

**Predictieberekeningen
Infiltratieproef Basaltbekleding
met Seep/W
definitief
CO-400970.0014 versie 2
januari 2002**

**Predictieberekeningen Infiltratieproef
Basaltbekleding met Seep/W**

definitief

CO-400970.0014


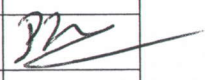
januari 2002

C:\My

Opgesteld in opdracht van:
RIJKSWATERSTAAT-DIENST WEG- EN
WATERBOUWKUNDE
POSTBUS 5044
2600 GA DELFT

AFDELING GRONDCONSTRUCTIES
Projectleider : Ir. P. Meijers
Projectbegeleider: Ir. T. P. Stoutjesdijk

GeoDelft
Stieltjesweg 2, 2628 CK DELFT
Postbus 69, 2600 AB DELFT
Telefoon (015) 269 35 00
Telefax (015) 261 08 21
Postbank 234342
Bank MeesPierson NV
Rek.nr. 25.92.35.911

rapportnr: CO-400970.0014		datum rapport: januari 2002			
titel en subtitel: Predictieberekeningen Infiltratieproef Basaltbekleding met Seep/W		behandelende afdeling: Grondconstructies			
		projectnaam:			
projectleider(s): Ir. P. Meijers		projectbegeleider(s): Ir. T. P. Stoutjesdijk			
naam en adres opdrachtgever: Rijkswaterstaat-Dienst Weg- en Waterbouwkunde Postbus 5044 2600 GA Delft		referentie opdrachtgever: DWW-1902			
		verzenden in: 20-voud			
		type rapport: definitief			
<p>samenvatting rapport:</p> <p>In dit rapport zijn predictieberekeningen gemaakt voor een infiltratieproef, gepland in de filterlaag onder de gepenetreerde basaltbekleding van het buitentalud van een zeedijk in Kruiningen. Als eerste zijn de berekeningen geijkt aan meetresultaten van een getijmeting in twee verschillende raaien, G1 en G2. Er is gevarieerd met de geometrie van de dijk en de doorlatendheden van de verschillende lagen. Vervolgens is voor beide raaien de stroming gedurende de infiltratieproef gesimuleerd. Per raai zijn vier berekeningen uitgevoerd met verschillende geometrieën en materiaalparameters. Het maatgevend mechanisme blijkt voor beide raaien te zijn de opstuwning bij de overgang van een goed naar een minder goed doorlatend filter. Uit alle vier berekeningen van raai G1 volgt dat er overdruk aanwezig is. Bij raai G2 is er in één berekening sprake van onvoldoende overdruk. Dit is de situatie dat er praktisch geen verschil is in de doorlatendheid van de filterlaag. De maximale drukverschillen worden in de boventafel verwacht. De gemiddelde infiltratiedebiet is van orde grootte 0,05 tot 0,32 m³/uur per strekkende meter, afhankelijk van de doorlatendheid van de filterlaag en de betreffende raai.</p>					
opmerkingen:					
trefwoorden:		verspreiding:			
opgeslagen op: onder titel: C:\My Documents\Rapportage\400970.0014.doc					aantal blz.: 29
versie:	datum:	opgesteld door:	paraaf:	gecontroleerd door:	paraaf:
1	27 augustus 2001	sfs		mey	
2	3 januari 2002	sfs		mey	

INHOUDSOPGAVE

1	Inleiding	1
2	Theorie en methode	3
2.1	Theorie	3
2.2	Methode	5
2.2.1	Geometrie	5
2.2.2	Randvoorwaarden	6
2.2.3	Initiële condities	7
2.2.4	Tijdsintegratie en convergentiecriteria	7
3	Resultaten	9
3.1	Getijmeting	9
3.1.1	Getijmeting raai G1	9
3.1.2	Getijmeting raai G2	10
3.2	Infiltratieproef	12
3.2.1	Algemeen	12
3.2.2	Infiltratieproef raai G1	13
3.2.3	Infiltratieproef raai G2	14
4	Discussie en Conclusies	17
	Referenties	19

Bijlage A: Getijmeting Raai G1

Bijlage B: Getijmeting Raai G2

Bijlage C: Infiltratieproef Raai G1

Bijlage D: Infiltratieproef Raai G2

1 Inleiding

Op de dijk van de Oostinkelenpolder, ten westen van de veerhaven Kruiningen, is voor week 39, 2001 een infiltratieproef gepland in de filterlaag onder de gepenetreerde basaltbekleding van het buitentalud. Het doel van de proef is na te gaan onder welke omstandigheden de ingegoten basaltbekleding kan worden afgedrukt door de waterdrukopbouw in de filterlaag. Voorafgaande aan de proef zijn getijmetingen uitgevoerd in twee verschillende raaien.

Het doel van dit rapport is het maken van een predictie van de waterdrukopbouw onder de basaltbekleding van de dijk te Kruiningen gedurende de infiltratieproef. Met deze predictie kan vervolgens een inschatting worden gemaakt van de kans dat de toplaag wordt opgedrukt en van de optredende vervormingen.

Met de beschikbare gegevens over de geometrie zijn eerst de simulaties geijkt aan de resultaten van de getijmetingen in de twee raaien. De getijmetingen zijn gerapporteerd in GD-rapport CO-400970.0023. Deze ijking resulteert in een beste schatting van de geometrie en de grondhydraulische parameters voor beide raaien. Door een aantal parameters te variëren wordt een indruk van de gevoeligheid van deze beste schatting verkregen. Vervolgens is de stroming gedurende de infiltratieproef gesimuleerd. Per raai zijn vier berekeningen uitgevoerd met verschillende geometrieën en/of materiaalparameters. De resultaten van deze berekeningen zijn geanalyseerd met betrekking tot de waterdrukopbouw onder de basaltbekleding en debiet door de filterlaag.

