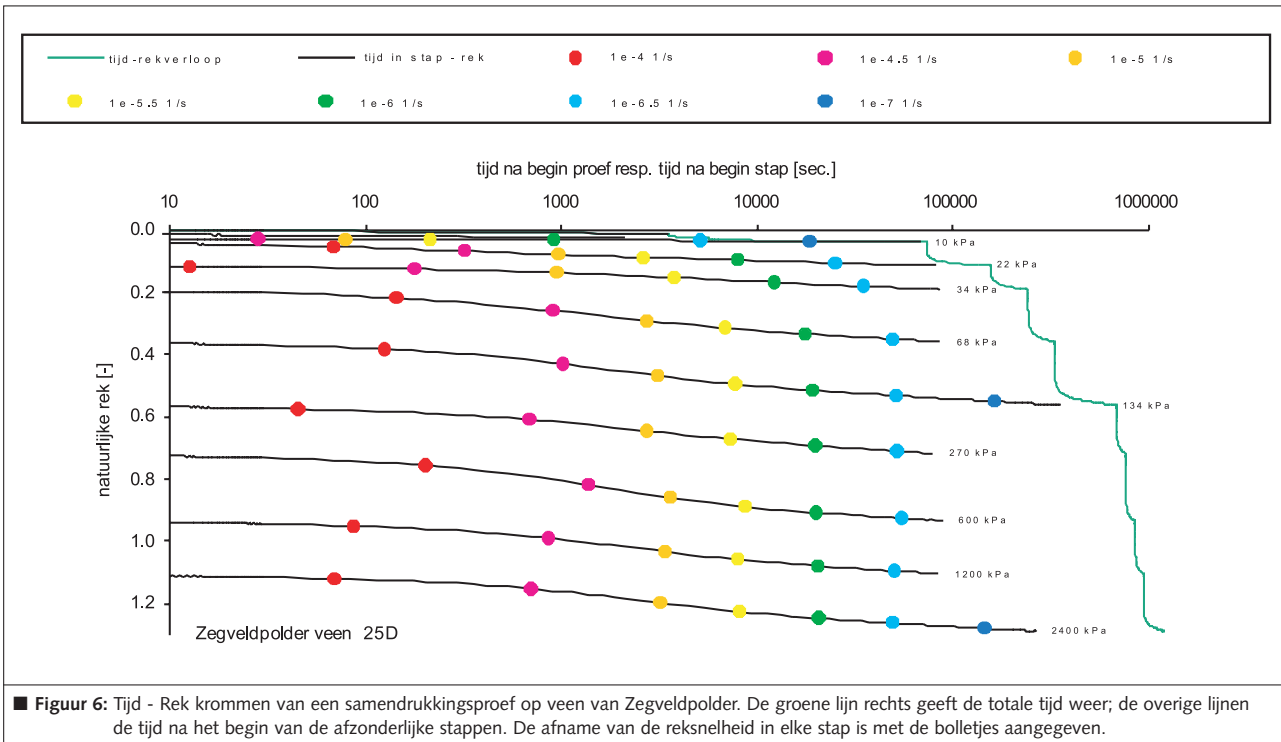
In *figuur 5* zijn de kruipisotachen de lijnen met helling *b*.
Hun verticale afstand is *c* als het verschil in snelheid een
factor $\exp(1)$ is. Door de initiële toestand ($\sigma'_{vo}, \epsilon = 0$) loopt
de isotach met kruipsnelheid $\dot{\epsilon}_o^s$. Daar hoort de intrinsieke
kruiptijd $\tau_o = c / \dot{\epsilon}_o^s$ bij. Die is vaak niet bekend, en het is
daarom handig om een referentie-isotach te gebruiken met
 $\tau_1 = 1$ dag. Deze valt nagenoeg samen met de 1-dags
kromme van de standaard samendrukkingsproef omdat de
tijdsverschuiving na 1 dag meestal verwaarloosbaar is.
(De reductie van τ door de belastingsverhoging is namelijk
zo groot dat de tijdsverschuiving een fractie van 1 dag
wordt. Na 1 dag is de intrinsieke kruiptijd dan ook circa
1 dag. Vaak treedt de gelijkheid van t en τ al veel eerder op,
en daarom is de buitenlandse bepalingwijze van de zet-
tingsasymptoten, zie de *figuren 1 en 2*, redelijk correct zelfs
binnen 1 dag.) Op deze referentie-isotach kan de grens-
spanning σ'_{vp} worden aangegeven, en de initiële toestand is
daar aan te relateren via het spanningsquotiënt $\sigma'_{vp} / \sigma'_{vo}$ of
wel OCR. De grensspanning ligt op het snijpunt van de
referentie-isotach en de *a*-lijn (en is dus anders gedefinieerd
dan via de bekende Casagrande regel). Dat laatste geeft de
directe rek weer en is, zoals door Buisman aangegeven, af-
hankelijk van de effectieve spanning. Er wordt een logarit-
mische samendrukkingswet voor gebruikt:

