geo 4-2004 opmaak 09-09-2004 18:38 Pagina 36

REKENEN MET VERTICALE DRAINS

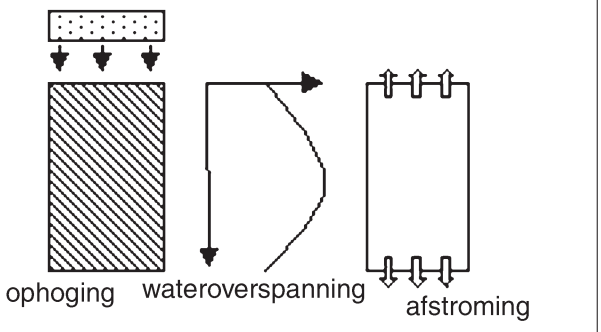
J.B. Sellmeijer, M.A.T. Visschedijk, M.J.M. Weinberg, GeoDelft

Samenvatting:
Rekenen met verticale drains

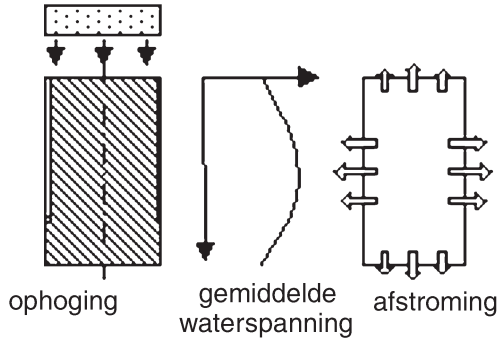
**Verticale drains versnellen de consolidatie bij ophoging. Door tijdelijke voorbelasting treedt ook minder restzetting op.
Hoe kunnen we de effecten van drainage op zettingen berekenen?
Het programma MSettle biedt nieuwe mogelijkheden, die geschikt zijn voor alle gangbare drainagesystemen. De nieuwe aanpak is een generalisatie van de traditionele methode volgens Terzaghi-Barron-Carillo. De mogelijkheden worden toegelicht aan de hand van twee praktijkvoorbeelden. Het eerste voorbeeld betreft de 5e Schipholbaan, waar de IFCO-methode is toegepast. De robuuste Terzaghi-oplossing wordt vergeleken met de meer nauwkeurige Darcy-oplossing. Het tweede voorbeeld betreft een aansluiting op de A4 te Schiedam, waar drainagestrips en overhoogte zijn toegepast. Combinatie met zakbaakfits verbetert de inschatting van de restzettingen.**

Verticale drains zijn een probaat middel om consolidatie door ophoging te versnellen. Door combinatie met tijdelijke voorbelasting door weggenomen overhoogte of geforceerde onderdruk treedt bovendien minder restzetting op.

Figuur 1: Aanbrengen van een verticale drain



■ **Figuur 2:** Natuurlijke consolidatie



■ **Figuur 3:** Versnelling door verticale drains

Een veelgehoorde vraag is nu hoe de zetting onder invloed van verticale drains moet worden voorspeld. De traditionele aanpak volgens Terzaghi-Barron-Carillo voldoet alleen bij toepassing van drainagestrips zonder geforceerde onderdruk. Dit artikel presenteert een generalisatie, waarmee ook geforceerde drainage, zandschermen en gefaseerde ophoging kunnen worden doorgerekend. Twee oplosmethoden in het rekenprogramma MSettle worden vergeleken aan de hand van een voorbeeld. Beide methoden blijken goed bruikbaar. De robuuste Terzaghi-oplossing levert snelle inschattingen. De meer nauwkeurige Darcy-oplossing laat het effect zien van de koppeling tussen kruip en consolidatie. Een tweede voorbeeld toont aan dat combinatie met zakbaakfits leidt tot een betere inschatting van restzettingen.

