

# Technisch Rapport voor controle op het mechanisme piping bij rivierdijken

jan. 1994



**GRONDMECHANICA  
DELFT**

Postbus 69, 2600 AB Delft

Ministerie van Verkeer en Waterstaat  
Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat



Dienst Weg- en Waterbouwkunde

Technisch Rapport  
voor controle op het  
mechanisme piping  
bij rivierdijken

jan 1994

Auteurs : Ir. E.O.F. Calle, Grondmechanica Delft  
Ir. J.B. Weijers, RWS, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Delft

Begeleiding : Ing. J. Dekker, Grondmechanica, Delft

## 1. VOORWOORD

In deze notitie wordt de conceptversie van de nieuwe rekenregel voor de contrôle op het mechanisme piping bij rivierdijken gepresenteerd. Het is de bedoeling om deze rekenregel in een aantal projecten te gaan toepassen onder directe begeleiding van werkgroep B van de TAW. Na deze eerste fase kan de definitieve regel worden opgesteld en via de TAW kanalen worden verspreid.

De rekenregel is een implementatie van het rekenmodel van Sellmeijer, aangevuld met een aantal procedures voor het bepalen van de in dit model te hanteren parameterwaarden op basis waarvan tot voldoende veilige beoordelingscriteria wordt gekomen.

## 2. ACHTERGROND

Tot op heden worden ontwerpaanpassingen bij waterkeringen ten aanzien van het mechanisme piping gebaseerd op klassieke empirische rekenregels. De meest gebruikte is de regel van Bligh, die bepaalt dat de lek lengte tenminste gelijk moet zijn aan een factor, de "creep"coëfficiënt van Bligh, maal het ontwerpverval over de kering.

De lek lengte is de horizontale afstand, door de grondlaag onder een ondoorlatende waterkeringsconstructie tussen het "intreepunt" op de vooroever en het "uitreepunt", meestal een sloot achter de kering. De coëfficiënt van Bligh varieert tussen 5 en 18, afhankelijk van een kwalitatieve klassificatie van het materiaal in de laag die aan erosie blootstaat (zie tabel I).

Door Lane is een alternatieve regel opgesteld, waarmee het mogelijk is om verticale componenten in de lekweg (bijvoorbeeld het effect van kwelschermen) mee te nemen (zie ook tabel I).

Voor Nederlandse omstandigheden varieert de coëfficiënt van Bligh die moet worden toegepast tussen 15 en 18. Het gebruik van deze regel leidt tot schattingen van de benodigde lek lengte (dus tot schattingen van de benodigde bermbreedte van dijken) die als "voldoende veilig" worden beschouwd.

Tabel I. Klassieke rekenregels van Bligh en Lane

Grondsoort	C <sub>creep</sub>		C <sub>w.creep</sub> (Lane)
	Bligh	Griffith	
Zeer fijn zand of silt	-	-	8.5
Fijn zand of silt	18	-	-
Fijn zand (Micr)	18	(14.5-16)	7
Fijn zand (Kwarts)	15	(12.5-14)	7
Middelkorrelig zand	-	-	6
Grof zand	12	(10-12)	5
Fijn grind	9	-	4
Middelkorrelig grond	-	(8)	3.5
Grof grind	-	(4)	3
Zeer grof grind	4	2.5	
Slappe klei	-	3	
Normale klei	-		2
Harde klei	-		1.8

Bligh:  $L \geq H * C_{creep}$

Lane:  $L_v + \frac{1}{3} L_h \geq H * C_{w.creep}$

L = leklengte  
L<sub>h</sub> = horizontale component leklengte [m]  
L<sub>v</sub> = verticale component leklengte [m]  
H = toelaatbaar verval over waterkering [m.w.k.]

In het kader van de TAW is onderzoek uitgevoerd naar het mechanisme piping, met als doel te komen tot rekenmodellen of -regels die:

1. Meer toegespitst zijn op Nederlandse situaties. De klassieke regels zijn gebaseerd op empirie in het buitenland, met andersoortige grondslag en andersoortige typen van waterkeringsconstructies.
2. Het mogelijk maken scherper te dimensioneren. Het gevoel bestond dat de klassieke regels nogal wat conservatisme in zich herbergen.
3. Een beter inzicht verschaffen in de werking van het mechanisme en de parameters die daarbij een rol spelen. De klassieke regels zijn gestoeld op een "black box" benadering.

Behalve in Nederland werd en wordt ook elders fundamenteel onderzoek verricht, met name in Duitsland.

Het TAW-onderzoek heeft o.a. geleid tot de modelbeschrijving van Sellmeijer [1] en een bijbehorende formule die de relatie aangeeft tussen kritiek verval over de waterkering en een aantal parameters die betrekking hebben op de geometrie van de waterkering en de eigenschappen van het zand in de aan erosie blootstaande laag onder de kering.

De formule luidt:

$$H_{crit} = \alpha c \frac{\rho_p}{\rho_w} \tan(\theta) (0.68 - 0.10 \ln c) L \quad (1)$$

waarin:

$$\alpha = \left(\frac{D}{L}\right)^{\left\{\frac{0.28}{\left(\frac{D}{L}\right)^{2.8} - 1}\right\}} \quad (1a)$$

en:

$$c = \eta d_{70} \left(\frac{1}{\kappa L}\right)^{1/3} \quad (1b)$$

Hierin is:  $\rho_w$  = massa-dichtheid van water [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_p$  = massa-dichtheid van zandkorrels onder water  
[kg/m<sup>3</sup>]

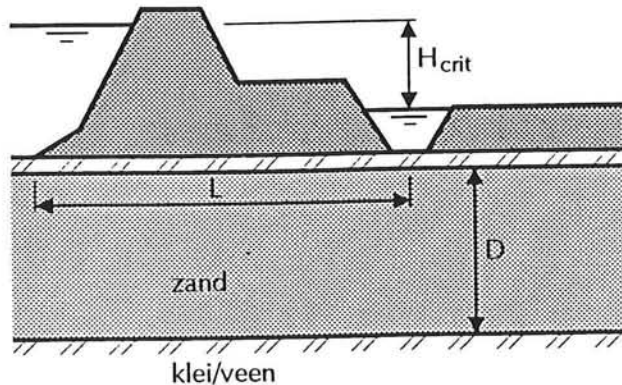
$\theta$  = rolweerstandshoek [°]  
 $\eta$  = sleepkrachtfactor (coëfficiënt van White)  
 $d_{70}$  = 70 percentiel waarde in korrelverdeling [m]  
 $\kappa$  = intrinsieke doorlatendheid van zandlaag die  
aan erosie blootstaat [m<sup>2</sup>]  
 $D$  = dikte van de zandlaag [m]  
 $L$  = de lengte van de kwelweg, horizontaal gemeten  
[m]

De factor  $\alpha$  reflecteert het effect van eindige dikte van de watervoerende zandlaag. De "c" coëfficiënt wordt bepaald door de eigenschappen van het zand in de watervoerende laag.