$$\epsilon^d = a \ln(\sigma'_v / \sigma'_{vo})$$

en deze geldt zowel beneden als boven de grensspanning!
De directe rek wordt als het ware van de totale rek afge-
snoept en het resterende deel is de seculaire rek. Per tijd-
stapje van een incrementele berekening wordt dan een
stukje ϵ^d onder helling *a* en een stukje ϵ^s recht omlaag
berekend: zie het $\sigma'_v - \epsilon$ pad in *figuur 5*.

Consolidatie

De aanpassing van σ'_v volgt uit een consolidatieberekening
waarin (af)stroming van poriënwater wordt gecombineerd
met de directe en seculaire rekverandering. Door hierbij uit
te gaan van de wet van Darcy wordt een link gelegd met de
doorlatendheidscoëfficiënt *k*. Bij de consolidatievergelijking
van Terzaghi wordt een aantal aannamen gedaan: elastisch



grondgedrag, constante doorlatendheid, kleine vervorming etc. Het *a,b,c*-isotachenmodel is op nettere wijze met Darcy gecombineerd: elasto-viscoplastisch grondgedrag volgens het *a,b,c*-model, variabele, rekafhankelijke doorlatendheid, en verwerking van de effecten van grote vervorming. Dit resulteert in de volgende consolidatievergelijking (Den Haan, 1994)

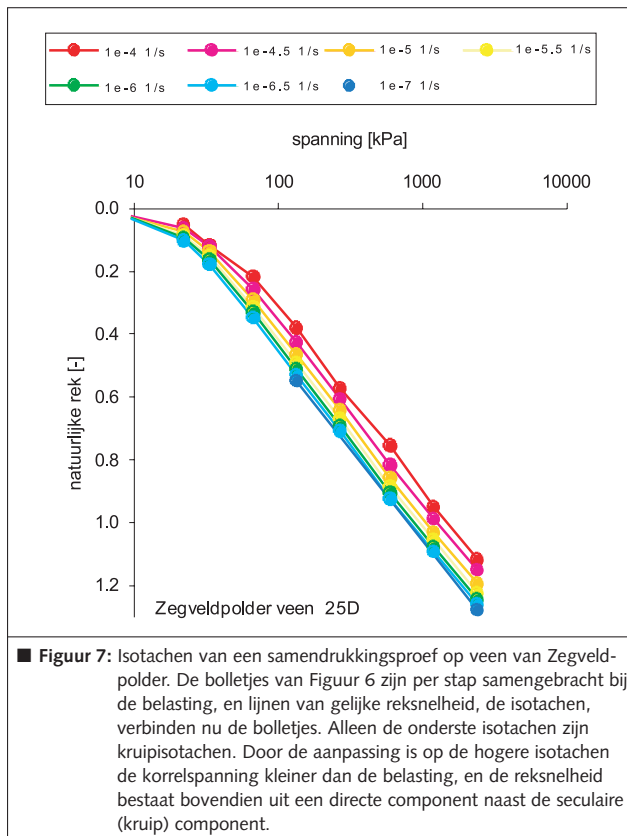
$$\frac{d\sigma'_v}{dt} = \frac{\sigma'_v}{a} \left[-\frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_w} \frac{v_o}{v} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{v} \right) + \frac{1}{\gamma_w} \frac{v_o}{v} \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{v_o}{v} \frac{\partial \sigma'_v}{\partial z} \right) - \dot{\epsilon}_s \right]$$

