

# **SBW Piping - Hervalidatie Piping**

## **C1. Bureaustudie schematisatie doorlatendheid voor pipinganalyse**

Jan Blinde

**Titel**

SBW Piping - Hervalidatie Piping

C1. Bureaustudie schematisatie doorlatendheid voor pipinganalyse

<b>Opdrachtgever</b>	<b>Project</b>	<b>Kenmerk</b>	<b>Pagina's</b>
Rijkswaterstaat Waterdienst	1001453-001	1001453-001-GEO-0002	23

**Trefwoorden**

Piping

Rekenregel

MSeep

Doorlatendheid

2-lagenmodel




**Samenvatting**

Het programma Sterkte & Belastingen Waterkeringen (SBW) is gericht op het invullen van belangrijke kennisleemtes bij het vijfjaarlijks toetsen van de primaire waterkeringen. Die kennisleemtes betreffen zowel de belasting als de sterkte bij het toetsen. Het voorliggende project betreft het project 'SBW Piping - Hervalidatie Piping', deelonderzoek C1, 'Bureaustudie schematisatie doorlatendheid voor pipinganalyse'. Het doel van het deelonderzoek C is het opstellen van een procedure voor het schematiseren van de doorlatendheid van de ondergrond ten behoeve van de pipinganalyse. Deelonderzoek C1 betreft het aan de hand van numerieke analyses bepalen van de invloed van de schematisatie van de doorlatendheid op de resultaten van de pipinganalyse.

De rekenregel voor piping, de regel van Sellmeijer, geldt voor een homogeen zandpakket. In de praktijk zal de pipinggevoelige zandondergrond echter niet homogeen zijn. Uit analyses met het numerieke grondwaterstromingsmodel MSeep met pipingmodule is vastgesteld dat:

- het tot een betrouwbaarder resultaat leidt als met de verschillen in doorlatendheid van de zandlagen wordt rekening gehouden in de schematisatie van een pipinganalyse.
- het rekenen in MSeep met een meer-lagen schematisatie van de ondergrond een realistischer kritiek verval oplevert dan het rekenen met één laag.

Verder wordt voorgesteld om eerst de ontwikkeling van de nieuwe rekenregel af te wachten alvorens verder te gaan met het opstellen van een schematiseringshandreiking.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	2009-03-13	Ing. J.E.J. Blinde		Dr. ir. G Hoffmans		Ing. A.T. Aantjes	
2	2009-05-27	Ing. J.E.J. Blinde		Ir. J.E. Knoeff		Ing. A.T. Aantjes	

**Status**

definitief

## Inhoud

<b>1 Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1 Introductie	1
1.2 SBW Hervalidatie piping	1
1.3 Doel onderhavige rapportage	1
1.4 Aanleiding	2
1.5 Leeswijzer	2
<b>2 Relatie rekenregel en numeriek model MSeep</b>	<b>5</b>
2.1 Huidige praktijk	5
2.2 Pipingmodel van Sellmeijer	5
2.2.1 Analytisch rekenmodel (rekenregel) van Sellmeijer	6
2.2.2 Numeriek rekenmodel van Sellmeijer	7
2.2.3 Verschillen tussen MSeep en de rekenregel van Sellmeijer	7
2.3 Relatie doorlatendheid en kritiekverval	8
2.3.1 Uitgangspunten berekeningen	8
<b>3 Relatie 2-lagenmodel en kritiek verval</b>	<b>11</b>
3.1 Uitgangspunten berekeningen	11
3.2 Berekeningsresultaten.	12
<b>4 Conclusie en aanbevelingen</b>	<b>19</b>
<b>5 Literatuur</b>	<b>21</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Introductie

In het project Veiligheid Nederland in Kaart I (VNK1) kwam piping als een dominant faalmechanisme naar voren, wat niet aansluit bij het beheerdersoordeel. Nader onderzoek naar de betrouwbaarheid van de resultaten van de pipinganalyses binnen VNK1 wees uit dat de kans op piping, bij een betere schematisatie, kleiner zou worden maar nog steeds groter is dan verwacht. Ook vanuit de historie zijn aanwijzingen dat het pipingmechanisme relevanter kan zijn dan tot nu toe gedacht. Het is niet uit te sluiten dat de kans op piping is onderschat en onveilige procedures rondom het schematiseren en voorschrijven van rekenmodellen zijn opgesteld. Aan de betrouwbaarheid van rekenmodellen wordt getwijfeld.

## 1.2 SBW Hervalidatie piping

In Nederland wordt voor het toetsen op piping teruggerepen naar het eind jaren negentig opgestelde Technisch Rapport Zandmeevoerende wellen [TAW, 1999]. In het TR Zandmeevoerende wellen wordt het pipingproces en bijbehorende rekenmodellen beschreven.

De meest gebruikte rekenregels om het risico op piping te bepalen zijn de regel van Bligh en de regel van Sellmeijer. De rekenregel van Bligh wordt internationaal het meest gebruikt.

De rekenregel van Bligh is gebaseerd op empirie, uit met name India, van bezweken en niet bezweken dammen. De rekenregel van Sellmeijer is gebaseerd op een mathematische beschrijving van de grondwaterstroming door het zandpakket en de pipe en de beschrijving van de stabiliteit van de zandkorrels in de pipe. Het pipingproces wordt in de rekenregel van Sellmeijer vanuit een meer complete modellering benaderd dan in de regel van Bligh.

Zoals elk rekenmodel is ook de rekenregel van Sellmeijer een mathematische schematisatie van de werkelijkheid. Voor een betrouwbaar resultaat van de regel van Sellmeijer dient de werkelijkheid op de juiste manier te worden geschematiseerd. Een praktische beschrijving van het geldigheidsgebied van de regel van Sellmeijer en de wijze waarop de werkelijkheid binnen dit geldigheidsgebied moet worden geschematiseerd ontbreekt in de literatuur.

Om de onzekerheden binnen de huidige piping toetsingsregels in beeld te krijgen en deze eventueel te verkleinen of te elimineren is het onderzoeksprogramma Sterkte Belastingen Waterkeringen (SBW) Hervalidatie Piping opgestart.

Het doel van het SBW onderzoeksprogramma 'Hervalidatie Piping' is gedefinieerd als:

1. Een verbeterde en breder gevalideerde formule voor piping.
2. Een procedure voor het analyseren van piping met het eindige elementen grondwaterstromingsprogramma MSeep.
3. Een verbeterde toetsingsmethode.
4. Een herzien en door ENW goedgekeurd Technisch Rapport Zandmeevoerende wellen.

Dit rapport maakt deel uit van het onderzoeksprogramma.

## 1.3 Doel onderhavige rapportage

Onderhavige rapportage is onderdeel van het deelonderzoek C 'Een procedure voor het analyseren van piping met het eindige elementen grondwaterstromingsprogramma MSeep'. Het doel is enerzijds inzicht te krijgen in de relatie tussen de doorlatendheid en de regel van Sellmeijer. Anderzijds om tot handreikingen te komen voor het schematiseren van een pipinganalyse ten behoeve van het toetsen van dijken.

