

De intrinsieke tijd in het Isotachenmodel

Inleiding

Dit artikel beschrijft het a,b,c-isotachenmodel in termen van de intrinsieke tijd τ in plaats van met de kruipsnelheid. Daardoor zijn de isotachen analoog aan de Buisman-Koppejanformules te schrijven. Uit de relatie tussen intrinsieke tijd en 'gewone' tijd zijn verschillende vormen van het tijd-zettingsverloop eenvoudig te verklaren. Bovendien wordt het mogelijk een handberekening met het isotachenmodel te maken. Niet onbelangrijk is dat de initiële intrinsieke tijd de initiële toestand bepaalt, die een sterke invloed heeft op de berekende zettingen. Diverse voetangels en klemmen bij de bepaling van de initiële toestand worden benoemd, en oplossingen en aanbevelingen worden aangedragen.

Intrinsieke tijd

Het isotachenmodel beschrijft het samendrukkingsgedrag van slappe grond met een Maxwell-element (figuur 1). De veer daarvan beschrijft de directe (elastische) rek ε_d^H ten gevolge van verandering van de korrelspanning tijdens consolidatie, en de demper beschrijft de seculaire (visco-plastische) rek ε_s^H . Zowel de rek als de reksnelheden van beide componenten kunnen opgeteld worden. Omdat de demper het gemakkelijkst te beschrijven is in termen van reksnel-

heid, wordt ook van de veer de reksnelheid bepaald. In een incrementele oplossing van het consolidatieprobleem wordt de momentane som van beide reksnelheden gelijkgesteld aan de momentane afstromingssnelheid van overspannen poriënwater. Hiervoor wordt de wet van Darcy gebruikt.

De directe samendrukking is evenredig met de logaritme van de korrelspanning:

$$\varepsilon_d^H = a \ln(\sigma'_v / \sigma'_{v0})$$

$$\frac{\partial \varepsilon_d^H}{\partial t} = \frac{a}{\sigma'_v} \frac{\partial \sigma'_v}{\partial t} \quad (1)$$

en de parameter a bepaalt dit verband. Het seculaire deel wordt losjes als kruip aangeduid, hoewel het ook tegelijk met directe samendrukking optreedt. De kruipreksnelheid wordt bepaald met het isotachenprincipe, dat een unieke relatie legt met de korrelspanning en de opgetreden rek. De isotachen zijn rechte lijnen als de natuurlijke (Hencky-)rek ε^H wordt uitgezet tegen de natuurlijke logaritme van de korrelspanning $\ln \sigma'_v$ (figuur 2a). Elke isotach geeft één bepaalde kruipreksnelheid weer, lager naarmate de isotach lager ligt. De helling van de isotachen is b ; de onderlinge (rek)afstand is $c \ln(10)$ voor een factor 10 verschil in snelheid.

Het isotachenmodel vindt momenteel breed ingang in de Nederlandse geotechniek. Dit weer-spiegelt het vertrouwen in de bruikbaarheid en betrouwbaarheid ervan, des te meer omdat het voor velen een moeilijk te doorgronden model is gebleken. Tot nu toe is in artikelen en model-beschrijvingen de rol van de intrinsieke tijd niet erg expliciet aan de orde geweest. Dit begrip kan evenwel een centrale rol vervullen in het praktisch omgaan met het model. Uit de relatie met de "gewone" tijd zijn verschillende vormen van het tijd-zettingsverloop eenvoudig te verklaren. Bovendien wordt het mogelijk een handberekening met het isotachenmodel te maken.

Als alternatief voor de kruipreksnelheid kan de intrinsieke tijd worden genomen:

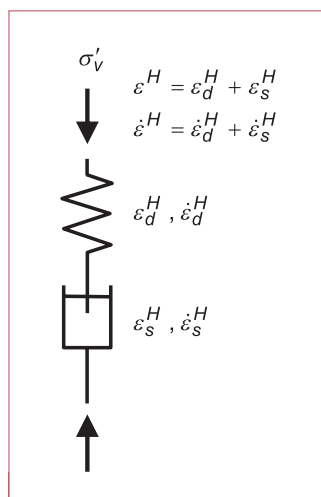
$$\frac{\partial \varepsilon_s^H}{\partial t} = \frac{c}{\tau} \quad (2)$$

De eenheden blijven hierbij gelijk: rek gedeeld door tijd. De isotachen kunnen nu dus met τ worden aangegeven in plaats van de kruipreksnelheid. Lagere isotachen met lagere kruipreksnelheid hebben een hogere τ , en ze lijken nu weer op de tijdlijnen van oudere zettingsmodellen. Alleen moet de relatie tussen τ en de tijd t na belasting worden bepaald.