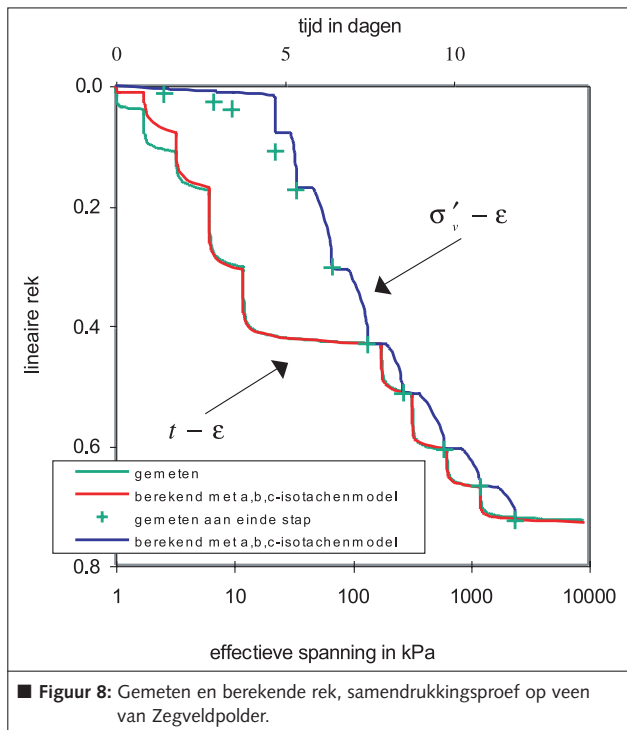
waarin $v_o/v = \exp(\epsilon^H)$. Deze is een partiële differentiaalvergelijking in σ'_v . Het wordt in het computerprogramma MSettle opgelost bij gegeven begin- en randvoorwaarden, voor een meerlagensysteem en bij een willekeurig belastingsschema. Als resultaat wordt de effectieve spanning σ'_v , de wateroverspanning en de verticale rek verkregen op alle diepten en tijden. Belastingsverhogingen worden op triviale wijze verwerkt, namelijk door op het belastingstijdstip de wateroverspanning met de belastingverhoging te vergroten. Hierbij kan rekening worden gehouden met eventuele gas etc. in de poriën waardoor een deel van de instantane belasting meteen als korrelspanning doorwerkt. De gekoppelde berekening van wateroverspanning en rek, en het moeiteloos verwerken van belastingverhogingen, zijn een grote stap vooruit ten opzichte van de oude generatie samendrukkingsmodellen, die niet méér doen dan een beschrijving geven van de kruip-asymptoten bij gegeven spanning.

Samendrukkingsproef op veen

Een monstertje veen uit Zegveldpolder nabij Woerden, is onderworpen aan een samendrukkingsproef tot hoge

belasting. *Figuur 6* geeft het tijd-zettingsverloop, zowel in termen van totale proeftijd als de tijd na belasten voor elke stap. Tevens is aangegeven hoe de snelheid langs de krom-





■ **Figuur 8:** Gemeten en berekende rek, samendrukkingsproef op veen van Zegveldpolder.

men afneemt. Door een spannings-as toe te voegen worden punten van gelijke snelheid op isotachen samengebracht: *Figuur 7*. Deze zijn recht en equi-distant in het maagdelijke bereik en voorbij het einde van de primaire consolidatie: de kruipisotachen. Voor de hogere isotachen is de aanpassing niet compleet en is dus $\sigma'_v < \sigma_v$. De punten zouden meer naar links plotten en dus dichter bij het patroon van de kruipisotachen komen. Bovendien is de snelheid van de hogere isotachen opgebouwd uit de kruipsnelheid én de directe vervormingssnelheid. Dit verklaart het afwijkende patroon van de hogere lijnen.