#### 1.4 Aanleiding

Uit eerdere piping analyses is gebleken dat de doorlatendheid van het zandpakket belangrijk is in het pipingmechanisme. Omdat de doorlatendheid vaak onbekend is, wordt voor de toetsing veelvuldig gebruik gemaakt van schattingen van de doorlatendheid, ontleend aan TNO-grondwaterkaarten of ontleend aan relaties met de korrelgrootteverdeling. De schattingen op basis van de grondwaterkaarten zouden wel eens te conservatief kunnen zijn omdat hierin vaak de diepere grovere en dus doorlatendere zandlagen dominant zijn. De relatie met korrelgrootteverdeling zouden wel eens optimistisch kunnen zijn omdat deze over het algemeen gebaseerd is op korrelgrootteverdelingen van zandmonsters die gewonnen zijn in de top van de zandlaag, die meestal fijner is en dus ondoorlatender dan de diepere lagen.

Het rekenmodel van Sellmeijer gaat uit van een homogeen zandpakket met één uniforme doorlatendheid. In de meeste gevallen is de opbouw van het doorlatende pakket echter niet uniform, hetgeen de toepassing van het rekenmodel van Sellmeijer bemoeilijkt. De laag direct onder de afdekkende kleilaag bestaat vaak uit fijner en minder doorlatend zand dan de dieper gelegen lagen.

Door de commissie Vrijling is naar aanleiding van de hoge faalkansen voor piping in het project Veiligheid Nederland in Kaart (VNK) in mei 2004 een studie opgeleverd [Thonus et al 2005] waarin onder andere is gekeken naar de invloed van het meenemen van meerdere lagen met een verschillende doorlatendheid.

In mei 2005 is door GeoDelft [Van Duinen 2005] een studie opgeleverd waarin onderzoek is gedaan naar de gevoeligheid van de modellering (laagopbouw) en parameterkeuze.

In de studie van de commissie Vrijling is aan de hand van MSeep berekeningen aangetoond dat het rekenen met een 2-lagensysteem met verschillende doorlatendheden leidt tot een betrouwbaarder resultaat. Verder is in deze studie een methode gegeven om vanuit een 2-lagen modellering te komen tot een 1-laags modellering voor de rekenregel van Sellmeijer.

In de studie van GeoDelft is aangetoond dat de verschillende methoden die beschikbaar zijn om de doorlatendheid van een zandpakket te bepalen verschillende resultaten geven. Afhankelijk van de gekozen methode levert dit een dus een bepaald resultaat in de pipinganalyse.

Parallel aan onderhavig onderzoek loopt in het kader van SBW-piping Hervalidatie een onderzoek naar de effecten van lokale inhomogeniteiten op stroomsnelheid van het grondwater en daarmee op de belasting op de zandkorrels onder dijken. De resultaten van dit onderzoek zijn gerapporteerd in rapport met titel Grondwaterstroming onder een dijk en sub titel 2D en 3D FEM-berekeningen ter bepaling van pipinggevoeligheid, met nummer 1200187-009-GEO-0001 voorlopige versie, dd 24-4-2009.

De conclusie is onder andere dat wanneer in de ondergrond onder de dijk lagen voorkomen met een hogere doorlatendheid en deze lagen niet door lopen tot voorbij het uittredepunt (binnenteen of kwelsloot), deze het verhang ter plaatse van het uittredepunt kunnen verhogen.

#### 1.5 Leeswijzer

In de onderhavige rapportage komen per hoofdstuk de volgende zaken aan bod:

Hoofdstuk 1: Inleiding. Hierin wordt de aanleiding en het doel van onderhavige rapportage beschreven.

Hoofdstuk 2: Relatie rekenregel en Numeriek model MSeep. Hierin worden de resultaten van berekeningen met de rekenregel vergeleken met de resultaten van berekeningen met MSeep.

In beide type berekeningen is een vergelijkbare schematisering van ondergrond en geometrie aangehouden.

Hoofdstuk 3: Relatie 2-lagenmodel en kritiek verval. In dit hoofdstuk wordt aan de hand van de resultaten van MSeep berekeningen aangetoond dat het rekenen met een gedifferentieerde doorlatendheid leidt tot een betere voorspelling van het kritiek verval.

Hoofdstuk 4: Conclusies en aanbevelingen. Hierin worden op basis van de resultaten uit hoofdstuk 2 en 3 conclusies en aanbevelingen geformuleerd.



## 2 Relatie rekenregel en numeriek model MSeep

### 2.1 Huidige praktijk

Voor het toetsen en ontwerpen van dijken zijn verschillende modellen beschikbaar met ieder hun toepassingsgebied.

Voor dijken en constructies zonder verticale schermen zijn dit de regel van Bligh (1910) en de regel van Sellmeijer (1988).

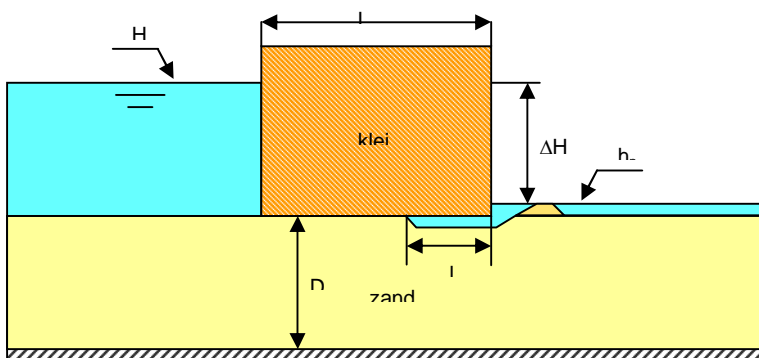
Voor dijken en constructies met verticale schermen zijn dit de regel van Lane (1935) en de methode Heave (1995). De regel van Sellmeijer is niet geldig voor dijken en constructies met verticale schermen.

In de toetspraktijk wordt de regel van Bligh gehanteerd voor de eenvoudige toetsing van dijken. Pas bij de gedetailleerde toetsing wordt dan de regel van Sellmeijer gebruikt.

Het deelonderzoek C1, 'Bureaustudie schematisatie doorlatendheid voor pipinganalyse' van het SBW-onderzoek Hervalidatie piping beperkt zich tot de regel van Sellmeijer omdat alleen hiervoor een numeriek model beschikbaar is om met verschillende lagen en verschillende doorlatendheden te rekenen.

### 2.2 Pipingmodel van Sellmeijer

Door Sellmeijer [Sellmeijer 1988] is een mathematisch rekenmodel ontwikkeld met betrekking tot piping. De eerste aanpak, die dateert van eind jaren tachtig van de vorige eeuw, is gebaseerd op analytische grondwaterstromingsberekeningen bij een dijk op homogene zandlaag, de zogenaamde standaardconfiguratie. Deze standaardconfiguratie is geschetst in Figuur 2.1. De resultaten zijn dan ook alleen maar geldig voor deze geometrie. Hiervoor is een vereenvoudigde formule ontwikkeld die aangeduid wordt als de rekenregel van Sellmeijer [Silvis, 1991], [TRZW, 1999]. De vorm van de formule lijkt op de formule van Bligh. Het verschil is dat de invloed van een aantal kenmerken van de watervoerende zandlaag zoals bijvoorbeeld de doorlatendheid meegenomen wordt via specifieke kwantitatieve parameters in plaats van de kwalitatieve kenmerken die bij de regel van Bligh een rol spelen.



Figuur 2.1 Modellering rekenmodel Sellmeijer

In het model zijn twee stromingsregimes in een pipinggevoelige zandlaag van belang:

- 1 grondwaterstroming door het zand.
- 2 waterstroming door het erosiekanaal.

Zij zijn gekoppeld door de voorwaarden van continuïteit van debiet en stijghoogte.



