

# Zettingsvoorspelling voor consolidatieversnellende grondverbeteringstechnieken

dr. ir. M.A. Van  
(*GeoDelft, Postbus 69, 2600 AB Delft, [van@geodelft.nl](mailto:van@geodelft.nl)*)

dr. H. den Adel  
(*GeoDelft*)

dr. ir. A.R. Koelewijn  
(*GeoDelft*)

## **Samenvatting**

Tengevolge van de wens van korte bouw tijden en strenge restzettingseisen worden bij de aanleg van ophogingen in toenemende mate consolidatieversnellende technieken toegepast. In Delft Cluster verband heeft GeoDelft de theorie voor consolidatie bij diverse bouwtechnieken afgeleid en uitgewerkt. In principe gaat het om grondverbeteringstechnieken, zoals verticale drainage en vacuümconsolidatie, waarbij horizontale en verticale afstroming in de grond optreedt, eventueel aangevuld met een extra belasting door een overhoogte of luchtonderdruk. Het model voor de afstroming is gecombineerd met het isotachen model voor de zettingsberekening, zodat het complexe kruipproces in de grond goed wordt gemodelleerd. Daarnaast is een nieuwe zogeheten  $K_0$ -CRS proef ontwikkeld, waarmee nauwkeuriger en sneller zettingsparameters kunnen worden bepaald. In deze bijdrage zal worden ingegaan op de toepassing van de nieuwe consolidatietheorie, de nieuwe proef en een case. Uit de case blijkt dat deze nieuw ontwikkelde ontwerpmethodiek goed bij de meetresultaten ligt.



## 1. Inleiding

Maatschappelijke ontwikkelingen oefenen druk uit om een bouwproces zo kort mogelijk te laten duren. Naast dit 'alles moet sneller' zijn ook de eisen opgeschroefd voor de maximaal toelaatbare restzetting, na de oplevering van de beoogde constructie. Deze ontwikkelingen eisen in toenemende mate meer van de expertise van de ontwerpers en uitvoerders. Sneller en beter voorspelbaar bevinden zich in een krachtveld. De eis van de goede voorspelbaarheid van de restzetting leidt tot het teruggrijpen op oude beproefde methoden. Hiermee is immers veel ervaring opgedaan, waardoor de kans op onverwachte tegenvallers wordt verkleind. De eis voor het versneld uitvoeren van het bouwproces daarentegen leidt tot het toepassen van nieuwe technieken, waar juist de ervaring ontbreekt. Ziehier het dilemma waarin een aannemer zich bevindt. Een derde maar niet minder belangrijke factor in dit krachtenveld is de kostprijs. Snel en voorspelbaar moet niet tot excessief hoge kosten leiden.

Het is daarom van belang dat reeds in een vroeg stadium van het proces helder wordt waar de kansen en risico's liggen. Deze dienen nader te worden uitgewerkt als uit een serie mogelijke technieken de meest belovende techniek of combinatie van technieken is gekozen. Zo zouden de ontwerpers kunnen hebben becijferd dat het mogelijk is de constructie zonder drainage (net) binnen de gestelde bouwtijd te kunnen realiseren. Een kleine afwijking tussen het feitelijke gedrag van de grond en de materiaalparameters waarmee de constructeurs hebben gerekend, kan echter al aanleiding geven tot een enkele maanden langere bouwtijd of een te grote restzetting aan het einde van de geplande bouwtijd. Indien het in de beginfase van het proces duidelijk is dat een dergelijk scenario reëel is, kan een alternatieve methode worden gekozen die de kans op uitloop verkleint.

Het is derhalve van belang nauwkeurige voorspellingen voor de restzetting en bouwtijd te hebben die voor diverse uitvoeringstechnieken toepasbaar zijn. In Delft Cluster verband heeft GeoDelft de afgelopen jaren gewerkt aan een ontwerpmethodiek die voor diverse uitvoeringstechnieken toepasbaar is en die nauwkeurig is. De uitvoeringstechnieken die hierbij voor ogen staan, zijn:

- Verticale drainage
  - met geforceerde ophoging
  - met draindieptes die op enige afstand van het pleistocene zand blijven vanwege kwel
- Nat opspuiten van zand, waardoor een hoge freatische lijn (cq. opbolling) in het stort de effectiviteit van de drains verlaagt
- Luchtdruktechnieken die de grond extra belasten waardoor het consolidatieproces sneller verloopt
- Andere vormen van drainage zoals wanden en palen
- Allerlei combinaties van bovengenoemde technieken

Voor de adviespraktijk zijn laboratoriumproeven en een rekenmodel ontwikkeld dat nauwkeuriger is en voor bovenstaande technieken toepasbaar is. In deze bijdrage wordt ingegaan op het rekenmodel en de nieuwe laboratoriumproeven. Daarnaast wordt voor de situatie aan de Barendrechtse weg, waar uitgebreid is gemeten, de nieuwe methode toegepast.

## **2. Theorie**

### **Verschijnselen**

Bij het aanbrengen van een zandlichaam of een aarden baan wordt er op het maaiveld een extra belasting aangebracht. Vooral in het westen en noorden van Nederland bestaat de bodem uit slappe weinig doorlatende grond. Door het aanbrengen van een extra belasting op deze grond zal deze de neiging hebben te gaan deformeren. De deformatie gaat gepaard met een volumeverandering, met name de poriën in de grond zullen kleiner worden. Het daarin aanwezig water is weinig samendrukbaar en verhindert daardoor de afname van het volume. Het water komt onder een extra druk te staan, waardoor het water zal willen afstromen naar plaatsen waar de waterspanning laag is. De slechte doorlatendheid van de grond werkt deze afstroming tegen.