Vóór de grensspanning zijn alle isotachen vervormd. Dat is een gevolg van de zwel die is opgetreden, hetzij al in het veld, hetzij door verstoring tijdens en na het boren. Er wordt aan gewerkt om deze effecten te beschrijven en in MSettle te verwerken (zie ook Den Haan & Sellmeijer, 2000). De proef is met MSettle nagerekend. Het resultaat is gegeven in *figuur 8*. Een uitstekend resultaat, over een enorm bereik aan spanning (tot 2400 kPa!) en rek (70%!). Het niet meenemen van de verstoring van de isotachen leidt tot een onderpredictie in het overgeconsolideerde gebied. Door a groter te nemen kan daar meer zetting worden berekend, zonder het maagdelijke gedrag wezenlijk te beïnvloeden. (Het is dan wel nodig de grensspanning aan te passen.)

Het heeft geen zin dezelfde proef met Koppejan na te rekenen. *Figuur 6* maakt duidelijk dat de z - $\log(t)$ lijnen niet divergeren, maar Koppejan laat dat wel gebeuren. Zoals eerder al gezegd, het superpositiebeginsel van Buisman dat onveranderd door Koppejan is overgenomen, is verkeerd, en dient verlaten te worden.

Meer nieuws

Het is niet alleen het isotachenmodel en de natuurlijke rek dat nieuw is aan MSettle. Er is sprake van een geheel nieuwe aanpak van zettingsberekeningen. In de Nederlandse geotechniek worden drainageversnellende maatregelen dagelijks toegepast. MSettle komt hieraan tegemoet met slimme één-dimensionale oplossingen voor verticale drainage, Beaudrains en IFCO- of PTD-drains. Hierbij wordt in de consolidatievergelijking een extra (put)term aangebracht die de afvoer van poriënwater naar de drains representeert. In een komend artikel in *Geotechniek* over de toepassing van geforceerde drainage bij de 5^e landingsbaan op Schiphol wordt daar op ingegaan.

Ook van groot belang voor de Nederlandse geotechniek is de mogelijkheid om restzettingen te voorspellen. MSettle heeft een inversie-optie, Zakbaak genaamd, waarmee grondparameters aangepast worden aan zakbaakwaarnemingen om zo een optimale extrapolatie naar de toekomst mogelijk te maken. In het artikel van Molendijk en Dykstra in dit nummer wordt daar op ingegaan.

De overgang van de traditionele methoden naar wat hier is geschetst is groot. MSettle bevat daarom een aantal opties die tegemoetkomen aan de bestaande empirie. Uiteraard kan nog steeds op de oude wijze met Koppejan gerekend worden. Tevens is er een optie om Koppejan gekoppeld met consolidatie volgens Darcy te berekenen, bijvoorbeeld voor die gevallen waar verticale drainage toegepast wordt. Een andere optie komt tegemoet aan de NEN C_c - C_α methode. Naast de letterlijke invulling volgens de NEN is het mogelijk deze methode als isotachenmodel te gebruiken, gecombineerd met gekoppelde consolidatie volgens Darcy. Dit betreft dan feitelijk een lineaire rekversie van het a,b,c -model. Deze optie wordt aangeduid als het "NEN-Bjerrum model" en daarmee wordt aangegeven dat het de realisatie is van wat feitelijk met het NEN-model en het Bjerrum model werd bedoeld. Overigens is in *figuur 3* te zien dat Bjerrum's conceptuele model afbuigende kruiptijdlijnen onderscheidt, en die zijn met natuurlijke rek (a,b,c parameters) beter te modelleren. "NEN-Bjerrum" doet dat niet en zal bij tijd en wijle problemen ondervinden van zettingen groter dan de laagdikte.

De a,b,c -parameters kunnen uit een gewone samendrukkingsproef worden bepaald, maar ook uit de K_0 -C.R.S. proef (Den Haan, The & Van, 2001; Den Haan & Kamao, 2003). In een komend artikel in deze serie zal daar dieper op worden ingegaan, alsmede op diverse schattingswijzen voor de isotachenparameters.

Het isotachenmodel is inmiddels toegepast in enkele projecten en ook daarvan wordt verslag gedaan in komende artikelen in deze serie.

Met deze voorbeelden, en met de hiervoor geschetste opties onder handbereik moet het mogelijk zijn de overgang naar het a,b,c -model te maken. Nederland zal dan eindelijk weer voor de dag kunnen komen met zijn zettingsberekeningsmethoden. En wel "with a vengeance": nergens buiten Nederland wordt momenteel routinematig met isotachen, dan wel met gekoppelde rek- en afstroming, gewerkt!

