

# Indringing van waterspanning in samendrukbare gelaagde grondpakketten

## Uitwerking voor de Lekdijken in de Alblasserwaard

Dr. S. Schoofs

Shell International Exploration and Production (tot voor kort werkzaam bij GeoDelft)

Ing. T.A. van Duinen

GeoDelft

### SAMENVATTING

De mate waarin een waterstandsverhoging op de rivier resulteert in een verhoging van de waterspanning in het slecht doorlatende grondpakket, uitgedrukt in de zogenaamde indringingslengte, is belangrijk voor de berekening van de macrostabiliteit van dijken in verband met het faalmechanisme 'opdrijven'. Tot op heden werd de slecht doorlatende deklaag daarbij geschematiseerd door een enkele homogene grondlaag. In een onderzoek naar de macrostabiliteit van de Lekdijken in de Alblasserwaard is de gelaagdheid van het slecht doorlatende pakket expliciet meegenomen in de berekening van de indringingslengte. In combinatie met langduriger maatgevend hoogwater blijkt dit tot een significant grotere indringingslengte te leiden.

### INLEIDING

Veranderende waterstandstatistiek van de Nederlandse rivieren, samen met nieuwe inzichten en rekenmodellen, heeft de laatste jaren geresulteerd in een langere duur van de maatgevende hoogwaterstand voor toetsing en ontwerp van waterkeringen. In stabiliteitsberekeningen voor waterkeringen moet daarom in rekening worden gebracht dat een waterstandsverhoging op de rivier via de watervoerende zandlaag verder dan voorheen doorwerkt in de slecht doorlatende, samendrukbare deklaag onder en achter de dijk. De mate waarin de waterstandsverhoging op de rivier resulteert in een verhoging van de waterspanning in het slecht doorlatende grondpakket, de zogenaamde indringingslengte, is een belangrijke parameter in de berekening van de macrostabiliteit van dijken. Een toename van de indringingslengte met een factor 2 resulteert in een factor 2 tot 5 toename van de kans op falen van een representatief dwarsprofiel van de Lekdijken in de Alblasserwaard.

In eerdere modellen voor het bepalen van de indringingslengte is de slecht doorlatende deklaag geschematiseerd door een enkele

homogene grondlaag. In een onderzoek naar de macrostabiliteit van de Lekdijken in de Alblasserwaard is de intrinsieke gelaagdheid van het slecht doorlatende pakket expliciet meegenomen in de berekening van de indringingslengte. De combinatie van een langere duur van de maatgevende hoogwaterstand en het in rekening brengen van de gelaagdheid van het slecht doorlatende grondpakket leidt tot een significant grotere indringingslengte dan tot nu toe wordt aangenomen. Voor een aantal typen grondopbouw kan het water zelfs het gehele pakket doordringen.

### ACHTERGROND

In verband met de vijfjaarlijkse toetsing van de waterstaatkundige veiligheid wordt een onderzoek naar de macrostabiliteit bij opdrijven uitgevoerd voor de primaire waterkeringen langs de Lek in de Alblasserwaard. Dit betreft een traject van 17 km lopend van Nieuw-Lekkerland via Streefkerk tot Groot-Ammer (zie figuur 1). In het benedenriviereengebied is de binnenwaartse macro-instabiliteit bij opdrijven in veel gevallen het maatgevende faalmechanisme voor de sterkte van de waterkeringen langs de grote rivieren.

Door het toepassen van probabilistische stabiliteitsanalyses wordt geprobeerd een zo groot mogelijk deel van de Lekdijken goed te keuren voor het toetsonderdeel macrostabiliteit. Probabilistische stabiliteitsanalyses zijn analyses volgens de waarschijnlijkheidsleer op basis van gemiddelden en spreidingen van de grondeigenschappen. In de adviespraktijk is het gebruikelijk stabiliteitsanalyses uit te voeren met rekenwaarden (karakteristieke waarden met partiële veiligheidsfactoren) van de grondeigenschappen. Met probabilistische stabiliteitsanalyses kan het veiligheidsniveau dat in de TAW-leidraden wordt nagestreefd met de algemeen geldende partiële veiligheidsfactoren, worden toegespitst op de specifieke situatie van de Lekdijken met de daar aangetroffen gemiddelden en spreidingen van de eigenschappen van de grond. Het toetscriterium voor binnenwaartse macrostabiliteit kan daarmee direct gekoppeld worden aan de overschrijdingsfrequentie van de maatgevende waterstand van het dijkkringgebied. Deze aanpak leidt tot meer realistische en ook gunstiger resultaten dan een analyse op basis van rekenwaarden van de grondeigenschappen.

In de berekening van de macrostabiliteit bij opdrijven zijn de hoogte van de waterspanningen in het slecht doorlatende pakket ter plaatse van het achterland van grote invloed. Deze waterspanningen worden grotendeels beïnvloed door de indringing van rivierwater dat, via het eerste watervoerende pakket onder de dijk door, het slecht doorlatende pakket indringt (zie figuur 2).

De uitgangspunten van dijkversterkingsontwerpen van de Lekdijken in de Alblasserwaard van de tachtiger jaren voldoen niet meer, vanwege de steeds langere duur van de hoge waterstanden op de rivier. De in figuur 3 weergegeven zogenaamde waterstandsverlooptlijnen zijn door de Provincie Zuid-Holland berekend, gebruikmakend van de waterstandstatistiek van Hoek van Holland in combinatie met de statistiek van Lobith [GeoDelft, 2004]. In de figuur is de toename van de tijdsduur van de hoogwatergolf met de tijd zichtbaar.

De mate van indringing van de waterspanning vanuit het watervoerende pakket in het slecht doorlatende, samendrukbare pakket is tot nu toe bepaald, uitgaande van een homogene samenstelling van dit pakket. Daarbij is een blokvormige belasting aan de onderkant van het slecht doorlatende pakket verondersteld. De indringingslengte kan op basis van deze aannamen goed worden benaderd met de lengte  $L_i$ , zoals beschreven in bijlage b4.3 in [TAW, 2003]:

$$L_i = 4\sqrt{c_v(t-t_0)} \quad (1)$$

Hierin is  $t$  de tijd vanaf het moment van de belasting op  $t = t_0$ . Verder is  $c_v$  de consolidatiecoëfficiënt van het slecht doorlatende pakket (voor de precieze definitie, zie 'Berekeningsmethode'). Deze benadering komt neer op een afstand, waarbij nog ongeveer 5% aanpassing optreedt. Met de voor de Alblasserwaard geldende waarden voor de consolidatiecoëfficiënt  $c_v$  en de hydraulische randvoorwaarden van de 80-er jaren betekent deze benadering dat met een verhoging van de waterspanning in de onderste 0,5 à 1,5 m van de klei- en veenlagen kan worden volstaan.

In werkelijkheid bestaat de slecht doorlatende deklaag echter uit verschillende gelaagde afzettingen met relevante verschillen in elastische eigenschappen en doorlatendheid. De vraag doet zich hierbij voor in welke mate de indringing in een gelaagd pakket anders is



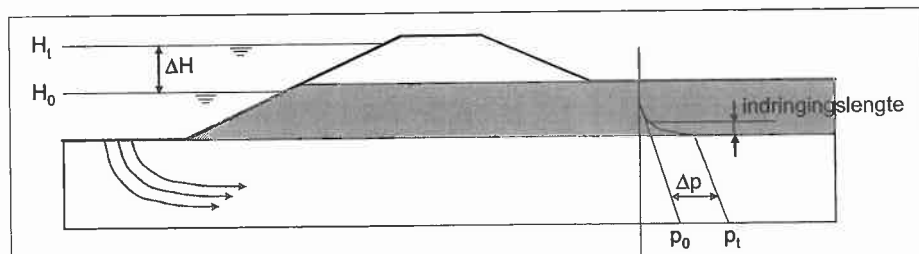
↑ **Figuur 1** Lekdijk Alblasserwaard: van deze dijk is een probabilistische beschouwing gemaakt. Water in de rivier stroomt tijdens een maatgevende hoogwaterstand door het watervoerende pakket onder de dijk door en dringt ter plaatse van het achterland het slecht doorlatende pakket in. De mate van indringing wordt bepaald door de tijdsduur van de hoogwatergolf en de opbouw en eigenschappen van de slecht doorlatende grond in het achterland.

dan in een homogeen pakket en hoe deze op eenvoudige wijze kan worden geschematiseerd voor de adviespraktijk. Om deze reden is in detail de indringingslengte in een gelaagd (tweelaags), elastisch deformerend pakket onderzocht als functie van het tijdsafhankelijke waterspanningsverloop in de watervoerende zandlaag. In de berekeningen wordt gevarieerd met de periode van de (fictieve) afvoergolf, de amplitude van de (gesuperponeerde) getijdengolf en de consolidatiecoëfficiënten van beide slappe lagen. Als case wordt de situatie van de Lekdijken te Nieuw-Lekkerland, Streefkerk en Groot-Ammer in de Alblasserwaard beschouwd.