Het principe

Door ophoging ontstaat overspannen water dat wil afstromen. De hoeveelheid afstromend water bepaalt de consolidatiezetting. Bij natuurlijke consolidatie stroomt het overspannen water vooral verticaal af, naar goed geleidende lagen aan boven- en onderzijde (*figuur 2*). Bij verticale drains stroomt overspannen water ook horizontaal af, naar verticale strips of zandschermen (*figuur 3*). De zetting treedt daardoor versneld op. Restzetting kan verder worden gereduceerd door het genereren van extra consolidatiezetting. Dat gebeurt door tijdelijke overhoogte en/of door geforceerde onderdruk (vacuüm, IFCO, Press-To-Drain en Beau Drain).

De beperkingen in de huidige rekenpraktijk

In de praktijk wordt een consolidatiegraad meestal voorspeld door de theorie van Terzaghi-Barron-Carillo te gebruiken. Carillo combineerde de oplossing voor horizontale radiale stroming volgens Barron met de klassieke Terzaghi-oplossing voor verticale consolidatie. De ontwerpgrafieken in CUR-publicatie 162 zijn op deze theorie gebaseerd.
In zettingspredicties en zakbaakfits wordt een zettingsmodel als Koppejan of NEN-Bjerrum vaak gekoppeld aan de klassieke Terzaghi-oplossing voor natuurlijke consolidatie. Het effect van verticale drains is daarin verwerkt door middel van een aangepaste verticale consolidatiecoëfficiënt. Tegenwoordig wordt echter steeds meer gebruik gemaakt van geforceerde onderdruk in strips of zandschermen. De klassieke aanpak voldoet dan niet.

Uitbreiding van de consolidatietheorie

Een meer algemene aanpak wordt mogelijk door de volgende uitbreiding van de theorie voor natuurlijke consolidatie.
De wateronttrekking door drainage is uit te drukken als functie van de gemiddelde stijghoogte tussen de drains, door integratie van het theoretische verloop. Dat leidt tot uitbreiding van de eendimensionale bergingsvergelijking (1) met de omkaderde lekterm [Sellmeijer, 2002].

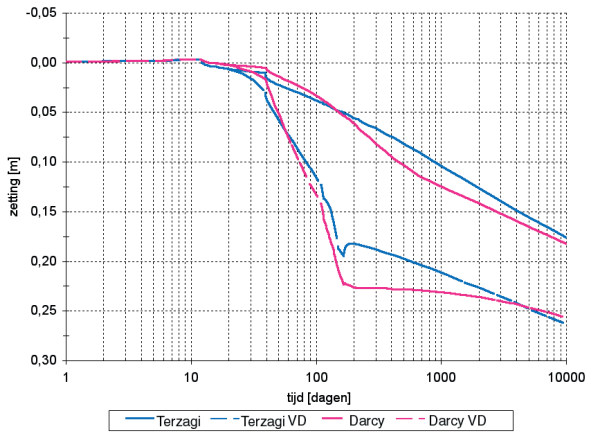
Berging: $$\frac{d\varepsilon_v}{dt} + k_v \frac{d^2\bar{\phi}}{dz^2} + \boxed{k_v \frac{\bar{\phi} - \phi_{drain}}{\lambda^2}} = 0 \qquad (1)$$

De bergingsvergelijking is om te schrijven in een consolidatievergelijking (2), door een elastisch verband aan te nemen tussen de verandering van rek en de verandering van wateroverspanning.

Consolidatie: $$\frac{d^2\bar{\phi}}{dz^2} = \frac{1}{c_v}\frac{d\bar{\phi}}{dt} + \boxed{\frac{\bar{\phi} - \phi_{drain}}{\lambda^2}}, \quad c_v = \frac{E_{oed} k_v}{\gamma} \qquad (2)$$

met

c_v	De verticale consolidatiecoefficiënt volgens Terzaghi
k_v	De verticale doorlatendheid volgens Darcy
ε_v	De verticale rek, positief bij samendrukking
$\bar{\phi}$	De in horizontale zin gemiddelde stijghoogte tussen de drains
ϕ_{drain}	De stijghoogte in de drain
z	De verticale coördinaat
t	De tijd
E_{oed}	De verticale samendrukbaarheid (oedometer-stijfheid)
γ	Het soortelijk gewicht
λ	De leklengte. Vergelijking (3) geeft de leklengte in geval van horizontale stroming naar sleuven en strips.