Afsluiting

Het isotachenmodel is de voorlopige culminatie van decennialang en wereldwijd onderzoek naar het kruipgedrag van slappe grond. Het model is in opzet eenvoudig, evenals de toepassing in de praktijk.

De begrippen intrinsieke tijd en tijdverschuiving zijn de wezenskenmerken van het model en worden uitgebreid in dit artikel behandeld. Zonodig echter kunnen zij in het praktische gebruik van het model buiten beschouwing blijven.

Het model wordt gekoppeld aan afstroming volgens Darcy, en berekent daarom korrelspanningen, wateroverspanningen en rekken continu in plaats en tijd. Belastingverhogingen worden op triviale wijze verwerkt. Samendrukking wordt op deze wijze consistent en nauwkeurig berekend. Ten opzichte van de huidige generatie zettingsmodellen als Koppejan en de NEN- C_c, C_α methode, is er wat dat betreft sprake van een quantum-sprong voorwaarts, waarbij toepassing eerder eenvoudiger dan ingewikkelder is geworden.

Door ontlasten en zwel wordt het isotachenpatroon verstoord. Bij herbelasten is dat te merken aan hogere kruipsnelheden ten opzichte van het maagdelijke gedrag. Een formulering van de verstoorde isotachen tijdens herbelasten is beschikbaar, en onderzoek naar andere aspecten van ontlasten (met name de invloed daarvan op restzettingen) is gaande.

Een specifiek Nederlandse ontwikkeling is geweest om isotachen te combineren met natuurlijke rek.

Het grondgedrag wordt met natuurlijke rek nauwkeuriger beschreven, en de bijbehorende parameters (a, b, c) zijn in tegenstelling tot de lineaire rekparameters (bijv. C_c, C_α) onafhankelijk van rek- of spanningsniveau. Vooral in slappe grond bij grote samendrukking is het gebruik van natuurlijke rek een voordeel. Zowel lineaire- als natuurlijke rekversies van het isotachenmodel zijn beschikbaar in het rekenpakket MSettle. Zij vormen de hoeksteen van een verbeterde aanpak voor zettingsberekeningen. Daarover wordt in de andere artikelen van deze serie verder bericht.

Referenties

A.S. Keveling Buisman (1936). Results of long duration settlement tests. Proc. 1st ICSMFE, Cambridge Mass. 103-106.

A.S. Keveling Buisman (1940). Grondmechanica. 294p. Heruitgegeven door Balkema, 1996.

L. de Rijk (1977). De berekening van seculaire samendrukking. T.H. Delft rapport.

L. de Rijk (1978). The calculation of secondary settlement in one-dimensional compression. Delft Progress Report, 3:237-255.

L. Bjerrum (1967). Engineering geology of Norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlement of buildings. Géotechnique 81-118.

D.W. Taylor & W. Merchant. (1940). A theory of clay consolidation accounting for secondary compression. J. Math. & Phys., XIX, 3, July:167-185.

L. Šuklje(1957). The analysis of the consolidation process by the isotaches method. Proc. 4th Int. Conf. Soil Mech. and Fdn Eng. London, Vol. 1, 200-206.

J.E. Garlanger (1972). The consolidation of soils exhibiting creep under constant effective stress. Géotechnique 22, 1:71-78.

E.J. den Haan (1994). Vertical compression of soils. Thesis, Delft University Press.

E.J. den Haan (1996). "A compression model for non-brittle soft clays and peat." Géotechnique, Vol. 1, pp. 1-16.

E.J. den Haan & J.B. Sellmeijer (2000). " Calculation of soft ground settlement with an isotache model." Soft Ground Technology, ASCE Geotech. Spec. Publ. nr. 112, pp. 94-104.

E.J. den Haan, B.H.P.A.M. The & M.A. Van (2001). De K_0 -C.R.S. proef. Geotechniek, 4:55-63.

E.J. den Haan & S. Kamao (2003). Obtaining isotache parameters from a C.R.S. K_0 -oedometer. Soils & Foundations, 43, 4:203-214.