

# **Waterlaagje bij ingegoten steenzettingen**

10 September 2004

# **Waterlaagje bij ingegoten steenzettingen**

16 juni 2004

Ruud Bosters

---

## Inhoudsopgave

---

<b>1.</b>	<b>Inleiding</b>	<b>4</b>
<b>2.</b>	<b>Case</b>	<b>5</b>
<b>3.</b>	<b>Ondoorlatende toplaag met zeer open teen</b>	<b>6</b>
3.1	Stijghoogteverloop	6
3.2	Spleetlengte bij horizontale stijghoogtelijn over spleettraject	7
3.3	Spleetlengte bij lineair aflopende stijghoogtelijn over spleettraject	9
3.4	Spleetbreedte	10
3.5	Spleetbreedte bij dalende filterwaterstand	12
<b>4.</b>	<b>Doorlatende toplaag met oneindig talud</b>	<b>14</b>
4.1	Stijghoogteverloop	14
4.2	Open of dichte teen?	15
4.3	Daling filterwaterstand	16
4.4	Stroming door gaatje in de toplaag	17
4.5	Vergelijking met grondwaterstromingstheorie	18
4.6	Spleetlengte	20
4.7	Spleetbreedte	21
<b>5.</b>	<b>Bezwijkmechanisme</b>	<b>22</b>
<b>6.</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>23</b>
<b>Bijlage: Nadere uitwerkingen</b> <b>25</b>		
1.	Bepaling spleetlengte bij lineair verlopende stijghoogtelijn in de spleet	25
2.	Differentiaalvergelijking opgedreven toplaag	26
<b>Symbolenlijst</b> <b>27</b>		
<b>Referenties</b> <b>29</b>		

---

# 1. Inleiding

---

Met de infiltratieproeven van Kruiningen, Baarland en Willem-Annapolder is aangetoond dat wateroverdrukken bij maatgevende omstandigheden mogelijk zullen leiden tot opdrijven van een ingegoten bekleding, maar niet noodzakelijk tot bezwijken van deze bekleding. Indien de toplaag niet opgedreven is, wordt bezwijken door de maatgevende golfklappen door de experts zeer onwaarschijnlijk geacht. Wel blijft de vraag hoeveel groter dan maatgevend een golfklap moet zijn om wèl tot bezwijken te komen. Bij een opgedreven toplaag bestaat de vrees dat maatgevende golfklappen mogelijk tot bezwijken van de bekleding kunnen leiden.

Op grond van het bovenstaande mag worden verondersteld dat het voorkomen van opdrijven van de toplaag en het minimaliseren van de watertoevoer onder de toplaag, de sterkte van de bekleding zeer ten goede komt. Een mogelijkheid om de watertoevoer te minimaliseren is het toepassen van een waterslot.

In deze notitie wordt getracht langs analytische weg en op basis van een case meer inzicht te krijgen in de sterkte en het gedrag van ingegoten bekledingen. Doel is aannemelijk te maken dat bij een geringe watertoevoer, al dan niet door de aanwezigheid van een waterslot, zich geen waterlaagje zal vormen of dat dit niet tot bezwijken van de bekleding zal leiden.

Achtereenvolgens worden twee situaties beschouwd:

1. Ondoorlatende toplaag met zeer open teen;
2. Doorlatende toplaag op oneindig talud.

Gekeken wordt naar het stationaire en instationaire stijghoogteverloop in het filter, het ontstaan van een met water gevulde spleet (waterlaagje), lengte en breedte van deze spleet en bezwijkmechanisme.

## 2. Case

In dit rapport zijn een aantal berekeningen gemaakt, waarvan de resultaten zijn vergeleken met de getijdemetingen en de meetresultaten van de infiltratieproeven in Baarland en Willem-Annapolder. De voor de berekeningen gehanteerde case betreft een glooiing met de volgende karakteristieken:

Taludhelling	$\alpha = 18^\circ$ (talud 1:3,1)
Toplaagdikte	$D_t = 0,3$ m
Filterdikte	$D_f = 0,1$ m
Soortelijk gewicht top laag	$\rho_t = 2.900$ kg/m <sup>3</sup>
Soortelijk gewicht zout water	$\rho_w = 1.035$ kg/m <sup>3</sup>
Doorlatendheid top laag	$k_t = 1 \cdot 10^{-7}$ m/s
Doorlatendheid filtermateriaal	$k_f = 1 \cdot 10^{-4}$ m/s (goed ingezand filter)
Effectieve porositeit filtermateriaal	$n = 0,2$
Filterwaterstand	$\Phi_f = +3$ m, t.o.v. teen glooiing
Daalsnelheid buitenwaterstand	$v_{dw} = 2,7 \cdot 10^{-4}$ m/s = 0,97 m/u

Hieruit kunnen de volgende kentallen afgeleid worden:

Lengte talud	$L = \Phi_f / \sin \alpha = 9,71$ m
Verhang talud	$i_{\text{talud}} = \Phi_f / L = \sin \alpha = 0,31$
Gewichtscoefficiënt	$\Delta = (\rho_t - \rho_w) / \rho_w = 1,8$
Onderwatergewicht top laag	$\Delta \cdot D_t \cdot \cos \alpha = 0,51$ m
Weerstand van de top laag	$c_t = D_t / k_t = 3.000.000$ s = 35 d
Leklengte	$\lambda = (k_f \cdot D_f \cdot c)^{0,5} = 5,48$ m
Maximaal filterdebiet (Darcy)	$Q_{f,\text{max}} = k_f \cdot D_f \cdot i_{\text{talud}} = 3,1 \cdot 10^{-6}$ m <sup>3</sup> /s/m' = 11 l/u/m'
Inhoud filter	$I_f = L \cdot D_f \cdot n = 0,194$ m <sup>3</sup> /m' = 194 l/m'

Enige kentallen uit de getijdemetingen bij Baarland en Willem-Annapolder zijn weergegeven in tabel 1.

Tabel 1: Kentallen getijdemetingen Baarland en Willem-Annapolder

	Baarland		Willem-Annapolder	
	Voor infiltratieproef	Na proef	Voor proef	Na proef
Getijverschil	ca. 3,3 m	ca. 4,1 m	ca. 3,5 m	ca. 4,1 m
$H_t^{1)}$	0,40 m	0 m	0,50 m	0,60 m
$H^{2)}$	0,55 m	0 m	0,65 m	0,70 m
1) Maximaal stijghoogteverschil over top laag				
2) Maximaal verschil tussen filterwaterstand en buitenwaterstand				

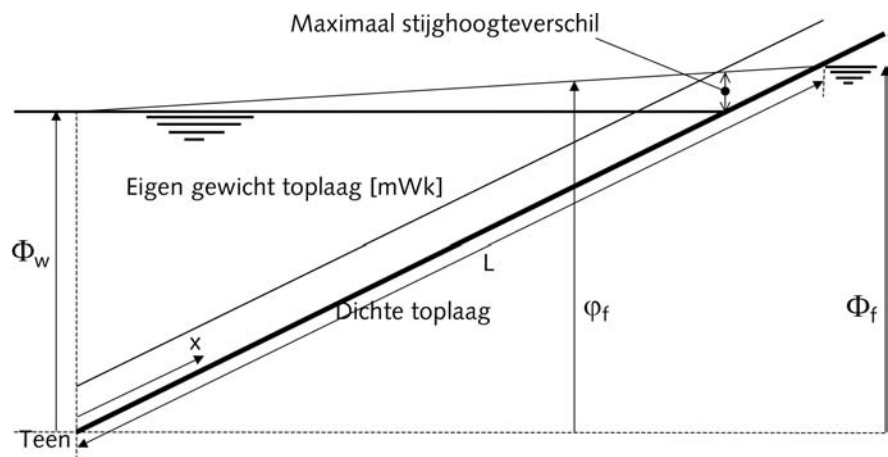
### 3. Ondoorlatende toplaag met zeer open teen

De volgende aannames zijn gehanteerd:

1. De toplaag is ondoorlatend;
2. De teen is oneindig open (het buitenwater staat direct tegen het filter, alsof de teen afwezig is);
3. De toplaag heeft een stijfheid  $EI = 0$  (als ware de toplaag een laagje plastic);
4. Het filter ligt op een waterdichte ondergrond;
5. Filterwaterstand is constant (als ware het een infiltratieproef);
6. De stroming is stationair (evenwichtssituatie).

#### 3.1 Stijghoogteverloop

Indien de buitenwaterstand lager ligt dan de filterwaterstand, is beneden de filterwaterstand sprake van een netto opwaartse waterdruk op de toplaag. Zolang deze kleiner is dan het gewicht van de toplaag, zal de toplaag niet opdrijven.