Voorts is nog een voorwaarde vereist om het kritieke verval over de constructie vast te leggen. Deze volgt uit de toestand van grensevenwicht van de korrels op de bodem van het erosiekanaal.

Het maximale verval over de constructie wordt berekend als de zandkorrels nog net in evenwicht zijn. Dit verval is afhankelijk van de verhouding  $l/L$ , tussen de lengte van het pipe kanaaltje en de lengte van de constructie, de doorlatendheid van het zand, de sleepkracht coëfficiënt (White coëfficiënt), de korrel diameter en de rolweerstand van de zandkorrels. Het verval bij de grootste verhouding van  $l/L$  waarbij nog net evenwicht wordt gevonden is het kritieke verval. Als het verval groter wordt dan het kritieke verval zal het pipe kanaaltje progressief groeien.

Het pipingmodel van Sellmeijer is gekalibreerd op enkele in de Deltagoot van WL | Delft Hydraulics uitgevoerde proeven.

### 2.2.1 Analytisch rekenmodel (rekenregel) van Sellmeijer

Met dit analytische model zijn door Sellmeijer voor een groot aantal combinaties van verschillende parameters berekeningen van het kritieke verval uitgevoerd. Samen met de validatieproeven in de Deltagoot [Silvis 1991] is een benaderende analytische formule afgeleid, de rekenregel van Sellmeijer (zie formule 2.1 t/m 2.4).

$$\Delta H_c = \alpha c (\gamma_p/\gamma_w) \tan(\theta) (0,68 - 0,10 \ln(c)) L \quad (2.1)$$

met:

$$\alpha = \left(\frac{D}{L}\right)^{0,28/\left\{\left(\frac{D}{L}\right)^{2,8}-1\right\}} \quad (2.2)$$

en:

$$c = \eta d_{70} (1/\kappa L)^{1/3} \quad (2.3)$$

met:

$$\kappa = (v/g) k \quad (2.4)$$

Waarin:

$\Delta H_c$  = kritieke verval over de waterkering [m]

$\gamma_p$  = (schijnbaar) volumegewicht van de zandkorrels onder water (17 kN/m<sup>3</sup>)

$\gamma_w$  = volumegewicht van water [kN/m<sup>3</sup>]

$\theta$  = rolweerstandshoek van de zandkorrels [°]

$\eta$  = coëfficiënt van White [-]

$k$  = doorlatendheid van de zandlaag [m/s]

$\kappa$  = intrinsieke doorlatendheid van de zandlaag [m<sup>2</sup>]

$d_{70}$  = 70-percentielwaarde van de korrelverdeling [m]

$D$  = dikte van de zandlaag [m]

$L$  = lengte van de kwelweg (horizontaal gemeten) [m]

$v$  = kinematische viscositeit [m<sup>2</sup>/s]

$g$  = zwaartekracht versnelling [m/s<sup>2</sup>].

Van de parameters die in de formule voorkomen zijn de geometrie eigenschappen  $D$  en  $L$  en de zandeigenschappen  $d_{70}$  en  $k$  variabelen. Voor de zandeigenschappen  $\theta$  en  $\eta$  worden vaste waarden aangehouden. De overige parameters zijn ook vaste waarden.

### 2.2.2 Numeriek rekenmodel van Sellmeijer

Sinds 2005 is er een numeriek model voor piping beschikbaar. Dit numerieke model is geïmplementeerd in het programma MSeep. MSeep is een programma voor de analyse van grondwaterstroming, gebaseerd op een Eindige Elementen Methode. Er wordt een aanname gedaan voor het verloop van de stijghoogte in het erosiekanaal. Vervolgens wordt getoetst in hoeverre voldaan wordt aan de evenwichtscondities van zandkorrels in het erosiekanaal.

Met de uitbreiding van MSeep voor een pipinganalyse kunnen de effecten van een niet homogene opbouw van de pipinggevoelige watervoerende zandlaag worden meegenomen. Ten opzicht van de rekenregel van Sellmeijer biedt dit het voordeel dat de watervoerende zandlaag niet als homogene laag moet worden geschematiseerd. De schematisatie van een in werkelijkheid niet homogene zandlaag tot een "reken"-zandlaag die wel homogeen is, is niet eenvoudig.

Van groot belang is het gehanteerde krachtenevenwicht op een korrel. Deze bestaat in de analytische benadering uit vier bijdragen. Enerzijds de horizontale bijdragen van de sleepkracht en de stromingsdruk [Sellmeijer, 1988]. Anderzijds de verticale bijdragen van korrelgewicht en stromingsdruk.

Recente inzichten hebben geleid tot een bijstelling hiervan. Deze bijstelling houdt in dat de korrel, waarop het krachtenevenwicht wordt bepaald, nauwelijks onderhevig is aan stromingsdrukken. In het numerieke rekenmodel worden de, stromingsdrukken verwaarloosd. Ten slotte wordt het stijghoogte verloop in het kanaal iteratief bijgesteld totdat voldaan wordt aan de evenwichtscondities.

### 2.2.3 Verschillen tussen MSeep en de rekenregel van Sellmeijer

In principe zal een predictie met overeenkomende parameters met MSeep en met de rekenregel van Sellmeijer, als gevolg van het verschil in benadering van het evenwicht van een zandkorrel, tot een verschillend resultaat leiden.

De rekenregel van Sellmeijer is gekalibreerd op enkele in de Deltagoot van WL | Delft Hydraulics uitgevoerde proeven. Hierop is de rolweerstandshoek, die voorgeschreven wordt bij het gebruik van de rekenregel van Sellmeijer voor de toetsing van dijken [TRZW, 1999], geijkt. Hierbij werd een rolweerstandshoek gevonden van  $41^\circ$ .

In het kader van VNK2 is er een analyse uitgevoerd waarin getracht is om de uitkomsten van de kritiek verval bepalingen met MSeep te ijken op de rekenregel. Net als bij de ontwikkeling van de rekenregel is de tangens van de rolweerstandshoek gebruikt als ijkfactor.

Hiervoor zijn een groot aantal vergelijkingen gemaakt tussen de resultaten van de rekenregel en MSeep voor gelijke schematisaties [GeoDelft 424111.0014-v5 dd 9-3-2007]. Het resultaat van de vergelijking was dat de verschillen tussen de rekenregel van Sellmeijer en MSeep kunnen worden geminimaliseerd door in MSeep te werken met een iets hogere rolweerstandshoek, namelijk  $45^\circ$  in plaats van  $41^\circ$ .

De berekeningsresultaten zullen nooit exact overeenkomen door het aanpassen van de rolweerstandshoek, omdat er een modelleringverschil is tussen beide rekenmodellen.

De verschillen hangen sterk af van de grootte:

$$c = \eta d_{70} (1/\kappa L)^{1/3} \quad (2.3)$$

Om straks de resultaten van de pipinganalyses met elkaar te kunnen vergelijken wordt waar mogelijk (bij homogenen zandlagen) zowel een resultaat geleverd met de rekenregels als een resultaat met MSeep.

### 2.3 Relatie doorlatendheid en kritiekverval

Voor de bepaling van de relatie tussen de doorlatendheid van de ondergrond en het kritieke verval is gebruik gemaakt van de rekenregel van Sellmeijer en van het numerieke model van Sellmeijer zoals dat is geprogrammeerd in MSeep 7.4.2.1.

Zoals in het vorige hoofdstuk vermeld, is er een verschil tussen de modellering van de rekenregel en de modelering van het numerieke model.