De formules zijn geldig voor een constellatie van de geometrie van het probleem, zoals aangegeven is in figuur 1.

Het basismodel van Sellmeijer wordt beschreven door een stelsel van vergelijkingen voor grondwaterstroming in de zandlaag, de stroming in door erosie ontstane kanaaltjes bovenin de zandlaag, en evenwichtsvergelijkingen voor zankorrels in deze kanaaltjes. Door numeriek oplossen van dit stelsel vergelijkingen kan de waarde van het grootste verval

over de waterkering worden gevonden, waarbij net geen doorgaande erosie (volledige pijpvorming) optreedt, het kritieke verval. De parameters in het stelsel vergelijkingen zijn dezelfde als boven genoemd. Voor een groot aantal parametercombinaties is het bijbehorende kritieke verval berekend. De formules (1), (1a) en (1b) zijn ontstaan door curvefitting aan deze numerieke berekeningsresultaten.



Figuur 1. Definitie schets

### 3. KEUZE VAN PARAMETERS IN ONTWERP/CONTROLE BEREKENING

De parameters in de formule van Sellmeijer moeten op een of andere wijze worden bepaald. Bij een gegeven ontwerp voor een waterkering op een gegeven grondslag liggen de geometrische parameters  $L$  en  $D$  vast, zij het dat met betrekking tot de precieze grootte onzekerheid kan bestaan. Bijvoorbeeld de dikte van de zandlaag moet via een beperkt aantal metingen worden vastgesteld. Bovendien zal enige ruimtelijke variatie een rol spelen. De lek lengte is de horizontale afstand tussen intreepunt en uitreepunt. Het laatste zal in het algemeen vrij nauwkeurig vastgelegd kunnen worden, bijvoorbeeld wanneer het uitreepunt in een sloot ligt. De locatie van het intreepunt waarmee gerekend moet worden ligt vaak niet eenduidig vast. Hierbij spelen overwegingen als hoeveel voorland blijvend aanwezig verondersteld mag worden, bijvoorbeeld i.v.m. ontgravingen of erosie.

Andere parameters die een rol spelen hebben betrekking op de korrelgrootte van het zand, de doorlatendheid van de zandlaag en hydraulische (morfologische) parameters van het zand (rolweerstandshoek  $\theta$  en coëfficiënt van White  $\eta$ ).

Korrelverdelingsparameters en doorlatendheid moeten worden geschat aan de hand van resultaten van terrein en of laboratoriumproeven. In beginsel zou dit ook gelden voor de parameters  $\theta$  en  $\eta$ , echter de hiervoor benodigde proeven zijn duur en passen in het algemeen niet in een opzet voor terreinverkenning en grondonderzoek. Deze parameters zijn typische "literatuur"parameters, dat wil zeggen de schattingen worden ontleend aan wat hierover in de literatuur bekend is.

### 3.1. Veiligheidsbeschouwing

Aan de hand van vastgestelde waarden voor de geometrie en materiaalparameters wordt met de formule van Sellmeijer het bijbehorende kritieke verval over de waterkering berekend. Vervolgens wordt getoetst of de belastingmaat, het geschatte optredende verval in een extreme situatie, kleiner is dan het kritieke verval. Zo niet, dan kan in een ontwerpsituatie de berm zodanig verlengd worden (vergroting van L) totdat wel aan het toetscriterium is voldaan.

Gegeven de onzekerheden met betrekking tot geometrie en materiaalparameters en de onzekerheid met betrekking tot het werkelijk optredende verval in de planperiode die in beschouwing wordt genomen moet veiligheid in de toetscriteria worden ingebouwd.

Zoveel mogelijk aansluitend op de gangbare praktijk, zoals vastgelegd in de leidraden voor ontwerpen van rivierdijken, maar ook in de nieuwe normen voor de geotechnische ontwerp praktijk, wordt hier uitgegaan van de volgende wijze waarop veiligheid in de ontwerp/contrôle regel voor piping wordt verdisconteerd:

- De waarden van de geometrie- en materiaalparameters waarmee m.b.v. de contrôleregels het kritieke verval moet worden bepaald worden rekenwaarden genoemd. Dit zijn de zogenaamde representatieve waarden (in beginsel conservatieve schattingen) van de parameters, gedeeld door partiële veiligheidsfactoren, de zogenaamde materiaalfactoren. De representatieve waarde van een parameter is óf een karakteristieke waarde, in het geval een steekproef van waarnemingen van de parameter beschikbaar is, óf een nominale waarde. Een karakteristieke waarde is die waarde van de parameter welke op grond van de steekproef geacht wordt een (kleine) onder- of overschrijdingskans te hebben, meestal wordt hiervoor 5 procent aangehouden. In het geval geen steekproef van waarnemingen beschikbaar is wordt voor de representatieve waarde een voldoende veilig geachte "nominale waarde" genomen. Dit kan een voorgeschreven waarde zijn. In het rekenvoorschrift voor de pipingregel zullen we ook een andere definitie hanteren, namelijk de waarde die gevonden wordt door van c.q. bij een "best guess" schatting een marge af te trekken c.q. op te tellen die gelijk is aan 1.65 keer het product van

"best guess"-waarde en een nominale variatiecoëfficiënt. We doen dus net alsof de "best guess" waarde de verwachtingswaarde van de parameter representeert en de nominale variatiecoëfficiënt de variatiecoëfficiënt van de parameter, en we bepalen op grond hiervan een (pseudo) karakteristieke waarde.