#### PRAKTIJKMETINGEN

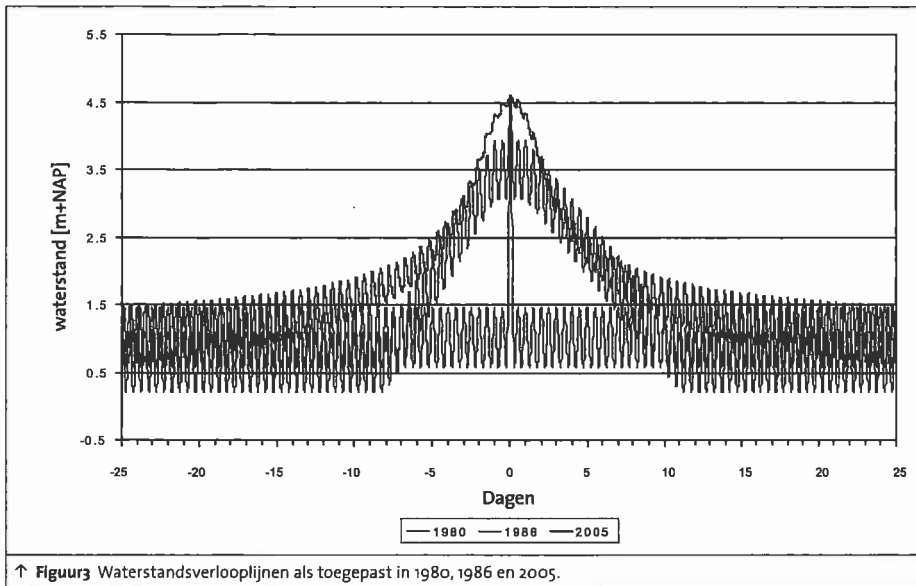
In het kader van de voorbereiding van de proeven op het Proefvak 'Actuele Sterkte' te Bergambacht is een literatuuronderzoek uitgevoerd naar de indringing van waterspanning in de deklaag vanuit een watervoerende zandlaag [Delft Cluster, april 2001]. Om de theorie en de adviespraktijk te toetsen, zijn meetgegevens van de volgende drie locaties vergeleken met verwachtingen op basis van de theorie:

- Ravenswaaij: meetlocatie in de Lekdijk (hmp 279), periode november 1987 tot juni 1988 [Heidemij, 1988];
- Zennewijnen: meetlocatie in de Waaldijk (hmp 37), periode november 1987 tot juni 1988 [Heidemij, 1988];



↑ **Figuur 2** Koppeling van de waterstand (sverlooptlijn) op de rivier  $H_1$  en de indringing van waterspanning via de watervoerende zandlaag (geel) onder de dijk (blauw) door het slecht doorlatende pakket in (groen). Naarmate de duur van het hoogwater groter is, dringt de waterspanning verder in.

## Indringing van waterspanning in samendrukbare gelaagde grondpakketten



↑ **Figuur 3** Waterstandsverlooptlijnen als toegepast in 1980, 1986 en 2005.

• Oosterscheldedijken: meetlocatie Gouweveer, periode 1987 tot 1989 [GeoDelft, 1989].

Op basis van metingen van de waterspanning bij Zennewijnen en Ravenswaaij blijkt gedurende een hoge rivierstand de indringingslengte in werkelijkheid 3 à 4 m te kunnen bedragen. De duur van een hoge rivierstand bedraagt 44 à 68 dagen.

Voor de meetlocaties Zennewijnen en Ravenswaaij is op basis van de formule voor de bepaling van de indringingslengte en consolidatiecoëfficiënten bij belastingen een indringingslengte berekend van 1 à 2,5 m, afhankelijk van de duur van de hoge rivierstand. Op basis van een consolidatiecoëfficiënt bij ontlasten bedraagt de berekende indringingslengte 2,8 à 3,8 m. De laatstgenoemde indringingslengten komen redelijk overeen met de gemeten waterspanningen.

Met name de meetlocatie in Ravenswaaij geeft een sterke tijdsafhankelijkheid te zien. De maximale indringing in de afdekkende klei- en veenlagen wordt pas bereikt als de stijghoogte in de watervoerende zandlaag alweer min of meer een gemiddelde waarde heeft bereikt (zie de figuren 4 en 5).

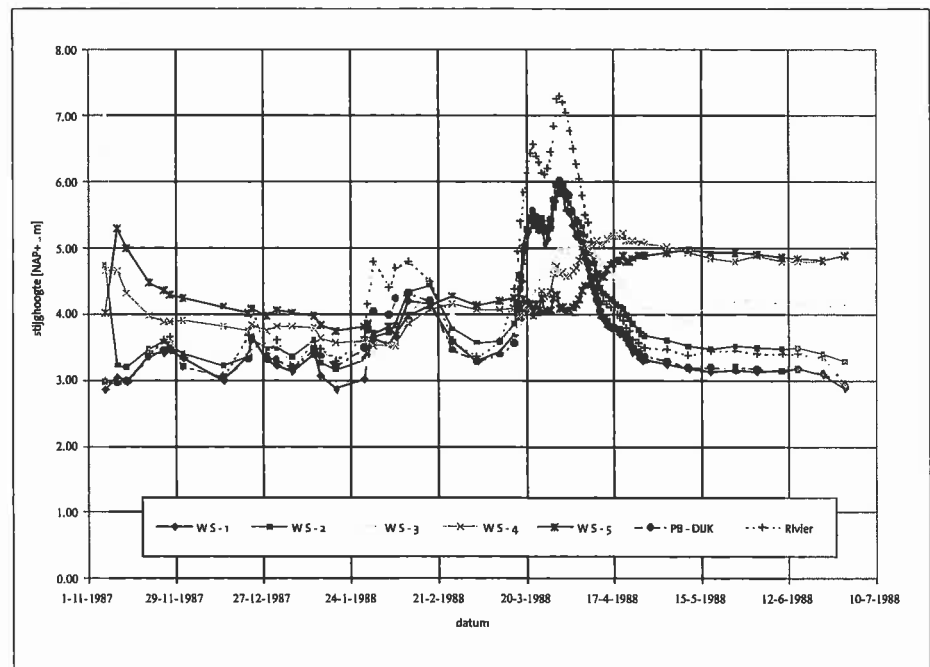
Bij de meetlocatie Gouweveer blijkt op basis van metingen van de waterspanning een indringingslengte van 1,0 à 1,5 m op te treden bij de normale eb- en vloedbeweging. De indringing gedurende een normale eb- en vloedbeweging geeft aanleiding om te veronderstellen dat gedurende een storm van 2 dagen of meer een indringing van 3 à 4 m zou kunnen optreden.

Voor een dwarsprofiel van de Lekdijk in het Proefvak 'Actuele Sterkte' te Bergambacht zijn stabiliteitsberekeningen op basis van rekenwaarden van de sterkte uitgevoerd met verschillende indringingslengten en stijghoogten in de watervoerende zandlaag. Als gevolg van de variatie van de indringingslengte en de stijghoogte varieert de evenwichtsfactor in deze gevoeligheidsberekeningen met 0,05 tot 0,15 [Delft Cluster, januari 2001].