Figuur 1: stijghoogteverloop zonder opdrijven van de toplaag

Bij stationaire stroming verloopt de stijghoogte in het filter lineair. Daarbij komt de stijghoogte aan de top van het filter overeen met de filterwaterstand en aan de teen met de buitenwaterstand (zie ook figuur 1):

$$\varphi_f = \Phi_w + (\Phi_f - \Phi_w) \cdot x/L \quad (1)$$

Waarin:

- $\varphi_f$  Stijghoogte in filter, t.o.v. teen bekleding [m]  
 $\Phi_w$  Buitenwaterstand, t.o.v. teen bekleding [m]  
 $\Phi_f$  Filterwaterstand, t.o.v. teen bekleding [m]

---

L	Lengte van talud van teen tot filterwaterstand [m]
x	Coördinaat, gemeten langs talud vanaf de teen [m]

De grootste opwaartse druk bevindt zich op de waterlijn. Het kritieke moment bij stationaire stroming treedt op als de buitenwaterstand de helft bedraagt van de filterwaterstand ( $\Phi_w = \Phi_f/2$ ). Hieruit volgt dat bij stationaire stroming de toplaag niet op zal drijven en zich geen waterlaagje zal vormen als:

$$\Delta \cdot D_t \cdot \cos\alpha > (\Phi_f - \Phi_w)/2 \Leftrightarrow \Phi_f < 4 \cdot \Delta \cdot D_t \cdot \cos\alpha \quad (2)$$

Voor de gehanteerde case volgt:  $\Phi_f < 2,1$  m.

De praktische waarde van deze oplossing is beperkt. In werkelijkheid zal er nooit sprake zijn van een onbeperkt doorlatende teen, waardoor de kritieke buitenwaterstand verschuift richting teen en het maximale stijghoogteverschil over de toplaag ( $\Delta\phi_t$ ) groter wordt dan  $(\Phi_f - \Phi_w)/2$ . ' $\Phi_f < 4 \cdot \Delta \cdot D_t \cdot \cos\alpha$ ' kan daardoor niet zondermeer als veilig criterium gehanteerd worden.

Aan de andere kant zal de filterwaterstand niet constant zijn, maar met de buitenwaterstand mee dalen. Hierdoor wordt het stijghoogteverschil genivelleerd.

### 3.2 Spleetlengte bij horizontale stijghoogtelijn over spleettraject

Indien de toplaag onvoldoende zwaar is, zal deze bij een dalende buitenwaterstand op een gegeven moment ter plaatse van de waterlijn op beginnen te drijven. Naarmate de buitenwaterstand verder daalt, ontstaat over een zekere lengte een met water gevulde spleet (een waterlaagje dus). Omdat de stromingsweerstand in de spleet veel kleiner is dan in het filter, zal het filterwater over het spleettraject grotendeels door de spleet gaan stromen.

Hierdoor zal het verhang over het spleettraject afnemen, terwijl het verhang boven en onder de spleet juist zal toenemen. Er gaat dus meer water door het filter stromen. Bij een constante buitenwaterstand zou zich daarbij een evenwicht instellen met een constante spleetlengte.

Uitgaande van een horizontale stijghoogtelijn over het spleettraject (in de spleet is er dan geen stromingsweerstand, hetgeen resulteert in een hydrostatische drukverdeling) kan deze spleetlengte als volgt berekend worden (zie ook figuur 2):

$$i_f = \{\Phi_f - \Phi_w - \Delta \cdot D_t \cdot \cos\alpha\} / \{(\Phi_f - \Phi_w)/\sin\alpha\} \quad (3)$$

$$L_{a,os} = \Delta \cdot D_t \cdot \cos\alpha / i_f \quad (4)$$

$$L_{a,bs} = (\Phi_f - \Phi_w) / \sin\alpha \quad (5)$$

$$L_a = L_{a,bs} + L_{a,os} = (\Phi_f - \Phi_w) / i_f \quad (6)$$

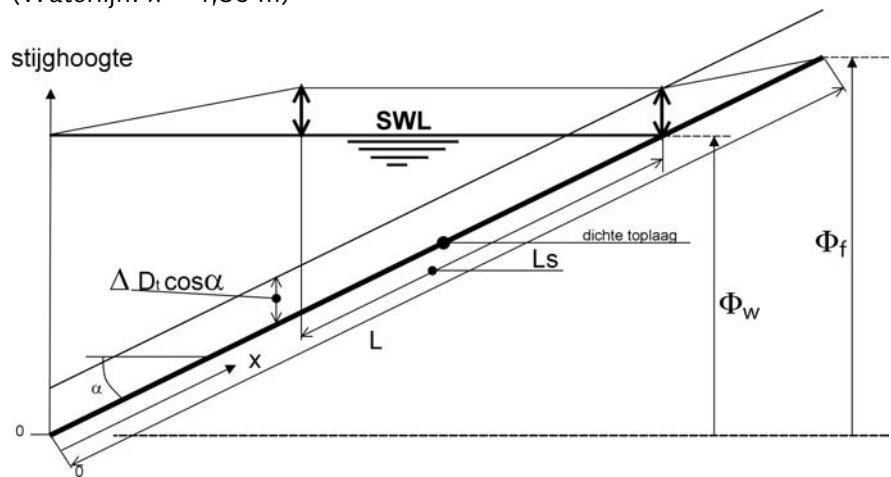
$$L_s = L - L_a \quad (7)$$

Waarin:

$i_f$	Verhang in filter boven en onder spleettraject [-]
$L_{a,bs}$	Niet-opgedreven toplaaglengthe boven spleet [m]
$L_{a,os}$	Niet-opgedreven toplaaglengthe onder spleet [m]
$L_a$	Totale niet-opgedreven toplaaglengthe [m]
$L_s$	Spleetlengthe [m]

Voor de case is de spleetlengthe berekend als de buitenwaterstand de helft bedraagt van de filterwaterstand:  $\Phi_w = +1,5$  m. Bij een open teen is bij deze waterstand het stijghoogteverschil over de toplaag maximaal en bedraagt:  $(\Phi_f - \Phi_w)/2 = 0,75$  m. Deze waarde treedt op op de waterlijn. Hoewel de teen in de praktijk nooit onbeperkt doorlatend zal zijn, komt deze waarde van 0,75 m goed overeen met de maximale stijghoogteverschillen uit de getijdemetingen en de infiltratieproeven. Uit de berekening volgt:

$$\begin{aligned}i_f &= 0,20 \\L_{a,os} &= 2,53 \text{ m} \\L_{a,bs} &= 4,85 \text{ m} \\L_s &= 2,32 \text{ m} \\(\text{Waterlijn: } x &= 4,86 \text{ m})\end{aligned}$$



Figuur 2: Spleetlengthe bij horizontale stijghoogtelijn over spleettraject

Indien het gewicht van de toplaag zeer klein zou zijn ( $\Delta \cdot D \cdot \cos \alpha \ll \Phi_f - \Phi_w$ ) dan gaan (3), (4) en (7) over in:

$$\begin{aligned}i_f &\approx \sin \alpha \\L_{a,os} &\approx \Delta \cdot D_t \cdot \cos \alpha / \sin \alpha \\L_s &\approx \Phi_w / \sin \alpha\end{aligned}$$

Het filterverhang boven de spleet is nu vrijwel gelijk aan de taludhelling en de spleet loopt van de waterlijn tot vrijwel de teen.



### 3.3 Spleetlengte bij lineair aflopende stijghoogtelijn over spleettraject

In werkelijkheid zal er in de spleet altijd enige stromingsweerstand zijn en zal de stijghoogtelijn over het spleettraject dus niet horizontaal zijn, maar een kleine helling hebben. Dit impliceert dat bij een horizontale stijghoogtelijn de hoeveelheid water die door het systeem stroomt, wordt overschat.