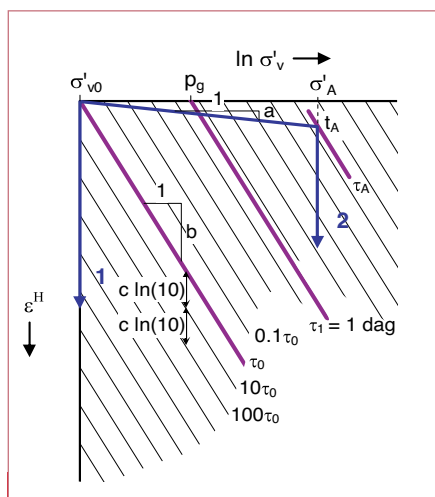
De isotachen worden beschreven met

$$\varepsilon^H = b \ln \frac{\sigma'_v}{\sigma'_{v0}} + c \ln \frac{\tau}{\tau_0} \quad (3)$$

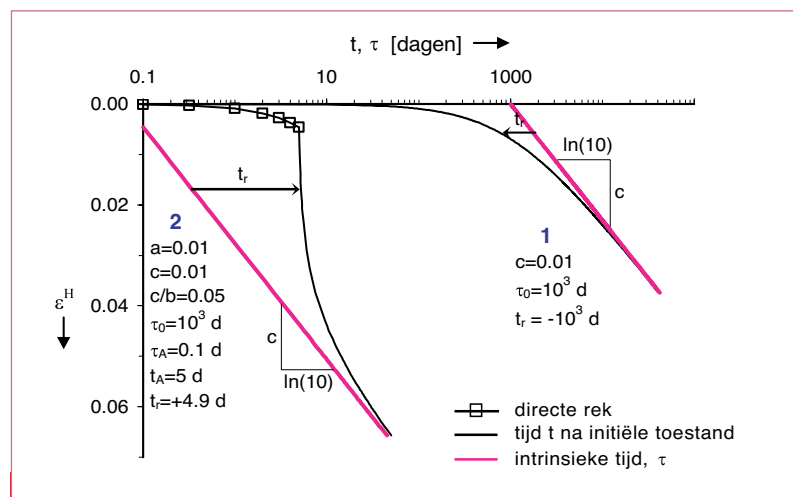
waar de initiële toestand als referentie wordt genomen. Deze beschrijving is enigszins analoog aan de beschrijving van de tijdlijnen in bijv.



Figuur 1 Het Isotachenmodel weergegeven als Maxwell-element



Figuur 2a Isotachen weergegeven met intrinsieke tijd



Figuur 2b Ontwikkeling van de kruip als (geval 1) niet wordt doorbelast, en (geval 2) na het aanbrengen van een relatief grote belasting.

het Buisman-Koppejanmodel. Omdat hier de tijdlijnen niet divergeren zoals bij Buisman-Koppejan maar evenwijdig zijn, wordt de beschrijving eenvoudiger.

De intrinsieke tijd volgt dan uit

$$\tau = \tau_0 \left(\frac{\sigma'_v}{\sigma'_{v0}} \right)^{-b/c} \exp(\varepsilon^H/c) \quad (4)$$

als de initiële toestand als referentie wordt genomen, of uit

$$\tau = \tau_1 \left(\frac{\sigma'_v}{\rho_g} \right)^{-b/c} \exp(\varepsilon^H/c) \quad (5)$$

waar de isotach met $\tau_1 = 1$ dag en met afsnijding ρ_g op de horizontale as de referentie is.

Tijdverschuiving

Als niet wordt belast (geval 1 in *Figuur 2*) dan wordt de verticale as omlaag gevolgd langs isotachen met steeds lagere kruipreksnelheid en hogere intrinsieke tijd. Er geldt

$$\varepsilon^H = c \ln(\tau/\tau_0) \quad (6)$$

waarin τ_0 de initiële intrinsieke tijd is¹. De intrinsieke tijd neemt hierbij toe met

$$\tau = \tau_0 + t \quad (7)$$

zodat

$$\varepsilon^H = c \ln \frac{\tau_0 + t}{\tau_0} \quad (8)$$

Waar de kruip een mooie rechte oplevert als $\ln t$ wordt uitgezet (*figuur 2b*), versteilt het als $\ln(t)$ wordt uitgezet. Dit is het gevolg van het schuiven met de tijdas. Keverling Buisman's rek- $\log(\text{tijd})$ wet gaat wel op, als we maar de juiste tijd kiezen. En dat is de intrinsieke tijd. Keverling Buisman wist dat al – zie bijvoorbeeld de toelichting bij *figuur 71* in zijn boek 'Grondmechanica' uit 1940.

De tijdsverschuiving wordt naar Janbu geschreven als

$$t_r = t - \tau \quad (9)$$

In dit voorbeeld is dus $t_r = -\tau_0$ en dus negatief.

We kunnen ook kijken naar het effect van een belastingsverhoging naar σ'_A (geval 2 in *figuur 2*). Gemakshalve scheiden we de directe en de seculaire bijdragen in de tijd. Stel dat de directe rek lineair met de tijd toeneemt, en na t_A voltooid is. Dan is het gelijk aan

$$\varepsilon_d^H = a \ln \frac{\sigma'_A}{\sigma'_{v0}} \quad (10)$$

en kan het als totale rek worden ingevuld in (4):

$$\tau_A = \tau_0 \left(\frac{\sigma'_A}{\sigma'_{v0}} \right)^{-b/c} \exp(\varepsilon_d^H/c) = \tau_0 \left(\frac{\sigma'_A}{\sigma'_{v0}} \right)^{-(b-a)/c} \quad (11)$$

De kruiprek volgt dan uit

$$\varepsilon_s^H = c \ln \frac{\tau}{\tau_A} = c \ln \frac{\tau_A + t - t_A}{\tau_A} = c \ln(1 + \Delta t / \tau_A) \quad (12)$$