■ **Figuur 4:** Zettingsvoorspelling 5e Schipholbaan, met natuurlijke en geforceerde drainage, met Darcy- en Terzaghi-oplossing

$$\lambda^2 = \begin{cases} \frac{1}{12}\frac{k_v}{k_h}(D-d)^2 & \text{sleuf} \\ \frac{D^2}{8}\frac{k_v}{k_h}\left[\frac{D^2}{D^2-d^2}\ln\left(\frac{D}{d}\right)-\frac{1}{2}-\frac{D^2-d^2}{4D^2}\right] & \text{strip} \end{cases} \quad (3)$$

De leklengte in vergelijking (3) is een maat voor het horizontale invloedsgebied van een drain. Hoe kleiner de waarde, hoe groter de invloed. De leklengte is een functie van de verhouding tussen de afstand tussen de drains D, de equivalente afmeting van de drain d, en de verhouding tussen horizontale en verticale doorlatendheid $K_v/k_h \approx c_v/c_h$. Voor zandschermen is d gelijk aan de dikte van de sleuf. Voor strips is d gelijk aan de omtrek gedeeld door π .

Terzaghi-oplossing van de consolidatievergelijking

De Terzaghi-oplossing is in dit artikel de aanduiding voor een analytische oplossing van de uitgebreide consolidatievergelijking (2), met behulp van Fourier-reeksen. Voor radiale stroming komt deze oplossing exact overeen met de methode van Terzaghi-Barron-Carillo. Zonder verticale drains reduceert de oplossing tot de klassieke oplossing voor natuurlijke consolidatie.
De Terzaghi-oplossing houdt rekening met de tijdsafhankelijke ophoogfasering en onderdruk door middel van superpositie. Op elk gewenst tijdstip wordt per laag en belastingstap een consolidatiegraad $1-\Delta\phi_t/\Delta\phi_o$ bepaald. Deze wordt gebruikt voor een benaderende correctie van een gedraineerde vervorming $\Delta\varepsilon_{t\ \text{gedraineerd}}$. De gedraineerde vervorming wordt afzonderlijk berekend met een zettingsmodel als het isotachenmodel of het Koppejan-model.

$$\Delta\varepsilon_t = (1-\frac{\Delta\phi_t}{\Delta\phi_0})\Delta\varepsilon_{t,\text{gedraineerd}} \quad (4)$$

Vanwege de ontkoppeling tussen consolidatie en vervorming wordt geen rekening gehouden met de vertragende invloed van kruip op consolidatie.
De Terzaghi-oplossing geldt voor één laag. Een benaderende oplossing voor een lagenpakket wordt gevonden door in vergelijking (2) de verticale coördinaat voor laag i te schalen met de verticale consolidatiecoëfficiënt $c_{v,i}$.

$$\frac{\mathrm{d}^2\bar{\phi}}{\mathrm{d}\zeta^2} = \frac{\mathrm{d}\bar{\phi}}{\mathrm{d}t} + \frac{c_v}{\lambda^2}\left(\bar{\phi}-\phi_{\text{drain}}\right), \quad \zeta = \frac{z_i}{\sqrt{c_{v.i}}} \quad (5)$$