Door het aanbrengen van een bovenbelasting op het maaiveld neemt de totale spanning in de grond toe, maar door de slechte afstroming van het water komt deze toename van de spanning geheel op het conto van de waterspanning. Het water komt onder een extra spanning te staan. Dit verlaagt de stabiliteit van de constructie. Het proces van het afstromen van het overspannen water wordt consolidatie genoemd.

Er zijn diverse technieken om de consolidatie te versnellen. Zo kunnen er bijvoorbeeld verticale drains of drainerende wanden worden aangebracht, waardoor de afstand waarover het water door een slecht doorlatend materiaal moet stromen, aanzienlijk wordt verkleind. Een andere mogelijkheid zijn vacuümtechnieken, waardoor versnelde afstroming van het overspannen poriewater wordt bewerkstelligd. Ook de oorzaak van de wateroverspanning kan worden aangepakt, door de stijfheid van de grond te verbeteren door middel van een grondverbetering.

### **Een nieuw rekenmodel**

In de voorafgaande paragraaf is duidelijk gemaakt dat de oorzaak van de lange duur van het bouwproces de deformatie van de grond is, in combinatie met de slechte afstroming van overspannen water. De klassieke berekeningswijze van een consolidatieprobleem geeft de waarde van de waterspanning als functie van de tijd. Ook kan de berekeningswijze in termen van het aanpassingspercentage van de waterspanning worden geformuleerd. Uit de stijfheid van de grond en de aangebrachte bovenbelasting wordt de eindzakking bepaald: de zakking op het moment dat alle overspannen water is afgestroomd. Om de zakking als functie van de tijd te verkrijgen wordt bijvoorbeeld de methode conform NEN6744 gebruikt, de zakking op een tijdstip wordt afgeleid uit het aanpassingspercentage.

Verticale drainage laat zich in bovenstaande aanpak lastiger schematiseren. De invloed van de verticale drainage op de consolidatie moet worden geschematiseerd door middel van een aangepaste waarde van de samendrukkingcoëfficiënt. Vacuümconsolidatie laat zich niet met NEN6744 vangen. Bovendien is het nog iets ingewikkelder: kruip. Als alle overspannen water is afgestroomd, draagt de grond in zijn geheel de bovenbelasting. In feite is er dan geen reden meer dat er nog verdere vervorming van de grond optreedt. Maar zelfs onder de constante spanning vervormt de grond nog langzaam, dit noemen we kruip.

Om zettingen tijdens en na het ophoogproces te kunnen voorspellen, zijn er drie modellen nodig:

- grondmodel voor de relatie tussen spanning en rek, inclusief kruip
- model voor het afstromen van water
- model voor de berging van water

Het grondmodel geeft aan welke vervorming er optreedt bij een aangebrachte spanningverhoging. Dit model dient zowel de directe vervorming als de kruiprek te beschrijven. Het model voor het afstromen van water moet aangeven hoe snel het water afstroomt naar de goed doorlatende lagen. Het bergingmodel beschrijft de relatie tussen de effectieve spanningen en de stijghoogte.

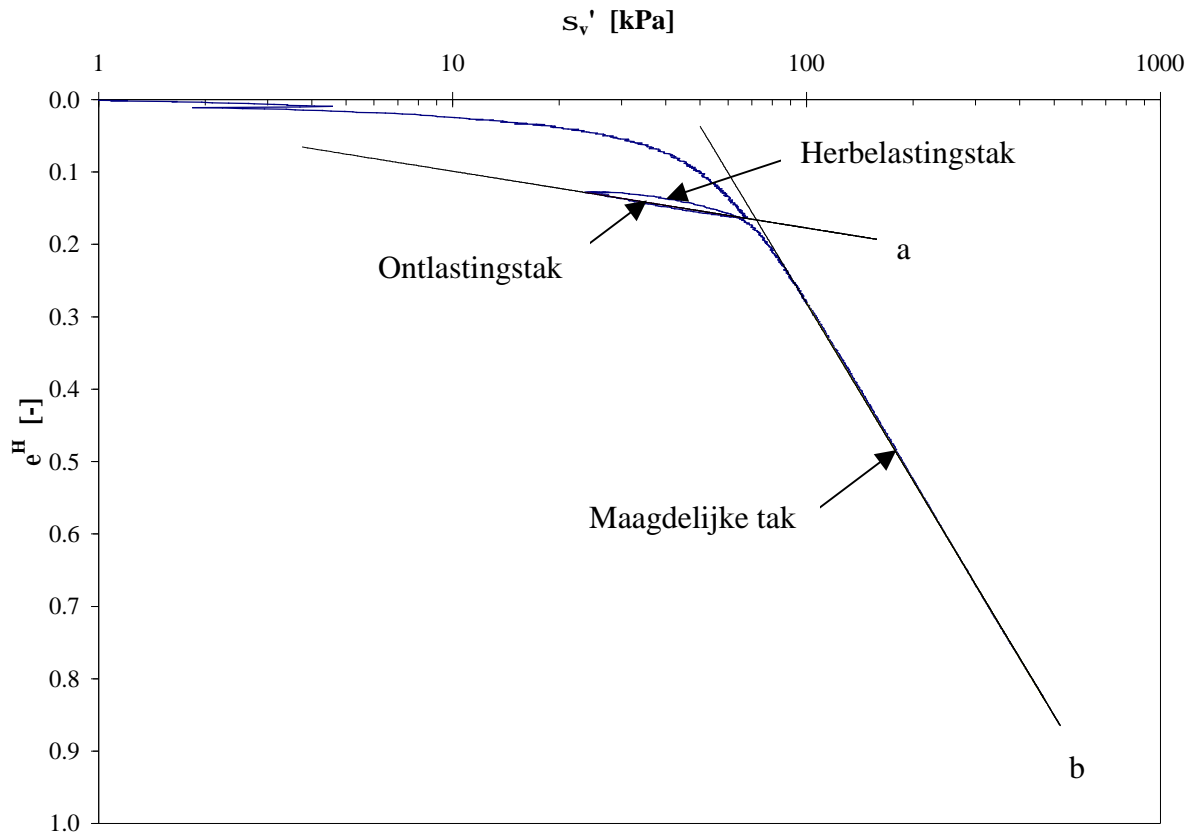
Voor het grondmodel is het 'state of the art' isotachenmodel gekozen [den Haan 2000]. Dit bevat een geïntegreerde relatie tussen spanning en rek bij belasten, ontlasten, herbelasten en kruip. Het model voor het afstromen van water is een één dimensionaal stromingsmodel. De invloed van verticale drainage is hierin analytisch verwerkt waarbij rekening wordt gehouden met het feit dat de drains niet doorlopen tot in het pleistocene zand, ten einde kwel te voorkomen. Randvoorwaarden bij de stroming zijn de waterspanningen in de drainerende lagen, zodat bijvoorbeeld ook het effect van vacuüm drainage op de stroming van het water kan worden doorgerekend. Daarnaast mag de waterspanning in de drain afwijken van de freatische lijn, zodat een opbolling in het stort ook te berekenen valt.