Zie *figuur 2b*. Nog steeds levert $\ln t$ een rechte op, maar $\ln(t)$ verflauwt. De tijdverschuiving is nu van teken veranderd ten opzichte van de kruip onder de initiële spanning. Was het eerst $-\tau_0$, nu is het $(t_A - \tau_A)$. De eerste is altijd negatief, de laatste is positief als de consolidatie langer duurt dan de intrinsieke tijd in A groot is. Bij grote belasting is dat al gauw het geval door de enorm sterke invloed van de spanning op de isotachen: de macht b/c heeft waarden tussen 12.5 en 25. Grote belasting => hoge kruipreksnelheid => geringe intrinsieke tijd.

Let wel dat in *figuur 2b* geval 2 de kruip begint direct na de knik. Door de tijdwaarnemingen met een constante tijdverschuiving t_r te verminderen, kan de helling c worden teruggevonden. Dit biedt een praktische methode voor de interpretatie van samendrukkingsproeven. Schat een waarde van t_r , trek dat af van de gemeten tijd, voer een regressieanalyse uit van de kruipstaart

$$\varepsilon^H = \text{constante} + c \ln(t - t_r) \quad (13)$$

en varieer t_r net zolang tot de regressiecoëfficiënt wordt gemaximaliseerd.

Tenslotte nog een korte samenvatting van het voorgaande:

Intrinsieke tijd τ is de omkering van de kruipreksnelheid, keer c . Bij constante effectieve spanning is de rek - $\log \tau$ lijn recht. De tijdverschuiving t_r is het verschil tussen intrinsieke tijd τ en gekozen tijd t . Het is constant als de effectieve spanning constant is. Op de lange duur wordt het verwaarloosbaar ten opzichte van de almaar toenemende τ en t . Dan is $\tau \approx t$, en is ook de rek - $\log(t)$ lijn recht.

Gewiste geheugen

Als de nieuwe spanning σ'_A in *figuur 2a* groot is,

en dus τ_A klein, en bovendien de tijdverschuiving klein is, dan is $\tau \approx t$, en lijkt het al gauw alsof σ'_A altijd op de grond heeft gewerkt. Het geheugen is voor wat betreft de oude belasting, uitgewist!

Dit gaat ook op in de samendrukkingsproef. De belastingsverhoging is in het algemeen groot en de consolidatie verloopt snel zodat geval 2 in *figuur 2* redelijk opgaat. Het verloop in *figuur 2b* is dan ook kenmerkend voor de samendrukkingsproef (al is het verloop vloeiender doordat er ook vóór de knik seculaire rek ontstaat). Omdat zowel τ_A als t_A klein zijn, is de tijdverschuiving ($t_r = t_A - \tau_A$) dat ook. Na één dag is dan $t \approx \tau$, en dit verklaart waarom de ééndags spanning-reklijn bruikbaar is als referentie-isotach. Het is dan niet strikt noodzakelijk om de isotachen te tekenen.

Bij kleinere belastingsverhoging hoeft dit niet op te gaan. Dan kan het weleens voorkomen dat na één dag, de intrinsieke tijd beduidend groter is dan één dag, en geval 1 in *figuur 2* is hiervan een extreem voorbeeld (belastingverhoging is nul; na één dag is de intrinsieke tijd 1001 dagen). Als in dat geval echter de echte kruipisotachen worden bepaald, zal blijken dat deze niet afhankelijk zijn van de grootte van de belasting. De $\sigma'_v - \varepsilon^H - \tau$ relatie is namelijk uniek, zolang het maar om maagdelijke belasting gaat. De ligging van de ééndagsisotach is dan door terugextrapolatie te bepalen.

Handberekening

Geval 2 in *figuur 2* met de drie bijbehorende formules 10 t/m 12 voor de directe en seculaire rek en τ_A levert een simpele handberekening op van de zetting. De directe rek wordt verondersteld onmiddellijk te ontstaan ($t_A = 0$), gevolgd door de seculaire rek, waarbij τ_A volgt uit de directe rek. Dit levert net als bij de Buisman-Koppejanmethode, een asymptoot van de rek op, maar anders dan bij Buisman-Koppejan, kunnen de asymptoten versteilen of verflauwen, afhankelijk van de tijdverschuiving. De asymptoot kan vervolgens op de gebruikelijke wijze gereduceerd worden met de aanpassingsfactor U van de Terzaghi-consolidatietheorie. Na enig rekenwerk ontstaat dan

$$\varepsilon = U \left[1 - \left(\left(\frac{\sigma'_A}{\sigma'_{v0}} \right)^{b/c} t / \tau_0 + \left(\frac{\sigma'_A}{\sigma'_{v0}} \right)^{a/c} \right)^{-c} \right] \quad (14)$$

waarin de natuurlijke rek al is omgerekend naar lineaire rek: $\varepsilon = 1 - \exp(-\varepsilon^H)$. Bij belasting in fasen heeft elke belasting een eigen asymptoot, en zijn aannamen nodig voor het verloop van U . Bij een meer-laagse geometrie zijn verdere

¹ De tijdsafgeleide hiervan is

$$\frac{\partial \varepsilon_s^H}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon_d^H}{\partial t} = \frac{c}{\tau} \frac{d\tau}{dt} + 0$$

en omdat de toename van t gelijk is aan die van τ , is inderdaad zoals al werd aangenomen,

$$\frac{\partial \varepsilon_s^H}{\partial t} = \frac{c}{\tau}$$

aannamen nodig om de U van het lagenstelsel te bepalen.