2 Theorie en methode

2.1 Theorie

Stroming in de onverzadigde/verzadigde zone wordt mathematisch beschreven door middel van de zogenaamde Richardsvergelijking [Tindall and Kunkel, 1999]. Deze vergelijking, die volgt uit de combinatie van de continuïteitsvergelijking voor het water met de impulsvergelijking (de wet van Darcy) voor het water, wordt met de drukhoogte $p(m)$ als primaire variabele geschreven als:

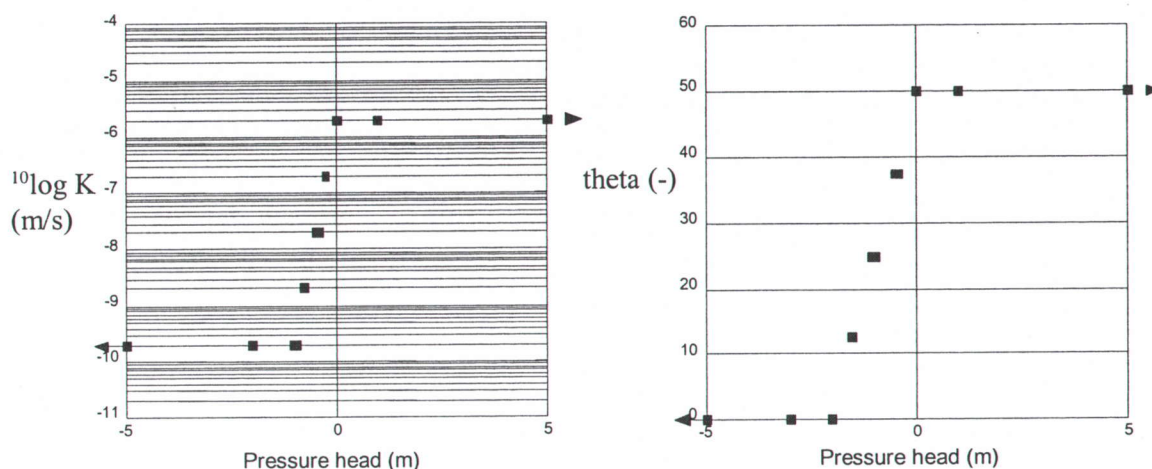
$$\nabla \cdot [\mathbf{K}(\nabla p + \rho \mathbf{g})] = \left[(m_v + n\beta)S + n \frac{\partial S}{\partial p} \right] \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2.1)$$

waarin:

\mathbf{K}	doorlatendheidstensor [m/s]
p	drukhoogte [m]
\mathbf{g}	gravitatie-vector [m/s ²]
ρ	dichtheid [kg/m ³]
m_v	samendrukbaarheid van de korrelmatrix [1/m]
n	porositeit
β	samendrukbaarheid van de vloeistof-lucht mengsel [1/m]
S	effectieve verzadigingsgraad [-]
t	tijd [s]

De berekeningen van de onverzadigde stroming worden uitgevoerd met het eindig elementenprogramma Seep/W. Het mathematisch principe is echter hetzelfde. In het vervolg wordt voor de stijghoogte de variabele h (m) gekozen, de drukhoogte wordt aangeduid met p (m). De verzadigde doorlatendheid wordt aangeduid met K_s (m/s). Verder wordt de plaatshoogte aangegeven met z (NAP + m).

Voor het oplossen van de Richardsvergelijking dienen zogenaamde materiaalcurven te worden gedefinieerd, relaties tussen de doorlatendheid en het vochtgehalte en de aanwezige (negatieve) druk. Deze relaties, die essentieel en bepalend zijn voor de berekeningen, zijn voor dijkmateriaal nog niet goed bekend. Net als het geval is voor natuurlijk afgezette gronden, zijn voor het dijkmateriaal beide relaties hoogstwaarschijnlijk echter sterk niet-lineair. In een zojuist verschenen rapport wordt beargumenteerd dat een vereenvoudigde beschrijving leidt tot een adequate beschrijving van de drukopbouw in de dijk [GeoDelft, 2001]. De vereenvoudigde beschrijving bestaat uit een lineaire relatie tussen het vochtgehalte θ (-) met de negatieve drukhoogte en een loglineaire relatie tussen de doorlatendheid K (m/s) en de negatieve drukhoogte (zie Figuur 2.1 voor de functie voor het onderste deel van de filterlaag).



Figuur 2.1 Doorlatendheid K (m/s) en vochtgehalte θ (-) als functie van de drukhoogte (in m), voor de basaltlaag in raai G1. De twee curven zijn gedefinieerd met behulp van een schatting voor de verzadigde doorlatendheid K_s , de porositeit n en de twee parameters p_k en p_s .

Bij een drukhoogte van $p > 0$ m wordt de doorlatendheid gelijk aan de verzadigde doorlatendheid gekozen. Vervolgens neemt de doorlatendheid logaritmisches (met kental 10) 4 orden van grootte af tussen $p = 0$ m en de (negatieve) drukhoogte p_k (m). Voor drukhoogten kleiner dan p_k is de doorlatendheid constant:

$$\begin{aligned} K(p) &= K_s & p &\geq 0 \\ K(p) &= K_s 10^{(-4p/p_k)} & p_k \leq p \leq 0 \\ K(p) &= K_s 10^{-4} & p \leq p_k \end{aligned} \quad (2.2)$$

De eerste vormparameter in deze vereenvoudigde beschrijving is de waterdrukhoogte p_k (m). Deze is gedefinieerd als de (negatieve) drukhoogte waarbij de conductiviteit 4 orden van grootte is afgenomen.

De relatie tussen het vochtgehalte en de drukhoogte wordt lineair verondersteld. Bij een drukhoogte gelijk aan $p = 0$ m wordt het vochtgehalte gelijk gesteld aan de effectieve porositeit n_e (het verzadigde vochtgehalte minus het restvochtgehalte). De verzadigingsgraad wordt vervolgens beschreven als:

$$\begin{aligned} \theta(p) &= n_e & p &\geq 0 \\ \theta(p) &= n_e (1 - p/p_s) & p_s < p < 0 \\ \theta(p) &= 0 & p \leq p_s \end{aligned} \quad (2.3)$$

De drukhoogte p_s (m) is de tweede vormparameter in de vereenvoudigde beschrijving. Dit is de (negatieve) drukhoogte waarbij het vochtgehalte gelijk aan nul is geworden. In overeenstemming met relatie (2.3) is de vochtcapaciteit gedefinieerd als:

$$\begin{aligned} c(p) &= 0 & p &\geq 0 \\ c(p) &= -1/p_s & p_s < p < 0 \\ c(p) &= 0 & p &\leq p_s \end{aligned} \quad (2.4)$$

Het vochtgehalte en de doorlatendheid worden voor positieve drukken gelijk gekozen aan het verzadigd vochtgehalte en de verzadigde doorlatendheid. Voor één materiaal, de weerstandslaag onder aan de teen van buitentalud, wordt een samendrukbaarheid van $m_v = 10^{-7} \text{ m}^{-1}$ verondersteld. Voor alle andere materialen is de samendrukbaarheid verwaarloosd.