In de pipingregel worden de partiële veiligheidsfactoren op de parameters gelijk 1.0 gesteld, dus de rekenwaarden voor de parameters zijn de representatieve waarden. Op basis van een reeks probabilistische analyses [2],[3] werd gevonden dat de benodigde partiële veiligheidsfactoren voor de verschillende parameters dicht in de buurt van en zelfs beneden de 1.0 liggen. Om het rekenrecept eenvoudig te houden is ervoor gekozen de waarde 1.0 aan te houden, en de parameteronzekerheid af te dekken door één factor. Deze wordt gecombineerd met factor voor modelonzekerheid (zie onder).

- De rekenwaarde voor het mogelijk optredend verval is gelijk aan het verschil tussen conservatieve schatting van de mogelijk optredende hoogwaterstand in de rivier en het peil in de sloot (polderpeil, p.p.).
- Tenslotte wordt een partiële veiligheidsfactor gebruikt, die de modelonzekerheid afdekt. Deze wordt gecombineerd met de factoren voor parameteronzekerheid (zie boven), tot één factor  $\gamma$ .

Het toetscriterium is, zodoende:

$$(H_{opt} - p.p.) * \gamma \leq H_{crit}(L_{rep}, D_{rep}, d_{rep}, \kappa_{rep}, \dots) \quad (2)$$

waarbij de rekenwaarden gelijk zijn aan (pseudo) karakteristieke waarden of nominale waarden.

### 3.2. Te kiezen rekenwaarden en partiële veiligheidsfactoren

#### 3.2.1. **Optredend verval**

Voor de te keren waterstand wordt bij dijken uitgegaan van de maatgevende hoogwaterstand (MHW). Het criterium voor het vaststellen van de MHW is de jaarfrequentie van overschrijden ervan, die voor elke primaire waterkering is vastgelegd. Deze jaarfrequentie is een relatieve maat voor de beveiliging van het te beschermen gebied. Voorgesteld wordt om voor de optredende waterstand bij de controle op het mechanisme piping de MHW te nemen. De belastingmaat in het linkerlid van (2) wordt dus:

$$(H_{opt} - p.p.) = (MHW - p.p.) \quad (3)$$



waarin p.p. het polderpeil (slootpeil) betekent.

### 3.2.2. Veiligheidsfactor

Voor deze factor wordt geadviseerd  $\gamma=1.2$ . Dit is de combinatie van de veiligheidsfactor die parameteronzekerheden afdekt (1.1) en de model-factor, ook gelijk aan 1.1.

### 3.2.3. Parameters voor berekening kritieke verval

#### Parameter: L (lek lengte)

Schat hiervoor verwachtingswaarde (of best guess) en spreiding en op grond hiervan een "worst credible".

In een situatie waarin een redelijke steekproef van waarnemingen beschikbaar is, is dit de karakteristieke waarde:

$$L_{kar} = \mu(L) - t_{n-1}^{0.05} \sigma(L) \quad (4)$$

waarin  $\mu(L)$  en  $\sigma(L)$  gemiddelde en standaardafwijking zijn van de steekproef en  $t$  de Student t-waarde die hoort bij  $n-1$  graden van vrijheid ( $n$  = steekproefgrootte) en 5 procent onderschrijdingskans.

Ingeval alleen maar een best guess schatting beschikbaar is en een indicatie van de relatieve spreiding, wordt aangeraden te rekenen met de volgende representatieve waarde:

$$L_{rep} = L (1 - 1.65 V) \quad (4a)$$

waarin  $L$  de best guess is en  $V$  de relatieve spreiding (variatiecoëfficiënt). Neem  $V = 0.10$ , tenzij een betere indicatie beschikbaar is.

In sommige gevallen zal de absoluut minimale lek lengte met grote nauwkeurigheid kunnen worden vastgesteld. Deze is uiteraard representatief, wanneer die groter is dan de waarde die volgt uit bovenstaande recepten.

#### Parameter: D (dikte zandlaag)

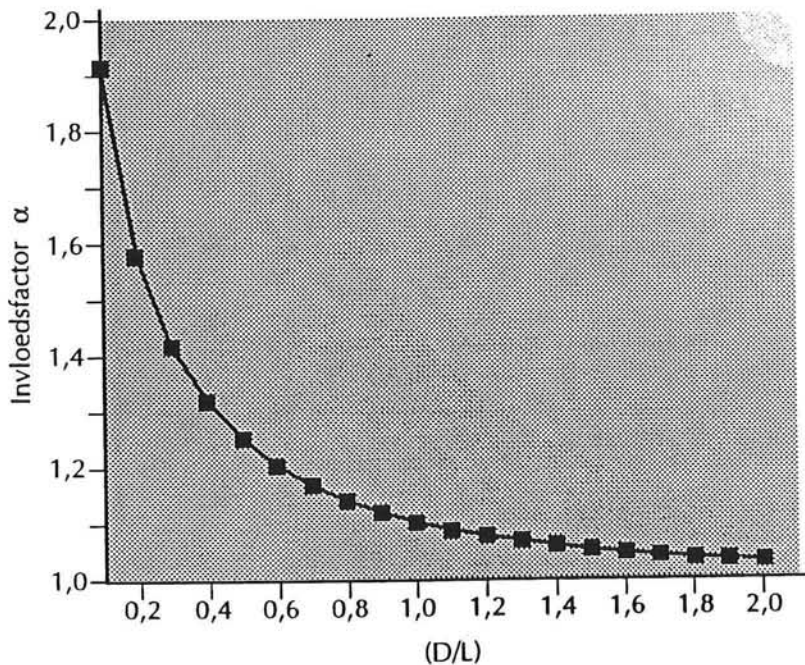
Deze moet geschat worden op basis van het grondonderzoek. Voor zandlagen met beperkte dikte (in vergelijking met de lek lengte) is deze parameter belangrijk (zie figuur 2), i.v.m de doorwerking ervan in de factor  $\alpha$ . Dat betekent tevens dat onzekerheden ten aanzien van deze parameter uitsluitend interessant zijn indien  $D < L$ .