#### 2.3.1 Uitgangspunten berekeningen

Aan de hand van een serie berekeningen met de rekenregel en met MSeep is het verschil in beeld gebracht.

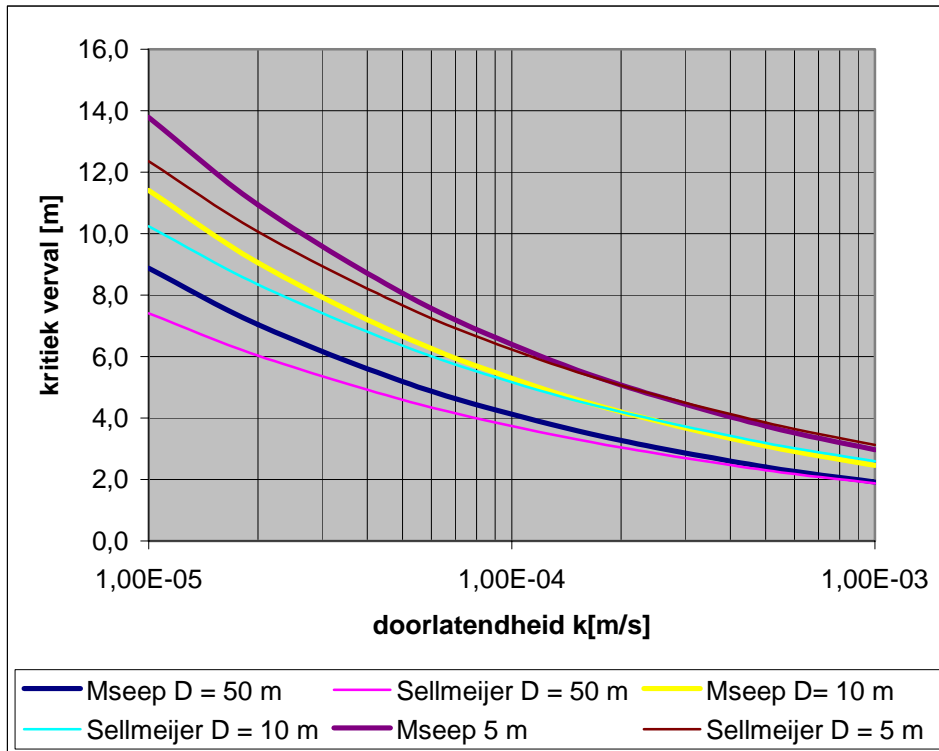
De uitgangspunten van de berekeningen zijn in onderstaande tabel aangegeven.

parameter	Rekenregel waarde	MSeep waarde	
$\gamma_p$	17		kN/m <sup>3</sup>
$\gamma_w$	10		kN/m <sup>3</sup>
$\gamma_s$		20	kN/m <sup>3</sup>
$n$		0,4	-
$\theta$	41	45	°
$\eta$	0,25	0,25	-
$d_{70}$	200	200	µm
$D$	5 tot 50	5 tot 50	m
$L$	40	40	m
$v$	$1,33 \times 10^{-6}$	$1,33 \times 10^{-6}$	m <sup>2</sup> /s
$g$	9,81	9,81	m/s <sup>2</sup>
$k$	$1 \times 10^{-5}$ tot $1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-5}$ tot $1 \times 10^{-3}$	m/s

Tabel 2.1 Uitgangspunten vergelijking Rekenregel en MSeep

In de rekenregel als ook in MSeep zijn de berekeningen uitgevoerd voor 3 dikten van de zandlaag, te weten: 5 m, 10 m en 50 m en 7 verschillende doorlatendheden, te weten:  $10^{-5}$  m/s,  $2 \times 10^{-5}$  m/s,  $5 \times 10^{-5}$  m/s,  $10^{-4}$  m/s,  $2 \times 10^{-4}$  m/s,  $5 \times 10^{-4}$  m/s,  $10^{-3}$  m/s.

De resultaten zijn vermeld in onderstaande figuur.



Figuur 2.2 Vergelijking MSeep en de Rekenregel

In de figuur is goed zichtbaar dat voor de hier gekozen schematisatie er een verschil van circa -5% ( $k=10^{-3}$ ) tot circa +20% ( $k=10^{-5}$ ) optreedt afhankelijk van de gekozen doorlatendheid en laagdikte.



### 3 Relatie 2-lagenmodel en kritiek verval

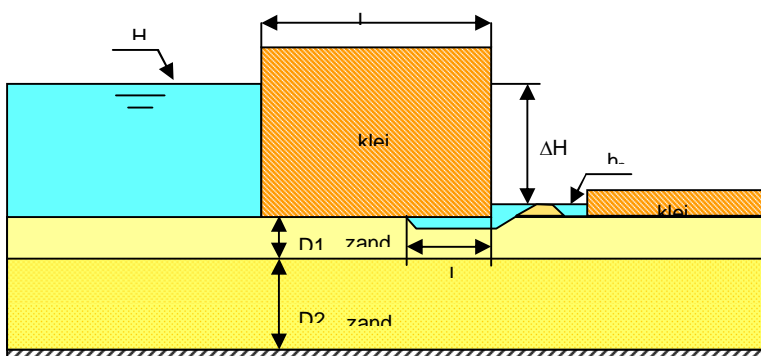
Zoals gezegd gaat het rekenmodel van Sellmeijer uit van een homogeen zandpakket met één uniforme doorlatendheid. In de meeste gevallen is de opbouw van het doorlatende pakket echter niet uniform, hetgeen de toepassing van het rekenmodel van Sellmeijer bemoeilijkt. De top van de zandlaag bestaat vaak uit fijner en minder doorlatend zand dan de dieper gelegen lagen. In het oosten van Nederland komen gebieden voor waar de top van het zandpakket grover en doorlatender is dan dieper gelegen zandlagen.

Voor de bepaling van de relatie tussen het kritieke verval en doorlatendheidsverschillen tussen de top van het zandpakket en de overige zandlagen is gebruik gemaakt van MSeep versie 7.4.2.1.

#### 3.1 Uitgangspunten berekeningen

Aan de hand van een serie berekeningen met MSeep is de relatie in beeld gebracht.

Ten behoeve van de berekeningen is een 2-lagen ondergrondmodel geschematiseerd volgens onderstaand principe. De dikte en de doorlatendheid van de zandlagen is gevarieerd



Figuur 3.1 Modelling 2-laags MSeep-berekeningen

De uitgangspunten van de berekeningen zijn in onderstaande tabel aangegeven.

parameter	waarde	
$\gamma_s$	20	kN/m <sup>3</sup>
n	0,4	-
$\theta$	45	°
$\eta$	0,25	-
$d_{70}$	200	$\mu\text{m}$
$D_{\text{totaal}}$	50	m
$D_1$	0 tot 25	m
$D_1 + D_2$	50	m
L	40	m
v	$1,33 \times 10^{-6}$	m <sup>2</sup> /s
g	9,81	m/s <sup>2</sup>
$k_1$	$1 \times 10^{-5}$ tot $1 \times 10^{-4}$	m/s
$k_2$	$1 \times 10^{-5}$ tot $1 \times 10^{-5}$	m/s