Een dergelijke berekening is eenvoudig in een spreadsheet op te zetten. Het is redelijk bruikbaar: de Terzaghi optie in MSettle werkt ook op deze wijze. Wel moet worden opgemerkt dat de tijdsverschuiving τ_r gelijk wordt aan $-\tau_A$ en dus geen relatie meer heeft met de consolidatieduur. De Darcy optie in MSettle daarentegen is wél wiskundig correct. Het stelt per tijdsincrement de vervormingssnelheid van het skelet gelijk aan de afstromingssnelheid, en is niet gevoelig voor aannamen met betrekking tot U. Het houdt rekening met de effecten van grote vervorming en initiële kruipsnelheid. Het is te verkiezen als het consolidatieverloop niet-Terzaghiaans is, bijvoorbeeld door grote vervorming of als de initiële kruipsnelheid hoog is. In dit laatste geval kan de wateroverspanning eerst nog toenemen doordat de afstromingssnelheid onvoldoende groot is. Deze rigoureuze aanpak is echter niet geschikt voor handberekening.

Initiële toestand

Elke zettingsberekening begint bij een initiële toestand in termen van rek ($=0$), korrelspanning σ'_{v0} en kruipreksnelheid of intrinsieke tijd τ_0 . De laatste kan worden afgeleid uit de afstand tussen σ'_{v0} en de referentie-isotach:

$$\tau_0 = \tau_1 \left(\frac{\sigma'_{v0}}{p_g} \right)^{-b/c} = OCR^{b/c} = (1 + POP / \sigma'_{v0})^{b/c} \quad (15)$$

met τ in dagen. De initiële intrinsieke tijd τ_0 , de grensspanning p_g , de overconsolidatieratio OCR en de 'past overburden pressure' POP zijn dus concurrerende parameters voor de vastlegging van de initiële toestand. τ_0 en OCR zijn uitwisselbaar. Ze worden constant in een laag na langdurige belasting met een grote spanning. Dat is te begrijpen met het bi-lineaire pad van geval 2 in *figuur 2*. De intrinsieke tijd na aanpassing τ_A is klein door de grote belasting, en na lange tijd is dus overal in de laag, $\tau \approx t$. Stel nu dat van een veertig jaar oude wegophoging moet worden

voorspeld welke zetting nog binnen tien jaar te verwachten is. Dan kan (12) worden toegepast:

$$\varepsilon \approx c \ln(1 + 10/40) \quad (16)$$

Met extensometers is gemakkelijk na te gaan of deze benadering juist is. Als onder grotere ophogingen van bekende ouderdom gedurende enkele maanden in enkele kenmerkende lagen de reksnelheid wordt gemeten, en dit wordt vergeleken met het laboratorium-isotachenbeeld van de laag, kan worden vastgesteld of de extrapolatie van proef naar praktijk juist is.

Autonome zetting

In maagdelijke grond heeft kruip plaatsgevonden onder het eigengewicht gedurende de bestaans-tijd van de laag. Dat wordt wel 'ageing' genoemd, maar die term geeft verwarring omdat het lijkt te duiden op aftakeling en verslechtering. Het omgekeerde is het geval, en daarom is kruip-versteviging (creep hardening) een betere term. Ook hier ontstaat op den duur een constante τ_0 over de laag, die dan min of meer gelijk is aan de ouderdom van de laag. In *Tabel 1* wordt voor drie kenmerkende grondsoorten de relatie gegeven tussen τ_0 , OCR en de kruipsnelheid, ook wel de autonome zetting genoemd. Honderd jaar lijkt voor τ_0 toch wel een minimum, en de bijbehorende kruipsnelheden liggen in de orde van 10^{-11} à 10^{-13} 1/sec, oftewel (veel) minder dan 1 mm/jaar voor een 5m dikke laag. OCR is in veen in de orde van 2.3 - 2.8, en in (humeuze) klei 1.5 - 2.5. Deze waarden zijn veel hoger dan gebruikelijk is in elasto-plastische modellen. Gebruik van OCR = 1 staat gelijk aan $\tau_0 = 1$ dag, en dat levert dus de initiële kruipsnelheid op van de samendrukkingsproef na 1 dag. Die is circa 10^{-7} 1/sec en vertaald naar de praktijksituatie, is dat veel te hoog.

Ook hier geldt dat met extensometers zou zijn na te gaan welke waarden van τ_0 reëel zijn. Met dergelijke metingen kan bovendien het

isotachenmodel gevalideerd worden. De sprong van $\tau \approx 1$ dag in de samendrukkingsproef naar $\tau \approx 10^5$ dagen en meer voor maagdelijke grond, cq. $\tau \approx 10^4$ dagen voor ophogingen en dergelijke, is groot, en praktijkvalidatie is daarom wenselijk. Ook hiervoor zijn extensometers geschikt. Met nauwkeurige extensometers zijn weleens vervormingssnelheden tot 10^{-12} 1/sec vastgesteld, en in *Tabel 1* is te zien dat dit overeenkomt met τ_0 waarden tot enkele honderden jaren.