In MSettle wordt de zetting en de waterspanning als functie van de tijd berekend. Invoerparameters van het model zijn de geometrie van de ophoging en die van de lagen, de doorlatendheid van de grond in de lagen, de natte en droge volumieke gewichten, de grensspanningen, de initiële korrelspanningen, de abc parameters, de lucht(onder)druk en drainageparameters, zoals de lengte van de drains en hun hart op hart afstand.

### ***3. Nieuwe samendrukkingsproef ten behoeve van het isotachenmodel***

#### **Het ABC van de abc parameters**

De abc parameters uit het isotachenmodel geven in incrementele vorm (raaklijnen) de relatie tussen spanning en rek. De parameter a heeft de fysische betekenis van herbelasting van het monster. In het algemeen beschrijft a de relatie tussen spanning en rek bij spanningen onder de grensspanning. De b parameter heeft de fysische betekenis van belasten van maagdelijke grond, dat wil zeggen grond boven de zogeheten grensspanning. De c parameter beschrijft het kruipgedrag van de grond, dat wil zeggen de vervorming van de grond als functie van de tijd bij een constante spanning. De a en b parameter zijn in figuur 1 grafisch weergegeven. De c parameter staat in figuur 1 niet vermeld. Voor een gedetailleerde beschrijving van het isotachenmodel wordt naar [den Haan 2000] verwezen.



Figuur 1. De grafische betekenis van de a en b parameter.