Tabel 3.1 Uitgangspunten 2-lagen MSeep-berekeningen

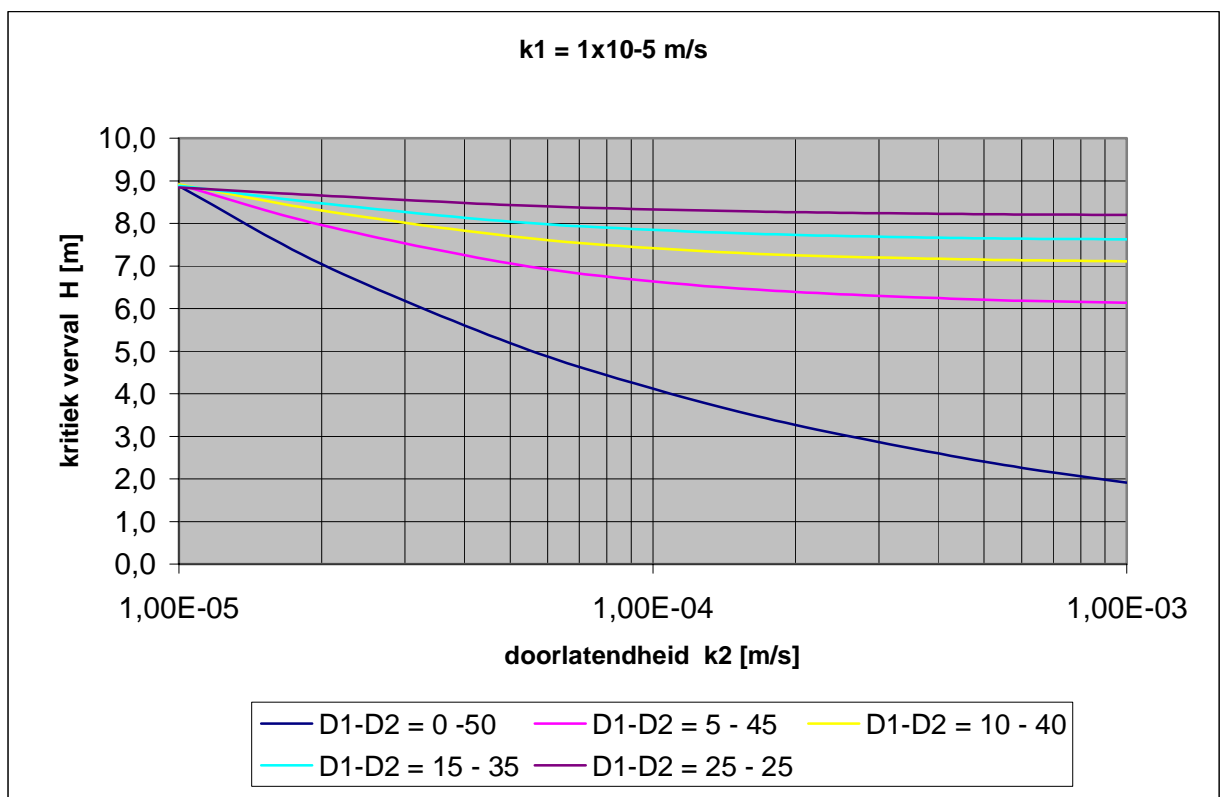
### 3.2 Berekeningsresultaten.

De berekeningen zijn uitgevoerd voor 4 verschillende dikten van de bovenste zandlaag ( $D_1$ ), te weten: 5 m, 10 m, 15 m en 25 m en 3 verschillende doorlatendheden ( $k_1$ ), te weten:  $10^{-5}$  m/s,  $5 \times 10^{-5}$  m/s en  $10^{-4}$  m/s. De totale dikte van de zandlagen ( $D_1+D_2$ ) is constant gehouden op 50 m. De doorlatendheid van de onderste zandlaag ( $k_1$ ) is per dikte en doorlatendheid van de bovenste zandlaag als volgt gevarieerd:  $10^{-5}$  m/s,  $2 \times 10^{-5}$  m/s,  $5 \times 10^{-5}$  m/s,  $10^{-4}$  m/s,  $2 \times 10^{-4}$  m/s,  $5 \times 10^{-4}$  m/s,  $10^{-3}$  m/s.

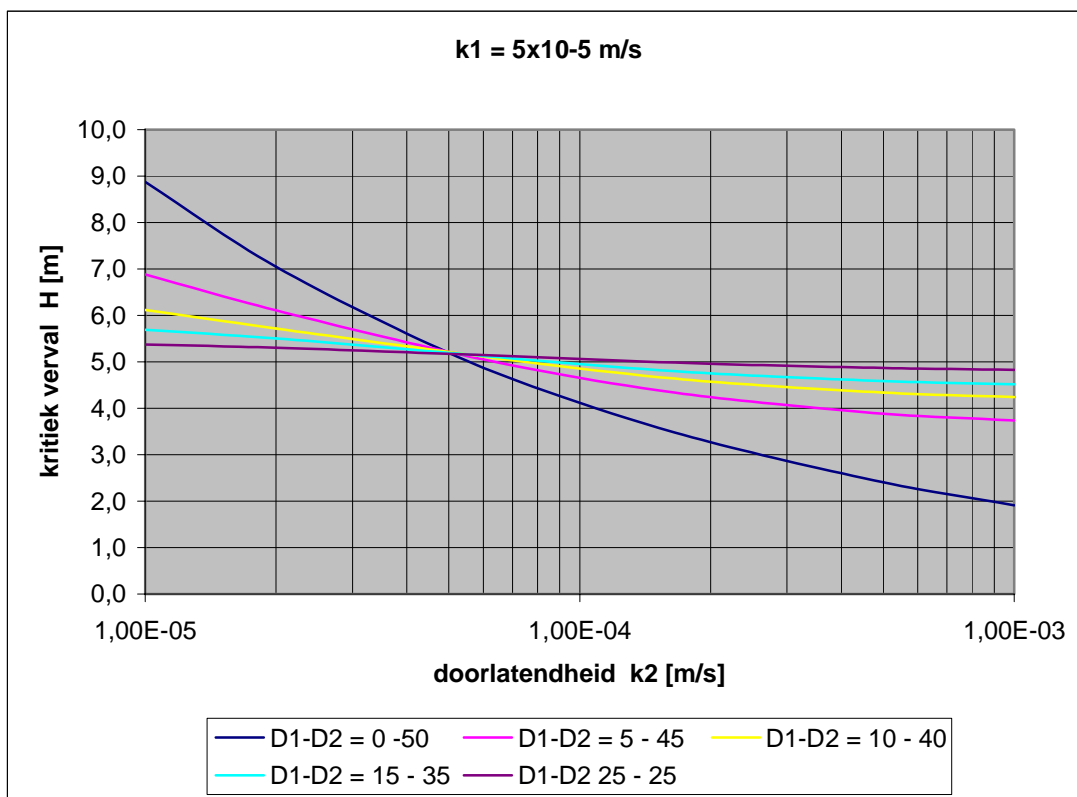
De resultaten zijn vermeld in onderstaande figuren. De resultaten worden op twee manieren weergegeven.

In Figuur 3.2, Figuur 3.3 en Figuur 3.4 wordt voor drie verschillende doorlatendheden van de bovenste zandlaag bij vijf verhoudingen van de dikte van de bovenste en de onderste zandlaag de relatie uitgezet tussen de doorlatendheid van de onderste zandlaag en het kritiek verval.