De autonome maaiveldval is in grote delen van Nederland in de orde van 1 cm/jaar. Dat is veel hoger dan de 0.01 - 1 mm/jaar van *Tabel 1* en heeft zijn oorzaak vooral in verwerking van veen boven het grondwaterniveau, en in mindere mate in periodieke verlaging van polderpeilen. Een polderpeilverlaging is als belasting op te vatten, maar kan ook verrekend worden met een verlaagde τ_0 .

POP

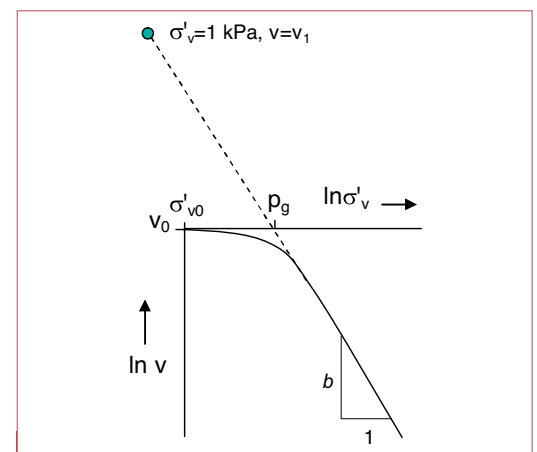
Voorbelaste grond zou een constante POP bezitten, dus een constante afstand tussen terreinspanning en grensspanning (ter grootte van de ontlasting). Dat is in principe wel juist in elasto-plastische modellen, maar niet in elasto-viscoplastische modellen, omdat er dan kruip-versteviging optreedt. Bovendien gaan de maagdelijke isotachen niet op tijdens en na ontlasten – ze raken verstoord door de optredende zwel. De juiste initiële toestand van voorbelaste grond is daarom niet gemakkelijk te bepalen. In zeer stijve, zwaar voorbelaste grond is het isotachenmodel minder bruikbaar.

Soortelijk volume

Als de rek op de verticale as wordt vervangen door het soortelijk volume v (totale volume / volume vaste stof), krijgen de isotachen een vaste plaats. De referentie-isotach kan dan worden vastgelegd met v_1 , het soortelijk volume op de

grondsoort	veen			humeuze klei			siltige klei		
aanduiding	Vm			Kh3			Ks		
γ_{nat} [kN/m ³]	10.0			12.5			15		
c	0.025			0.015			0.006		
b/c	12.5			14			25		
dikte laag [m]	5			5			5		
τ_0 [jaren]	100	1000	10000	100	1000	10000	100	1000	10000
de^H/dt [sec ⁻¹]	7.9E-12	7.9E-13	7.9E-14	4.8E-12	4.8E-13	4.8E-14	1.9E-12	1.9E-13	1.9E-14
OCR	2.32	2.79	3.35	2.12	2.50	2.94	1.52	1.67	1.83
dz/dt [mm/jaar]	1.25	0.125	0.0125	0.75	0.075	0.0075	0.3	0.03	0.003

Tabel 1 Autonome zettingsnelheid voor diverse grondsoorten als functie van de initiële intrinsieke tijd τ_0 , uitgaande van een 5 m dikke laag.



Figuur 3a Definitie van v_1

isotach bij een korrelspanning van 1 kPa, *figuur 3a*. Er is een strak verband tussen v_1 en b voor een groot aantal grondsoorten, *figuur 3b*. Grotere samendrukbaarheid hoort dus bij een groter poriënvolume, en v_1 en b zijn fundamentele grondparameters. De relatie tussen beiden is voorspelbaar, en de grensspanning en τ_0 volgt daaruit:

$$\begin{aligned} b \ln p_g &= \ln(v_1/v_0) \\ p_g &= (v_1/v_0)^{1/b} \\ \tau_0 &= (v_1/v_0)^{1/c} \sigma'_{v0}{}^{-b/c} \end{aligned} \quad (17)$$

waarbij gebruik is gemaakt van

$$\varepsilon^H = -\ln(v/v_0) \quad (18)$$

Een lager initieel soortelijk volume v_0 resulteert in hogere p_g en τ_0 , maar de v_1 - b -relatie blijft bestaan. Op deze wijze krijgt de dichtheid invloed op de grensspanning, bijvoorbeeld ook binnen één laag waarin de dichtheid naar onderen toe afneemt. Bepaling van het soortelijk volume vergt alleen een pycnometerproef op het monstermateriaal na afloop van de samendrukkingsproef.

Ook tussen v_1 en v_0 zijn mooie correlaties gevonden, *figuur 3c*. Dat is onverwacht omdat v_1 een echte grondparameter is en v_0 een toestandsparameter. De nauwkeurigheid en bruikbaarheid van de v_1 - b - v_0 relaties moet nog worden vastgesteld, maar verwacht mag worden dat opslag ervan in databases op den duur waardevolle correlaties zal opleveren.