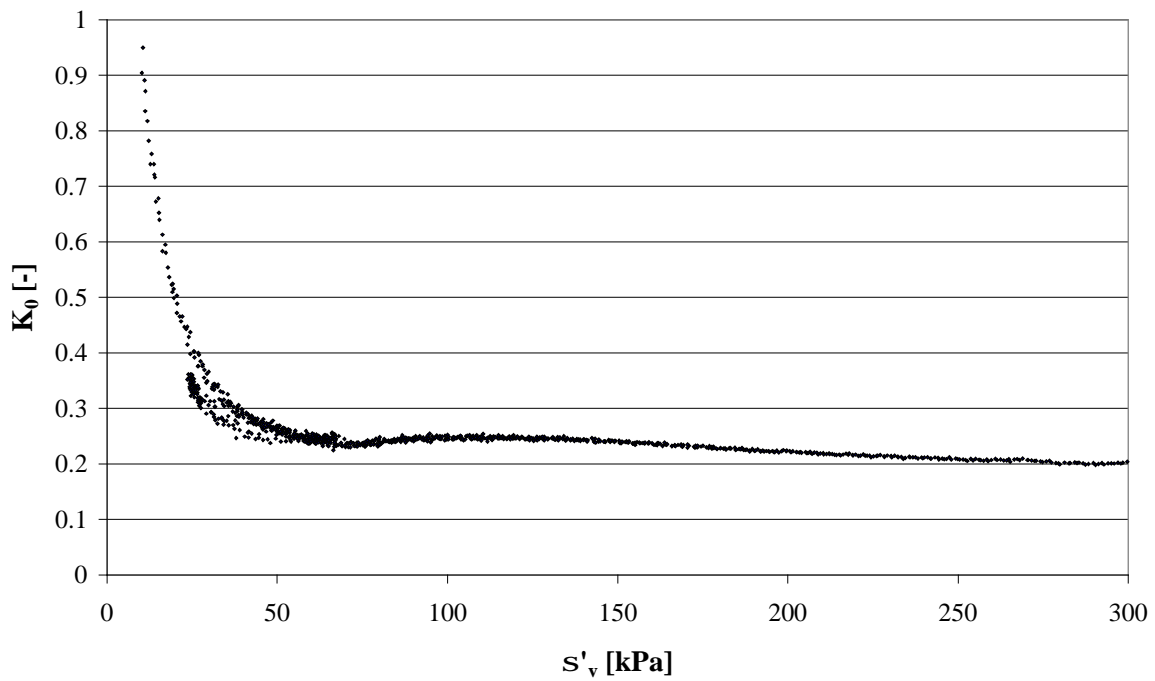
### Het $K_0$ -CRS apparaat

De a en b parameters kunnen in principe worden gemeten in een oedometerproef. Omdat deze proef enkele systematische fouten kent, hebben wij er voor gekozen de parameters in het nieuw ontwikkelde  $K_0$ -CRS apparaat te meten. De basis van dit apparaat bestaat ook uit een oedometerring. In de ring wordt een monster van 20 mm hoog geplaatst. Het monster wordt aan de bovenzijde belast met een constante reksnelheid. CRS is een acroniem voor Constant Rate of Strain. De reksnelheid kan zowel positief zijn (compressie), nul, als negatief (extensie). De kracht die met de vervorming gepaard gaat, wordt zowel aan de onder- als aan de bovenzijde van het monster gemeten. De bovenkant van het monster is gedraineerd. Water dat uit het monster afstroomt, kan daar vrijelijk wegstromen. Aan de onderzijde is het monster ongedraineerd. De waterspanning die ten gevolge van de vervorming ontstaat, wordt aldaar gemeten. Om de invloed van luchtbelletjes in het poriewater op de stijfheid van het monster te elimineren, wordt de proef onder een backpressure van 300 kPa uitgevoerd.

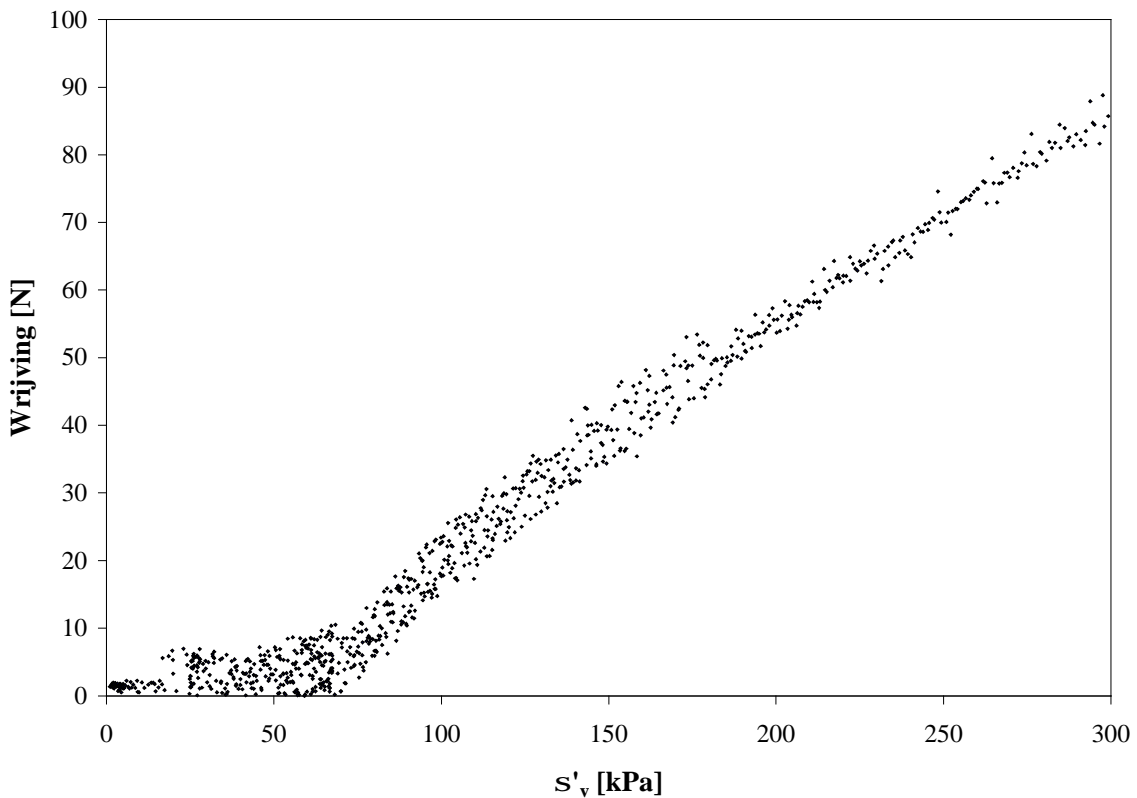
In de ring is een voorziening aangebracht om de horizontale kracht te meten. Halverwege de initiële monsterhoogte verjongt de ring, zie foto 1. In de verjonging zijn rekstrookjes geplakt. De vervorming van de ring in de verjonging staat toe de horizontale kracht te meten. Dit lijkt in strijd te zijn met de eis dat het monster in horizontale richting vormvast moet zijn. De ring is echter zodanig stijf dat de vervorming voldoende gering is om het monster nog als vormvast te kunnen beschouwen. De verhouding van de horizontale en verticale kracht is  $K_0$ . De gemeten waarde is weergegeven in figuur 2.



Foto 1 De  $K_0$  ring



Figuur 2 De gemeten waarde van  $K_0$  als functie van de korrelspanning.