Voor de representatieve waarde van deze parameter moet een conservatieve bovengrenswaarde worden gekozen. Indien op basis van het grondonderzoek een gemiddelde waarde en standaardafwijking kunnen worden bepaald is de te hanteren waarde:

$$D_{kar} = \mu(D) + t_{n-1}^{0.05} \sigma(D) \quad (5)$$

Indien alleen best guess schattingen beschikbaar zijn wordt, analoog met formule (4a), gerekend met een geschatte variatiecoëfficiënt, die tenminste 0.10 is.

Indien de dikte langs de te onderzoeken dijkstrekking zeer sterk varieert, verdient het aanbeveling deelstrekkingen te onderscheiden en de pipingcontrole per deelstrekking uit te voeren.



Figuur 2. Invloedsfactor voor dikte van de zandlaag

Parameters:  $\theta$  (rolweerstandshoek) en  $\eta$  (coëfficiënt van White)

De schatting van deze parameters is gebaseerd op literatuurgegevens en op ijking van het berekeningsmodel aan experimentele proeven [4]. Aanbevolen wordt om met de volgende nominale waarden te rekenen.

$$\theta_{rep} = 41^\circ \quad \text{en} \quad \eta_{rep} = 0.25 \quad (6)$$

Parameters met betrekking tot intrinsieke doorlatendheid

Er wordt onderscheid gemaakt tussen de volgende manieren om de intrinsieke doorlatendheid te bepalen namelijk:

1. Via directe schatting van de intrinsieke doorlatendheid op basis van in situ meting (bijvoorbeeld pompproef, infiltratieproef of meting met behulp van doorlatendheid sonde).
2. Schatting op basis van empirische relaties tussen korrelverdelingskarakteristieken van de watervoerende zandlaag en intrinsieke doorlatendheid.
3. Beide, waarbij onderlinge vergelijking mogelijk is.

Er moet gewerkt worden met een conservatieve bovengrens van de intrinsieke doorlatendheid.

ad 1. Bij in situ metingen zijn de geschatte doorlatendheden onzekere grootheden. De aard van die onzekerheden zullen afhankelijk zijn van het toegepaste type meting en de bekendheid met de ondergrondssituatie, voor zover die van belang is voor de interpretatie van de meting. Over de grootte van onzekerheden is overigens weinig bekend. Gerekend moet worden dat schattingen van de doorlatendheid gauw zo'n factor 3 mis kunnen zijn.

ad 2. Verondersteld wordt dat uit de korrelanalyse (en eventuele in situ meting) de volgende parameters bekend zijn:

- $d_{10}$ : de 10 percentiel waarde in de korrelverdeling van (zodanig afgeslibd) zand. (Het gewicht van de korrels met een diameter kleiner dan  $d_{10}$  is 10 procent van het totaal).
- $U$ : de uniformiteitscoëfficiënt  $U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$
- Het percentage fijne deeltjes (leem)
- De in situ porositeit.

Aan de hand van de hierna volgende relaties kan de doorlatendheid worden bepaald. De relatie tussen intrinsieke doorlatendheid  $\kappa(m)$  en doorlatendheidscoëfficiënt  $k$  (m/s) is:

$$\kappa = \frac{\nu}{g} k = 1.35 \cdot 10^{-7} k \quad (7)$$

waarin  $\nu$  de kinematische viscositeit is ( $\approx 1.33 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s voor grondwater van 10°C) en  $g$  de versnelling van de zwaartekracht ( $\approx 9.81$  m/s<sup>2</sup>).

De doorlatendheidscoëfficiënt  $k$  wordt op de volgende wijze berekend (Den Rooyen, [5]):

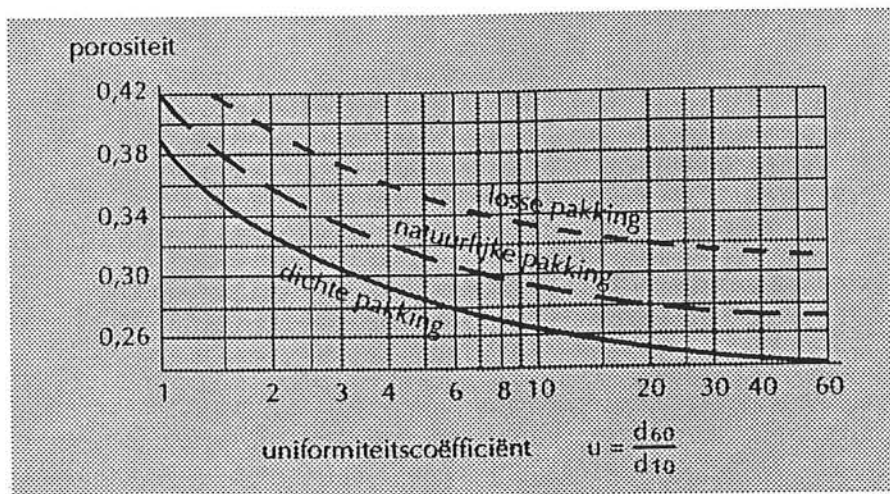
$$k = \{c_0 - 1.83 \cdot 10^3 \ln(U)\} d_{10}^2 \quad (8)$$

met  $d_{10}$  in m,  $k$  in m/s en  $U$  de uniformiteitscoëfficiënt  $U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$

Parameter  $c_0$  is afhankelijk van de pakking:

- losse pakking:  $c_0 = 1.5 \cdot 10^4$
- middelmatige pakking  $c_0 = 1.2 \cdot 10^4$
- vaste pakking  $c_0 = 1.0 \cdot 10^4$

Met behulp van figuur 3 kan aan de hand van schattingen van het poriegehalte en de uniformiteitscoëfficiënt de pakking kwalitatief worden afgeschat. Indien niets over de pakking bekend is dient de  $c_0$  waarde voor losse pakking te worden gebruikt.