Meetfouten

De referentie-isotach in de samendrukkingsproef is gevoelig voor meetfouten en interpretatiefouten. Het gaat o.a. om apparaatwrijving waardoor de aangebrachte belasting niet geheel op het monster komt, ringwrijving met hetzelfde gevolg en de invloed van monsterverstoring. De apparaatwrijving ontstaat in de hefboom en kan

oplopen tot meer dan 10%. Het levert een overschatting van p_g op, en als het afneemt met de spanning, een overschatting van b . De ringwrijving wordt in het K_0 -C.R.S. apparaat gemeten. Daaruit is gebleken dat in het algemeen, ook daardoor p_g en b wordt overschat. De monsterverstoring heeft echter het effect dat beiden onderschat worden. De grafische methode van Schmertmann wordt wel te hulp geroepen om voor monsterverstoring te corrigeren. Wellicht valt in de huidige procedures monsterverstoring tegen de meetfouten weg. Het zou dan onjuist zijn om eenzijdig de meetfouten te verhelpen.

Maagdelijkheid

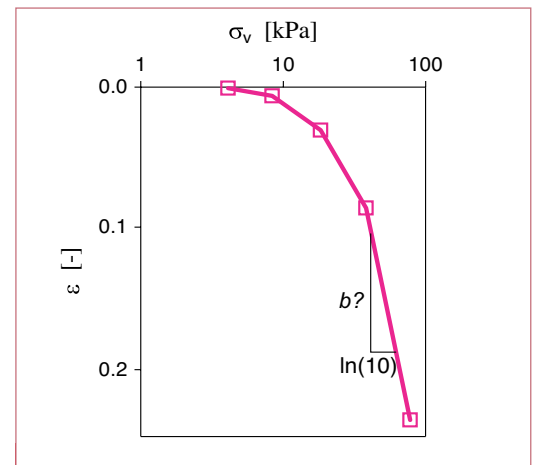
Figuur 4 is het resultaat van een samendrukkingsproef op veen, waarvan de laatste tak nog versteilt ten opzichte van de een-na-laatste tak. Het is dus niet zeker of het maagdelijke gebied is bereikt. De parameter b is dan mogelijk te laag, en de grensspanning eveneens. Deze proef is representatief voor de huidige uitvoering van de samendrukkingsproef, en de maagdelijkheid van b is dus in het geding. Alleen met maagdelijke waarden kunnen betrouwbare correlaties voor b en p_g worden opgebouwd.

De eerste paar stappen van een samendrukkingsproef zijn meestal snel uitgeconsolideerd. Er is dan niets op tegen om na één uur door te belasten. De tijdwinst kan worden benut voor een of twee extra stappen bij hoge belasting. Ook kan van het weekeinde gebruik worden gemaakt om bij de meest waarschijnlijke gebruiksbelasting een langere stap van 72 uur uit te voeren, met een navenant betrouwbaardere bepaling van de parameter c . Bijvoorbeeld:
 $0.25\sigma'_{v0}$ (1u) - $0.5\sigma'_{v0}$ (1u) - σ'_{v0} (22u) - $2\sigma'_{v0}$ (24u) - $4\sigma'_{v0}$ (72u) - $8\sigma'_{v0}$ (24u) - $16\sigma'_{v0}$ (24u)
 Bij een terreinspanning van 25 kPa gaat de proef dus tot 400 kPa. Naar verwachting is dat voldoende om in de laatste tak het maagdelijke

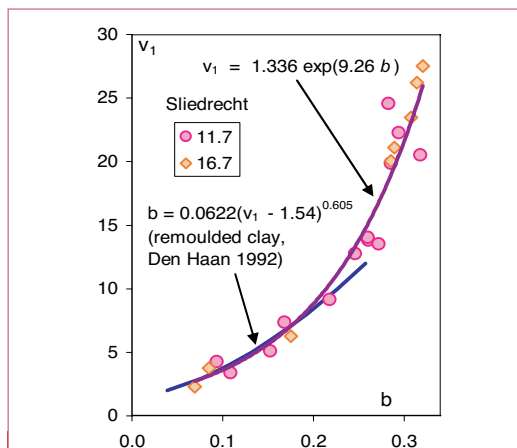
gebied te bereiken. Als $16\sigma'_{v0}$ te hoog wordt geacht, kunnen kleinere belastingsstappen in het maagdelijke gebied worden gekozen. De isotachen zijn immers niet gevoelig voor de grootte van de belastingsstap.

Figuur 5 is een correlatie van maagdelijke b -waarden met γ_{nat} , van proeven waarvan de laatste en een-na-laatste tak redelijk op één lijn lagen. Deze figuur kan gebruikt worden om van de maagdelijkheid van b een indicatie te krijgen. Valt een waarde duidelijk beneden de band van de punten in de grafiek, dan is waarschijnlijk niet tot in het maagdelijke gebied doorbelast.