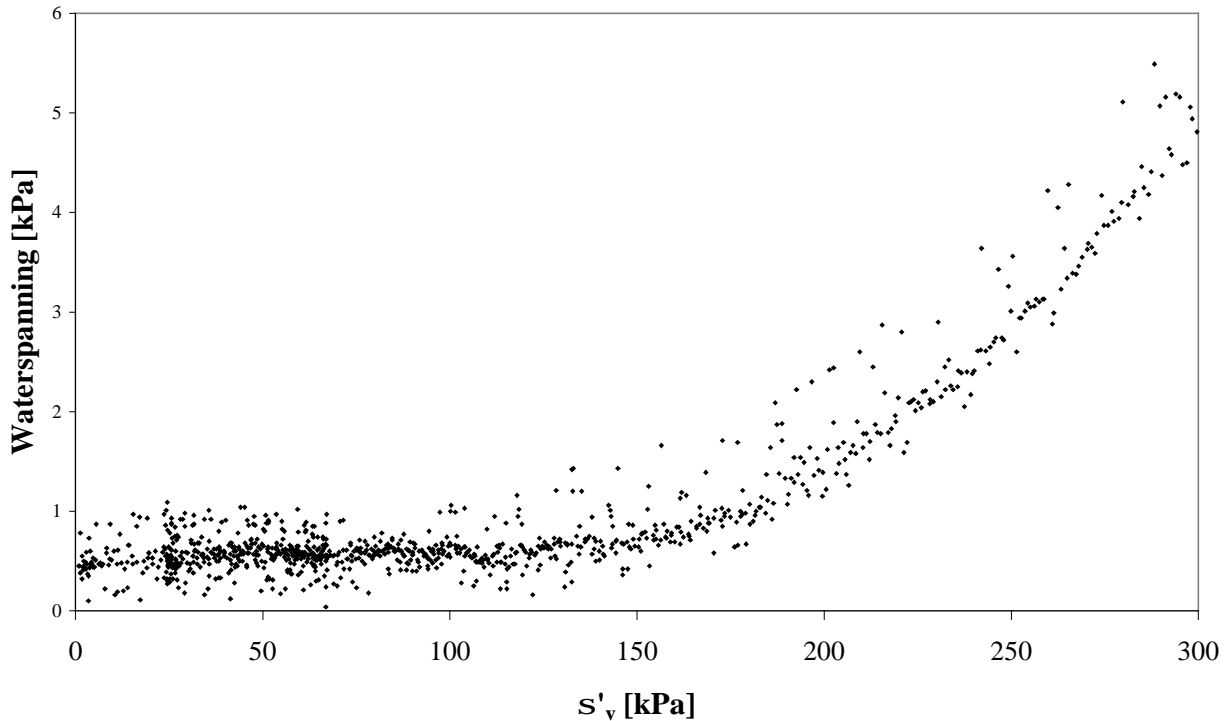


Figuur 3 De wrijving als functie van de korrelspanning

Het monster in de ring ondervindt, net als in de klassieke oedometerproef, wrijving langs de wand. Omdat in het  $K_0$ -CRS apparaat zowel de kracht op het monster aan de onder- als aan de bovenzijde wordt gemeten, is tevens het krachtsverlies ten gevolge van wrijving langs de



wand bekend, zie figuur 3. Voor de berekening van de totale spanning op het monster kan er dus voor de wrijving worden gecorrigeerd. Omdat de waterspanning wordt gemeten, kan de korrelspanning worden berekend. Omdat de proef met beleid wordt uitgevoerd, loopt de waterspanning niet erg op, in figuur 4 niet meer dan 2%.