### GRONDOPBOUW ALBLASSERWAARD

De Holocene deklaag is in de Alblasserwaard over het algemeen opgebouwd uit een aantal in geotechnische zin te onderscheiden lagen. In tabel 1 is de geotechnische schematisatie van de laagopbouw (van maaiveld naar beneden) gegeven. In de tabel zijn ook waarden voor de consolidatiecoëfficiënten gegeven die representatief zijn voor de Alblasserwaard. Deze waarden zijn verkregen voor belastsituaties. Het proces van indringing van waterspanning komt eerder overeen met een ontlastsituatie. Het is bekend dat de consolidatiecoëfficiënt bij ontlasting of herbelasting ongeveer 3 tot 10 maal hoger is dan de consolidatiecoëfficiënt bij primaire belasting. De mogelijke ondergrondsschematisaties zijn weergegeven in figuur 6. Hierbij is het mogelijk dat het laagpakket Basisveen of de Formatie van Kreftenheye ontbreken.

Naast deze vaak voorkomende typen grondopbouw komt het ook regelmatig voor dat het Holocene pakket bestaat uit zandige afzettingen. De waterspanningsopbouw in deze zogenaamde donken en geulen worden in deze studie naar de indringingslengte niet beschouwd. Het faalmechanisme macro-instabiliteit bij opdrijven met het drukstaafmechanisme speelt hier namelijk geen rol; de waterspanning wordt op een andere wijze geschematiseerd.



↑ **Figuur 4** Meting van de waterspanning bij de Lekdijk in Ravenswaaij (hmp 279) in de periode november 1987 tot juni 1988.

laag (met gebruikte afkorting)	geologische formatie	lithologie	laagdikte [m]	$c_v$ [ $m^2/s$ ]
Tiel (TIEL)	Echteld	klei	1 tot 5	$5 \times 10^{-6}$
Gorkum Licht (GL)	Echteld	organische klei	0 tot 8	$5 \times 10^{-8}$
Gorkum Zwaar (GZ)	Echteld	organische klei	0 tot 8	$3 \times 10^{-7}$
Hollandveen (HV)	Nieuwkoop	Veen	0 tot 8	$4 \times 10^{-7}$
Basisveen (BV)	Nieuwkoop	kleilig veen / venige klei	0 tot 1	$5 \times 10^{-7}$ tot $1 \times 10^{-8}$
Kreftenheye (KR)	Boxtel	leem, zandige klei of kleilig zand	0 tot 2	$1 \times 10^{-4}$ tot $1 \times 10^{-7}$

↑ Tabel 1 Schematische laagopbouw, geologische formatie, lithologie, dikte en (range van)  $c_v$ 's (voor een belasting) van het slappe lagenpakket van maaiveld naar beneden in de Alblasserwaard.

**BEREKENINGSMETHODE**

*Mathematische beschrijving van de indringing*

De indringing van de waterspanning in het kleilige en/of venige grondpakket is een tijdsafhankelijk verschijnsel als gevolg van de vertraging die optreedt doordat een volumeverkleining gepaard gaat met een verkleining van het poriënvolume (en dat kan alleen als het water uit de poriën geperst wordt). Dit proces, ook wel consolidatie genoemd, hangt dan ook af van de samendrukbaarheid en de doorlatendheid van de grond.

De beschouwing van de consolidatie wordt beperkt tot het eendimensionale geval, waarbij de grond zijdelings niet kan vervormen en de afstroming van het water alleen in verticale

richting kan plaatsvinden. De wiskundige beschrijving van het proces gaat als eerste uit van de evenwichtsvergelijking van een lineair elastisch deformerend materiaal, op basis van Terzaghi's principe van de effectieve spanningen:

$$\Delta \epsilon_{vol} = \Delta \epsilon = -m_v \Delta \sigma' = -m_v (\Delta \sigma - p) \quad (2)$$

met  $\Delta \epsilon_{vol}$  [-] de toename van de volumerek (in het eendimensionale geval is dit gelijk aan de incrementele verticale rek  $\Delta \epsilon$  [-]),  $m_v$  [ $m^2/N$ ] de samendrukbaarheid,  $\Delta \sigma'$  [ $N/m^2$ ] de toename van de verticale effectieve spanning en  $\Delta \sigma$  [ $N/m^2$ ] de toename van de totaalspanning en  $p$  [ $N/m^2$ ] de incrementele waterspanning. Door het veronderstellen van continuïteit van

het poriënwater wordt de zogenaamde bergingsvergelijking verkregen (de afleiding van deze differentiaalvergelijking staat uitvoerig beschreven in [Verruijt, 1999]):

$$\frac{\partial \Delta \epsilon}{\partial t} = -n\beta \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{\partial q_z}{\partial z} \quad (3)$$

met  $t$  [s] tijd,  $n$  [-] de porositeit,  $\beta$  [ $N/m^2$ ] de samendrukbaarheid van het in de poriën aanwezige water,  $q_z$  [ $m/s$ ] het specifieke debiet in de z-richting en  $\partial/\partial z$  [ $1/m$ ] de afgeleide naar de z-coördinaat.

De grootte van het specifieke debiet  $q_z$  hangt samen met de drukgradiënt volgens de wet van Darcy

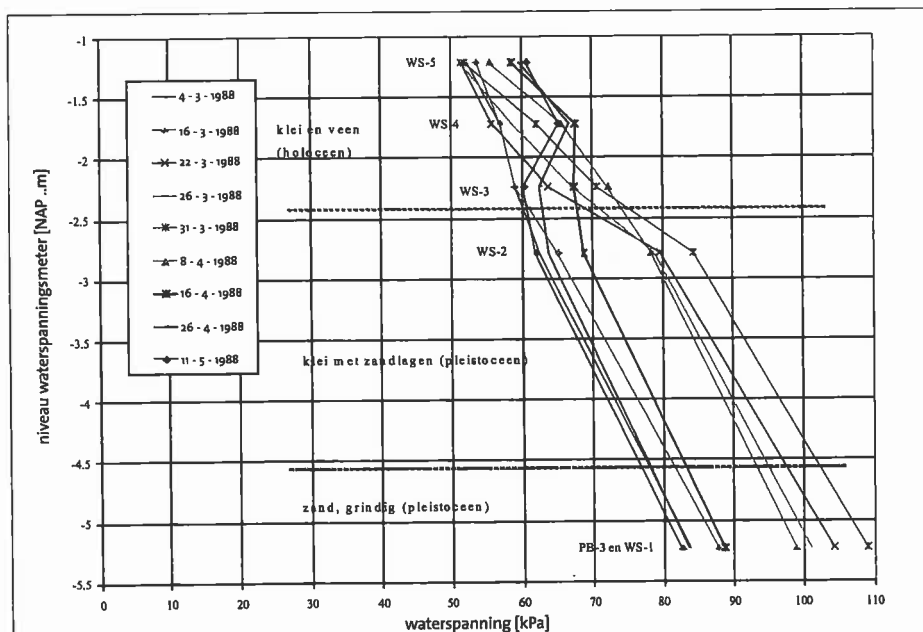
$$q_z = -\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (4)$$

met  $k$  [ $m/s$ ] de doorlatendheidscoëfficiënt en  $\gamma_w$  [ $N/m^3$ ] het gewicht van het water. Combinatie van de vergelijkingen (2), (3) en (4) resulteert in de eendimensionale consolidatievergelijking

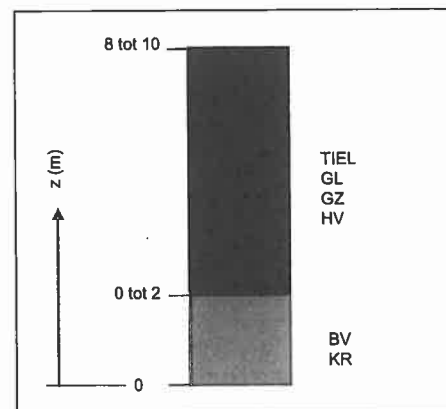
$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{m_v}{m_v + n\beta} \frac{\partial \Delta \sigma}{\partial t} + c_v \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \quad (5)$$

met  $c_v$  [ $m^2/s$ ] de consolidatiecoëfficiënt gelijk aan  $c_v = k / (\gamma_w (m_v + n\beta))$ .