Behalve materiaalparameters zijn voor de berekening geschikte randvoorwaarden en een schatting van de initiële condities nodig. De randvoorwaarden voor de getijmeting zijn niet geheel bekend, aangezien slechts een zevental stijghoogten in de filterlaag gemeten is. Verder is de neerslagflux niet gemeten en ontbreekt de stijghoogte in het dijklichaam. Verder zijn de negatieve drukhoogten afgekapt op $p = 0 \text{ m}$. Het verloop van de getijgolf gedurende de meting is wel bekend. De randvoorwaarden en initiële condities worden in Hoofdstuk 3 besproken.

2.2 Methode

2.2.1 Geometrie

De geometrie van de dijk is niet goed bekend. Op een paar locaties is de verticale grondopbouw bepaald. Tijdens de definitie van de geometrie is zoveel mogelijk rekening gehouden met deze gegevens. De numerieke resolutie in de toplagen is gesteld op 0,1 m (zie Bijlage A1 en B1). Gezien de optredende Darcy snelheden van orde grootte $q = 10^{-4} \text{ m/s}$ zijn, is deze gridgrootte redelijk bij een tijdstap van 1 minuut (zie paragraaf 2.4). Iedere laag bestaat uit minimaal drie elementen. Over het algemeen zijn vierhoekige elementen gebruikt. In enkele situaties is overgegaan op driehoekige elementen. In de zandkern is een geleidelijke overgang naar een grover elementengrid ontworpen. Hier is een maximale grootte van een elementrand van 0,5 m aangehouden.

In de berekeningen zijn de volgende aannamen gedaan. De stroming verloopt in een twee dimensionaal vlak, waarin slechts een deel van het buitentalud van de dijk wordt gerepresenteerd. Neerslag wordt verwaarloosd. Verder wordt de drukafname in de filterlaag door drukafhankelijkheid van de porositeit verwaarloosd. Tenslotte worden de onverzadigde grondhydraulische parameters volgens een vereenvoudigd model [GeoDelft, 2001] weergegeven.

Het buitentalud van de dijk heeft een helling van 1:3.8 en is opgebouwd uit een achttal gebieden. De basaltlaag (zwart voor relatief ondoorlatend en grijs voor relatief doorlatend) is 0,3 m dik. De filterlaag (verschillende kleuren blauw) is 0,3 m dik. De kleilaag (groen) varieert van 0,5 m tot 1,0 m dikte. Hieronder ligt de zandlaag (geel). Een weerstandslaag onder aan de teen van de dijk (oranje) loopt door tot de bodem van de filterlaag. Deze weerstandslaag resulteert in een vertraagde

getijreactie van de stijghoogten ter plaatse van de drukopnemers als gevolg van elastische berging. Onder de weerstandslaag loopt de kleilaag door tot aan de linkerkant van het domein.

Verschillen in de geometrie tussen raaien G1 en G2 betreffen de locaties van de doorlatende basaltbekleding en de lekken in de kleilaag. Verder verschillen de optimale waarden van de materiaalparameters van de basaltbekleding enigszins.

2.2.2 Randvoorwaarden

Getijmetingen

De randvoorwaarde in de dijk, aan de rechterkant van het domein, is op een stijghoogte van $h = 1,0$ m gesteld. Deze waarde van $h = 1,0$ m is een realistische waarde, vergeleken met eerdere waarnemingen in andere dijken. Er is gevarieerd met deze randvoorwaarde en de resultaten bleken hiervoor redelijk gevoelig. De genoemde waarde gaf voor beide raaien de beste resultaten in vergelijking met de getijmetingen. Dit geeft vertrouwen in de gekozen randvoorwaarde. Aan de linkerrand en op het talud wordt de getijgolf opgelegd.

Op het talud boven de maximale getijhoogte wordt de flux gelijk aan nul verondersteld.

Infiltratieproeven

De randvoorwaarde in de dijk, aan de rechterkant van het domein, is net als in de getijmeting op een stijghoogte van $h = 1,0$ m gesteld. Aan de linkerrand en op het talud wordt tijdens de infiltratieproef verwachte getijgolf opgelegd (de proef is gepland op 27 september 2001).

Gedurende de infiltratieproef wordt de drukhoogte op het talud in het gebied tussen de maximale hoogte van het getij en de infiltratieput op $p = 0$ m gezet. De stijghoogte in de infiltratieput (die doorloopt tot in de kleilaag) wordt gelijk gekozen aan de plaatshoogte van de onderrand van de putten. Hiertoe is in raai G1 een infiltratieput gemaakt op een hoogte van $z = 3,8$ m. In raai G2, waar de infiltratieput juist buiten het domein valt, is de rechterrandoorwaarde tot een hoogte van $z = 4,8$ m ($0,2$ m in de kleilaag) gesteld op $h = 5,3$ m.

Na het verschijnen van de conceptrapportage is gebleken, dat de hoogte van de infiltratiesloot bij raai G1 en G2 is verwisseld. Dit betekent dat bij G1 de infiltratie te laag op het talud plaatsvindt. De consequentie is dat de overdruk waarschijnlijk wordt onderschat, net als het debiet. Voor raai G2 geldt het omgekeerde.

De randvoorwaarde op de taludhelling, voor de beschrijving van de getijgolf, dient in drukhoogte-waarden opgegeven te worden. De drukhoogte varieert over het talud en wordt in verschillende gebieden opgelegd (waarin ieder gebied een hoogteverschil van $\Delta z = 1,0$ m heeft). De waarden van de drukhoogten zijn zo gekozen, dat de minimale drukhoogte van de getijgolf gelijk is aan $p = -0,5$ m, terwijl de gemiddelde drukhoogte over ieder deelgebied gelijk aan 0 m is. Op deze manier kan een realistisch drukverschil tussen top en onderkant van de basaltlaag worden bepaald. Testberekeningen (niet afgebeeld) hebben aangetoond, dat het afkappen van de drukhoogte nauwelijks invloed heeft op de stijghoogtewaarden op de interne gridpunten.