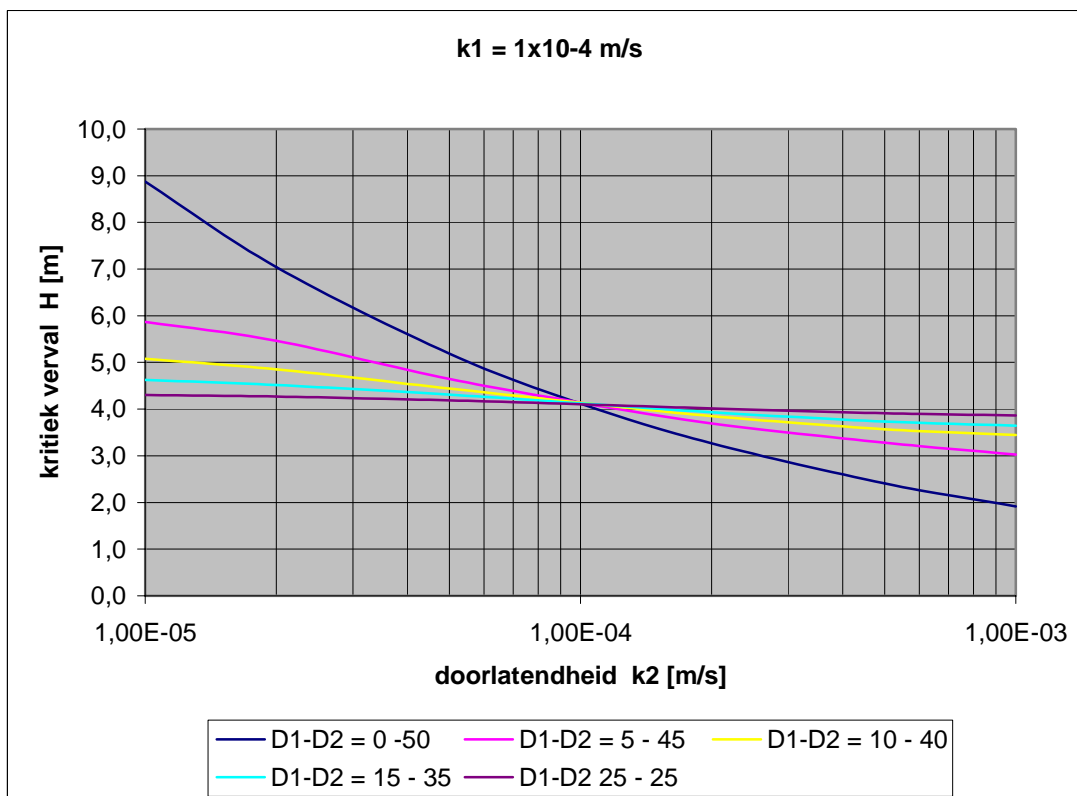
In Figuur 3.5, Figuur 3.6 en Figuur 3.7 wordt voor drie verschillende doorlatendheden van de bovenste zandlaag voor zeven doorlatendheden van onderste zandlaag de relatie uitgezet tussen de dikte van de van de bovenste zandlaag en het kritiek verval, waarbij de totale dikte van de zandlaag steeds 50 m bedraagt.



Figuur 3.2 relatie  $k_2 - \Delta H$  voor  $k_1 = 10^{-5}$  m/s



Figuur 3.3 relatie  $k_2 - \Delta H$  voor  $k_1 = 5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$



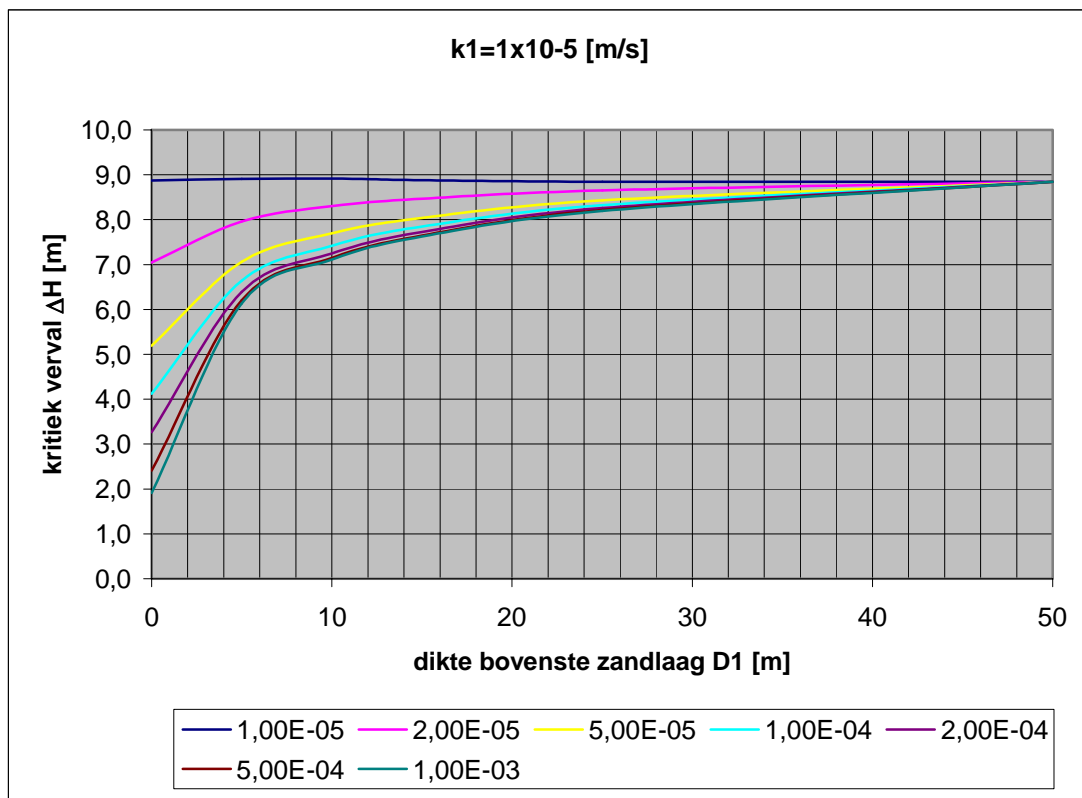
Figuur 3.4 relatie  $k_2 - \Delta H$  voor  $k_1 = 10^{-4} \text{ m/s}$