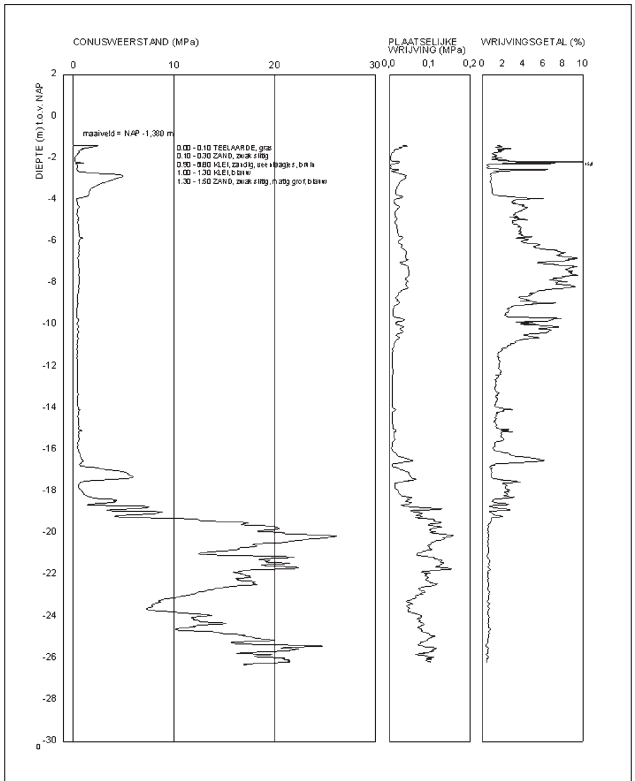
Dit leidt tot de volgende uitdrukkingen voor de equivalente verticale en horizontale consolidatiecoëfficiënten van het lagenpakket.

$$\frac{\sum h_i}{\sqrt{c_{v.\text{equivalent}}}} = \sum\frac{h_i}{\sqrt{c_{v.i}}}, \quad \frac{\sum h_i}{\sqrt{c_{h.\text{equivalent}}}} = \sum\frac{h_i}{\sqrt{c_{h.i}}} \quad (6)$$

Met h_i de dikte van laag i.

Darcy-oplossing van de bergingsvergelijking

De Darcy-oplossing is in dit artikel de aanduiding voor een numerieke oplossing van de bergingsvergelijking (1). In deze oplossing worden vervormingen en stijghoogten gekoppeld



■ **Figuur 5:** Sondering

geo 4-2004 opmaak 09-09-2004 18:38 Pagina 39

bepaald, door een directe combinatie van de bergingsvergelijking met een zettingsmodel als NEN-Bjerrum of Koppejan. Een stapsgewijze eindige differentie oplossing in de tijd is daarvoor noodzakelijk.
De Darcy-oplossing kent dus niet de beperkingen van de Terzaghi-oplossing. De Terzaghi- en Darcy-oplossing zijn theoretisch gelijk bij een enkele laag met constante stijfheid die geen kruip vertoont.

Combinatie met zakbaakfit

De Darcy-permeabiliteit en de Terzaghi-consolidatiecoëfficiënt zijn bekende parameters. In de praktijk kunnen ze echter maar met beperkte betrouwbaarheid uit proeven worden bepaald. Ook de samendrukkingsparameters en laagindeling zijn vaak niet nauwkeurig bekend. Dit beperkt de betrouwbaarheid van een initiële zettingsvoorspelling. Met behulp van zakbaakfits is een betere voorspelling mogelijk. Door aanpassing van de parameters worden de gemeten zettingen beter benaderd en worden de restzettingen nauwkeuriger voorspeld. Met de hierboven beschreven oplosmethoden kunnen we gedurende de fit rekening houden met verticale drains. Verticale drains beïnvloeden daarbij zowel de ligging als de vorm van de zettingscurve, zeker bij geforceerde onderdruk.