2.2.3 Initiële condities

De initiële freatische lijn is bepaald door na te gaan wat het verloop van de freatische lijn is na afloop van een getijgolf. Vanwege continuïteit van de druk begint de freatische lijn in de basaltlaag bij het getij, welke op $h = 0$ m begint. Vervolgens loopt de freatische lijn horizontaal door de basaltlaag en filterlaag tot de top van de kleilaag. De freatische lijn loopt via de top van de kleilaag op en snijdt deze op $h = 1,0$ m door om zo horizontaal door te lopen tot de rechterkant van het domein (zie ook Bijlagen A2, A3, B2 en B3). Initieel wordt de minimale drukhoogte gelijk gesteld aan $p = -1$ m. Uit ervaring blijkt, dat dit een redelijke waarde voor de drukhoogte in de onverzadigde zone van dijken is.

De getijgolven zijn een aantal keren herhaald om de invloed van de initiële conditie te laten afnemen. Uit de berekeningen blijkt dat na drie getijgolven een dynamisch evenwicht is bereikt. Op dat moment zijn namelijk de drukhoogten voorafgaande aan en na afloop van de getijgolf gelijk. De situatie na de derde golf wordt als initiële conditie gebruikt, zowel voor berekeningen van de getijmetingen als voor de infiltratieproeven (de initiële conditie wordt wel met een andere getijgolf berekend dan voor de getijmetingen).

De voor de getijmeting in raai G1 gebruikte geometrieën zijn gegeven in Bijlagen A2 en A3. Voor raai G2 zijn de geometrieën afgebeeld in Bijlagen B2 en B3.

2.2.4 Tijdsintegratie en convergentiecriteria

De standaard convergentiecriteria van het programma Seep/W zijn toegepast. Dit houdt in, dat de iteratie stopt wanneer de oplossing minder dan één procent verandert. Verder worden maximaal 10 iteraties per tijdstap gedaan. Wanneer geen convergentie wordt bereikt, wordt met de laatste iteratie verder gerekend in de volgende tijdstap. Uit testberekeningen met verschillende tijdstapgrootte is gebleken, dat de resultaten niet noemenswaardig verschillen wanneer een tijdstap van $\Delta t = 30$ s, $\Delta t = 60$ s, of $\Delta t = 300$ s wordt genomen. Om deze reden is in de berekeningen gekozen voor een constante tijdstap van $\Delta t = 60$ s. De oplossing wordt iedere 15 minuten opgeslagen. De berekeningstijd van 3000 tijdstappen met een computer met een processor van 400 MHz bedraagt ongeveer 4 uur.

3 Resultaten

In dit hoofdstuk worden eerst de resultaten van de berekening van de getijmeting besproken, gevolgd door de resultaten van de infiltratieproef. In de beschrijving wordt telkens onderscheid gemaakt tussen de twee raaien.

3.1 Getijmeting

3.1.1 Getijmeting raai G1

De gebruikte geometrie van de beste schatting voor raai G1 is te zien in Bijlage A2. In Tabel 3.1 zijn de waarden voor de verzadigde doorlatendheid K_s , de porositeit n en de twee parameters p_k en p_s gegeven voor de beste schatting van de getijmetingen. De variaties op de beste schatting zijn gegeven in Bijlagen A2 en A3. In de eerste variatie is de kleilaag dicht gemaakt, de tweede variatie heeft een homogene basaltlaag, in de derde variatie is het onderste deel van de filterlaag een orde minder doorlatend verondersteld.

De berekende stijghoogten op de locaties van de drukopnemers gedurende de getijmetingen zijn geplot in Bijlagen A4 t/m A7. Hierin is in de bovenste figuur de getijmeting te zien, in de onderste figuur zijn de berekeningsresultaten gegeven. Op de horizontale assen is de tijd weergegeven. Ieder vak komt overeen met 1,0 uur. Alleen het getij en de meetwaarden van de eerste vier waterdrukopnemers zijn te zien. De drie bovenliggende drukopnemers gaven namelijk geen respons op het getij (zowel in de meting als in de berekeningen), en zouden alleen het beeld verstoren. Tenslotte wordt opgemerkt dat in de getijmetingen (de bovenste figuren) de drukhoogte bij $p = 0,0$ m is afgekappt. De horizontale lijnen zijn in de realiteit waarschijnlijk niet geheel horizontaal, aangezien de drukhoogte in het algemeen tot negatieve waarden zal afnemen. In de berekeningsresultaten zijn de negatieve waarden wel meegenomen in de berekening van de stijghoogtewaarden.

Tabel 3.1 Waarden voor de verzadigde doorlatendheid K_s , porositeit n , de twee parameters p_k en p_s voor de beste schatting van de getijmetingen in raai G1.

materiaal	K_s (m/s)	n (-)	p_k (m)	p_s (m)	m_v (Pa ⁻¹)	laagdikte (m)
basalt	$2,0 \times 10^{-6}$	0,05	-1,0	-2,0	-	0,3
doorlatende basalt	$1,0 \times 10^{-5}$	0,10	-1,0	-2,0	-	0,3
weerstandslaag	$1,0 \times 10^{-6}$	0,40	-0,5	-4,0	1×10^{-3}	0,6
filterlaag onder	$1,0 \times 10^{-4}$	0,20	-2,0	-2,0	-	0,3
filterlaag midden	$3,0 \times 10^{-3}$	0,20	-1,0	-2,0	-	0,3
filterlaag boven	$5,0 \times 10^{-2}$	0,30	-1,0	-2,0	-	0,3
kleilaag	$3,0 \times 10^{-6}$	0,50	-0,5	-15,0	-	0,5-1,0
zandlaag	$1,0 \times 10^{-4}$	0,35	-1,0	-2,0	-	variabel

De resultaten van de beste fit (Bijlage A4) laten ten eerste een goede overeenkomst met de stijghoogten in de vier drukopnemers zien. De maximale stijghoogte van WSM2 wordt ten hoogste 0,1 m overschat. De maximale stijghoogte is voornamelijk afhankelijk van de doorlatendheden van de weerstandslaag onder in het talud, de filterlaag (zowel het onderste als de middelste deel) en de basaltlaag. Door het basalt op een hoogte tussen $z = 1,4$ m en $z = 1,5$ m doorlatend te veronderstellen worden de stijghoogten in WSM2 en WSM3 nagenoeg aan elkaar gelijk, net als het geval is in de getijmeting. Voor het verloop van de stijghoogte van de twee bovenste opnemers (WSM4 en WSM5) blijkt het genoemde doorlatende deel van de basaltbekleding en een lek in de kleilaag noodzakelijk.