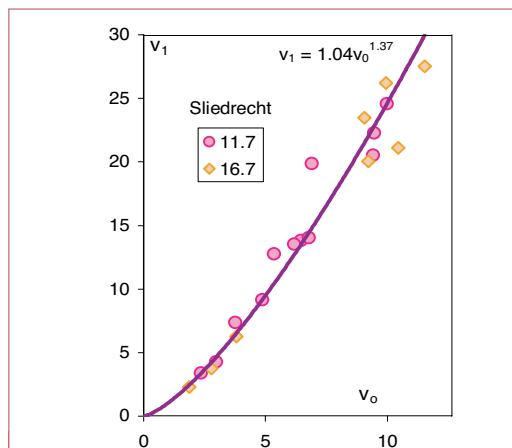
Een oudere correlatie tussen b en γ_{nat} was gebaseerd op een deelverzameling van *figuur 5*: $b = 0.326(\gamma_{nat}/\gamma_w)^{-2.11}$. Het valt plaatselijk buiten de aangegeven band en is daarom minder betrouwbaar gebleken. Een vloeiende benadering van de band is lastig, vooral omdat er rond $\gamma_{nat} = 15$ kN/m³ sprake lijkt van een trendbreuk. Afgezien daarvan is de band zelf als correlatie te gebruiken, met een nauwkeurigheid van $\Delta b \approx \pm 0.04$.



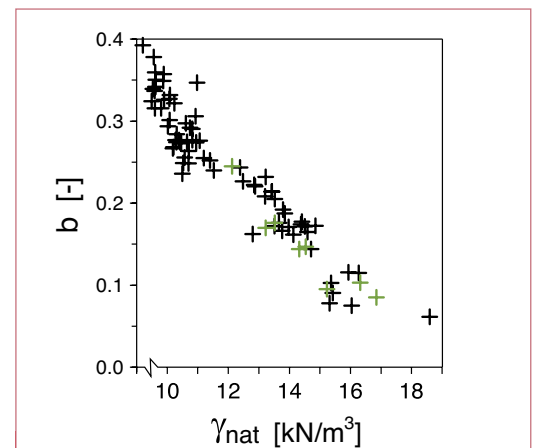
Figuur 4 Te kleine hoogste belasting levert onbetrouwbare b



Figuur 3b Correlatie van v_1 en b



Figuur 3c Correlatie van v_1 en v_0



Figuur 5 Update van b - γ_{nat} correlatie

b of b-a

In formule 4 wordt τ afhankelijk gesteld van de totale rek. Dat is fysisch gezien correct omdat het seculaire verschijnsel afhangt van de dichtheid, c.q. de afstand tussen de vastestofdeeltjes, en het aantal contacten daartussen. In zowel MSettle als het Plaxis Soft Soil Creep-model wordt τ (en via formule 2 dus ook $d\varepsilon_s^H/dt$) afhankelijk gesteld van de seculaire rek ε_s^H . Dan worden ook de isotachen in termen van ε_s^H geschreven. Door aftrek van de directe rek verdraaien de isotachen naar de helling b-a, en de grensspanning verplaatst zich naar p_{g2} (figuur 6). Hiervoor geldt de aangepaste vergelijking

$$\tau = \tau_1 \left(\frac{\sigma'_v}{p_{g2}} \right)^{-(b-a)/c} \exp(\varepsilon_s^H/c) \quad (19)$$

met $\tau_1 = 1$ dag. De relatie tussen p_g en p_{g2} is als volgt:

$$\begin{aligned} a \ln(p_{g2}/\sigma'_{v0}) &= b \ln(p_{g2}/p_g) \\ p_{g2}^{b-a} &= p_g^b (\sigma'_{v0})^{-a} \\ OCR_2 &= OCR^{b/(b-a)} \end{aligned} \quad (20)$$

Het bepalen van p_{g2} vereist, anders dan p_g , een keuze vooraf voor de initiële korrelspanning en voor de parameter a. Uiteraard wordt met beide schrijfwijzen dezelfde initiële intrinsieke tijd berekend:

$$\tau_0 = \tau_1 (OCR)^{b/c} = \tau_1 (OCR_2)^{(b-a)/c} \quad (21)$$

Een nadeel van de (b-a, p_{g2})-schrijfwijze is echter dat als a wél, maar p_{g2} of OCR_2 niet wordt veranderd, er wel degelijk een andere initiële intrinsieke tijd wordt berekend. De juiste waarde van a is moeilijk te bepalen, maar speelt in het isotachenmodel bij juist gebruik een ondergeschikte rol. Keuze voor een grotere a vergroot de directe rek, maar brengt de spanning-rektoestand bij een lagere isotach waardoor de seculaire rek afneemt (zie punt A in figuur 2a). Netto is het

verschil gering. In figuur 7 wordt dit geïllustreerd voor een factor 5 verschil in a.

Verandering van alleen a in de (b-a, p_{g2})-formulering levert echter grote verschillen in initiële kruipsnelheid op. De factor 5 toename van a in figuur 7 resulteert dan in een afname van de initiële intrinsieke tijd τ_0 met de macht $(b-5a)/(b-a) = 5/9$. Dit resulteert in een aanzienlijke toename van de berekende zetting. De (b, p_g)-schrijfwijze is daarom te verkiezen. Een goed alternatief is om, ongeacht de formulering, de initiële toestand met de intrinsieke tijd te beschrijven.

Afsluiting

Een goed begrip van de betekenis van intrinsieke tijd maakt het isotachenmodel toegankelijk. De uitleg hierover in dit artikel zal het model hopelijk (ondanks het hoge theoretische gehalte) voor velen tot leven brengen.