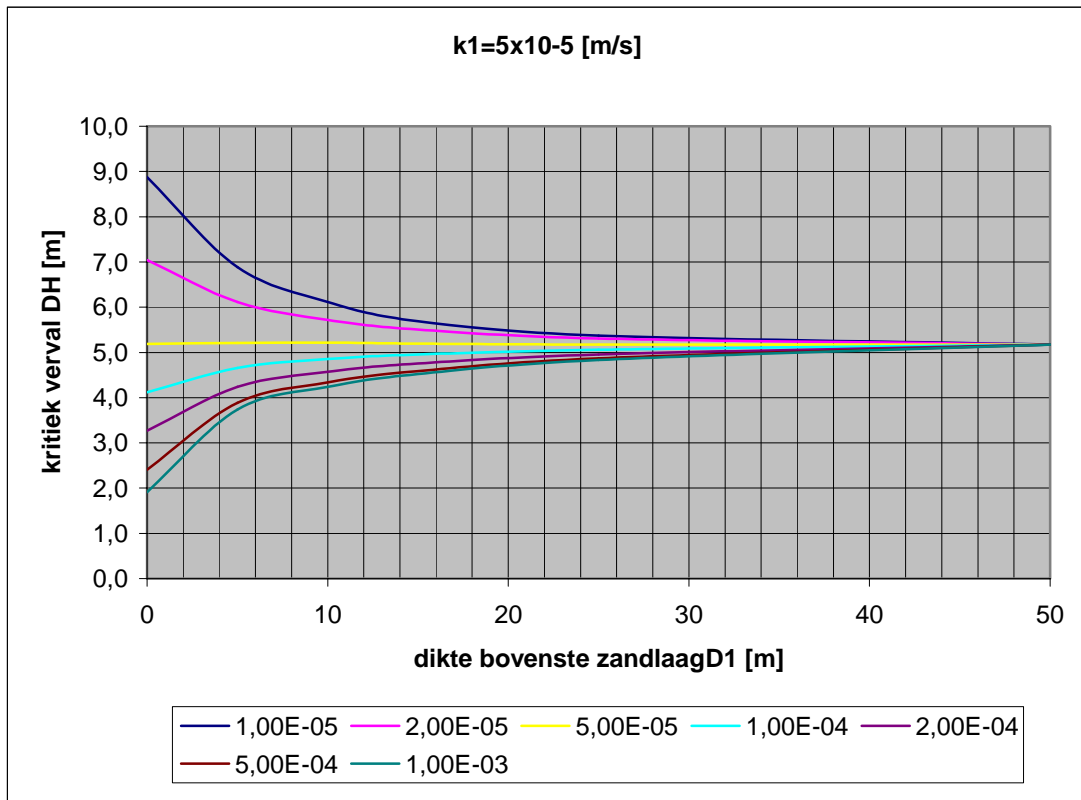
Uit de figuren 3.2 tot 3.4 blijkt dat als de doorlatendheid van de bovenste zandlaag kleiner is dan die van de onderste zandlaag het kritiek verval toeneemt. Als de doorlatendheid van de bovenste zandlaag groter is dan die van de onderste zandlaag, dan neemt het kritiek verval af. Dit effect is het grootst als  $D_1$  klein is ten opzichte van  $D_2$ .

Dit is logisch want als een van de doorlatendheden ten opzichte van de andere, dan neemt de totale doorlatendheid van het pakket toe en dus neemt bij gelijk verval het debiet toe. Als het debiet toeneemt, dan neemt ook de stroomsnelheid van het water toe en daarmee ook de kracht die op de zandkorrel werkt.

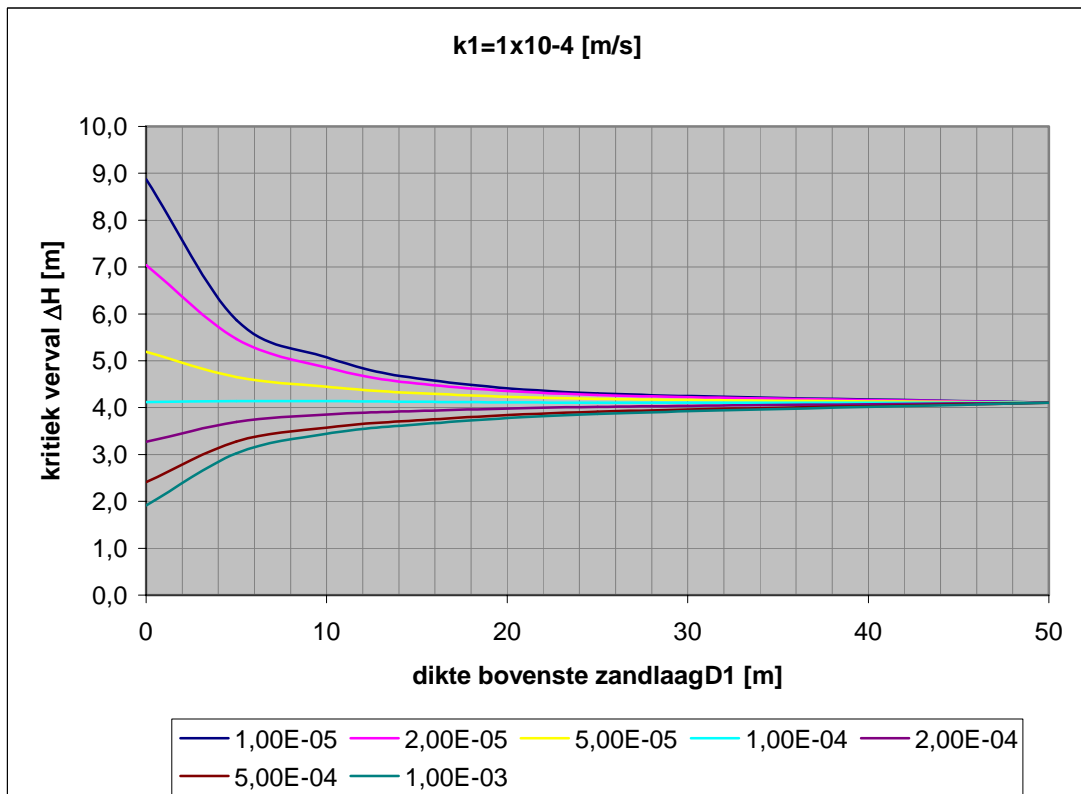
Bij andere verhoudingen tussen de kwelengte en de dikte van de zandlaag ( $L/D_1+D_2$ ) worden dezelfde trends waargenomen.



Figuur 3.5 relatie  $D_1 - \Delta H$  voor  $k_1 = 10^{-5}$  m/s



Figuur 3.6 relatie  $D_1 - \Delta H$  voor  $k_1 = 5 \times 10^{-5}$  m/s



Figuur 3.7 relatie  $D_1 - \Delta H$  voor  $k_1 = 10^{-4}$  m/s

Uit de laatste 3 grafieken blijkt dat het effect op het kritiek verval het grootst is tot een dikte van 10 m à 20 m voor de bovenste zandlaag.

Bij grotere diktes van  $D_1$  is er nog wel verschil zeker bij een groot doorlatendheidscontrast  $k_1/k_2$  maar dat wordt steeds minder.

In het overgrote deel van Nederland waar de ondergrond nabij de dijken pipinggevoelig kan zijn is de doorlatendheid van de top van het zandpakket kleiner dan het gemiddelde van het totale pakket. Hier uit kan worden geconcludeerd dat het voordelen heeft om bij het toetsen op pipingrisico rekening te houden met gedifferentieerde doorlatendheid.