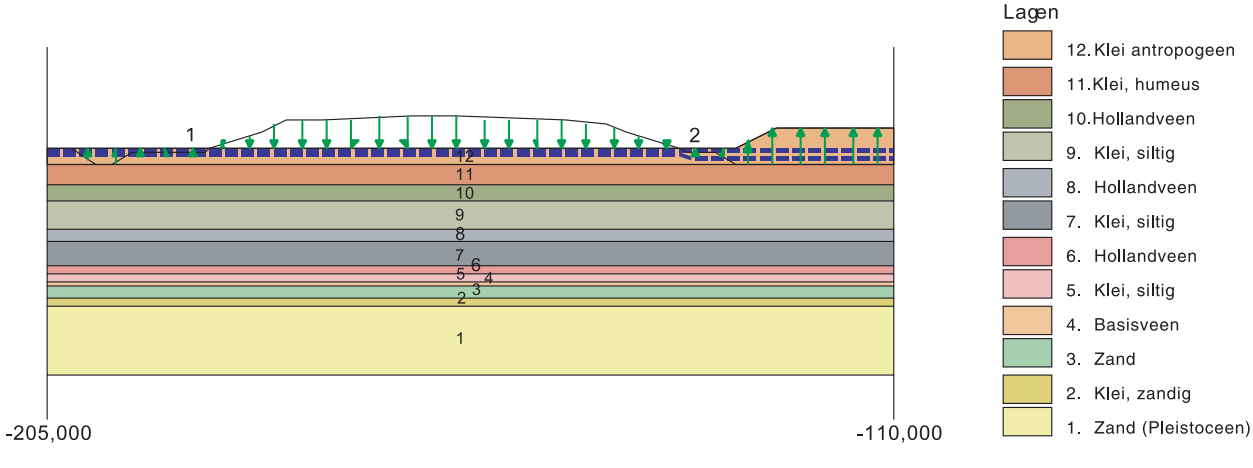
Voorbeeld: de 5e Schipholbaan met geforceerde drainage

De verschillen tussen beide consolidatiebeschrijvingen worden duidelijk aan de hand van een voorbeeld. We grijpen daarvoor terug op de zettingsberekening voor de 5e Schipholbaan, die al uitgebreid is beschreven in Geotechniek [Den Adel 2004]. De ophoging van 1,65 m is gemaakt in een cunet van 1 m diep. Daaronder zijn om de 3,5 m drainagesleuven gegraven. In de sleuven is een tijdelijke onderdruk van 50 kPa aangebracht (IFCO-methode).
De kruipgevoelige klei- en veenlagen zijn voor Nederlandse begrippen behoorlijk overgeconsolideerd, met een Pre Overburden Pressure (POP) die varieert tussen 40 en 145 kPa.
De oorspronkelijke berekening was uitgevoerd met de Darcy-oplossing en een freatische lijn die 1.65 m onder maaiveld lag. *Figuur 4* geeft een nieuwe zettingsvoorspelling met beide methoden, zowel zonder als met drainage. Om een zuivere vergelijking mogelijk te maken is de freatische lijn in de nieuwe berekeningen op het maaiveldniveau gelegd.

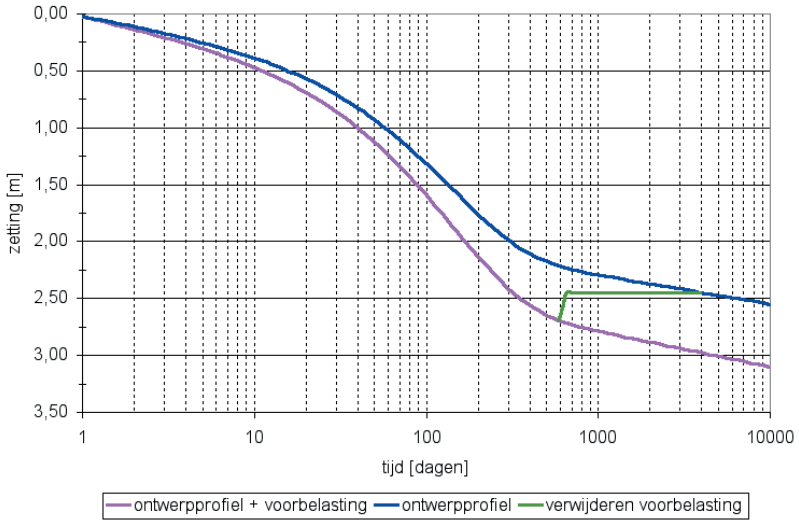
Zoals verwacht leiden de verticale drains tot versnelde primaire zetting. We zien daarin goed het effect van de tijdelijke onderdruk die is aangebracht vanaf 19 tot 165 dagen. Op het eerste gezicht is het opmerkelijk dat de kruiptak nauwelijks wordt beïnvloed door de tijdelijke onderdruk. Dat is te verklaren door te bedenken dat de kruipsnelheid alleen afneemt wanneer de grensspanning door voorbelasting duidelijk groter wordt [Den Haan, 2003]. Vanwege de grote initiële overconsolidatie en de geringe toegevoegde belasting is dat hier niet het geval.
Bij vergelijking van de Terzaghi- en Darcy-oplossingen zien we dat de Darcy-oplossing onder de grensspanning sneller reageert en boven de grensspanning trager. Dit komt omdat in de Darcy-berekening de stijfheid en kruip van de grond invloed hebben op de consolidatie. Onder de grensspanning neemt de stijfheid toe en reduceert de kruip. De uiteindelijke zettingen na 10.000 dagen zijn goed vergelijkbaar.