De vertraging van de respons op het getij van alle drukopnemers is ook goed gerepresenteerd. Met name de keuze van de doorlatendheid en de samendrukbaarheid van de weerstandslaag lag hieraan ten grondslag. Ook de locatie van het doorlatende basalt heeft veel invloed op de vertraging in de getijrespons van de hoger gelegen drukopnemers. De locatie waar de getijcurve de stijghoogte in de drukopnemers gedurende aflopend getij snijdt in de grafiek komt ook goed overeen. Deze snijpunten liggen op een hoogte van ongeveer $z = 1,8$ m voor de lagere en $z = 1,5$ m voor de hogere opnemers. Het leeglopen van de filterlaag, tenslotte, gaat in de berekening enigszins langzamer dan in de getijmeting. Hoewel getracht is het leeglopen sneller te laten verlopen, is dit niet geheel geslaagd. Bij gelijke doorlatendheidscurven voor het instromen als uitstromen zal snel leeglopen ook betekenen, dat de filterlaag snel volloopt. Dat leidt tot een hogere maximale stijghoogte, wat niet realistisch is. Het kan ook zijn, dat het langzaam leeglopen wordt veroorzaakt doordat de freatische lijn aan de landzijde een vaste waarde van $z = \text{NAP} + 1,0$ m heeft. Dit is verder niet onderzocht.

In de eerste variatie is het gat in de kleilaag afgesloten. Zoals te zien is in Bijlage A5 heeft dit nauwelijks invloed op de resultaten.

Wanneer de basaltlaag homogeen wordt verondersteld (gelijk aan $K_S = 2 \times 10^{-6}$ m/s, zie Bijlage A6), worden de hogere waterdrukopnemers beïnvloed. WSM3, WSM4 en WSM5 hebben alle een iets lagere maximale stijghoogte. Het zeewater kan dus inderdaad minder makkelijk via de toplaag instromen.

In de derde variatie op de beste schatting is de doorlatendheid van het onderste deel van de filterlaag een orde van grootte kleiner gekozen. Zoals te zien is in Bijlage A7 heeft dit wederom nauwelijks invloed op de resultaten. De lage doorlatendheid van de weerstandslaag bepaalt hoogstwaarschijnlijk het debiet dat via de onderkant de filterlaag binnenstroomt, meer dan de doorlatendheid van het onderste deel van de filterlaag.

3.1.2 Getijmeting raai G2

De gebruikte geometrie van de beste schatting voor raai G2 is te zien in Bijlage B2. In Tabel 3.2 zijn de waarden voor de verzadigde doorlatendheid K_S , de porositeit n en de twee parameters p_k en p_s gegeven voor de beste schatting van de getijmetingen in deze raai. De beste schatting van raai G2 verschilt op de volgende punten van die in raai G1:

1. de doorlatendheid van de basaltlaag is hoger
2. de basaltlaag is tussen $z = 1,5$ m en $z = 1,6$ m lek (de doorlatendheid van zand is hiervoor genomen)
3. de basaltlaag is doorlatend tussen $z = 1,5$ m en $z = 2,25$ m
4. er zijn twee lekken in de kleilaag gedefinieerd
5. de grens tussen het onderste en middelste deel van de filterlaag ligt op $z = 1,10$ m en tussen het middelste en bovenste deel op $z = 2,55$ m

Tabel 3.2 Waarden voor de verzadigde doorlatendheid K_s , porositeit n , de twee parameters p_k en p_s voor de beste schatting van de getijmetingen in raai G2.

materiaal	K_s (m/s)	n (-)	p_k (m)	p_s (m)	m_v (Pa ⁻¹)
basalt	$5,0 \times 10^{-6}$	0,05	-1,0	-2,0	-
doorlatende basalt	$1,0 \times 10^{-4}$	0,10	-1,0	-2,0	-
weerstandslaag	$1,0 \times 10^{-6}$	0,40	-0,5	-4,0	1×10^{-3}
filterlaag onder	$1,0 \times 10^{-4}$	0,20	-2,0	-2,0	-
filterlaag midden	$3,0 \times 10^{-3}$	0,20	-1,0	-2,0	-
filterlaag boven	$5,0 \times 10^{-2}$	0,30	-1,0	-2,0	-
kleilaag	$3,0 \times 10^{-6}$	0,50	-0,5	-15,0	-
zandlaag	$1,0 \times 10^{-4}$	0,35	-1,0	-2,0	-

De geometrie van de berekeningen met variaties op de beste schatting zijn gegeven in Bijlagen B2 en B3. Net als in raai G1 bestaan deze variaties uit (a) het dichtmaken van de kleilaag (b) het veronderstellen van een homogene basaltlaag en (c) het met een orde van grootte verminderen van de doorlatendheid van de onderste deel van de filterlaag.

De berekende stijghoogten op de locaties van de drukopnemers gedurende de getijmetingen zijn gegeven in Bijlagen B4 t/m B7. Hierin is in de bovenste figuur de getijmeting te zien, in de onderste figuur zijn de berekeningsresultaten gegeven. Op de horizontale assen is de tijd weergegeven. Ook hier komt ieder vak overeen met 1,0 uur. Aangezien alle drukopnemers een respons op het getij geven zijn deze alle te zien. Tenslotte wordt opgemerkt dat in de getijmetingen (de bovenste figuren) de drukhoogte bij $p = 0,0$ m is afgekapt. In de berekeningsresultaten zijn de negatieve waarden wel meegenomen in de berekening van de stijghoogtewaarden.

De resultaten van de beste schatting (Bijlage B4) laten ten eerste een goede overeenkomst met de stijghoogten in de zeven drukopnemers zien. De hoogste waarde van de stijghoogte wordt in de getijmeting bereikt door WSM6, in de berekeningen door WSM3 en WSM4. De verschillen in maximale waarden van de stijghoogten tussen de meting en berekening zijn echter klein, van orde grootte 0,1 tot 0,2 m. De maximale stijghoogte is voornamelijk afhankelijk van de doorlatendheden van de weerstandslaag onderin het talud, de filterlaag (zowel het onderste als het middelste deel) en de basaltlaag. Door het doorlatende basalt op een hoogte van 1,2 m te laten beginnen blijft de maximale stijghoogte in WSM2 achter op de waarden in de andere metingen, net als het geval is in de

getijmeting. Voor het verloop van de stijghoogte van de bovenste opnemers (WSM4 t/m WSM8) blijkt een stuk doorlatend basalt en een lek in de kleilaag noodzakelijk. De vertraging van de respons op het getij van de twee drukopnemers WSM2 en WSM3 is ook goed gerepresenteerd. Met name de doorlatendheid en samendrukbaarheid van de weerstandslaag liggen hieraan ten grondslag. De locatie van het doorlatende basalt heeft veel invloed op de nauwelijks aanwezige vertraging in de getijrespons van de hoger gelegen drukopnemers. De locatie waar de getijcurve de stijghoogte in de drukopnemers gedurende aflopend getij snijdt in de grafiek komt ook goed overeen. Deze snijpunten liggen op een hoogte van ongeveer $z = 2,2$ m voor de hogere en afnemend tot $z = 1,5$ m voor de lagere opnemers. In de getijmeting doorsnijdt het getij de stijghoogtecurve van de lagere drukopnemers op een hoogte van ongeveer $z = 0,7$ m. Aan dit verschil tussen de meting en berekening ligt de minder goede representatie van het leeglopen van de filterlaag ten grondslag. Hoewel ook in de berekeningen van deze raai getracht is het leeglopen sneller te laten verlopen, is dit niet geheel geslaagd.