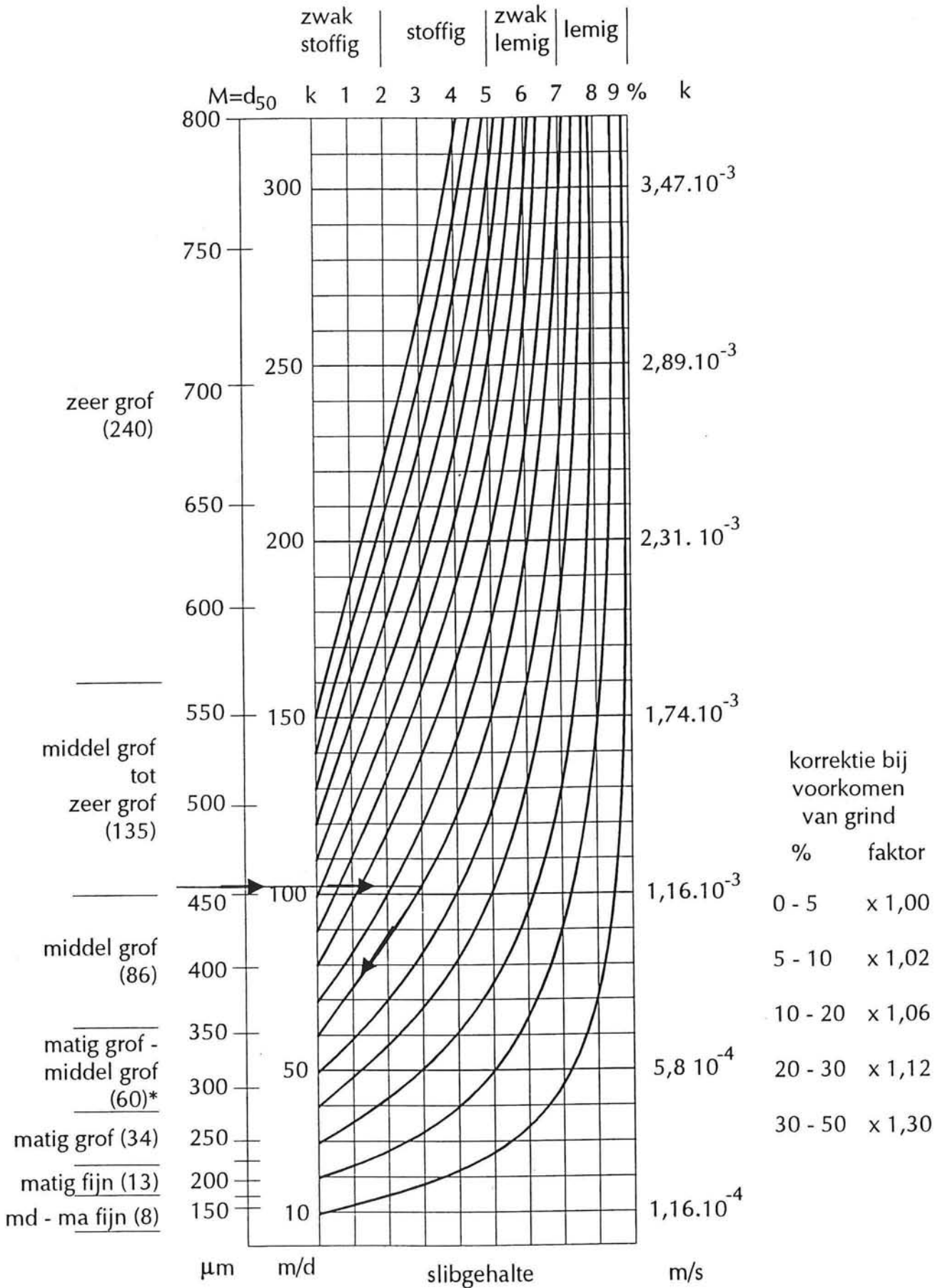


Figuur 3. Relatie porositeit, uniformiteitscoëfficiënt en pakking

In de berekening volgens vergelijking (8) moet gerekend worden met representatieve waarden voor  $d_{10}$  en voor  $U$ . Later, bij de behandeling van korrelverdelingsparameters zal hierop worden teruggekomen.

De berekende waarde van de doorlatendheidscoëfficiënt kan indien nodig worden gecorrigeerd voor het percentage fijne deeltjes, gebruikmakend van de grafiek van Van den Akker [6] (figuur 4). Op deze wijze kan, met behulp van (7) een representatieve waarde voor de intrinsieke doorlatendheid  $\kappa$  worden berekend.

De doorlatendheid waarmee gerekend moet worden is een parameter die representatief is voor de grondwaterstroming in de omgeving van de te onderzoeken locatie. Men moet bedacht zijn op zaken die het stromingsbeeld in de geïdealiseerde situatie (figuur 1) sterk kunnen beïnvloeden, zoals opgevulde geulen, klei of siltlenzen, etc. In deze gevallen is de kans groot dat de hier gegeven formules op basis van de korrelverdeling geen goede representatie opleveren. Het is aan te bevelen om in die gevallen een specialist te raadplegen.



\* (60) = gemiddelde k-waarde [m/d]

Figuur 4. Doorlatendheidscoëfficiënten als functie van korrelverdelingskarakteristieken (Van den Akker, [6]).

Korrelverdelingsparameters  $d_{7,0}$ , U en  $d_{1,0}$

Deze parameters worden geschat op basis van zeefanalyses van zandmonsters die getrokken zijn uit de zandlaag en waaruit slib verwijderd is. Aan de hand van de zeefanalyses moet eerst gekeken worden of de zandopbouw een systematiek vertoont, bijv. boven fijn en naar onder toe grof etc. De parameter  $d_{7,0}$  staat voor erosiegevoeligheid van het zand en moet dus gebaseerd zijn op de zandmonsters bovenin de laag, althans wanneer de systematiek er is. Wanneer die systematiek er niet is kan de schatting van deze parameter gebaseerd worden op alle zandmonsters in de laag. De representatieve waarde waarmee gerekend moet worden is een lage karakteristieke waarde (5 procents ondergrens). Omdat voor deze parameter de aanname van een lognormale vewrdeling geschikter is dan een normale verdeling moet hiermee gerekend worden. Het recept is:

- bepaal het gemiddelde van de  $\log$ 's van de  $d_{7,0}$  van de n zandmonsters:

$$\text{gem}(\log d_{7,0}) = \frac{1}{n} \sum \log d_{7,0,i} \quad (9a)$$

- bepaal de steekproefvariantie:

$$\sigma^2(\log d_{7,0}) = \frac{1}{n-1} \sum (\log d_{7,0,i} - \text{gem}(\log d_{7,0}))^2 \quad (9b)$$

- en de karakteristieke waarde:

$$(\log d_{7,0})_{\text{kar}} = \text{gem}(\log d_{7,0}) - t_{n-1}^{0.05} \sigma(\log d_{7,0}) / \sqrt{n} \quad (9c)$$

- de representatieve waarde is dan:

$$d_{7,0,\text{kar}} = \exp((\log d_{7,0})_{\text{kar}}) \quad (9d)$$

Voor de berekening van de doorlatendheid zijn U en  $d_{1,0}$  van belang. Hierbij gaat het om een schatting die representatief is voor de gehele laag. Er moet dus gewerkt worden met de monsters uit de gehele laag. Analoog aan de bepaling van  $d_{7,0}$  wordt ook voor U een lognormale verdeling gebruikt, zij het met ondergrens 1. De formule voor de representatieve waarde van U is:

$$U_{\text{kar}} = 1 + \exp[\text{gem}(\log(U-1)) - t_{n-1}^{0.05} \sigma(\log(U-1)) / \sqrt{n}] \quad (10a)$$

De representatieve waarde voor  $d_{1,0}$  wordt bepaald m.b.v.:

$$d_{10,rep} = \alpha d_{70,kar} / U_{kar} \quad (10b)$$

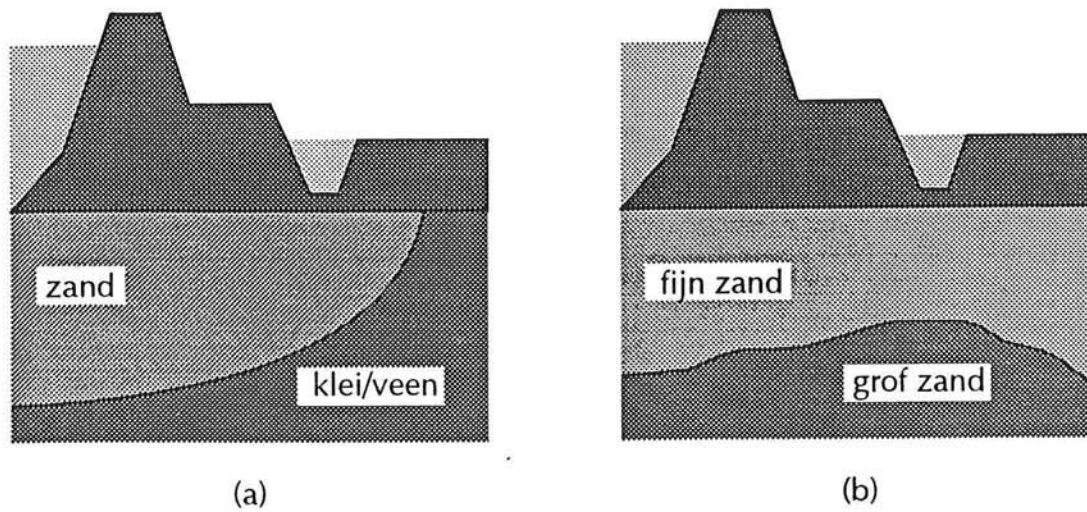
indien de schatting voor  $d_{70}$ , die in de formules (9) bepaald wordt, gebaseerd is op zandmonsters uit de gehele laag. In (10b) is  $\alpha$  een correctiefactor is. Neem hiervoor 0.9.

Ingeval de schatting voor  $d_{70}$  in de formules (9) gebaseerd zijn op alleen die zandmonsters die uit de bovenkant van de zandlaag komen, moet voor de  $d_{70}$  die in (10b) gebruikt wordt een nieuwe schatting gemaakt worden, die gebaseerd is op alle zandmonsters in de laag. Ook zou gewerkt kunnen worden met een hoge karakteristieke waarde van  $d_{10}$  die analoog aan (9a...9d) bepaald wordt (maar dan met "+" in plaats van "-" in formule (9c)) waarbij zandmonsters uit de gehele laag worden genomen.

Bij heterogene zandlagen zullen in het algemeen zeer grote variaties in de uitkomsten van de zeefanalyses voorkomen. De bovengegeven receptuur, die eigenlijk bedoeld is voor redelijk homogene zandlagen, kan dan onwerkbaar zijn. In dat geval moet de mogelijkheid onderzocht worden om concentraties van verschillende zandsoorten te identificeren en zo mogelijk te localiseren, en na te gaan welke maatgevend zijn ten aanzien van piping in de te onderzoeken strekking. Aanbevolen wordt om daarbij specialisten te raadplegen.

#### 3.2.4. Afwijkende geometrieën

De formule van Sellmeijer is geldig voor geïdealiseerde geometrie en parameters van de watervoerende zandlaag, dat wil zeggen een laag met homogene doorlatendheidseigenschappen met een constante dikte en die zich uitstrekt tot ver voorbij het "uittreepunt" (zie definitieschets figuur 1). In de praktijk zullen zich afwijkingen van die geïdealiseerde geometrie manifesteren. Figuur 5a laat een veel voorkomende afwijking van de geometrie zien, figuur 5b een afwijking ten aanzien van de geometrische verdeling van de doorlatendheidseigenschappen.



Figuur 5 (a) afwijking geometrie ten opzichte van geïdealiseerde model van Sellmeijer  
 (b) afwijking met betrekking tot doorlatendheid

#### 3.2.4.1. Algemene aanpak

Uitgangspunt voor de berekening van het toelaatbare (kritieke) verval over de waterkering blijft de formule van Sellmeijer. Echter, hierop worden correcties toegepast voor afwijkingen van de geïdealiseerde geometrie.