De spleetlengte bij een lineair aflopende stijghoogtelijn over het spleettraject kan als volgt berekend worden (voor een nadere uitwerking wordt verwezen naar de bijlagen):

$$(\Phi_w + L \cdot i_s - L \cdot \sin\alpha) \cdot i_f^2 + \{(\Phi_f - \Phi_w - \Delta \cdot D_t \cdot \cos\alpha) \cdot \sin\alpha - \Phi_f \cdot i_s\} \cdot i_f + \Delta \cdot D_t \cdot \cos\alpha \cdot i_s \cdot \sin\alpha = 0 \quad (8)$$

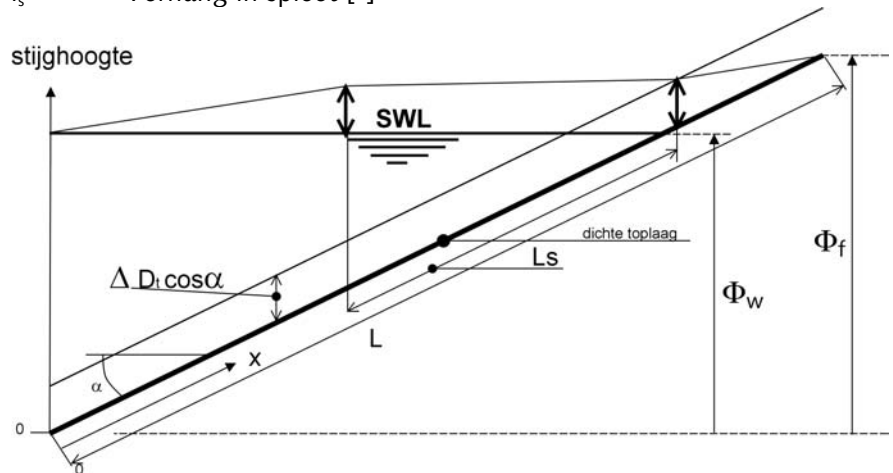
$$L_{a,bs} = (\Phi_f - \Delta \cdot D_t \cdot \cos\alpha - L \cdot \sin\alpha) / (i_f - \sin\alpha) \quad (9)$$

$$L_{a,os} = \Delta \cdot D_t \cdot \cos\alpha / i_f \quad (10)$$

$$L_s = L - L_{a,bs} - L_{a,os} \quad (11)$$

Waarin:

$i_s$  Verhang in spleet [-]



Figuur 3: Spleetlengte bij verhang over de spleet

Voor de case is wederom de spleetlengte berekend uitgaande van:  $\Phi_w = +1,5$  m. De relatie tussen spleetverhang en spleetlengte is weergegeven in tabel 2.

Tabel 2: Spleetlengte bij lineair aflopende stijghoogtelijn over spleettraject

$\Phi_w = +1,5$ m, waterlijn: $x = 4,86$ m				
$i_s$	$i_f$	$L_{a,os}$	$L_{a,bs}$	$L_s$
0	0,20	2,53 m	4,85 m	2,32 m
0,001	0,20	2,53 m	4,85 m	2,33 m
0,01	0,20	2,55 m	4,78 m	2,38 m
0,02	0,20	2,58 m	4,70 m	2,44 m
0,05	0,19	2,66 m	4,43 m	2,61 m
0,10	0,18	2,89 m	3,92 m	2,90 m

Uit de tabel blijkt dat bij een aflopende stijghoogtelijn de spleetlengte iets groter is dan bij een horizontale stijghoogtelijn ( $i_s = 0$ ) en dat het begin van de spleet opschuift tot boven de waterlijn. De invloed op het filterverhang daar waar de top laag niet opgedreven is, is nihil.

### 3.4 Spleetbreedte

De spleetbreedte wordt bepaald door de watertoevoer van bovenaf en het gewicht van de top laag. Bij stationaire stroming stelt zich daarbij een evenwicht in op grond van de continuïteitsvergelijking (12) en de stijghoogtevergelijking (13):

$$k_f \cdot D_f \cdot i_s + D_s^3 \cdot g \cdot i_s / 12 \cdot v = k_f \cdot D_f \cdot i_f \quad (12)$$

$$\text{Onder waterlijn: } \varphi_s = \Phi_w + D_s / \cos \alpha + \Delta \cdot D_t \cdot \cos \alpha \quad (13a)$$

$$\text{Boven waterlijn: } \varphi_s = x \cdot \sin \alpha + D_s / \cos \alpha + \Delta \cdot D_t \cdot \cos \alpha \quad (13b)$$

Waarin:

$i_s, D_s, \varphi_s$	Functies van $x'$
$x'$	Coördinaat, gemeten langs talud vanaf onderkant spleet [m]
$k_f \cdot D_f \cdot i_f$	Filterdebiet boven en onder de spleet volgens Darcy, tevens totaaldebiet [ $m^2/s$ ]
$k_f \cdot D_f \cdot i_s$	Debiet door de filterlaag ter plaatse van spleet, volgens Darcy [ $m^2/s$ ]
$D_s^3 \cdot g \cdot i_s / 12 \cdot v$	Debiet door spleet bij laminaire stroming [ $m^2/s$ ]
$D_s$	Spleetbreedte [m]
$\varphi_s$	Stijghoogte in spleet, t.o.v. teen bekleding [m]
$g$	Zwaartekrachtversnelling [ $m/s^2$ ]
$v$	Kinematische viscositeit van water [ $m^2/s$ ]

Daar geldt:  $i_s = d\varphi_s/dx$ , zijn de vergelijkingen (12) en (13) in elkaar te schuiven tot een differentiaalvergelijking (zie bijlage) waarvan de oplossing het stijghoogteverloop  $\varphi_s$ , en daarmee ook het verloop van het verhang  $i_s$  en de spleetbreedte  $D_s$ , over de spleet weergeeft als functie van  $x'$ .

Daar deze differentiaalvergelijking niet zo eenvoudig op te lossen is, is getracht de spleetbreedte te bepalen via een andere weg.

Voor de case is de relatie tussen spleetverhang en spleetbreedte berekend volgens (12). Daarbij is tabel 2 gebruikt als uitgangspunt. Dit resulteert in tabel 3. De stroming door de spleet bleek inderdaad laminair te zijn ( $Re \approx 1$ ).

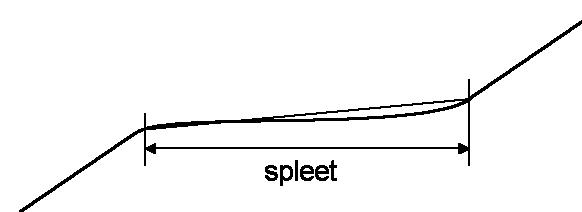
Tabel 3: Debieten en spleetbreedte bij gemiddeld spleetverhang en ondoorlatende toplaag

$g = 9,81 \text{ m/s}^2, \nu = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$					
$i_s$ (-)	$i_f$ (-)	Totaaldebiet ( $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}'$ )	Debiet door filtermateriaal ( $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}'$ )	Debiet door spleet ( $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}'$ )	$D_s$ (mm)
0,001	0,203	$2,03 \cdot 10^{-6}$	$0,01 \cdot 10^{-6}$	$2,02 \cdot 10^{-6}$	1,5
0,01	0,201	$2,01 \cdot 10^{-6}$	$0,10 \cdot 10^{-6}$	$1,91 \cdot 10^{-6}$	0,7
0,02	0,200	$2,00 \cdot 10^{-6}$	$0,20 \cdot 10^{-6}$	$1,80 \cdot 10^{-6}$	0,5
0,05	0,193	$1,93 \cdot 10^{-6}$	$0,50 \cdot 10^{-6}$	$1,43 \cdot 10^{-6}$	0,4
0,10	0,178	$1,78 \cdot 10^{-6}$	$1,00 \cdot 10^{-6}$	$0,78 \cdot 10^{-6}$	0,2

Tabel 3 geeft niet de maximale spleetbreedte weer, maar slechts de spleetbreedte bij het *gemiddelde* spleetverhang  $i_s$ . Ergens aan het begin en aan het eind van de spleet zal telkens een punt aanwezig zijn waar het spleetverhang volgens (12) gelijk is aan dit gemiddelde verhang en waar de spleetbreedte bijgevolg gelijk is aan die in tabel 3. Het maximum ligt echter tussen deze twee punten in en wel op de waterlijn, waar het stijghoogteverschil over de toplaag het grootst is.

Het verloop van de stijghoogtelijn over de spleet kan afgeleid worden uit vergelijking (13). Indien de spleet vanaf het onderste punt naar boven gevolgd wordt, is er sprake van een toename van de spleetbreedte, die volgens (13a) gelijk is aan de toename van de stijghoogte. Daar geldt:  $Q_s \sim D_s^3$ , betekent een toename van de spleetbreedte dat het verhang naar boven toe snel afneemt en dat de stijghoogtelijn dus steeds vlakker wordt. Dit gaat door tot het punt waar de waterlijn de bekleding snijdt: Hier is het verhang het kleinst, de overdruk onder de bekleding het grootst en de spleetbreedte maximaal. Boven dit punt nemen de overdruk onder de bekleding, en daarmee ook de spleetbreedte, snel af. Een en ander impliceert dat er op de waterlijn een knik in het spleetbreedteverloop zit.

Het bovenstaande impliceert dat de stijghoogte in de spleet rond de eerder veronderstelde lineaire stijghoogtelijn heengolft: Bovenin de spleet vormt de stijghoogtelijn een bolling onder de lineaire lijn, onderin de spleet een bolling boven de lineaire lijn, zie ook figuur 4. De golvende stijghoogtelijn snijdt de lineaire lijn vermoedelijk ergens onder de waterlijn.