In de eerste variatie is de lek in de kleilaag afgesloten. Zoals te zien is in Bijlage B5 leidt dit tot een overschatting van de maximale stijghoogtewaarden in alle drukopnemers.

Wanneer de basaltlaag homogeen wordt verondersteld (gelijk aan $K_s = 5 \times 10^{-6}$ m/s, zie Bijlage B6), neemt de maximale stijghoogte in de hogere waterdrukopnemers ongeveer 0,5 m af, niet overeenkomstig met de metingen. Als reden geldt natuurlijk dat het zeewater minder makkelijk kan instromen.

In de derde en laatste variatie op de beste schatting is de doorlatendheid van het onderste deel van de filterlaag een orde van grootte kleiner gekozen. Zoals te zien is in Bijlage B7 heeft dit invloed op de vertraging tussen de stijghoogten in de hogere drukopnemers met het getij. Verder blijft opnemer WSM8 onverzadigd, in tegenstelling tot de gemeten waarde.

3.2 Infiltratieproef

3.2.1 Algemeen

Met de beste schatting vanuit de getijmeting wordt de infiltratieproef doorgerekend. Doel van deze berekening is het maken van een schatting van het drukverschil tussen de boven- en onderkant van de basaltlaag.

Aangenomen dat de basaltbekleding een gemiddelde dikte van $\Delta z = 0,3$ m heeft, dan is met een gemiddelde dichtheid van $2,83 \times 10^3$ kg/m³ een drukhoogteverschil van grootte $\Delta p = 0,82$ m nodig om de basaltlaag af te drukken. Het drukhoogteverschil wordt berekend door het verschil te nemen van het een na hoogste knooppunt in de basaltlaag met het op een na hoogste knooppunt in de filterlaag. Op deze manier wordt het knooppunt vermeden, dat precies op de grens tussen filterlaag en basaltlaag ligt. De waarde in dit knooppunt is eerder een interpolatie tussen beide lagen en dus niet geschikt voor de berekening van het drukhoogteverschil. Het drukhoogteverschil wordt geplot over de hele lengte tussen de teen van de dijk en de infiltratieput, op vier verschillende tijdstippen: opkomend getij ($h = 0,0$ m), maximaal getij ($h = 1,7$ m), afnemend getij ($h = 0,0$ m), minimaal getij ($h = -1,55$ m).

Per raai zijn vier berekeningen uitgevoerd. De variaties zijn gegeven in Tabel 3.3. De eerste drie berekeningen gebruiken de beste schatting voor de geometrie en parameters van de ondertafel. In run 1 wordt de kleilaag van de boventafel lek verondersteld, net als het geval is voor de ondertafel in de beste schatting van de getijmeting. In run 2 wordt de kleilaag van de boventafel niet lek verondersteld. Run 3 is gelijk aan run 1, behalve dat het bovenste deel van de filterlaag (hoger dan $z = 2,55$ m) een orde van grootte minder doorlatendheid is.

Tabel 3.3 Variaties in de berekeningen van de infiltratieproef voor raaien G1 en G2.

berekening	K_s bovenste filterlaag (m/s)	ondertafel	kleilaag boventafel
Run 1	$5,0 \times 10^{-2}$	beste schatting	lek
Run 2	$5,0 \times 10^{-2}$	beste schatting	niet lek
Run 3	$5,0 \times 10^{-3}$	beste schatting	lek
Run 4	$5,0 \times 10^{-2}$	kleilaag niet lek	niet lek

3.2.2 Infiltratieproef raai G1

De twee gebruikte geometrieën voor de infiltratieproeven in raai G1 zijn te zien in Bijlagen C1.

Bijlage C2 (bovenste figuur) laat voor Run 1 de drukhoogteverschillen over de toplaag op de vier tijdstippen zien als functie van de lengte vanaf de teen. Dit zijn respectievelijk het moment van laagwater, het moment dat bij opkomend tij de getijhoogte NAP+0 m is, hoogwater en het moment dat de bij afgaand tij de getijhoogte NAP+0 m is. De interpretatie van de berekening is het duidelijkst, wanneer met de bespreking begonnen wordt bij de infiltratieput. Vanaf de put naar beneden loopt het drukhoogteverschil sterk op, tot het moment dat de middelste filterlaag wordt bereikt. Op $l = 13,9$ m wordt de grens $\Delta p = 0,82$ m overschreden, boven deze grens kan de basaltlaag worden afgedrukt. De lekken die op $l = 12,0$ m en $l = 16,5$ m in de kleilaag zitten zijn in het verloop van het drukhoogteverschil niet waar te nemen. Door de lagere doorlatendheid van het middelste deel van de filterlaag neemt het drukhoogteverschil minder snel toe, tot het punt waarop de middelste filterlaag overgaat op de onderste filterlaag. Op dat punt wordt het grootste drukhoogteverschil bereikt. Bij hoogtij is dit verschil maximaal. Het onderste lek in de kleilaag ($l = 4,6$ m) is wederom niet te onderscheiden. Het drukhoogteverschil neemt vervolgens af in het gebied waar de basaltlaag doorlatend is.

In het gebied tussen ongeveer $l = 0,0$ m en $l = 9,0$ m is de invloed van het getij duidelijk zichtbaar. De locatie waarop de grenswaarde $\Delta p = 0,82$ m wordt bereikt hangt af van de getijhoogte. Bij het afgaand getij wordt de maximale lengte van $\Delta l = 5,3$ m bereikt waarin het drukhoogteverschil groter dan $\Delta p = 0,82$ m is (dit is de grens waarboven de basaltlaag opgedrukt kan worden).