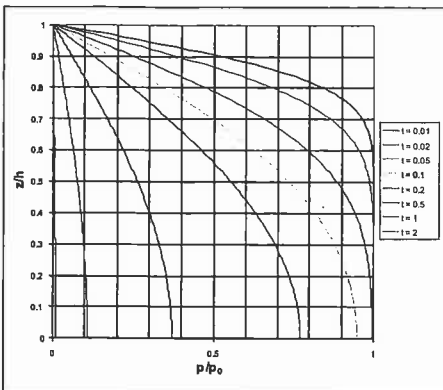
Wanneer wordt aangenomen dat de totaalspanning tijdens het proces niet verandert,  $\Delta \sigma = 0 \text{ N/m}^2$  (oftewel de belasting op de grond is constant tijdens de consolidatie), overeen-



↑ Figuur 5 Meting van de waterspanning bij de Lekdijk in Ravenswaaij (hmp 279). De waterspanning is uitgezet tegen de diepte voor verschillende tijdstippen.



↑ Figuur 6 Ondergrondschematisatie van het slappe lagenpakket in de Alblasserwaard als functie van de afstand tot de basis van het zand z. Zie tabel 1 voor de gebruikte afkortingen voor de lithostratigrafie.



↑ **Figuur 7** Resultaten van de (met  $p_0$  [m] geschaalde) waterspanning als functie van de (met  $h$  [m] geschaalde) plaatshoogte  $z$  op verschillende tijdstippen van een testberekening voor eendimensionale consolidatie op een homogeen monster. De resultaten komen overeen met de klassieke oplossing voor eendimensionale consolidatie.

voudigt vergelijking (5) in:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \quad (6)$$

Door de toename van de waterspanning  $p$  te delen door het volumegewicht van water wordt een toename van de stijghoogte  $\Delta h$  [m] verkregen.

**Numerieke berekeningsmethode**

De zogenaamde diffusievergelijking (6) is gediscretiseerd met behulp van de eindige volume methode [Wesseling, 2001]. Deze methode gaat uit van continuïteit van fluxen. De methode is eerder veelvuldig gebruikt voor andere toepassingen (zie bijvoorbeeld [Schoofs and Spera, 2003]), maar is voor deze studie aangepast voor de berekening van consolidatie met tijdsafhankelijke randvoorwaarden.

**Verificatie**

De berekeningsmethode is eerder geverifieerd voor de berekening van diffusief warmtetransport door een tweedimensionaal poreus medium met een ruimtelijk variabele thermische diffusiviteit [Schoofs, 1999]. De consolidatievergelijking (5) is identiek aan de warmtevergelijking wanneer de thermische diffusiviteit wordt vervangen door de consolidatiecoëfficiënt en de temperatuur door de druk.

Als voorbeeld van een verificatieberekening wordt de consolidatie van een homogeen monster beschouwd. Hiervoor is de ééndimensionale samendrukking nagerekend, zoals is

beschreven in Verruijt [1999]. In het beschouwde probleem heeft een monster ten gevolge van een bovenbelasting een initiële waterspanning  $p_0$  gekregen. Vervolgens gaat het monster op  $t = 0$  aan de bovenzijde consolideren (éenzijdige afstroming), waardoor aan de bovenkant op  $t = 0$  een waterspanning  $p/p_0 = 0$  ontstaat. De waterspanning in het monster neemt af met de tijd volgens de analytische oplossing [Verruijt, 1999]:

$$\frac{p}{p_0} = \frac{4}{\pi} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{(-1)^{j-1}}{2j-1} \cos\left[(2j-1)\frac{\pi z}{2h}\right] \exp\left[-(2j-1)^2 \frac{\pi^2 c_v t}{4 h^2}\right] \quad (7)$$

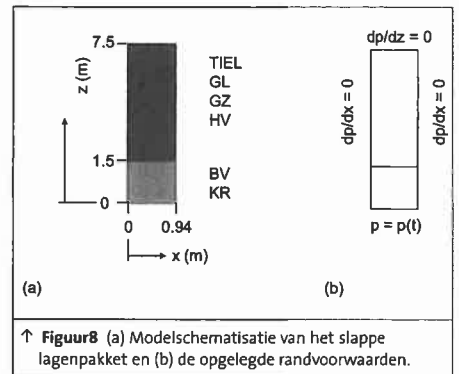
Het hier beschouwde probleem is in essentie ééndimensionaal, de numerieke methode is echter tweedimensionaal. Om de eendimensionale situatie te benaderen is een 2D gebied met een grote aspect ratio (hier 1/8) gekozen.

*Figuur 7* laat de resultaten zien voor een monster met hoogte  $h$  en begin-waterspanning  $p/p_0 = 1$ . Op  $t = 0$  dag wordt de waterspanning aan de bovenkant van het monster op  $p = 0$  N/m<sup>2</sup> gesteld. De resultaten zijn te zien als functie van de tijd voor een monster met een consolidatiecoëfficiënt gelijk aan  $c_v = 1$  m<sup>2</sup>/dag. De resultaten komen zeer goed overeen met de analytische oplossing gegeven in Verruijt [1999].

**Berekeningsopzet**

Voor de berekeningen van de indringingslengte is een pakket verondersteld met een totale dikte van 7,5 m, zie *figuur 8*. Net als in de testberekening is een aspect ratio van het berekeningsdomein van 1/8 verondersteld. In verticale richting is het domein opgedeeld in 128 volumecellen, in horizontale richting in 16 cellen.

In de berekeningen is de opbouw zoals eerder beschreven, geschematiseerd met behulp van twee horizontale lagen. De onderste laag heeft



↑ **Figuur 8** (a) Modelschematisatie van het slappe lagenpakket en (b) de opgelegde randvoorwaarden.

een dikte van 1,5 m en representeert de al dan niet aanwezige Formatie van Kreftenheye (KR) of het Basisveen laagpakket van de Formatie van Nieuwkoop (BV). De bovenste laag is 6 m dik; deze laag representeert de lagen Tiel, Hollandveen en/of Gorkum (Tiel, HV, GZ, GL). Met de consolidatiecoëfficiënten van beide lagen is gevarieerd, om zo de meest gangbare ondergrondschematisaties te beschouwen.

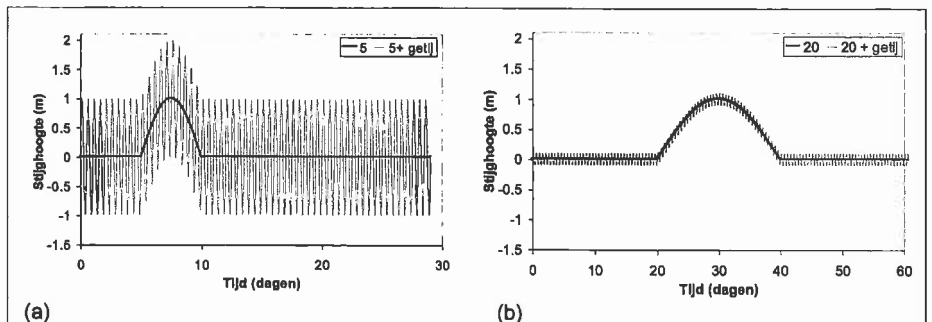
Als initiële conditie is de waterspanning overal gelijkgesteld aan  $p = 0$  kN/m<sup>2</sup>.