Voorbeeld: Zakbaakfit aansluiting rijksweg A4 te Schiedam

Het tweede voorbeeld betreft de herberekening van (rest)zettingen op basis van zakbaakmetingen. Het gaat hier om een ophoging voor de aansluiting op de A4 te Schiedam, waarvan de aanleg is gestart in mei 2000.
De toe- en afrit ligt westelijk van de A4 en noordelijk van de



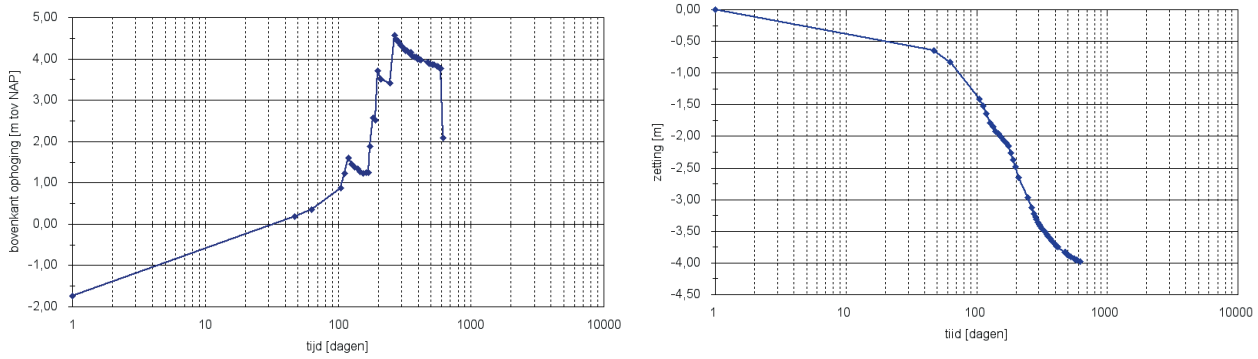
■ **Figuur 6:** Ondergrond en ontwerpprofiel



■ **Figuur 7:** Zettingen volgens de ontwerpberekening (Koppejan met aangepaste c_v volgens Terzaghi-Barron-Carillo)

Burgemeester L.A. Kesperweg te Schiedam. Het maaiveld lag gemiddeld op NAP – 1,8 m. De onderkant van het Holocene lagenpakket ligt op circa NAP – 18 m.
Deze gegevens zijn ontleend aan de sondering in *figuur 5*.
De bovenkant van het ontwerpprofiel van de toe- en afrit verloopt van circa NAP + 1,6 m tot NAP + 2,05 m.
De schematisatie van de ondergrond en het ontwerpprofiel is getekend in *figuur 6*.
Door de opdrachtgever Rijkswaterstaat Directie Zuid-Holland was als voorwaarde gesteld dat binnen 2 jaar aan het restzettingscriterium van 0,1 m moest worden voldaan. Uit benaderende ontwerpberekeningen (*figuur 7*) volgde dat daarvoor minimaal 17 maanden een voorbelasting tot het niveau van NAP + 5,5 m moest worden gehandhaafd. Verder moest onder de aardebaan verticale kunststof drainage worden aangebracht, met een breedte van 0,1 m en een dikte van 0,005 m in een driehoeksstramien met een h.o.h.-afstand van 1,0 m.
De gefaseerde ophoging in 6 maanden werd voor dit ontwerp geschematiseerd als een enkele ophoging met 3 maanden zettingstijd. Het toegepaste Koppejan model is, in tegenstelling tot het isotachen model, niet rechtstreeks bruikbaar voor weggenomen voorbelasting. De restzetting werd daarom afgeschat uit afzonderlijke berekeningen met en zonder voorbelasting. De aangenomen zetting bij het verwijderen van de voorbelasting is daarbij gereduceerd met een veiligheidsfactor 1,1.
De opgetreden zettingen zijn op 6 posities gemeten met zakbaken. Het gemeten ophoogschema en de gemeten zetting bij zakbaak 2 zijn weergegeven in *figuur 8*. Bij het wegnemen van de voorbelasting na ruim 600 dagen blijkt al ongeveer 4 m zakking te zijn opgetreden.