Bijlage C2 (onderste figuur) laat voor Run 2 (geen lek in de kleilaag van de boventafel) een nagenoeg identiek verloop zien. Uit dit feit kan worden afgeleid, dat de lekken in de kleilaag van de boventafel van beperkte invloed op het resultaat zijn. Dit is uit de gegevens van Run 1 ook af te leiden, aangezien er geen invloed van deze lekken in Run 1 (bovenste figuur in Bijlage C2) is te constateren.

De resultaten van Run 3 (zie Bijlage C3, bovenste figuur) verschillen ook slechts een beetje van de eerste twee runs. De maximale drukhoogte ligt wat lager. De reden voor het verschil in drukhoogteverschil is, dat door de lagere doorlatendheid van de bovenste filterlaag de drukhoogte in de filterlaag minder hoog wordt. De verschillen tussen boven- en onderkant van de basaltbekleding worden dus ook minder groot. Het is opmerkelijk, dat de drukhoogteverschillen in de ondertafel groter zijn dan in de eerdere runs. Bij het afgaand getij wordt de maximale lengte van $\Delta l = 3,8$ m bereikt waarin het drukhoogteverschil groter dan $\Delta p = 0,82$ m is.

In Bijlage C3 (onderste figuur) is tenslotte het drukhoogteverschil van Run 4 te zien. Het verloop van de curve lijkt over het algemeen op de eerdere runs, behalve dat bij aflopend tij de opgedrukte zone veel groter is. Hieruit kan worden geconcludeerd, dat de lek in de ondertafel duidelijk van invloed is op de mogelijkheid tot afdrukken van de toplaag.

Behalve de drukhoogteverschillen zijn ook de debieten in de infiltratielaag bepaald. In Bijlage C4 zijn voor Runs 1 en 3 de infiltratiesnelheden geplot als functie van de tijd voor de vier knooppunten, waarop de filterlaag op de infiltratieput uitkomt. De twee hoogste waarden worden in het midden van de filterlaag gemeten. De andere twee waarden zijn van de knooppunten die grenzen aan de klei- en basaltlagen. Voor het bepalen van het debiet worden het gemiddelde van de twee middelste knooppunten bepaald. Deze wordt vervolgens in een uurdebiet per strekkende meter omgerekend volgens:

$$Q = \Delta h \times q \times 3600$$

met Q (m³/uur per strekkende meter) het debiet, Δh (m) de hoogte van de filterlaag, en q (m/s) de gemiddelde snelheid in de filterlaag nabij de infiltratieput.

Voor Run 1 is het gemiddeld debiet $Q = 0,05$ m³/uur per strekkende meter, met een maximum van $Q = 0,14$ m³/h per strekkende meter. In Run 3, waar een lagere doorlatendheid van het bovenste deel van de filterlaag is verondersteld, is het debiet ook gelijk aan $Q = 0,05$ m³/h per strekkende meter. Een maximum van $Q = 0,13$ m³/uur per strekkende meter wordt bereikt.

3.2.3 Infiltratieproef raai G2

De gebruikte geometrieën voor de infiltratieproeven in raai G2 zijn te zien in Bijlagen D1.

Bijlage D2 (bovenste figuur) laat voor Run 1 de drukhoogteverschillen op de vier tijdstippen zien als functie van de lengte vanaf de teen. Met de interpretatie van de berekening wordt begonnen vanaf de infiltratieput. Vanaf de put naar beneden loopt het drukhoogteverschil sterk op, tot het moment dat de middelste filterlaag wordt bereikt. Op dat punt wordt het grootste drukhoogteverschil bereikt. Op $l = 19,4$ m wordt de grens $\Delta p = 0,82$ m overschreden, boven deze grens kan de basaltlaag worden afgedrukt. De lekken die op $l = 19,5$ m, $l = 15,8$ m en $l = 12,0$ m in de kleilaag van de boventafel zitten zijn in het verloop van het drukhoogteverschil niet waar te nemen. Ook de lekken in de kleilaag van de ondertafel zijn niet te onderscheiden. In het gebied tussen ongeveer $l = 0,0$ m en $l = 10,0$ m is

de invloed van het getij duidelijk zichtbaar. De overgang van het middelste filter naar het onderste filter (op $l = 10,0$ m) is nauwelijks zichtbaar.

De onderste locatie, waarop de grenswaarde $\Delta p = 0,82$ m wordt bereikt, hangt niet af van de getijhoogte.

De lengte waarover het drukhoogteverschil groter dan $\Delta p = 0,82$ m is (dit is de grens waarboven de basaltlaag opgedrukt kan worden) is gelijk aan $\Delta l = 7,5$ m. Deze lengte is een factor 1,4 groter dan in raai G1.

Bijlage D2 (onderste figuur) laat voor Run 2 (geen lek in de kleilaag van de boventafel) een nagenoeg identiek verloop zien. Uit dit feit kan worden afgeleid dat de lekken in de kleilaag van de boventafel niet van invloed op het resultaat zijn. Dit is uit de gegevens van Run 1 ook af te leiden, aangezien er geen invloed van deze lekken in Run 1 (bovenste figuur in Bijlage D2) is te constateren.

Run 3 in Bijlage D3 (bovenste figuur) verschilt aanzienlijk van de eerste twee runs. Het maximale drukhoogteverschil bedraagt $\Delta p = 0,6$ m; dit wordt in de ondertafel bij oplopend tij bereikt. De reden voor deze lage maximale waarde is, dat door de lagere doorlatendheid van de bovenste filterlaag de drukhoogte in de filterlaag nauwelijks oploopt. De verschillen tussen boven- en onderkant van de basaltbekleding worden dus ook minder groot. De grenswaarde voor afdrukken wordt niet bereikt.

In Bijlage D3 (onderste figuur) is tenslotte het drukhoogteverschil van Run 4 te zien. Het verloop van de curve is nagenoeg hetzelfde als in Runs 1 en 2. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de lek in de ondertafel niet merkbaar van invloed is op de mogelijkheid tot afdrukken van de top laag.