De bovenzijde en de twee verticale zijden zijn ondoorlatend verondersteld (zie ook *figuur 8b*). Aan de onderzijde van het domein wordt een tijdsafhankelijke drukrandvoorwaarde opgelegd. Met de vorm van deze randvoorwaarde is gevarieerd, met als doel de invloed van de duur van de afvoergolf en de invloed van het getij op de indringingslengte te bepalen.

**BEREKENINGSRISULTATEN**

In totaal zijn 54 berekeningen uitgevoerd. Bij deze berekeningen zijn combinaties gemaakt met:

- de tijdsduur van de waterstandsverhoging, namelijk 5 dagen en 20 dagen;



↑ **Figuur 9** Randvoorwaarden met en zonder getijdschommelingen voor afvoergolven met een periode van (a) 5 en (b) 20 dagen.

- de waterstandsverhoging met en zonder getijde;
- consolidatiecoëfficiënten voor belasten en voor ontlasten c.q. herbelasten;
- combinaties met hoge, gemiddelde en lage  $c_v$ -waarden in de twee grondlagen van het model.

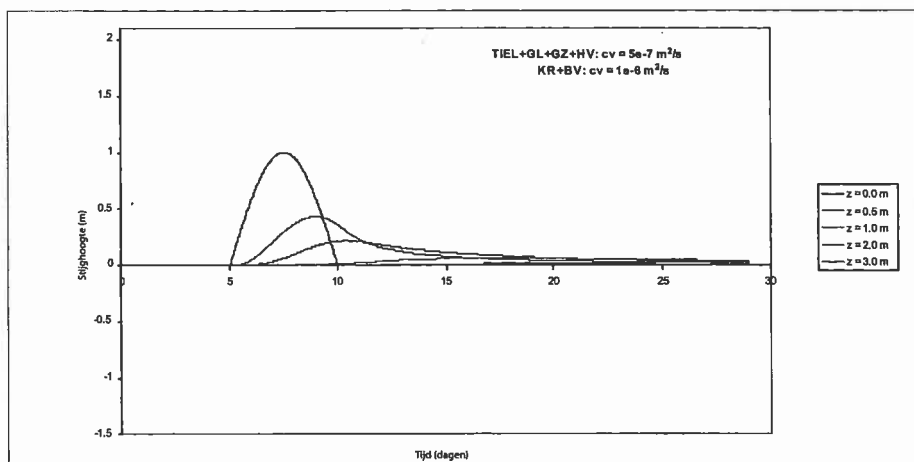
Er worden twee sinusvormige afvoergolven beschouwd, één met een tijdsduur van 5 dagen en één met een tijdsduur van 20 dagen (zie figuur 9). Voor iedere afvoergolf wordt de situatie met en zonder getijdeninvloed beschouwd. Voor de golf van 5 dagen is de amplitude van het getijde even groot als de amplitude van de afvoergolf. Voor de golf van 20 dagen is de amplitude van het getijde 0,1 maal de amplitude van de afvoergolf.

De afvoergolf van 5 dagen beschrijft de situatie in de buurt van Nieuw-Lekkerland redelijk, waar de waterstandstatistiek van Hoek van Holland dominant is in de definitie van de afvoergolf. De afvoergolf van 20 dagen representeert de situatie in de buurt van Groot-Ammers, waar veel invloed is van de waterstandstatistiek van Lobith. De getijdenschommelingen zijn gesuperponeerd op de afvoergolf. Op deze manier kan eenvoudig worden onderzocht of het getijde van invloed is op de indringingslengte.

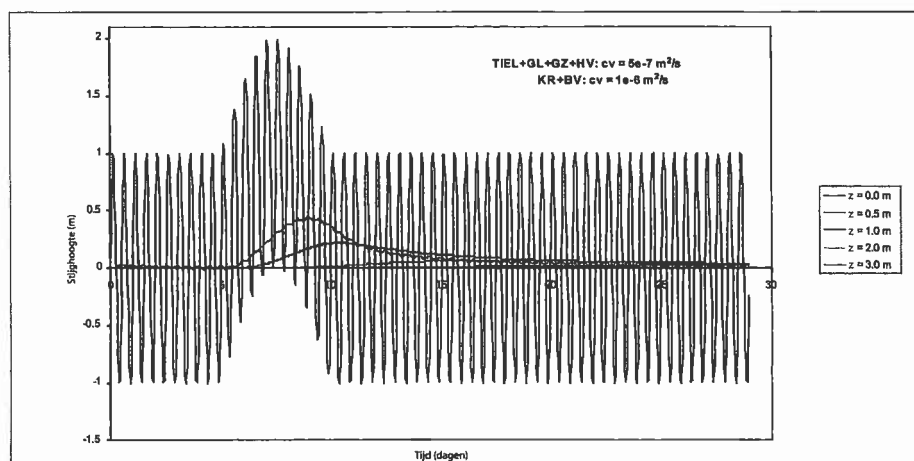
In de berekeningen zijn  $c_v$ 's toegepast voor belasten en ontlasten of herbelasten. In deze paragraaf worden de resultaten voor belastwaarden beschreven. De berekeningen met  $c_v$ 's voor ontlasten zijn alleen voor de situatie zonder getijde uitgevoerd; de resultaten zijn in de discussie opgenomen. De resultaten worden beschreven ten opzichte van de hydrostatische situatie, gedefinieerd als de situatie met een stijghoogte gelijk aan 0. Voor de eenvoud wordt de bovenste laag aangeduid met TIEL+GL+GZ+HV, de onderste laag met KR+BV.

In de berekeningen neemt de consolidatiecoëfficiënt (voor belasten) voor de onderste grondlaag van het model (KR+BV) de waarden  $c_v = 1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  of  $1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  aan. De bovenste grondlaag (TIEL+GL+GZ+HV) heeft ook drie variaties in de consolidatiecoëfficiënt:  $c_v = 5 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  of  $5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . Hierbij is de proevenverzameling van de Alblasserwaard als indicatie gebruikt.

Figuur 10 geeft de randvoorwaarde en de waterspanningsverhoging op een aantal punten in de verticaal als functie van de tijd voor de bere-



↑ **Figuur 10** Randvoorwaarde (stijghoogte op  $z = 0,0 \text{ m}$ ) en de waterspanningsverhoging op een aantal punten in de verticaal als functie van de tijd voor de situatie van een golf met een periode van 5 dagen zonder getijdenschommelingen. De consolidatiecoëfficiënten zijn voor BV+KR  $c_v = 1 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  en voor TIEL+GL+GZ+HV  $c_v = 5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  (de gemiddelden van de range  $c_v$ 's).



↑ **Figuur 11** Randvoorwaarde ( $z = 0,0 \text{ m}$ ) en de stijghoogteverhoging op een aantal punten in de verticaal als functie van de tijd voor de situatie van een golf met een periode van 5 dagen met getijdenschommelingen ( $c_v$ 's idem als in figuur 10).

kening met een periode van 5 dagen zonder getijde. De demping en vertraging van de randvoorwaarde nemen toe naarmate de plaats hoogte  $z$  groter is. Hierin is  $z$  gedefinieerd als de afstand vanaf de onderkant van de Holocene deklaag naar boven.

In figuur 10 is verder zichtbaar dat de plaats hoogte met de maximale stijghoogteverhoging en met de tijd varieert. Voor een stabiliteitberekening is op  $t = 7,5$  dagen het glijvlak op  $z = 0,0 \text{ m}$  maatgevend. Op  $t = 9,0$  dagen is het glijvlak op  $z = 0,5 \text{ m}$  maatgevend. Wellicht is de kans op inundatie op  $t = 9,0$  dagen kleiner geworden.