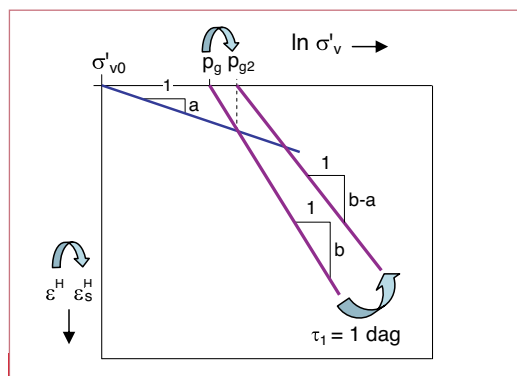
Hieronder volgt een overzicht van de conclusies van dit artikel.

1. De tijd in Keverling Buisman's logaritmische kruipwet betreft feitelijk de intrinsieke tijd.
2. De intrinsieke tijd vereenvoudigt de beschrijving van het isotachenmodel.
3. De intrinsieke tijd maakt duidelijk dat kruip niet altijd direct een semi-logaritmisch verband volgt, namelijk door de tijdsverschuiving ten opzichte van de gebruikte tijdmaat. Het is behulpzaam bij het maken van eenvoudige handberekeningen, en de initiële toestand kan ermee vastgelegd worden.
4. De hoge waarde van de intrinsieke tijd in-situ ten opzichte van de samendrukkingsproef vergt een grote extrapolatie. Validatie van het isotachenmodel is mogelijk door in-situ met extensometers de kruipsnelheid te meten, en dit te relateren aan met samendrukkingsproeven bepaalde isotachen.
5. Een dergelijke validatie is ook mogelijk voor grote ophogingen met een ouderdom van enkele tientallen jaren. De nauwkeurigheid

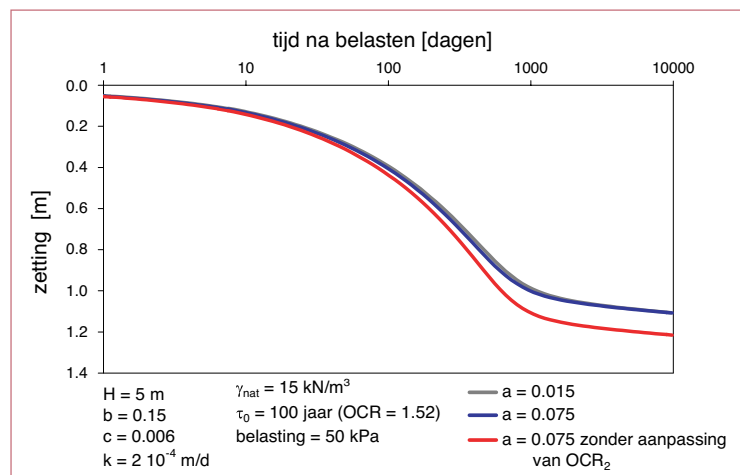
van de validatie neemt toe omdat de kruipsnelheden hoger zijn.

6. De isotachen hebben een unieke ligging als de rek door het soortelijk volume wordt vervangen. Dit is van waarde bij de bepaling van de initiële intrinsieke tijd in een laag, en het is daarom zinvol om hiervan correlaties op te bouwen.
7. Meetfouten door apparaat- en ringwrijving werken de effecten van monsterverstoring tegen. Correcties op de meetfouten moeten daarom samengaan met correcties voor monsterverstoring.
8. Omdat het isotachenmodel uitgaat van maagdelijk gedrag, moeten samendrukkingsproeven tot voldoende hoge spanningen worden doorgezet. Aanbevolen wordt om voor slappe grond tot minstens 16 maal de terreinspanning te belasten.
9. De manuals van MSettle en Plaxis Soft Soil Creep zouden expliciet moeten wijzen op de afhankelijkheid van de grensspanning en de overconsolidatieratio van de grootte van de elasticiteitsparameter (a c.q. CR c.q. κ^*). Een vergroting van de laatste moet leiden tot een vergroting van beide eerste, wil niet de kruipsnelheid drastisch toenemen. Dit is een gevolg van het relateren van de kruipsnelheid aan de seculaire rek en het kiezen van de grensspanning op het snijpunt van de a-lijn en de ééndags b-lijn. De in dit artikel gehanteerde schrijfwijze voorkomt dit probleem door de kruipsnelheid te relateren aan de totale rek en de grensspanning te nemen als de afsnijding van de ééndags b-lijn. Het probleem kan ook worden voorkomen door de initiële toestand te beschrijven met intrinsieke tijd. ■

Dit artikel is tot stand gekomen in het kader van het Delft Cluster project 'Blijvend Vlakke Wegen'. Reacties op dit artikel kunnen tot 1 april 2008 naar de uitgever worden gestuurd.



Figuur 6 Verdraaiing isotachen en verandering grensspanning door aftrek van directe rek in de "b-a"-beschrijving



Figuur 7 Een factor 5 verhoging van de parameter a heeft nauwelijks invloed op de zetting. Als daarbij echter OCR_2 niet wordt veranderd, is de invloed groot. (Bij $\tau_0 = 100$ jaar en $a = 0.015$ resp. 0.075 is $OCR_2 = 1.60$ resp. 2.32 . In beide gevallen is echter $OCR = 1.52$.)