Voor de berekening van correcties wordt de volgende filosofie gehanteerd. Van dominant belang voor het erosiemechanisme zijn de potentiaalgradiënten in de watervoerende zandlaag ter plaatse van het uittreepunt, i.e. de spleet.

Deze gradiënten zijn evenredig met het uittreedebeet. Dit uittreedebeet is geen locale parameter, maar wordt bepaald door de overall geometrie en doorlatendheid van de watervoerende laag. Bij een van de geïdealiseerde geometrie afwijkende geometrie hoort een afwijkend uittreedebeet en dus evenredig afwijkende gradiënten ter plaatse van het uittreepunt. Willen we grosso modo gelijke uittreegradiënten in het geval van geïdealiseerde en hiervan afwijkende werkelijke geometrie, dan moeten de debieten in beide gevallen gelijk zijn.

Het debiet bij het uittreepunt is in beide gevallen evenredig met het verval over de waterkering. Dit wil zeggen dat de afwijkende geometrie



gecontroleerd kan worden met de piping formule voor de geïdealiseerde geometrie, mits daarbij met een gecorrigeerd verval over de waterkering wordt gerekend. De correctie is zodanig dat het gecorrigeerde verval bij de geïdealiseerde geometrie eenzelfde uittredebiet oplevert als het werkelijke verval bij de afwijkende geometrie. Deze correctie wordt toegepast op het voor piping kritieke verval.

Voorbeeld: Veronderstel dat een werkelijk verval  $H$  over een waterkering uittredebiet  $Q$  oplevert, als gerekend wordt met de geïdealiseerde geometrie. Wordt gerekend met de werkelijke (dus van de geïdealiseerde afwijkende) geometrie dan vinden we een uittredebiet van, zeg,  $1.2 Q$ . We zouden derhalve moeten rekenen met het verval  $H' = H/1.2$  om bij de werkelijke geometrie een uittredebiet  $Q$  te vinden. Zouden we met behulp van de piping regel een toelaatbaar verval  $H'_{crit}$ , dan is de hiermee corresponderende  $H'_{crit}$  voor de afwijkende geometrie:  $H'_{crit} = H_{crit}/1.2$ .

Voor de berekening van de genoemde verhouding tussen de debieten voor geïdealiseerde en afwijkende geometrieën kunnen we gebruik maken van programmatuur voor numerieke berekening van grondwaterstroming (bijvoorbeeld: MSEEP). We moeten dan twee berekeningen maken, namelijk:

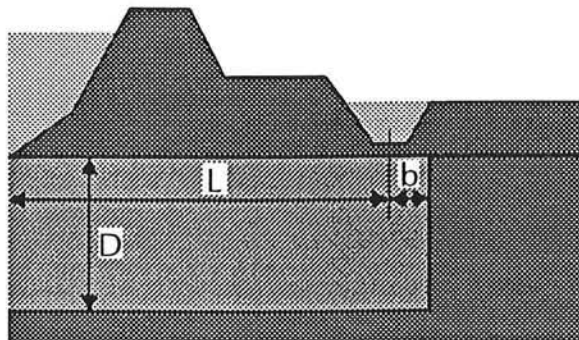
- met geïdealiseerde geometrie
- met werkelijke geometrie.

De eerste levert het uittredebiet  $Q_{id}$ , de tweede  $Q_{real}$ , de verhouding is  $Q_{real}/Q_{id}$ . Omdat de debieten beide lineair afhankelijk zijn van het potentiaal verval over de constructie is de verhouding onafhankelijk van de waarde van het verval waarmee gerekend wordt.

Van belang bij deze grondwaterstromingsberekeningen is de wijze waarop randvoorwaarden worden gekozen in de omgeving van het uittreepunt (de spleet). Voor het formuleren van eenduidige uitgangspunten is nog enig onderzoek noodzakelijk. In een later stadium zullen als aanvulling op de voorlopige rekenregel aanwijzingen worden geformuleerd.

#### 3.2.4.2. Werkwijze bij een specifieke geometrie

Gebaseerd op bovengenoemde werkwijze is voor een specifieke (afwijking van de geïdealiseerde) geometrie de invloed op het kritieke verval onderzocht. Het gaat om de geometrie die is aangegeven in figuur 6.



Figuur 6. Specifieke geometrie: doodlopend zandpakket

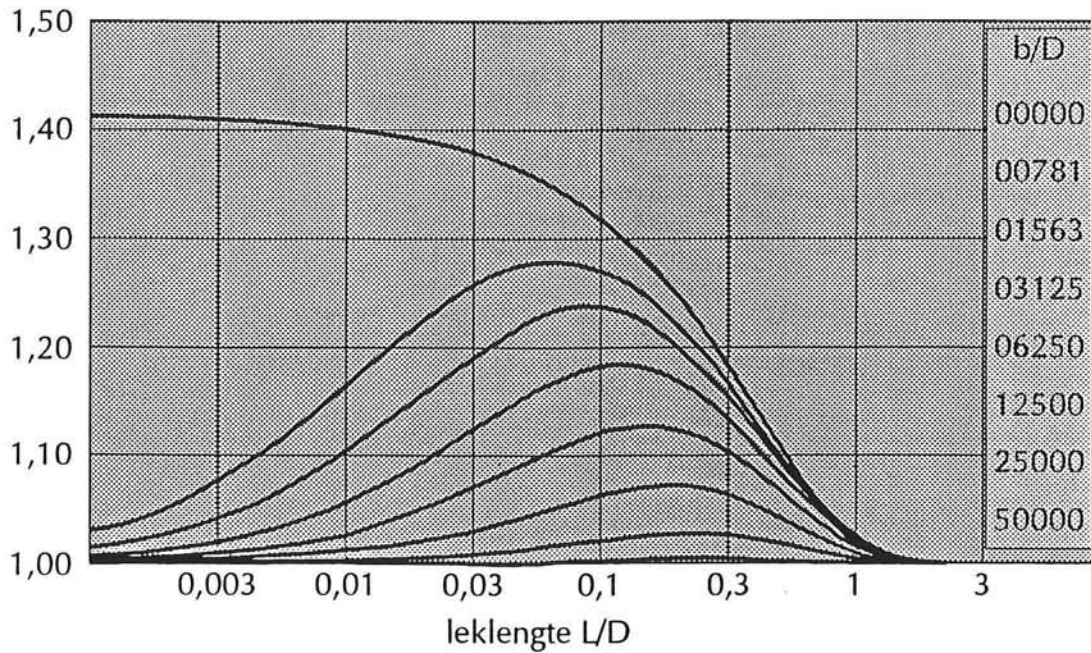
Door Sellmeijer [7] zijn berekeningen gemaakt voor het bepalen van de correctiefactor bij deze geometrie. Uitgangspunten bij die berekening zijn:

1. De pijp is geschematiseerd tot een uittreepunt (een put).
2. De correctiefactor is gelijk aan de verhouding tussen de potentialen halverwege de onderkant van de waterkering voor de situatie met doorlopende zandlaag (de geïdealiseerde geometrie) en de situatie waarin de zandlaag voorbij het uittreepunt stopt. De verticale rand bij de laatste geometrie wordt geacht ondoorlatend te zijn.

In figuur 7 is de berekende correctiefactor als functie van de verhouding tussen leklengte en pakketdikte weergegeven, voor verschillende waarden van de verhouding  $b/D$ .

In de figuur is te zien dat de correctie als gevolg van de afwijkende geometrie al snel tot 1.0 afneemt bij toename van  $b$ . Voor waarden van  $b$  groter dan  $1/8$  van de pakketdikte is de invloed minder dan 10 procent bij de ongunstigste verhouding tussen leklengte en pakketdikte. Bij leklengtes groter dan de pakketdikte is de correctie altijd kleiner dan 10 procent. Omdat bij de beschouwde geometrie de leklengte praktisch altijd groter zal zijn dan de pakketdikte is de correctie praktisch altijd verwaarloosbaar.

invloedsfaktor



Figuur 7. Invloed specifieke geometrie (uit: [7])

### 3.3. Vertikaal gedeelte in Lekweg

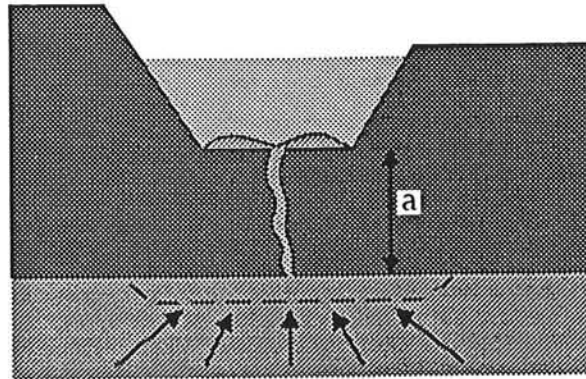
In het model van Sellmeijer bestaat nog niet de mogelijkheid om de invloed van een kwelscherm in rekening te brengen.

In voorkomende gevallen zal met de methode van Lane moeten worden gewerkt. Onderzocht wordt of het in rekening brengen hiervan kan, conform de methodiek die bij afwijkende geometrieën wordt gebruikt. Een vertikaal stuk bij de uitstroomopening kan wel worden meegenomen.

Proeven hebben aangetoond dat voor zo'n opening gemiddeld 50 procent van de lengte van het verticale kanaal als verval nodig is om zand af te voeren. Voor de berekening van het kritieke verval kan uitgegaan worden van de formule van Sellmeijer. Bij het resulterende verval wordt 30 procent van de lengte van het verticale kanaal opgeteld. Het toetsingscriterium wordt dus:

$$(\text{MHW} - \text{p.p.}) \gamma \leq H_{\text{crit}}(L_{\text{rep}}, D_{\text{rep}}, \dots) + 0.3 * a$$

waarin  $a$  de lengte is van het verticale kanaal (zie figuur 8).



Figuur 8. Vertikaal kanaal bij uittreepunt

#### 3.4. Het ontwerpprobleem

In het algemeen is de ontwerpvrijheid beperkt tot het bepalen van de hele lengte  $L$ , bijvoorbeeld met behulp van aanberming van de dijk. Voor de analyse betekent dit dat met "trial and error" gezocht zal moeten worden naar de benodigde verwachtingswaarde van de lek lengte  $\mu(L)$ .

Aangeraden wordt voorlopig, tot de definitieve rekenregel uitkomt, naast de hier geschetste voorlopige rekenregel de volgende beperking in acht te nemen. De lek lengtes mogen niet korter zijn dan tien keer de rekenwaarde van het verval (in mwk) over de waterkering.

## 4. VOLLEDIGE PROBABILISTISCHE ANALYSES

In beginsel zal de hier gegeven methodiek en receptuur enigszins aan de conservatieve kant zijn. Dit is inherent aan een receptuur die een groot geldigheidsgebied moet afdekken. In gevallen waarin besparing op de te nemen maatregelen t.a.v. piping van doorslaggevend belang is voor het ontwerp, wordt aangeraden een volledige probabilistische analyse (niveau II of niveau III) te laten uitvoeren door een daartoe gespecialiseerde adviseur.

## 5. REFERENTIES

- [1] Sellmeijer, J.B. On the Mechanism of Piping under impervious Structures. Dissertatie T.U. Delft, 1989.
- [2] Calle, E.O.F. Een probabilistische aanpak voor de analyse van piping onder waterkeringen. Grondmechanica Delft rapport CO-290531, januari 1990.
- [3] Heidemij Adviesbureau. Prototype onderzoek piping. Rapport 2 aug. 1991.
- [4] Silvis, F. Verificatie piping model, proeven in de Deltagoot. Grondmechanica Delft rapport CO-317710/7, maart 1991.
- [5] Den Rooijen, H. Literatuuronderzoek doorlatendheid - korrelkarakteristieken. Grondmechanica Delft rapport CO326020/9, febr. 1992.
- [6] Van den Akker, C. De schatting van kD-waarden van een watervoerend pakket aan de hand van granulaire samenstelling en dikte van het pakket, toegepast op boringen in de Gelderse vallei. Intern R.I.D. rapport, 1972.
- [7] Sellmeijer, J.B. Piping, geometrie-correcties. Grondmechanica Delft rapport CO-326020/6, januari 1992.