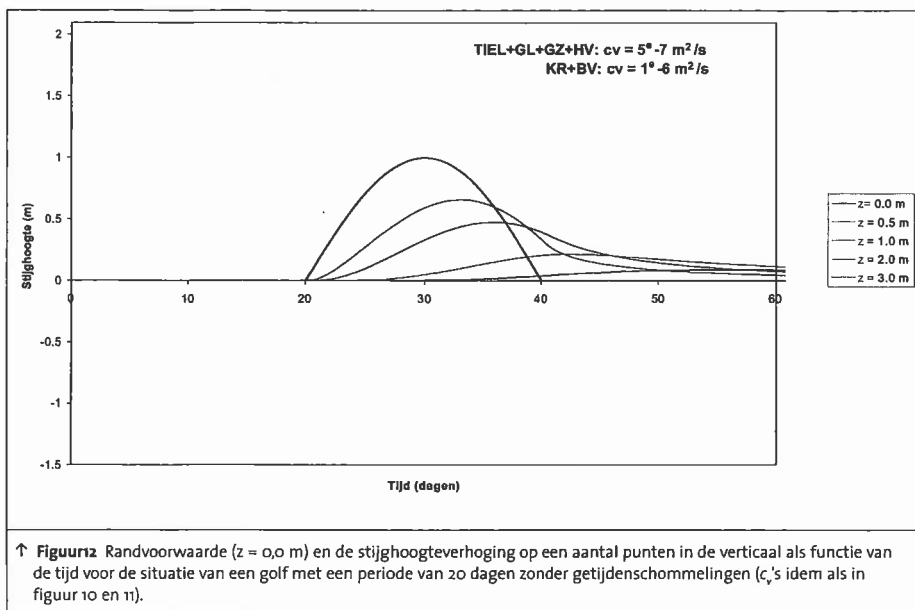
Figuur 11 geeft de resultaten voor dezelfde berekening als te zien is in figuur 10, maar nu

met getijdenschommelingen gesuperponeerd op de randvoorwaarde. De getijdenschommelingen hebben nauwelijks of zelfs geen effect op de hoogte van de stijghoogteverhoging in de slappe lagen. De schommelingen zijn op  $z = 1,0 \text{ m}$  al volledig gedempt.

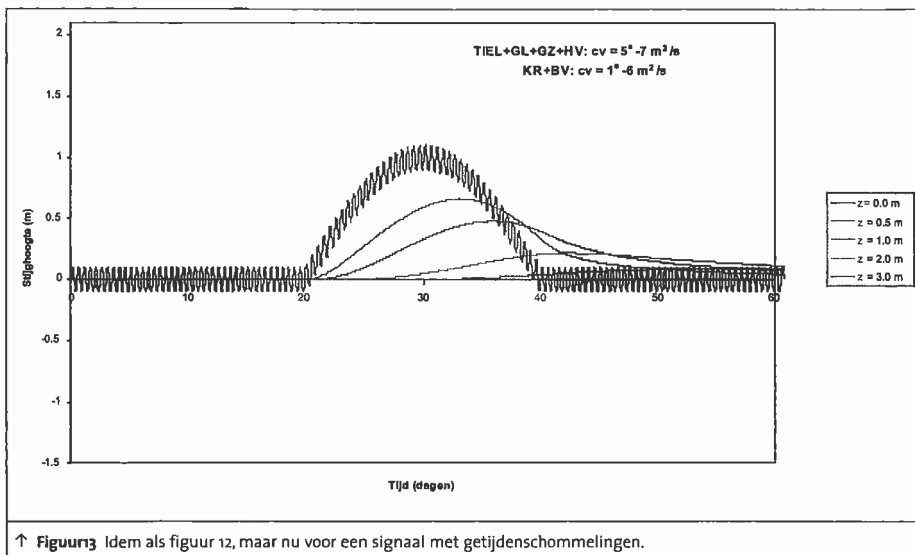
De figuren 12 en 13 geven de resultaten voor wederom dezelfde consolidatiecoëfficiënten, maar dan voor de berekeningen met een periode van de afvoergolf van 20 dagen zonder, respectievelijk met getijde.

De stijghoogteverhoging in het slappe lagenpakket is duidelijk groter dan met de kortere golfperiode. Op plaatshoogte  $z = 1,0 \text{ m}$  is de maximale stijghoogteverhoging gelijk aan  $0,47 \text{ m}$ , ten opzichte van  $0,22 \text{ m}$  bij een afvoer-

## Indringing van waterspanning in samendrukbare gelaagde grondpakketten



↑ **Figuur 12** Randvoorwaarde ( $z = 0,0$  m) en de stijghoogteverhoging op een aantal punten in de verticaal als functie van de tijd voor de situatie van een golf met een periode van 20 dagen zonder getijdenschommelingen ( $c_v$ 's idem als in figuur 10 en 11).



↑ **Figuur 13** Idem als figuur 12, maar nu voor een signaal met getijdenschommelingen.

golf van 5 dagen. De maximale verhoging treedt bij de golfduur van 20 dagen op 5,85 dagen na de maximale waterstand, terwijl bij een golfduur van 5 dagen dit al na 2,88 dagen na de maximale waterstand gebeurt, ongeveer tweemaal zo snel.

Bij een afvoergolf van 20 dagen geldt dat de invloed van de getijdenschommelingen op de stijghoogteverhoging in het slappe lagenpakket verwaarloosbaar klein is. Opgemerkt dient te worden dat de amplitude van de getijdenschommelingen al kleiner was dan bij de afvoergolf van 5 dagen.

In de figuren 14, 15 en 16 zijn een aantal kenmerkende vormen van het waterspanningsverloop met de plaatshoogte afgebeeld. Het zijn de profielen op een (willekeurig) aantal tijdstippen, geplot voor de berekeningen met de consolidatiecoëfficiënten  $c_{v,BV+KR} = 1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  (figuur 14),  $c_{v,BV+KR} = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  (figuur 15) en  $c_{v,BV+KR} = 1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  (figuur 16). Verder geldt in alle figuren, dat  $c_{v,TIEL+GL+GZ+HV} = 5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Er bestaat een goede overeenkomst tussen de indringingslengten voor de situaties met en zonder getijdenschommelingen, gegeven een tijdsduur van de afvoergolf. De indringingslengten tussen de twee afvoergolven van 5 en 20 dagen verschillen wel aanzienlijk.

In figuur 14 is nauwelijks enige overgang in de stijghoogte op de grens tussen de twee lagen zichtbaar. Hetzelfde geldt voor figuur 15. In figuur 16 is wel duidelijk een overgang zichtbaar. De overgang is van dien aard, dat de stijghoogte-toename in het watervoerende pakket ook merkbaar is aan de bovenkant van de laag KR+BV.

De maximale bereikte stijghoogteverhoging in de berekeningen met de verschillende invoerparameters en randvoorwaarden zijn op ieder van de vier plaatshoogten ( $z = 0,5$  m;  $z = 1,0$  m;  $z = 2,0$  m en  $z = 3,0$  m) met elkaar vergeleken. De resultaten laten zien dat de maximale bereikte stijghoogteverhogingen nauwelijks afhankelijk zijn van het feit of de getijdenschommelingen worden meegenomen. Voor een afvoergolf van 5 dagen bedraagt het verschil in stijghoogteverhoging voor de situatie met en zonder getijdenschommelingen op  $z = 0,5$  m namelijk maximaal 0,24 m, op  $z = 1,0$  m is dit afgenomen tot maximaal 0,06 m.

De indringingslengte  $L_i$  is, anders dan in het Voorschrift Toetsen op Veiligheid [VTV, 2004], hier gedefinieerd als de maximale plaatshoogte waarop 10 procent van de amplitude van de afvoergolf (zonder bijdrage van de getijdenschommeling) wordt bereikt.

Vanzelfsprekend is ook de indringingslengte niet of nauwelijks afhankelijk van de aanwezigheid van getijdenschommelingen. Verder blijkt dat de indringingslengte bij een afvoergolf van 20 dagen 1,2 tot 3,6 maal zo groot is als bij een afvoergolf van 5 dagen.

### DISCUSSIE

De resultaten van de berekeningen laten zien dat de getijdenschommelingen binnen één meter indringing nagenoeg zijn uitgedempt. Om deze reden heeft het getijde nauwelijks invloed op de berekende indringingslengte. De invloed van de getijdenschommeling komt via de stijghoogte in het watervoerende pakket wel in de berekening van de macrostabiliteit tot uiting.