Om na te gaan of de (rest)zettingsinschatting moest worden aangepast, is een fit uitgevoerd voor zakbaak 2, met behulp van het gemeten ophoogschema en de gemeten zettingen. Voor de fit is gebruik gemaakt van het a,b,c isotachenmodel en het Terzaghi-consolidatiemodel met verticale drains. De toegepaste rekenparameters zonder fitfactor zijn gegeven in *tabel 1*. De samendrukkingsparameters a,b,c zijn bepaald uit correlaties met het volumegewicht γ [Den Haan, 2000]. De volumegewichten komen uit een proevenverzameling van het gebied. De samendrukbaarheid van de diepe zandlagen is verwaarloosd. Voor de overconsolidatie ratio OCR is voor alle lagen een waarde aangenomen van 1,25. De horizontale consolidatiecoëfficiënt c_h is gelijk gesteld aan de verticale coëfficiënt c_v.



■ **Figuur 8:** Gemeten ophoogschema, gemeten zettingen

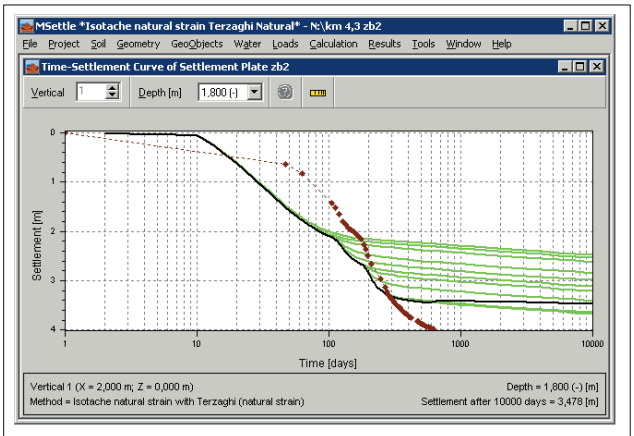
geo 4-2004 opmaak 09-09-2004 18:38 Pagina 41

grondsoort	γ [kN/m^3]	a [-]	b [-]	c [-]	c_v [m^2/s]
klei antropogeen	17,6	0,0127	0,0950	0,0038	$3{,}49 \cdot 10^{-8}$
klei, humeus	14,6	0,0189	0,1409	0,0056	$1{,}36 \cdot 10^{-8}$
veen (Hollandveen)	11,1	0,0335	0,2512	0,0126	$6{,}37 \cdot 10^{-8}$
klei, siltig	16,0	0,0155	0,1161	0,0046	$9{,}04 \cdot 10^{-8}$
veen (Basisveen)	11,5	0,0311	0,2331	0,0117	$6{,}37 \cdot 10^{-8}$
klei, zandig	18,0	0,0121	0,0906	0,0036	$9{,}04 \cdot 10^{-8}$