Figuur 4 De waterspanning als functie van de korrelspanning

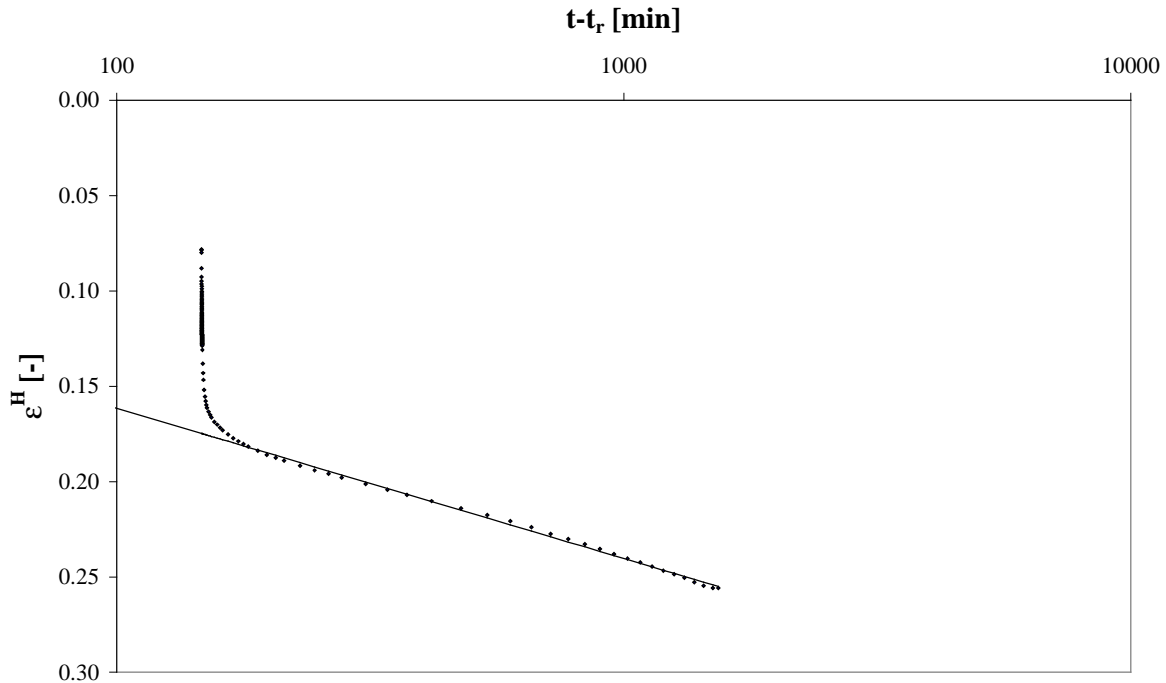
### Bepaling van de abc parameters

De a en b parameter worden bepaald uit de hellingen van de lijnen door de respectievelijk de herbelastingstak en de maagdelijke tak, zie figuur 1. In de  $K_0$ -CRS proef wordt daartoe de rek opgevoerd tot ruwweg 10%. Daarna wordt de rek enkele procenten gereduceerd (ontlastfase) en vervolgens weer opgevoerd (herbelastfase). De waarde van de a parameter wordt bepaald uit deze ontlasting-herbelastingtak. De waarde van de b parameter wordt bepaald uit de helling van de maagdelijke tak. De waarde van de c parameter wordt bepaald uit de relaxatiefase. Hierin neemt bij een stilstaande plunjer de gemeten spanning af ten gevolge van kruip in de grond. Uit deze afname wordt de waarde van c bepaald, zie figuur 5. Voor de details wordt verwezen naar [den Haan 2001].

### Voor- en nadelen

Het  $K_0$ -CRS apparaat is ingewikkelder van uitvoering dan de klassieke oedometerproef. De prestaties van de  $K_0$ -CRS proef zijn echter aanzienlijk beter. Bij de klassieke uitvoering van de oedometerproef wordt de wrijving verwaarloosd, in de  $K_0$ -CRS proef wordt deze gemeten en er wordt voor gecorrigeerd. Omdat tevens de waterspanning wordt gemeten, kan de feitelijke korrelspanning worden bepaald. Bij de klassieke oedometerproef is de aanname dat er geen wateroverspanning (meer) is. Tenslotte, omdat de proef rekgestuurd wordt uitgevoerd

onder gelijktijdige meting van de kracht, levert het  $K_0$ -CRS apparaat een continue beeld op van de relatie tussen spanning en rek. Bij de klassieke oedometerproef is er een aantal stappen, die een klein aantal punten op de curve uit figuur 1 leveren. De abc parameters van het isotachenmodel kunnen derhalve eenduidiger worden bepaald dan in de klassieke oedometerproef.



Figuur 5 Natuurlijke rek versus de tijd

#### 4. Case Barendrechtse weg

##### Situatiebeschrijving

Aan de zuidrand van Rotterdam nabij de A15 ligt de Barendrechtse weg. Voor de aanleg van het Betuwespoor wordt een ophoging toegepast. Door de nabijheid van leidingen en kabels dient er bijzondere aandacht aan de zettingen te worden besteed. Het oorspronkelijke plan op basis van de oude rekenmethodiek (Koppejan) was om de ophoging gedeeltelijk met EPS (een soort piepschuim) uit te voeren. Met het oog daarop is besloten om deze ophoging nauwkeurig te gaan volgen. Een dergelijke ophoging biedt immers een uitstekende gelegenheid om rekenmodellen te valideren. Onder de ophoging zijn verticale drains aangebracht, om het consolidatieproces te versnellen. De metingen gaven aan dat de zakkingen klein waren en dat de drainage prima werkte. Tijdens de uitvoeringsfase kon, op basis van de uitgebreide metingen en nieuwe ontwerpberoeeningen, de het dure EPS worden weggelaten.

## Postdictie

In deze case focussen we ons op de gemeten zettingen. De grondopbouw is in bijlage 1.1 weergegeven. Voor deze lagen zijn representatieve monsters genomen en beproefd in het laboratorium. Porositeit, doorlatendheid en volumiek gewicht staan in tabel 1. De abc parameters en de grensspanning zijn vermeld in tabel 2. In tabel 3 is het ophoog- en ontgraafschema vermeld.

Materiaal	Verticale doorlatendheid [m/s]	Horizontale doorlatendheid [m/s]	$\gamma_{\text{nat}}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_{\text{droog}}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Porositeit [-]
Duinkerken klei	$5.53 \times 10^{-10}$	$5.53 \times 10^{-10}$	19.2	14.5	0.5
Hollandveen	$2.31 \times 10^{-8}$	$9.24 \times 10^{-8}$	10.4	1.7	0.9
Gorkum zwaar 1	$8.95 \times 10^{-9}$	$8.95 \times 10^{-9}$	16.0	9.7	0.6
Gorkum licht	$1.59 \times 10^{-8}$	$1.59 \times 10^{-8}$	13.0	5.8	0.7
Gorkum zwaar 2	$8.95 \times 10^{-9}$	$8.95 \times 10^{-9}$	16.7	11.2	0.6
Basisveen	$8.99 \times 10^{-9}$	$3.6 \times 10^{-8}$	12.0	4.0	0.8