De indringingslengte is gedefinieerd als de afstand ten opzichte van de basis van het slappe lagenpakket waarop de maximale waterspanningsverhoging nog juist 10% van de waterspanning in de watervoerende zandlaag onder het pakket bedraagt. De berekende indringingslengte varieert tussen 0,5 m en het gehele pakket. Hierbij is de indringingslengte voor een afvoergolf van 20 dagen voor

dezelfde consolidatiecoëfficiënten ongeveer 1,2 tot 3,6 maal zo groot als voor een afvoergolf van 5 dagen.

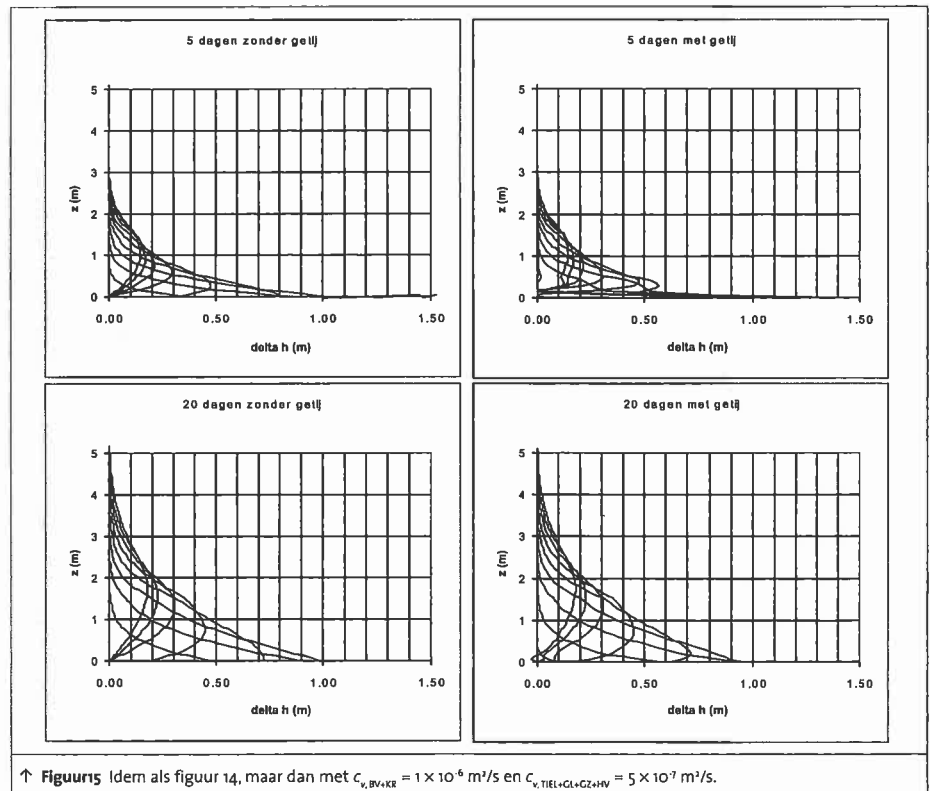
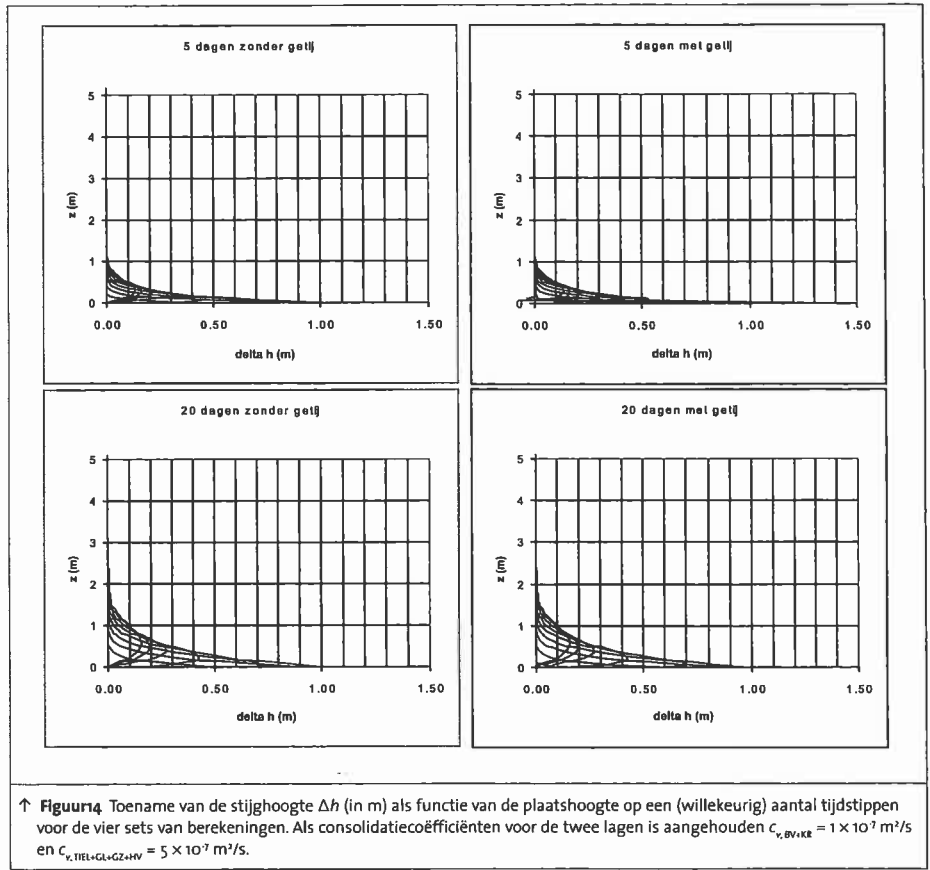
Voor de situatie met een ondergrondschematisatie met Kreftenheye en/of Basisveen (KR+BV) met een effectieve consolidatiecoëfficiënt van  $c_{v,KR+BV} = 1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  varieert de indringingslengte ongeveer 0,5 m, onafhankelijk van  $c_{v,TIEL+GL+GZ+HV}$ . Bij een periode van 20 dagen is dit ongeveer 1,0 m.

Indien  $c_{v,KR+BV} = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ , dan is de indringingslengte bij een afvoergolf van 5 dagen ongeveer 1,5 m, ongeacht de consolidatiecoëfficiënt van de lagen Gorkum, Tiel of Hollandveen. Bij een periode van 20 dagen is de indringingslengte ongeveer tussen 2,0 m ( $c_{v,TIEL+GL+GZ+HV} = 5 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ ) en 3,5 m ( $c_{v,TIEL+GL+GZ+HV} = 5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ).