Figuur 4: Kromlijinig stijghoogteverloop t.p.v. de spleet

Indien verondersteld wordt dat de werkelijke, golvende stijghoogtelijn ter plaatse van de waterlijn de rechte stijghoogtelijn (behorende bij het gemiddelde spleetverhang) snijdt, dan kan de maximale spleetbreedte als volgt berekend worden:

$$D_{s,max} = (L_{a,os} + L_s - x_w) \cdot i_s \quad (14)$$

Waarin:

$x_w$  x-coördinaat van de waterlijn, gemeten vanaf de teen en langs talud [m]

De berekende maxima voor de case zijn weergegeven in tabel 4.

Tabel 4: Maximale spleetbreedte bij ondoorlatende toplaag

Waterlijn: x = 4,86 m					
$i_s$ (-)	0,001	0,01	0,02	0,05	0,10
$L_{a,os}$ (m)	2,53 m	2,55 m	2,58 m	2,66 m	2,89 m
$L_s$ (m)	2,33 m	2,38 m	2,44 m	2,61 m	2,90 m
$D_{s,max}$ (mm)	0,01	0,7	3,2	20,5	93

Een terugblik op tabel 3 leidt tot de conclusie dat de benadering voor kleine verhangen (0,01 en 0,001) in ieder geval niet correct is. Het snijpunt tussen rechte en golvende stijghoogtelijn ligt daar kennelijk boven de waterlijn. Mogelijk verschuift het snijpunt voor grotere verhangen naar onderen, waarmee tabel 4 de spleetbreedte voor kleine verhangen (0,01 en 0,001) onderschat en voor grotere verhangen overschat.

### 3.5 Spleetbreedte bij dalende filterwaterstand

In de praktijk zal er nooit sprake zijn van een constante filterwaterstand (en dus een onbeperkte aanvoer van water), maar van een instationaire toestand waarbij de filterwaterstand niet alleen daalt vanwege de dalende buitenwaterstand maar ook vanwege het opvullen van de spleet. Voorts kost het tijd om de spleet te vullen en in deze tijd veranderen de randvoorwaarden. De spleetbreedte zal daardoor altijd kleiner blijven dan aangegeven in tabel 3 of tijdens een infiltratieproef. Uitgaande van een lineair verloop van de spleetbreedte kunnen de daling wegens het opvullen van de spleet en de vultijd (bij constante randvoorwaarden) als volgt berekend worden:

$$I_s = \frac{1}{2} \cdot D_{s,max} \cdot L_s \quad (15)$$

$$\Delta\Phi_f = I_s \cdot \sin\alpha / n \cdot D_f \quad (16)$$

$$t_s = I_s / q_f \quad (17)$$

Waarin:

$I_s$  Inhoud spleet [m<sup>3</sup>]

---

$\Delta\Phi_f$  Daling filterwaterstand [m]  
 $t_s$  Vultijd van de spleet [s]

Voor de case zijn de daling van de filterwaterstand en de vultijd van de spleet voor twee verhangen weergegeven in tabel 5. Daarbij is uitgegaan en gebruik gemaakt van tabel 3 en 4.

*Tabel 5: Daling filterwaterstand en vultijd spleet*

Verhang (-)	$L_s$ (m)	$Q_{f,in}$ (m <sup>3</sup> /s/m')	$D_{s,max}$ (mm)	$I_s$ (l/m')	$\Delta\Phi_f$ (m)	$t_s$ (u)
0,05	2,61	$1,93 \cdot 10^{-6}$	20,5	27	0,41	4
0,10	2,90	$1,78 \cdot 10^{-6}$	93	135	2,08	21

Om een spleet met een dikte aan de waterlijn van 9 cm te vullen is dus een daling van de filterwaterstand nodig van 2,09 m en een vultijd van 21 uur. Bij een daling van 2,09 m zou er echter onvoldoende druk overblijven om de spleet in stand te houden, voorts zullen in een getijdegebied binnen 21 uur de randvoorwaarden sterk veranderen. De spleetbreedte zou dus beduidend kleiner zijn dan 9 cm.

---

## 4. Doorlatende toplaag met oneindig talud

---

De volgende aannames zijn gehanteerd:

1. De toplaag is doorlatend;
2. Het talud loopt naar beneden oneindig door (teen is even doorlatend als de bekleding);
3. De toplaag heeft een stijfheid  $EI = 0$  (als ware de toplaag een laagje plastic);
4. Het filter ligt op een waterdichte ondergrond;
5. Filterwaterstand is constant (als ware het een infiltratieproef);
6. De stroming is stationair (evenwichtssituatie).

### 4.1 Stijghoogteverloop

Door WL zijn in 1985 (3) het stationaire stijghoogteverloop en verhang gepresenteerd voor een doorlatende toplaag bij een oneindig talud. Buitenwaterstand en filterwaterstand zijn daarbij constant. De oplossingen luiden als volgt:

$$\varphi_{f,ow} = \Phi_w + \frac{1}{2}\lambda' \cdot (e^{H/\lambda'} - e^{-H/\lambda'}) \cdot e^{(\sin\alpha/\lambda') \cdot x'} \quad (18a)$$

$$\varphi_{f,bw} = x' \cdot \sin\alpha + \frac{1}{2}\lambda' \cdot e^{-H/\lambda'} \cdot (e^{-(\sin\alpha/\lambda') \cdot x'} - e^{(\sin\alpha/\lambda') \cdot x'}) \quad (18b)$$

$$\Delta\varphi_{t,max} = \frac{1}{2}\lambda' \cdot (1 - e^{-2H/\lambda'}) \quad (19)$$

$$i_{f,ow} = \frac{1}{2}(e^{-H/\lambda'} - e^{H/\lambda'}) \cdot \sin\alpha \cdot e^{(\sin\alpha/\lambda') \cdot x'} \quad (20a)$$

$$i_{f,bw} = \frac{1}{2}(e^{(\sin\alpha/\lambda') \cdot x'} + e^{-(\sin\alpha/\lambda') \cdot x'} - 2e^{H/\lambda'}) \cdot \sin\alpha \cdot e^{-H/\lambda'} \quad (20b)$$

$$i_{f,max} = (e^{-H/\lambda'} - 1) \cdot \sin\alpha \quad (21)$$

Waarin:

$\varphi_{f,ow}$	Stijghoogte in filter onder stilwaterlijn, t.o.v. <i>filterwaterstand</i> [m]
$\varphi_{f,bw}$	Stijghoogte in filter boven stilwaterlijn, t.o.v. <i>filterwaterstand</i> [m]
$\Delta\varphi_{t,max}$	Maximaal stijghoogteverschil over toplaag (gelegen op stilwaterlijn) [m]
$i_{f,ow}$	Verhang in filter onder stilwaterlijn [-]
$i_{f,bw}$	Verhang in filter boven stilwaterlijn [-]
$i_{f,max}$	Maximaal verhang (gelegen op filterwaterstand) [-]
$x'$	Coördinaat, met oorsprong op <i>filterwaterstand</i> en positieve richting langs talud naar boven [m]
$\lambda'$	Lekhoogte ( $= (k_f \cdot D_f \cdot c)^{0.5} \cdot \sin\alpha$ ) [m]
$H$	Verskil tussen filter- en buitenwaterstand ( $= \varphi_f - \Phi_w$ ) [m]

Omdat de teen in deze oplossing dezelfde lek lengte heeft als de eigenlijke bekleding (en dus niet zeer open is), treden de grootste opwaartse drukken op bij een buitenwaterstand aan de teen. Bij een filterwaterstand die 3 m boven de teen ligt wordt voor de case een stijghoogteverloop berekend volgens tabel 6. Gemakshalve zijn de resultaten omgeschreven naar een assenstelsel met oorsprong in de teen (in bovenstaande formules ligt de oorsprong bij de filterwaterstand). In tabel 7 wordt de waterbalans voor dit geval weergegeven.

Tabel 6: Stijghoogte bij doorlatende top laag

L = 9,71 m, $\Phi_w = 0$ m, $\Phi_f = +3$ m, H = 3 m, $\lambda' = 1,69$ m, teen op x = 0								
x (m)	-2L	-L	0	0,2L	0,4L	0,6L	0,8L	L
$\Phi_w$ (m)	0	0	0	0,6*	1,2*	1,8*	2,4*	3*
$\varphi(x')$ (m)	0,02	0,14	0,82	1,16	1,57	2,02	2,50	3
$\Delta\varphi_t$ (m)	0,02	0,14	0,82	0,56	0,37	0,22	0,10	0
$\Delta\varphi_{t,max} = 0,82$ m								
* Boven de waterlijn is de plaatshoogte op het talud weergegeven								

Tabel 7: Waterbalans

Verhang t.p.v. filterwaterstand	$i_{f,max} = 0,26$
Verhang aan teen	$i_{f,teen} = 0,15$
Instroom om filterwaterstand op peil te houden	$Q_{f,in} = 2,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}'$
Uitstroom door teen	$Q_{f,teen} = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}'$
Uitstroom door top laag	$Q_t = Q_{f,in} - Q_{f,teen} = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}'$

Op basis van tabel 6 en 7 kan het volgende opgemerkt worden omtrent de oneindigheid van het talud en de stroming door de teen:

Op een afstand van twee maal de talud lengte (2L) onder de teen is het stijghoogteverschil over de top laag gereduceerd tot 2 cm en stroomt er dus nauwelijks nog water. Het 'oneindige' talud heeft hier dus een lengte van ongeveer 3L.