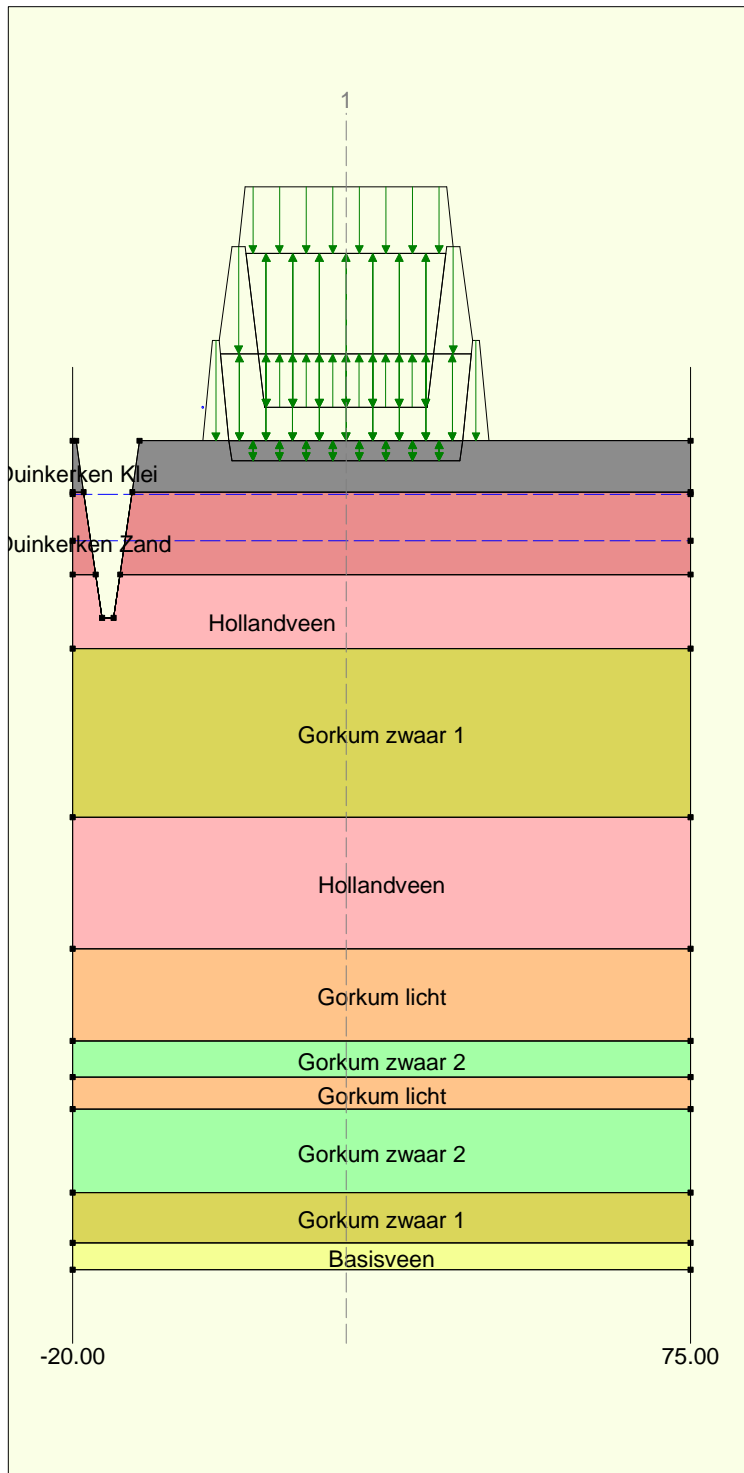
Tabel 1 Doorlatendheid, volumiek gewicht en porositeit

Materiaal	a	b	c	$p_g$ [kPa]
Duinkerken klei	0.0049	0.0566	0.0028	47
Hollandveen	0.035	0.276	0.0217	51
Gorkum zwaar 1	0.0123	0.1374	0.0061	52
Gorkum licht	0.0203	0.1765	0.0138	85
Gorkum zwaar 2	0.0103	0.1130	0.0057	110
Basisveen	0.0134	0.1344	0.0127	-

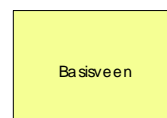
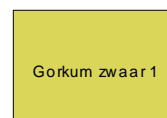
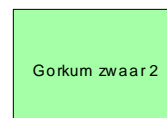
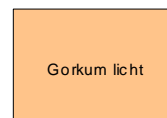
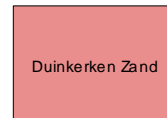
Tabel 2 De abc parameters en de grensspanning.

Stap	Datum [dag]	Type
1	0	Ontgraven
2	25	Ophogen
3	39	Ophogen
4	44	Ophogen
5	117	Ophogen
6	131	Ophogen
7	192	Ophogen