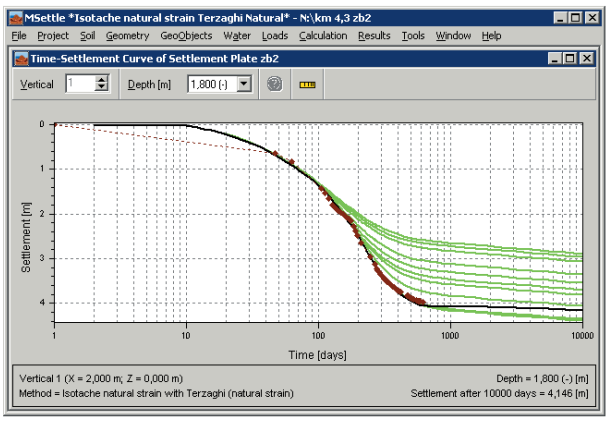
■ **Tabel 1:** Rekenparameters zonder fitfactor

Voor het freatisch niveau is een peil van NAP – 2,0 m gehanteerd en voor de stijghoogte in het Pleistocene zand een peil van NAP – 1,25 m. Aangenomen is dat het verloop van de waterspanningen over de diepte lineair is.

Met hulp van MSettle's kleinste kwadraten procedure vinden we voor deze parameters de onderstaande fitfactoren: OCR: 1,15, c_v: 0,25, a: 1, b: 1,33, c: 1,36.
Dit zijn vermenigvuldigingsfactoren die gelden voor alle lagen. *Figuur 9* toont de berekening zonder fitfactor en *figuur 10* de berekende zetting met fitfactor.
De rode stippen geven de gemeten zetting. De zwarte lijn geeft de voorspelling tengevolge van de hele belastingsgeschiedenis. De berekende knik op 10 dagen wordt veroorzaakt door het aanbrengen van de verticale drains. De groene lijnen geven na elke belastingsverandering de zetting die zou optreden wanneer daarna geen belastingsverandering meer zou plaatsvinden.
Voor de zakbaakfit wordt een correlatiefactor van 0,99 gevonden. Het blijkt in dit geval dus goed mogelijk om de voorspelling te fitten op de gemeten zettingen, ook wanneer verticale drains worden toegepast. Door de fit ontstaat meer zekerheid over de te verwachten restzettingen.



■ **Figuur 9:** Berekening zonder fit (a,b,c isotachen met Terzaghi-consolidatie en verticale drains)



■ **Figuur 10:** Berekening met fit (a,b,c isotachen met Terzaghi-consolidatie en verticale drains)

Referenties

[1] K. Terzaghi & R.B. Peck, Soil Mechanics in Engineering Practice, 1967
[2] R.A. Barron, Consolidation of fine-grained soils by drainwells, Trans ASCE 113, 718-742, 1948
[3] N. Carillo, Simple two and three-dimensional cases in the theory of consolidation of soils, Journal of Math. Phys. 21, 1-5, 1942
[4] Construeren met grond, CUR-publicatie 162, 1992
[5] C.J Dykstra & A.G. Joling, Praktijkwaarde consolidatiecoëfficiënt bepaald met Asaoka-methode, Geotechniek 2001 (2), 2001
[6] J.B. Sellmeijer, Vertical Drains simulated as Leakage, Learned and Applied Soil Mechanics out of Delft 75-80, 2002
[7] E.J. Den Haan & J.B. Sellmeijer, Calculation of soft ground settlement with an isotache model. "Soft Ground Technology", ASCE Geotech. Spec. Publ. Nr 112, pp 94-104, 2000
[8] E.J. Den Haan, Het a,b,c-isotachenmodel: hoeksteen van een nieuwe aanpak voor zettingsberekeningen. Geotechniek 2003 (4) 28-35, 2003
[9] E.J. Den Haan & H.M. Van Essen & M.A.T. Visschedijk & J. Maccabiani, Isotachenmodellen: Help, hoe kom ik aan de parameters, Geotechniek 2004 (1) 62-69, 2004
[10] W.O. Molendijk & C.J. Dykstra, Restzettingen na oplevering: het belang van een verbeterde voorspellingskracht. Casus Betuweroute Gorinchem. Geotechniek 2003 (4) 36-42, 2003
[11] H. Den Adel & V. Trompille & H. Sellmeijer & M. Van, Geforceerde drainage 5e Schipholbaan, Geotechniek 2004 (2) 58-64, 2004