Uit de waterbalans volgt dat voor de case 58% van het water de bekleding verlaat door de top laag, en 42% door de teen. Dit kan gezien worden als een richtwaarde voor een teen die noch open, noch dicht is.

## 4.2 Open of dichte teen?

De dichtheid van de teen is relatief en geeft alleen weer of de teen meer of minder doorlatend is dan de bekleding: Zo zal de teen bij een open bekleding bijna altijd gekwalificeerd kunnen worden als 'dicht', terwijl diezelfde teen bij een asfaltbekleding juist 'open' zou zijn. Of de teen van een bekleding relatief open of dicht is kan afgeleid worden uit het verloop van de stijghoogtelijn bij een getijdemeting of infiltratieproef:

Indien de stijghoogtelijn aan de teen voortdurend horizontaal is en afwijkt van de buitenwaterstand, is de teen dicht (het verhang is nul en er vindt dus geen stroming plaats door de teen). Dit lijkt het geval te zijn bij Willem-Annapolder.

Indien aan de teen sprake is van een significant verhang en de stijghoogte nog maar weinig afwijkt van de buitenwaterstand, is sprake van een zeer open teen.

Indien er aan de teen een verhang is, maar toch nog een redelijke afwijking van de buitenwaterstand, is sprake van een tussensituatie. De tussensituatie wordt weergegeven door de formules (18) tot en met (21). Voorlopig wordt afgezien van het uitwerken van deze formules voor een dichte of open teen.

### 4.3 Daling filterwaterstand

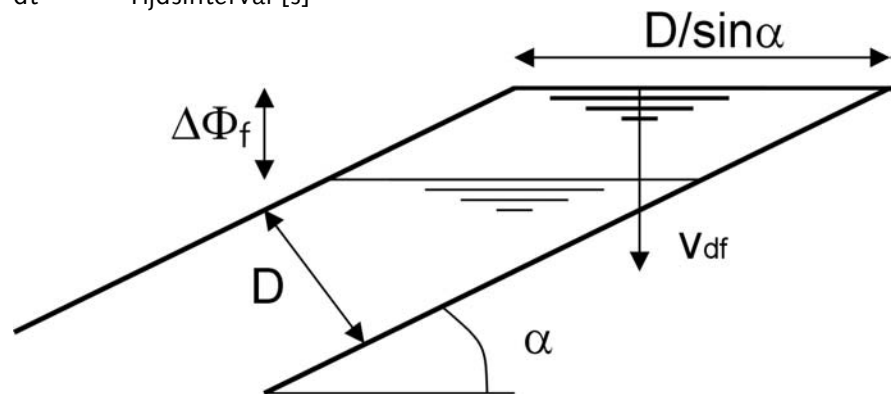
De gepresenteerde oplossing is een stationaire oplossing, d.w.z. zij geeft een evenwichtssituatie weer die uitgaat van constante randvoorwaarden. In werkelijkheid dalen zowel de buiten- als de filterwaterstand, waardoor de opwaartse druk minder hoog zal oplopen dan hierboven berekend. Getracht is de daling van de filterwaterstand te berekenen met o.a. de volgende formules:

$$v_{df} = Q_{f,in} \cdot \sin \alpha / (n \cdot D_f) \quad (22)$$

$$d\Phi_f = v_{df} \cdot dt \quad (23)$$

Waarin:

- $v_{df}$  Daalsnelheid filterwaterstand [m/s]
- $Q_{f,in}$  Instromend filterdebiet t.p.v. filterwaterstand =  $k_f \cdot D_f \cdot i_{f,max}$  [m<sup>3</sup>/s/m']
- $d\Phi_f$  Daling filterwaterstand per tijdsinterval [m]
- $dt$  Tijdsinterval [s]



Figuur 5: Dalende filterwaterstand

Op basis van een klein tijdsinterval, bijvoorbeeld 5 minuten, kan een initiële waarde voor  $H (= \Phi_f - \Phi_w)$  berekend worden. Vervolgens kan op basis van (21) het maximale verhang ( $i_{f,max}$ ) berekend worden. Hieruit volgen het filterdebiet, de (gemiddelde) daalsnelheid en de daling van de filterwaterstand voor dat tijdsinterval. Deze daling wordt verdisconteerd in de waarde voor  $H$  in de volgende tijdstep:

$$H_2 = (\Phi_{f1} - d\Phi_f) - (\Phi_{w1} - v_{dw} \cdot dt) \quad (24)$$



Waarin:

$v_{dw}$  Daalsnelheid buitenwaterstand [m/s]

Vervolgens worden daalsnelheid en daling van de filterwaterstand opnieuw berekend, enz. enz. enz. De resultaten voor de case zijn weergegeven in tabel 8.

Tabel 8: Daling filterwaterstand

$\Phi_{f1} = +3 \text{ m}, H_1 = 0,08 \text{ m}$				
t (min)*	H (m)	$v_{df}$ (m/s)	$d\Phi_f$ (m)	$\Sigma d\Phi_f$ (m)
30	0,49	$1,19 \cdot 10^{-5}$	0,01	0,01
60	0,96	$2,07 \cdot 10^{-5}$	0,03	0,04
90	1,42	$2,71 \cdot 10^{-5}$	0,04	0,08
120	1,86	$3,18 \cdot 10^{-5}$	0,05	0,14
150	2,29	$3,54 \cdot 10^{-5}$	0,06	0,20
185	2,79	$3,86 \cdot 10^{-5}$	0,07	0,27

\* De resultaten voor een kleiner tijdsinterval blijken hier weinig van af te wijken

Conclusie is dat in de periode dat de buitenwaterstand 3 m daalt tot de teen (in dit geval 185 minuten) de filterwaterstand met 0,27 m meedaalt. Dit betekent dat het maximale stijghoogteverschil afneemt met:

$$\Delta H_t = H_t (H = 3) - H_t (H = 3 - 0,27) = 0,82 - 0,81 = 0,01 \text{ m}$$

Waarin:

$H_t$  Maximaal stijghoogteverschil over toplaag [m]

$\Delta H_t$  Reductie stijghoogteverschil over toplaag door daling filterwaterstand [m]

Dit zet dus niet echt veel zoden aan de dijk. Een blik op de praktijk leert echter dat de filterwaterstand bij de getijdemetingen in Baarland en Willem-Annapolder veel verder daalde. Bij de tweede getijdemeting in Willem-Annapolder liep de filterwaterstand op tot 2,5 m boven de teen, terwijl bij laagwater het maximale verschil met de buitenwaterstand 0,7 m bedroeg. Er trad dus een daling op van 1,8 m (72%). Bij een daling van 72% voor de case volgt:  $H = 0,84 \text{ m}$ . De reductie van het stijghoogteverschil bedraagt dan:

$$\Delta H_t = H_t (H = 3) - H_t (H = 0,84) = 0,82 - 0,53 = 0,29 \text{ m}$$

Dit oogt al een stuk vriendelijker.

#### 4.4 Stroming door gaatje in de toplaag

Op grond van het voorgaande is in de case de doorlatendheid van de toplaag misschien toch wat onderschat. Om dit nader te onderzoeken is het debiet door een gaatje in de toplaag berekend:

$$Q_g = \pi \cdot r_g^4 \cdot g \cdot i_t / 8 \cdot v \quad (25)$$

Waarin:

$Q_g$  Debiet door gaatje in toplaag [ $m^3/s$ ]

$r_g$  Straal gaatje [m]

$i_t$  Verhang over toplaag [-]

De resultaten voor verschillende diameters zijn gepresenteerd in tabel 9. Daarbij is voor het verhang over de toplaag uitgegaan van de situatie dat de toplaag nog juist niet opdrijft:

$$\Delta\phi_t = \Delta \cdot D_t \cdot \cos\alpha = 0,51 \text{ m, waaruit volgt: } i_t = \Delta\phi_t / D_t = 1,7.$$

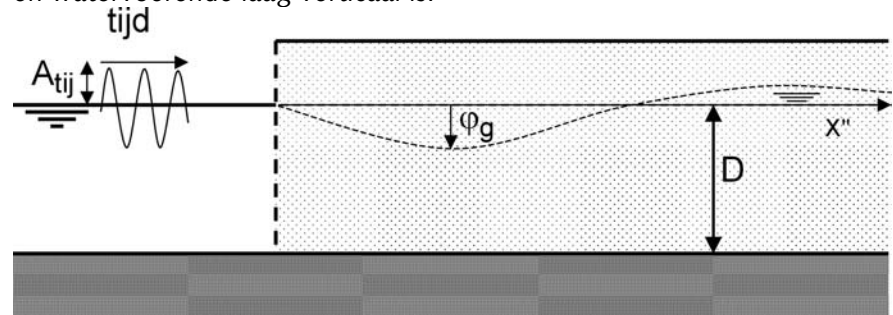
Tabel 9: Debiet door gaatje in toplaag

$\Delta\phi_t = 0,51 \text{ m, } i_t = 1,7$				
Diameter gaatje	1 mm	2 mm	5 mm	10 mm
Debiet ( $m^3/s$ )	$3,1 \cdot 10^{-7}$	$1,9 \cdot 10^{-6}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$

Indien we dit vergelijken met het in tabel 7 berekende taluddebiet ( $Q_t = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/s/m'$ ) zien we dat 3 gaatjes van 1 mm per strekkende meter talud al voldoende zijn om dit te realiseren. Op grond van de observaties in Baarland en Willem-Annapolder lijkt het er dus op dat de doorlatendheid van de toplaag duidelijk groter is dan  $1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ .

#### 4.5 Vergelijking met grondwaterstromingstheorie

Om de daling van de filterwaterstand wat analytischer te benaderen is deze vergeleken met de respons van de grondwaterstand in een watervoerende laag wanneer deze laag grenst aan een buitenwater met getijdewerking. Uitgangspunt daarbij is dat de grens tussen buitenwater en watervoerende laag verticaal is.



Figuur 6: case grondwaterstromingstheorie

Het verloop van de grondwaterstand kan als volgt berekend worden uit het getij:

$$\phi_g = A_{tij} \cdot e^{-\alpha x} \cdot \sin(\omega \cdot t - \alpha \cdot x'') \quad (26)$$

$$\phi_w = A_{tij} \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (27)$$

Met:

$$\alpha = (n \cdot \omega / 2 \cdot kD)^{0,5} \quad (28)$$

$$\omega = 2\pi/T_{\text{tij}}$$

(29)

Waarin:

$\varphi_g$	Grondwaterstand, t.o.v. gemiddelde buitenwaterstand [m]
$\varphi_w$	Buitenwaterstand door getijde, t.o.v. gemiddelde [m]
$A_{\text{tij}}$	Getij-amplitude (helft van het getijdeverschil) [m]
$e^{-\alpha x''}$	Demping (van de getij-amplitude) [-]
$\alpha x''/\omega$	Vertraging (t.o.v. getijde) [s]
$x''$	Coördinaat, gemeten vanaf grens met buitenwater [m]
$t$	Tijd, na begin getijdecyclus [s]
$n$	Efectieve porositeit watervoerende laag [-]
$k$	Doorlatendheid watervoerende laag [m/s]
$D$	Dikte watervoerende laag [m]
$T_{\text{tij}}$	Getijperiode [s]

In essentie geeft vergelijking 26 weer dat de grondwaterstand op een afstand  $x''$  (m) van de grens water/grond op het getij reageert met een vertraging gelijk aan  $\alpha x''/\omega$  (s), waarbij de getij-amplitude gedempt wordt met een factor  $e^{-\alpha x''}$  (-). Het verloop van de grondwaterstand op een bepaalde plaats wordt dus weergegeven door een kromme die gelijk is aan de getijkromme, maar dan afgeplat en iets verschoven in de tijd.

Een terugblik op de tweede getijdemeting bij Willem-Annapolder, uitgevoerd op de dag na de infiltratieproef, leert dat ook daar sprake was van een duidelijke afplating (demping) en een verschuiving ten opzichte van de getijkromme. In tabel 10 is voor 3 waterspanningsmeters weergegeven in hoeverre de getijmeting aansluit op vergelijking (26). Daarbij is uitgegaan van:  $x'' = D_f$  en  $T_{\text{tij}} = 12 \text{u} 25' = 44.700 \text{ s}$ .

Tabel 10: Correlatie getijmeting Willem-Annapolder met vergelijking (26)

$\omega = 1,404 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ , $x'' = 0,3 \text{ m}$				
Waterspanningsmeter	Vertraging	$\alpha$	Demping	
			Berekend	Gemeten
WSM4 (hoog op talud)	1.340 s	0,63	0,83	0,82
WSM6 (halverwege)	840 s	0,39	0,89	0,72
WSM11 (laag)	840 s	0,39	0,89	0,58

Het blijkt dat vergelijking (26) het gedrag van de waterspanningsmeters hoger op het talud goed weergeeft, maar dat lager op het talud de demping beduidend groter is dan op grond van de waargenomen vertraging verwacht zou worden. Op zich is dit niet zo vreemd, een steenbekleding verschilt ten slotte nogal van een verticaal begrensde watervoerende laag: de begrenzing is niet verticaal, en verder is er geen sprake van één homogene doorlatendheid, maar van een samengestelde doorlatendheid van toplaag, filter, teen en ondergrond.

Desondanks lijkt het principe van vergelijking (26) wel bruikbaar. Zo verklaart zij bijvoorbeeld het fenomeen dat de filterwaterstand al gaat dalen terwijl de buitenwaterstand nog hoger is dan de filterwaterstand.

De reden hiervoor is dat door de dalende buitenwaterstand na hoogwater het verhang over de toplaag langzaam afneemt, waardoor op een gegeven moment de instroom door de toplaag kleiner wordt dan de uitstroom naar de dijk kern, door de kleilaag.

Belangrijk is verder dat de factoren  $\alpha$  en  $\omega$  uit vergelijking (26) constanten zijn. Dit betekent dat de stijghoogte in het filter en daarmee ook het stijghoogteverschil over de toplaag ( $\varphi_f - \varphi_w$ ), lineair afhankelijk zijn van de getij-amplitude:

$$\varphi_f - \varphi_w = A_{\text{tij}} \cdot (e^{-\alpha x} \cdot \sin(\omega \cdot t - \alpha \cdot x) - \sin(\omega \cdot t)) \quad (30)$$

Met betrekking tot het maximale stijghoogteverschil is het daarbij belangrijk dat bij een normaal getijde de bekleding alleen blootstaat aan ruwweg de bovenste helft van de getijdekromme (uitgaande van een talud tot ca. NAP). Het maximum stijghoogteverschil treedt op aan de teen, maar als het talud zou doorlopen en de teen dus onder NAP zou liggen, dan zou het verschil groter worden.

Bij maatgevende omstandigheden is het talud ruwweg blootgesteld aan de gehele getijdekromme. Het maximale stijghoogteverschil opwaarts is dan gelijk aan het maximale stijghoogteverschil neerwaarts. Wanneer en waar dit maximum op zal treden kan rechtstreeks afgeleid worden uit de getijdemeting. Voor Willem-Annapolder is een en ander uitgewerkt in tabel 11. Het maatgevend tijverschil is daarbij aangenomen op 5 m.

Tabel 11: Maatgevend stijghoogteverschil voor Willem-Annapolder

	$A_{\text{tij}}$ (m)	$(\varphi_f - \varphi_w)_{\text{max}} = H_t$ (m)	
		Neerwaarts	Opwaarts
Getijmeting	4,1 m	1,0 m	0,6 m
MHW	5 m	1,2 m	1,2 m

Om te voorkomen dat het opwaartse stijghoogteverschil groter wordt dan tijdens springtij of eerder opgetreden en met succes doorstane stormomstandigheden, kan een waterslot aangebracht worden op springtijniveau.

## 4.6 Spleetlengte

De spleetlengte laat zich niet zo eenvoudig analytisch berekenen en waarschijnlijk is dat op dit moment ook niet zo relevant. De eerder gepresenteerde berekening ging uit van een zeer open teen en kwam uit op een spleetlengte van 2 à 3 m. Daar er hier geen sprake is van een zeer open teen zal het traject waarover het stijghoogteverschil groter is dan het onderwatergewicht van de toplaag langer zijn en doorlopen tot dicht bij de teen. Anderzijds zal de spleet wegens uitstroom via de open toplaag pas bij een lagere buitenwaterstand ontstaan en dus korter blijven. Voorlopig wordt uitgegaan van een spleetlengte van 3 à 5 m.

---

## 4.7 Spleetbreedte

Voor het berekenen van de spleetbreedte dient aan vergelijking (12) een term toegevoegd te worden die de uitstroom door de toplaag weergeeft. Vervolgens kan hieruit een differentiaalvergelijking gedistilleerd worden met behulp van de vergelijkingen 13. Ook deze is niet eenvoudig analytisch op te lossen.

In principe geldt ook hier hetzelfde als voor een ondoorlatende toplaag: Indien er geen onbeperkte watertoevoer van bovenaf kan plaatsvinden, dan zal de spleetbreedte nooit oplopen tot vele centimeters.