Tabel 3 Ophoog en ontgraafschema



Materialen



Stieljesweg 2  
2628 CK Delft

Tel +31-15-2693500  
Fax +31-15-2610821

datum  
23-11-01

get.  
Adel

Geometrie en ophoging Barendrechtse weg  
Illustratie isotachenmodel

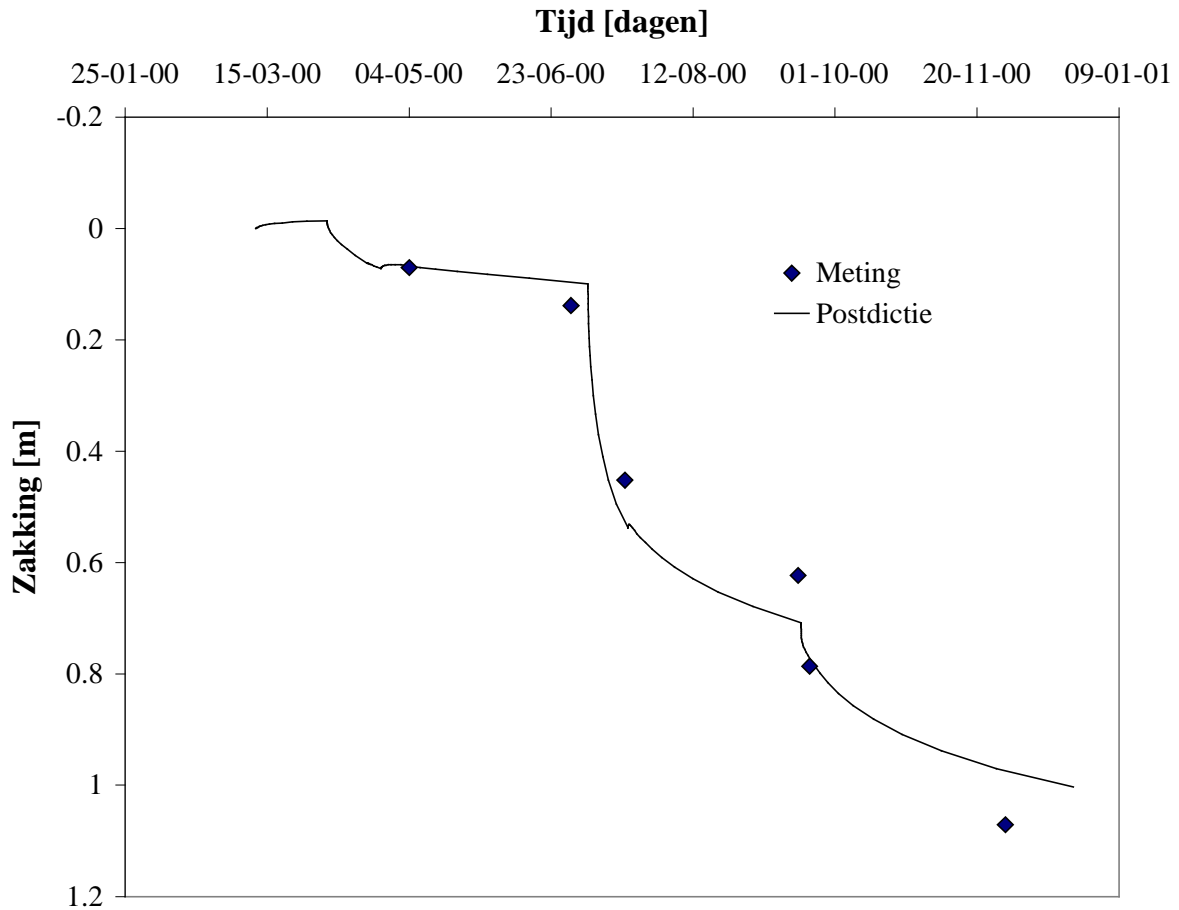
CO-710402

ctr.

MSettle 5.5 : RaaiBZonderDrainsMetOntgraving.sli

Bijl. 1.1

form.  
A4



Figuur 5 Meting en postdictie van de Barendrechtse weg.

In figuur 5 zijn de metingen en de berekeningen met MSettle met isotachenmodule weergegeven. De voornaamste invoerparameters van dit programma zijn in de tabellen 1 t/m tabel 3 vermeld. De waarden zoals ze uit het laboratoriumonderzoek met het nieuwe  $K_0$ -CRS apparaat volgen, zijn in MSettle ingevoerd. De waarden van de parameters zijn dus niet geoptimaliseerd om een zo goed mogelijke overeenstemming tussen meting en berekening te verkrijgen! De metingen en voorspellingen liggen voor wat gebruikelijk is voor zettingsberekeningen, goed op elkaar.

## 5. Conclusies

- Het isotachenmodel staat een geïntegreerde aanpak toe van de berekening van de zetting onder invloed van consolidatie en kruip bij gebruik van verticale drainage of vacuümconsolidatie.
- De abc parameters uit het isotachenmodel kunnen nauwkeuriger in de  $K_0$ -CRS opstelling worden bepaald dan in een oedometer opstelling.
- Het  $K_0$ -CRS apparaat geeft ook meer en een beter inzicht in de vervormings- en consolidatieparameters dan de klassieke oedometerproef.

- De overeenstemming tussen de gemeten en berekende zakking voor de case Barendrechtse weg is goed.

**Stelling:**

De adviespraktijk zou voor de zettingsproblematiek moeten overwegen om het isotachenmodel en de  $K_0$ -CRS proef te hanteren.

**6. Literatuur**

[den Haan 2000]

E. J. den Haan, J.B. Sellmeijer.

Calculation of soft ground settlement with an isotache model, blz. 94-104

Proceedings of the Soft Ground Technology conference, Noordwijkerhout, 2000.

[den Haan 2001]

E.J. den Haan, B.H.P.A.M. The, M.A. Van

De  $K_0$ -CRS samendrukkingsproef

Geotechniek, jaargang 5, nummer 4, oktober 2001, blz. 55-63