Ook voor deze raai zijn de debieten in de infiltratielaag bepaald. In Bijlage D4 zijn voor Runs 1 en 3 de infiltratiesnelheden geplot als functie van de tijd voor de vier knooppunten, waarop de filterlaag op de infiltratieput uitkomt. De twee hoogste waarden worden in het midden van de filterlaag gemeten. De andere twee waarden zijn van de knooppunten die grenzen aan de klei- en basaltlagen. Voor Run 1 is het debiet $Q = 0,32$ m³/uur per strekkende meter met een maximum van $Q = 0,43$ m³/uur per strekkende meter. Run 3, waar een lagere doorlatendheid van het bovenste deel van de filterlaag is verondersteld, heeft een debiet van $Q = 0,14$ m³/uur per strekkende meter met een maximum van $Q = 0,15$ m³/uur per strekkende meter.

4 Discussie en Conclusies

Door middel van berekeningen van onverzadigde stroming in het buitentalud van een dijk te Kruiningen zijn schattingen van de drukopbouw in de filterlaag onder de basaltbekleding gemaakt. De geometrie en materiaalparameters zijn eerst geijkt aan de hand van getijmetingen in twee verschillende raaïen. De toegepaste vereenvoudigde relaties tussen vochtgehalte en drukhoogte en doorlatendheid en drukhoogte blijken goed geschikt voor het uitvoeren van deze ijking. De berekeningen kunnen namelijk goed worden gefit aan het tijdsafhankelijk verloop van de gemeten drukhoogten in de filterlaag. Alleen het leeglopen van de filterlaag bij aflopend tij blijft enigszins achter op de meetresultaten. Dit verschil is echter klein genoeg om met de verkregen materiaalparameters betrouwbare schattingen te maken van de uit te voeren infiltratieproef.

Vervolgens is ook de infiltratieproef gesimuleerd voor beide raaïen. De berekeningen geven een goed beeld van de optredende mechanismen. Het maatgevend mechanisme blijkt te zijn de opstuwing bij de overgang van een goed naar een minder goed doorlatend filter. Dit wordt bij beide berekeningen gevonden.

Uit alle vier berekeningen van raaï G1 volgt dat er overdruk aanwezig is. Bij raaï G2 is er in één berekening sprake van onvoldoende overdruk. Dit is de situatie dat er praktisch geen verschil is in de doorlatendheid van de filterlaag.

Bij de beste schatting (run 1 van de predictieberekeningen) is de verandering van de drukhoogte in de filterlaag ongeveer 0,15 m/m. Dit is minder dan de verandering van de plaatshoogte (ongeveer 1:3,5). Dit wordt bij beide meetraaïen gevonden en is blijkbaar onafhankelijk van de situatie bij de ondertafel. De grootste overdruk wordt gevonden op de overgang naar een minder doorlatend filter. Bij de lage infiltratiesloot is dit de overgang van het middengedeelte van de filterlaag naar het onderste deel van de filterlaag. De grootste overdruk treedt dan op bij ongeveer NAP + 1,8 m. Bij de hoge infiltratiesloot is dit de overgang van het hooggelegen gedeelte van de filterlaag naar het middengedeelte. De grootste overdruk treedt dan op bij ongeveer NAP + 3,0 m. De echte plaats hangt af van de werkelijke plaats van de overgang en is dus niet nauwkeurig bekend.

Bij de berekening voor raaï G2 (dit is de berekening met de bodemopbouw voor de lage basalt) wordt de tussenliggende sprong in doorlatendheid filterlaag (op ongeveer NAP + 1 m) niet teruggevonden in de drukhoogteverschillen.

De drukhoogteverschillen tussen de boven- en onderkant van de basaltbekleding zijn voor raaï G1 over een lengte van ongeveer 5,3 m en voor raaï G2 over 7,5 m groter dan het gewicht van de basaltbekleding ($\Delta p \geq 0,82$ m). De maximale verschillen worden verwacht op de locatie waar de filterlaag minder doorlatend wordt, ten opzichte van het bovenste deel van de filterlaag. Met name in het gebied boven deze overgang in doorlatendheid zijn de drukhoogteverschillen boven de grenswaarde van $\Delta p = 0,82$ m.

De afstand over het talud waarover opdrukken optreedt is niet erg gevoelig voor de (in)homogeniteit van de kleilaag onder de filterlaag. Wel van belang is de doorlatendheid van de filterlaag. In de berekening

van de taludlengten is deze doorlatendheid op $K = 5,0 \times 10^{-2}$ m/s gesteld. In raai G1 neemt de lengte waarin opdrukken kan optreden af tot ongeveer 4,2 m in het geval, dat de filterlaag een orde minder doorlatend is ($K = 5,0 \times 10^{-3}$ m/s). In raai G2 bereiken onder deze omstandigheden de maximale drukhoogteverschillen de grenswaarde van $\Delta p = 0,82$ m voor opdrukken geheel niet. Naar verwachting zullen ook mogelijke doorlatende delen in de basaltbekleding in of boven het gebied waarin opdrukken optreedt, dit gebied verkleinen. De gemiddelde infiltratiedebieten zijn van orde grootte 0,05 tot 0,32 m³/h per strekkende meter, afhankelijk van de doorlatendheid van de filterlaag en de betreffende raai.

Tenslotte wordt opgemerkt, dat in de berekeningen de drukafhankelijkheid van het vochtgehalte van de filterlaag bij positieve druk is verwaarloosd. De drukhoogteverschillen die in deze berekeningen zijn verkregen dienen gezien te worden als maximale schattingen. De afname van de drukhoogteverschillen, die gedurende het opdrukproces onvermijdelijk zal optreden, kan er toe leiden dat de vervormingen van de toplaag klein blijven.

Na het uitvoeren van de berekeningen is gebleken dat bij de voorspelling van de waterdrukken tijdens de infiltratieproef de hoogte van de infiltratiesloot bij raai G1 en G2 verwisseld zijn. De vermelde resultaten in paragraaf 3.2 en dit hoofdstuk zijn dus voor de situatie met een infiltratiesloot op een andere hoogte dan voorzien tijdens de infiltratieproef. Uit de resultaten blijkt dat deze omwisseling geen invloed heeft op de feitelijke conclusies, namelijk dat er voldoende drukopbouw plaatsvindt en dat de plaats van de grootste overdruk verwacht wordt op een plaats waar de filterlaag minder doorlatendheid wordt.

Referenties

[GeoDelft, 2001]

Materiaalparameters voor ontwerpmodel grondwaterstroming, CO-710201/58, GeoDelft, opgesteld door C.A. Schoofs, augustus 2001.

[Tindall and Kunkel, 1999]

Unsaturated zone hydrology for scientists and engineers, Prentice Hall, London, U.K., 624 pp., 1999.