---

## 5. Bezwijkmechanisme

---

Op grond van het voorgaande wordt geconcludeerd dat de maximale filterstijghoogte laag op het talud al gauw het onderwatergewicht van de toplaag overschrijdt, en dit niet alleen bij maatgevende omstandigheden, maar ook bij veelvuldig voorkomende omstandigheden. Of vervolgens een waterlaagje ontstaat van enige relevantie hangt af van het toplaaggewicht, de toplaagstijfheid (EI), de taludhelling, de doorlatendheid van het systeem (toplaag, filter, teen en kleilaag) en de watertoevoer van bovenaf. Indien meerdere dijkvakken beschouwd worden, zal de spreiding in het toplaaggewicht en de taludhelling daarbij beduidend kleiner zijn dan de spreiding in doorlatendheid.

De belangrijkste factor in het geheel is de watertoevoer van bovenaf. Hierbij moet met name gedacht worden aan de situatie dat de ingieting aanwezig is van de teen tot enige meters onder de berm en dat het filter onder het bovenste deel van de ingieting relatief open is. In dat geval kan golfoploop hoog op het talud via de toplaag infiltreren en in het filter terechtkomen. Dit kan niet alleen leiden tot het ontstaan van een waterlaagje maar ook tot de instandhouding daarvan, met als gevolg mogelijk het progressief bezwijken van de bekleding.

Watertoevoer van bovenaf kan voorkomen worden door het toepassen van een waterslot. Door het waterslot aan te brengen op springtijniveau, zal ook bij maatgevende omstandigheden het waterlaagje niet dikker of langer worden dan bij regelmatig voorkomende omstandigheden. Wel zullen bij maatgevende omstandigheden de golfklappen groter zijn. Het ligt daarbij echter niet voor de hand dat de eerste de beste golfklap de hele bekleding wegvaagt, maar veeleer dat kleine gaatjes en scheurtjes zullen ontstaan. De doorlatendheid van de toplaag wordt hierdoor vergroot, waardoor een waterlaagje vroeg of laat teniet zal worden gedaan. Volgens de experts is het onwaarschijnlijk dat de golfklappen zoals die voorkomen in de Nederlandse situatie vervolgens alsnog zullen leiden tot bezwijken van de ingegoten bekleding.

---

## 6. Conclusies en aanbevelingen

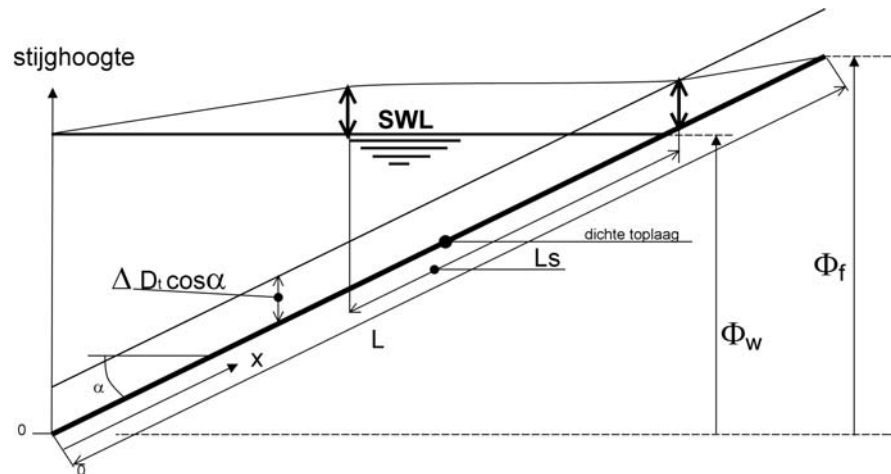
---

1. Het grootste stijghoogteverschil over de toplaag bij een dalende buitenwaterstand ligt altijd op de waterlijn. Op grond van de getijdemetingen wordt geconcludeerd dat de maximale waarde bij dagelijkse omstandigheden bereikt wordt aan de teen en bij maatgevend hoogwater vermoedelijk iets boven de teen;
2. Uit de getijdemetingen wordt geconcludeerd dat reeds bij dagelijkse omstandigheden de maximale filterstijghoogte laag op het talud al gauw het onderwatergewicht van de toplaag overschrijdt. Of vervolgens een waterlaagje ontstaat van enige relevantie hangt m.n. af van de doorlatendheid van het systeem en de watertoevoer van bovenaf;
3. Voor een ondoorlatende toplaag met zeer open teen werd een spleetlengte berekend van enige meters, waarbij het begin van de spleet op of iets boven de waterlijn ligt. Voor een doorlatende toplaag met een teen die net zo (on)doorlatend is als het filter ('oneindig talud') kan voorlopig gedacht worden aan spleetlengtes van 3 à 5 m;
4. De maximale spleetbreedte wordt op grond van wat benaderende berekeningen voorlopig ingeschat op enige mm tot maximaal enige cm. Hierbij is uitgegaan van de toepassing van een waterslot, dat de spleetbreedte sterk beperkt door de wateraanvoer van bovenaf te verhinderen. Er is geen rekening gehouden met de stijfheid van de toplaag en de uitstroom door de toplaag, die de spleetbreedte in de praktijk nog verder reduceren;
5. De spleetlengte en spleetbreedte zouden voor specifieke gevallen nauwkeuriger berekend kunnen worden, zij het waarschijnlijk niet analytisch. De parameters (m.n. doorlatendheden) zullen naar verwachting echter aan te veel spreiding onderhevig zijn om gebeurtenissen uit te sluiten of bruikbare grenswaarden op te leveren;
6. Bij de infiltratieproef en bij de gehanteerde vergelijkingen die de waterstroming door het filter beschrijven is telkens sprake van een stationaire toestand met een constante filterwaterstand. In werkelijkheid is er sprake van een instationaire toestand waarbij de filterstand meedaalt met de buitenwaterstand en waardoor het stijghoogteverschil over de toplaag gereduceerd wordt. Hoewel deze reductie relatief klein is, blijkt bij getijmetingen de daling van de filterstand groot te zijn, waardoor de reductie toch significant is. De daling in de praktijk bleek veel groter dan in de gehanteerde case;
7. De filterwaterstand volgt de buitenwaterstand en is in wezen een gedempte en vertraagde getijkromme. Damping en vertraging kunnen afgeleid worden uit een getijmeting. Hieruit kan per meetpunt het maximale stijghoogteverschil over de toplaag onder maatgevende omstandigheden eenvoudig berekend worden;

- 
8. Indien een waterslot wordt toegepast, zal bij maatgevende omstandigheden nauwelijks een groter stijghoogteverschil over de top laag ontstaan dan bij dagelijkse omstandigheden. Wel zullen bij maatgevende omstandigheden de golfklappen op het talud groter zijn;
  9. Kleine gaatjes of scheurtjes in de top laag kunnen al snel het hele filterdebiet verwerken, waardoor een waterlaagje voorkomen of snel teniet gedaan zou worden. Scheurtjes zouden kunnen ontstaan door een te grote golfbelasting;
  10. Wanneer zodanig veel scheurtjes zijn ontstaan dat er geen waterlaagje meer gevormd wordt, zal de top laag nog steeds relatief dicht zijn (in vergelijking met een open bekleding). Dit is ook logisch, want het filter is normaalgesproken ingeslibd en voert dus veel minder water aan dan een filter van steenslag bij een open bekleding. Voorts zal de ingegoten top laag met scheurtjes ook door interlock veel sterker zijn dan een open top laag.
  11. Aanbevolen wordt een golfklapproef te doen op een bestaande bekleding, waarbij de bekleding wordt onderworpen aan een dynamische belasting. Deze proef zou kunnen plaatsvinden bij springtij en rond de waterlijn, op het moment dat deze zich iets boven de teen bevindt. Het stijghoogteverschil over de top laag is dan vergelijkbaar met het stijghoogteverschil bij de maatgevende storm, met alleen het verschil dat dit optreedt hoger op het talud. De duur van de proef en de exacte locatie op het talud dienen afgestemd te worden op het aantal golfklappen dat bij een maatgevend afgaand water op één plaats in kan slaan.