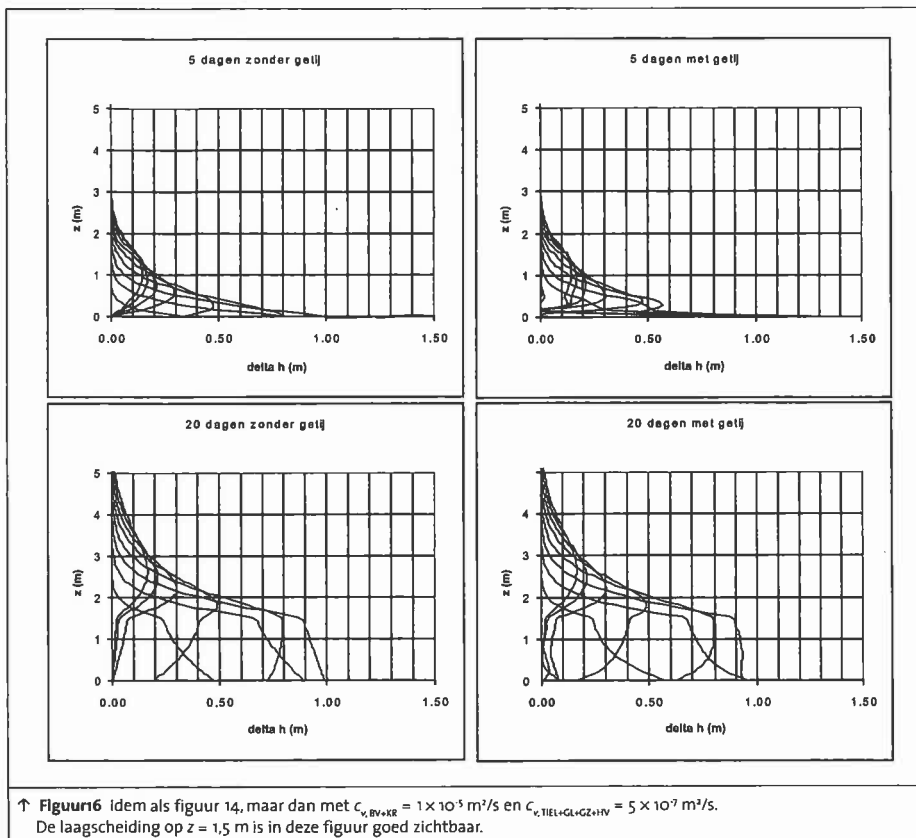
Wanneer de effectieve consolidatiecoëfficiënt van de Kreftenheye en Basisveen lagen gelijk is aan  $c_{v,KR+BV} = 1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ , dan varieert de indringingslengte bij een afvoergolf van 5 dagen tussen 2 m ( $c_{v,TIEL+GL+GZ+HV} = 5 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ ) en meer dan 7,5 m ( $c_{v,TIEL+GL+GZ+HV} = 5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ). Deze laatste situatie is ook representatief als de Kreftenheye en Basisveen lagen afwezig zijn. De indringingslengte neemt dan wel af met 1,5 m, omdat de dikte van de Kreftenheye en Basisveen lagen niet meegerekend worden.

Vanwege de grote variatie in de indringingslengte is het van belang de consolidatiecoëfficiënten van de slappe lagen nauwkeurig te bepalen. Dit blijkt in de praktijk een erg lastig te meten parameter. Indien er geen dertien-uurs(waterspannings)metingen in het slappe lagenpakket en in de watervoerende zandlaag beschikbaar zijn, is het aan te bevelen een  $c_v$  voor de Kreftenheye formatie (KR) te bepalen op basis van de boorbeschrijvingen in het gebied. Als veilige schatting voor de Kreftenheye formatie (KR) kan een  $c_v = 5,0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  worden aangehouden, tenzij er redenen zijn om een andere waarde aan te nemen.

Opgemerkt wordt dat de in de berekeningen gebruikte consolidatiecoëfficiënten belastwaarden zijn, terwijl het fysische proces eerder door een ontlastproces beschreven wordt. De meetgegevens van de meetlocaties Zennevijnen en Ravenswaaij bevestigen dit. Het verschil in deze  $c_v$ 's is van orde grootte 3 tot 10, wat redelijk klein is in vergelijking met de onzekerheid in de waarden van de proevenverzameling. De resultaten van berekeningen







met ontlast- $c_v$ 's (factor 5 groter dan de belast- $c_v$ 's) voor de afvoergolven zonder getijenschommelingen zijn ook uitgevoerd (hier niet afgebeeld). Zowel voor de afvoergolf van 5 dagen als voor 20 dagen is de berekende indringingslengte voor de ontlastwaarden een factor 1,3 tot 3 groter dan bij de belastwaarden. Dit betekent dat de indringing in sommige gevallen tot aan het maaiveld komt.

In de berekeningen is geen rekening gehouden met een verandering van de effectieve spanning en schuifspanning in het slappe lagenpakket ten gevolge van de veranderende waterspanningen. Ook zijn de invloeden van het optreden van de grenspotentiaal en van eventuele delaminatie tussen het slappe lagenpakket en de watervoerende zandlaag verwaarloosd. Het berekenen van deze processen vergt een volledig gekoppelde berekening met elastoplastische deformatie inclusief scheurvorming, iets wat buiten het kader van deze studie ligt.

De indringingslengte blijkt aanzienlijk groter dan de halve tot anderhalve meter, waarmee nu de stabiliteit berekend wordt. In een stabiliteitsberekening voor een representatief

dwarsprofiel van de Lekdijken (MStab Reliability, methode LiftVan) blijkt als gevolg van een toename van de indringingslengte met een factor 2 de kans op falen met een factor

2 tot 5 toe te nemen. Indringing van de waterspanning tot aan maaiveld kan resulteren in een toename van de faalkans met een factor 1.000 ten opzichte van de huidig gehanteerde berekening. Gevoeligheidsberekeningen voor het Proefvak 'Actuele Sterkte' te Bergambacht hebben vergelijkbare resultaten opgeleverd [Delft Cluster, januari 2001].

**CONCLUSIES**

In deze studie is de indringing van water in een gelaagd, elastisch deformerend pakket met behulp van een numeriek model berekend. Er zijn twee lagen onderscheiden: een onderste laag met een dikte van 1,5 m, representatief voor de Formatie van Kreftenheye (KR) en het laagpakket Basisveen van de Formatie van Nieuwkoop (BV), en een bovenste laag met een dikte van 6,0 m, representatief voor de formatie van Echteld. In deze laatste formatie worden op geotechnische gronden de lagen Tiel (TIEL), Hollandveen (HV), Gorkum Licht (GL) of Gorkum Zwaar (GZ) onderscheiden. De situatie met hoogwatergolven van 5 en 20 dagen zijn beschouwd, waarbij tevens de invloed van getijdenschommelingen is onderzocht. Er zijn voor beide afvoergolven een aantal berekeningen gemaakt met variaties in de consolidatiecoëfficiënten van beide lagen. In de berekeningen zijn de parameters van de proevenverzameling van de Alblasserwaard aangehouden. De resultaten van de uitgevoerde berekeningen geven een aanzienlijk grotere indringings-

Ondergrondschematisatie Holocene pakket	Afkorting	$L_i$ [m] duur golf 5 dagen	$L_i$ [m] duur golf 20 dagen
Kreftenheye, Basisveen en Gorkum Licht	KR+BV+GL	1,0	2,0
Kreftenheye, Basisveen en Hollandveen of Gorkum Zwaar	KR+BV+HV / GZ	1,0	2,0
Kreftenheye, Basisveen en Klei van Tiel	KR+BV+TIEL	1,0	1,5
Kreftenheye en Gorkum Licht	KR+GL *	2,0	3,0
Kreftenheye en Hollandveen of Gorkum Zwaar	KR+HV / GZ *	3,0	> 7,5 m
Kreftenheye en Klei van Tiel	KR+TIEL *	4,5	> 7,5 m
Gorkum Licht	GL **	0,5	1,5
Hollandveen of Gorkum Zwaar	HV / GZ **	1,0	> 6 m
Klei van Tiel	TIEL **	> 6 m	> 6 m

\* Hierin is het laagpakket Basisveen van de Formatie van Nieuwkoop (BV) afwezig; voor de Formatie van Kreftenheye (KR) wordt aangehouden:  $c_v = 5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  (ontlast  $c_v$ ), tenzij er aanwijzingen zijn voor een andere waarde.  
 \*\* Hierin zijn het laagpakket Basisveen van de Formatie van Nieuwkoop (BV) en de Formatie van Kreftenheye (KR) afwezig (althans hebben een  $c_v \geq 5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  (ontlast  $c_v$ )). De indringingslengte is hier berekend ten opzichte van de onderkant van de bovenste slappe lagen Tiel (TIEL), Hollandveen (HV), Gorkum zwaar (GZ) of Gorkum licht (GL) van de Formatie van Echteld.

↑ **Tabel 2** Aanbevolen waarden voor de indringingslengte  $L_i$  bij een relatief korte en lange afvoergolf op de rivier. De berekeningen zijn gebaseerd op de consolidatiecoëfficiënten tijdens de ontlastsituatie. Parameters zijn gebaseerd op de gegevens van de proevenverzameling van de Alblasserwaard.