## Bijlage: Nadere uitwerkingen



### 1. Bepaling spleetlengte bij lineair verlopende stijghoogtelijn in de spleet

Vergelijkingen die de stijghoogtelijn bepalen:

$$L = L_{a,os} + L_s + L_{a,bs} \quad (a)$$

$$L_{a,os} \cdot i_f + L_s \cdot i_s + L_{a,bs} \cdot i_f = \Phi_f - \Phi_w \quad (b)$$

$$L_{a,os} \cdot i_f = \Delta \cdot D_t \cdot \cos \alpha \quad (c)$$

$$(L_{a,os} + L_s) \cdot \sin \alpha + \Delta \cdot D_t \cdot \cos \alpha = \Phi_w + L_{a,os} \cdot i_f + L_s \cdot i_s \quad (d)$$

Waarin:

$L_{a,bs}$  Niet-opgedreven toplaaglengte boven spleet [m]

$i_s$  Verhang in spleet [-]

Oplossing:

- Eliminatie van  $L_s$  door substitutie van:  $L_s = L - L_{a,os} - L_{a,bs}$  in (b) en (d);

- Eliminatie van  $L_{a,os}$  door substitutie van:  $L_{a,os} = \Delta \cdot D_t \cdot \cos \alpha / i_f$  in (b) en (d);

- Optellen van vergelijking (b) en (d) elimineert  $i_s$ :

$$L_{a,bs} = (\Phi_f - \Delta \cdot D_t \cdot \cos \alpha - L \cdot \sin \alpha) / (i_f - \sin \alpha) \quad (9)$$

- Substitutie van  $L_{a,bs}$  in (b) levert:

$$(\Phi_w + L \cdot i_s - L \cdot \sin \alpha) \cdot i_f^2 + \{(\Phi_f - \Phi_w - \Delta \cdot D_t \cdot \cos \alpha) \cdot \sin \alpha - \Phi_f \cdot i_s\} \cdot i_f + \Delta \cdot D_t \cdot \cos \alpha \cdot i_s \cdot \sin \alpha = 0 \quad (8)$$

## 2. Differentiaalvergelijking opgedreven top laag

Bij stationaire stroming door een spleet gelden de continuïteitsvergelijking (12) en de stijghoogtevergelijking (13):

$$k_f \cdot D_f \cdot i_s + D_s^3 \cdot g \cdot i_s / 12v = k_f \cdot D_f \cdot i_f \quad (12)$$

$$\text{Onder waterlijn: } \varphi_s = \Phi_w + D_s / \cos \alpha + \Delta \cdot D_t \cdot \cos \alpha \quad (13a)$$

$$\text{Boven waterlijn: } \varphi_s = x \cdot \sin \alpha + D_s / \cos \alpha + \Delta \cdot D_t \cdot \cos \alpha \quad (13b)$$

Vergelijking 12 en 13a leveren samen differentiaalvergelijking (e).

Vergelijking 12 en 13b leveren (f):

$$d\varphi_s/dx = C_1 \cdot i_f / \{C_1 + (\varphi_s - \Phi_w - \Delta \cdot D_t \cdot \cos \alpha)^3\} \quad (e)$$

$$d\varphi_s/dx = C_1 \cdot i_f / \{C_1 + (\varphi_s - x \cdot \sin \alpha - \Delta \cdot D_t \cdot \cos \alpha)^3\} \quad (f)$$

Met:

$$C_1 = k_f \cdot D_f \cdot 12v / (g \cdot \cos^3 \alpha) \quad (g)$$

De oplossing van de differentiaalvergelijkingen (e) en (f) levert respectievelijk de onderwatertak en de bovenwatertak van de verhanglijn. Daarbij gelden de volgende randvoorwaarden:

$$x = 0: \varphi_s = \Phi_w + \Delta \cdot D_t \cdot \cos \alpha$$

$$x = 0: D_s = 0$$

$$x = x_w (= \Phi_w / \sin \alpha - L_{a,os}): \varphi_{s,o} = \varphi_{s,b}$$

$$x = x_w: d\varphi_{s,o}/dx = d\varphi_{s,b}/dx$$

$$x = x_w: D_{s,o} = D_{s,b}$$

$$x = L_s: \varphi_s = (L_{a,os} + L_s) \cdot \sin \alpha + \Delta \cdot D_t \cdot \cos \alpha$$

$$x = L_s: D_s = 0$$

---

## Symbolenlijst

---

### Symbool Omschrijving [eenheid]

$A_{tij}$	Getij-amplitude (helft van het getijdeverschil) [m]
$C$	Chézy-coëfficiënt [-]
$c_t$	Hydraulische weerstand van de toplaag [s]
$D$	Dikte watervoerende laag [m]
$D_f$	Dikte van de filterlaag [m]
$D_s$	Spleetbreedte [m]
$D_t$	Dikte van de toplaag [m]
$dt$	Tijdsinterval [s]
$g$	Zwaartekrachtversnelling [ $m/s^2$ ]
$H$	Vershil tussen filterwaterstand en buitenwaterstand [m]
$H_t$	Maximaal stijghoogteverschil over toplaag [m]
$I_f$	Inhoud filter [ $m^3/m'$ ]
$I_s$	Inhoud spleet [ $m^3/m'$ ]
$i_f$	Verhang in filter [-]
$i_{f,bw}$	Verhang in filter boven stilwaterlijn [-]
$i_{f,max}$	Maximaal verhang in filter [-]
$i_{f,ow}$	Verhang in filter onder stilwaterlijn [-]
$i_{f,teen}$	Verhang in filter aan de teen [-]
$i_s$	Verhang in spleet [-]
$i_t$	Verhang over de toplaag [-]
$i_{talud}$	Verhang talud [-]
$k$	Doorlatendheid [m/s]
$k_f$	Doorlatendheid filtermateriaal [m/s]
$k_t$	Doorlatendheid toplaag [m/s]
$k_w$	Wandruwheid [m]
$L$	Lengte talud van teen tot filterwaterstand [m]
$L_a$	Totale niet-opgedreven toplaaglengte [m]
$L_{a,bs}$	Niet-opgedreven toplaaglengte boven spleet [m]
$L_{a,os}$	Niet-opgedreven toplaaglengte onder spleet [m]
$L_s$	Spleetlengte [m]
$n$	Effectieve porositeit filtermateriaal [-]
$Q_{f,in}$	Instromend filterdebiet t.p.v. filterwaterstand [ $m^3/s/m'$ ]
$Q_{f,max}$	Maximaal filterdebiet [ $m^3/s/m'$ ]
$Q_{f,teen}$	Uitstromend filterdebiet aan teen [ $m^3/s/m'$ ]
$Q_g$	Debiet door gaatje in toplaag [ $m^3/s$ ]
$Q_t$	Uitstromend filterdebiet door toplaag [ $m^3/s/m'$ ]
$R$	Hydraulische straal [m]
$Re$	Getal van Reynolds [-]
$r_g$	Straal gaatje [m]
$T_{tij}$	Getijdeperiode [s]
$t$	Tijd, na begin getijdecyclus [s]
$t_s$	Vultijd van de spleet [s]
$v_{df}$	Daalsnelheid filterwaterstand [m/s]
$v_{dw}$	Daalsnelheid buitenwaterstand [m/s]

---

$v_s$	Stroomsnelheid in de spleet [m/s]
$x$	Coördinaat, gemeten langs talud vanaf de teen [m]
$x'$	Coördinaat, gemeten langs talud vanaf onderkant spleet [m]
$x''$	Coördinaat, gemeten vanaf grens met buitenwater [m]
$x_w$	x-coördinaat van de waterlijn, gemeten vanaf de teen en langs talud [m]
$\alpha$	Taludhelling [°]
$\Delta$	Gewichtscoefficiënt (relatief gewicht onder water) [-]
$\Delta\Phi_f$	Daling filterwaterstand [m]
$\Delta H_t$	Reductie stijghoogteverschil over toplaag door daling filterwaterstand [m]
$\lambda$	Leklengte [m]
$\lambda'$	Lekhoogte (= $(k_f \cdot D_f \cdot c)^{0.5} \cdot \sin\alpha$ ) [m]
$\nu$	Kinematische viscositeit van water [m <sup>2</sup> /s]
$\rho_t$	Soortelijk gewicht toplaag [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_w$	Soortelijk gewicht (zout) water [kg/m <sup>3</sup> ]
$\Phi_f$	Filterwaterstand [m]
$\Phi_w$	Constante buitenwaterstand [m]
$\varphi_f$	Stijghoogte in filter [m]
$\varphi_{f,bw}$	Stijghoogte in filter boven stilwaterlijn [m]
$\varphi_{f,ow}$	Stijghoogte in filter onder stilwaterlijn [m]
$\varphi_g$	Grondwaterstand [m]
$\varphi_s$	Stijghoogte in spleet [m]
$\varphi_w$	Variabele buitenwaterstand door getijde [m]
$\omega$	Karakteristieke frequentie ( $\omega = 2\pi/T$ ) [1/s]

---

## Referenties

---

1. Meijers, P. (2003), "*Infiltratieproef Baarlandpolder*", Geodelft, Delft.
2. Meijers, P. (2003), "*Infiltratieproef Willem Anna polder*", Geodelft, Delft.
3. "*Taludbekledingen van gezette steen, belasting en sterkte van zetsteenverdedigingsconstructies op oevers en dijken*", WL | Delft Hydraulics, 1985.