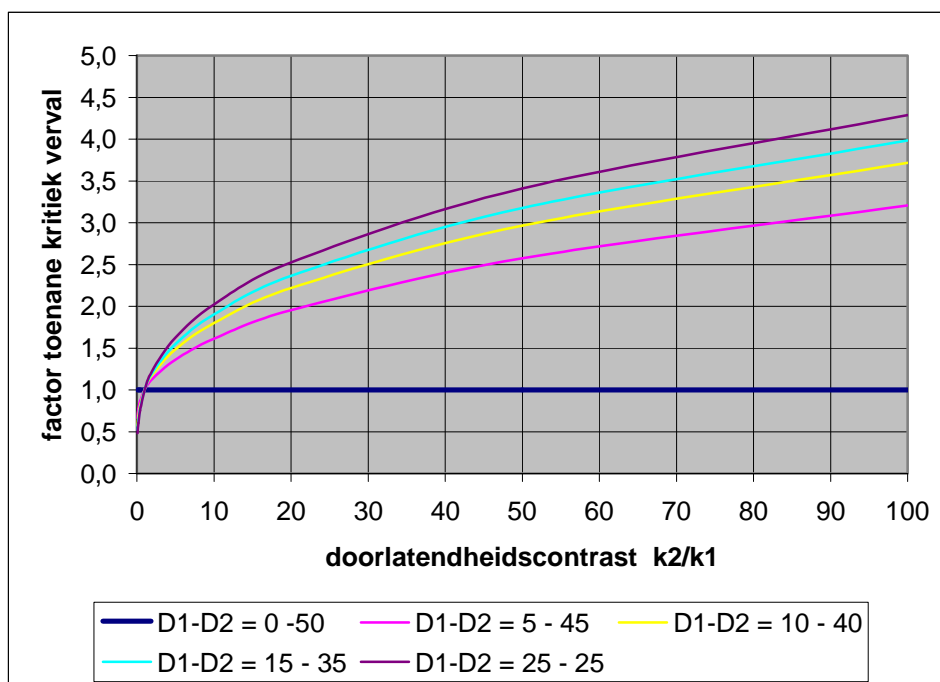
In het kader van het project Veiligheid Nederland in Kaart is door TNO een landsdekkende database gemaakt met per 250m dijk een aantal mogelijke ondergrondmodellen met hun kans van voorkomen.

Op basis van deze database wordt verwacht dat voor de Nederlandse situatie het doorlatendheidscontrast  $k_1/k_2$  ligt tussen 0,5 en 10.

Voor de in dit onderzoek gekozen uitgangspunten levert dit het beeld op volgens Figuur 3.8 en Figuur 3.9.

In Figuur 3.8 is de relatieve toename van het kritiek verval als functie van het doorlatendheidscontrast uitgezet voor vier verschillende verhoudingen van de zandlaagdikten  $D1/D2$  ten opzichte van een één-laagschematisatie.

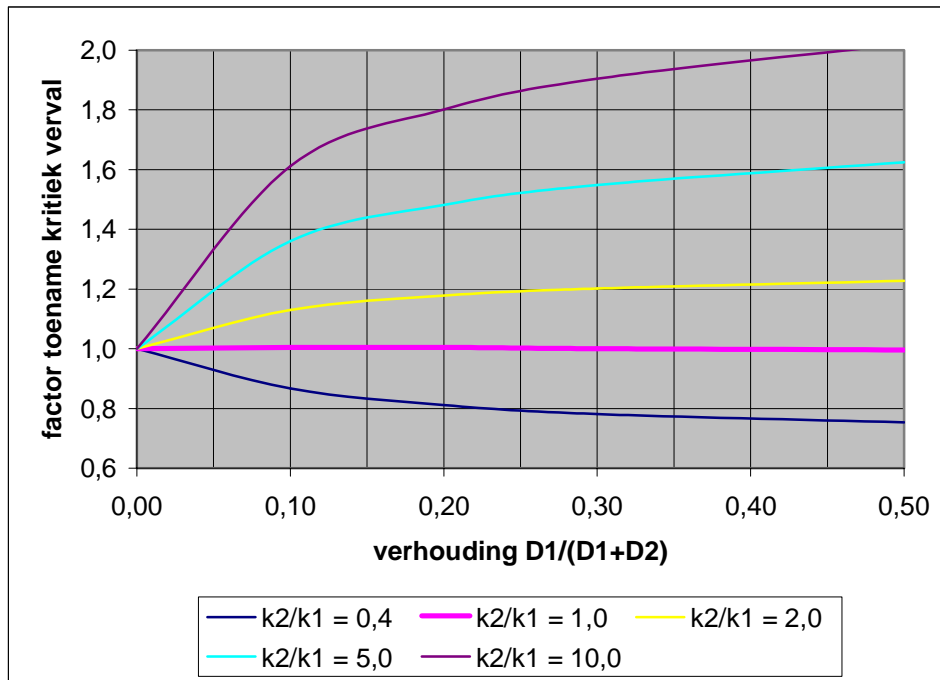
In Figuur 3.9 is de relatieve toename van het kritiek verval als functie van het verhoudingen van de zandlaagdikten  $D1/D2$  uitgezet voor vier verschillende doorlatendheidscontrasten ten opzichte van een één-laagschematisatie.



Figuur 3.8

Uit Figuur 3.8 valt af te lezen dat afhankelijk van de dikteverhouding al bij een contrast van 2

circa 10% tot 20% meer verval over de waterkering kan worden toegestaan. Dit loopt op naar 60% tot 100% bij een contrast van 10.



Figuur 3.9

Uit Figuur 3.9 valt af te lezen dat afhankelijk van het doorlatendheidscontrast bij een dikteverhouding 0,1 circa -10% tot 60% van het verval dat hoort bij een éénlaagsysteem over de waterkering kan worden toegestaan. Dit loopt op naar -25% tot 100% bij een dikte verhouding van 0,5.

De hier getoonde relaties tussen doorlatendheden en dikte verhoudingen gelden voor de schematisatie volgend paragraaf 3.1.

Voor andere schematisaties zijn de trends vergelijkbaar, maar de verhoudingen kunnen anders zijn.

Behalve de hier getoonde relaties zijn de volgende zaken uit de MSeep-berekeningen naar voren gekomen.

De berekende waarde van het kritiek verval is ook afhankelijk van modelschematisatie keuzen, zoals de grootte van de mesh-elementen en het toekennen van elementknopen ter plaatse van laagovergangen aan de eenen of aan de andere laag. Bij een grovere mesh kan tot een aantal procenten minder verval worden gekeerd.



## 4 Conclusie en aanbevelingen

De modellering waarop de rekenregel is gebaseerd is een deels andere dan die waarop het numerieke model in MSeep is gebaseerd. In principe zal een predictie met overeenkomende parameters met MSeep en met de rekenregel van Sellmeijer, als gevolg van het verschil in benadering van het evenwicht van een zandkorrel, tot een verschillend resultaat leiden. Omdat vanaf de jaren 90 van de vorige eeuw met de rekenregel is gewerkt is de Mseep modelering geijkt aan de rekenregel. Om vergelijkbare resultaten te krijgen is een iets hogere rolweerstandshoek, namelijk  $45^\circ$  in plaats van  $41^\circ$  nodig in MSeep.

De berekeningsresultaten zullen nooit exact overeenkomen door het aanpassen van de rolweerstandshoek, omdat er een modelleringverschil is tussen beide rekenmodellen. Uiteindelijk zal het onderzoek 'Hervalidatie piping' leiden tot een eenduidige aanpak.

Het rekenen in MSeep met een meer-lagen schematisatie van de ondergrond levert een realistischer kritiek verval op dan het rekenen met één laag. Bij een laag doorlatendheidscontrast (factor 2) kan al 10% tot 20% meer verval over de dijk worden toegestaan ten opzichte van een benadering met een één-laagschematisatie met doorlatendheden die gebaseerd zijn op b.v. pompproeven in de diepere lagen.

Bij dijken met een te keren verval van bijvoorbeeld 4 m kan al 40 cm to 80 cm meer verval over de waterkering worden toegestaan. Of anders gezegd de piping berm kan afhankelijk van de andere parameters 5 tot 10 m korter zijn.

Als met de rekenregel (de formule van Sellmeijer) wordt gewerkt zal een equivalente doorlatendheid moeten worden bepaald, die het 'meerlagen' systeem representeert. Hiervoor zijn verschillende methoden beschikbaar.

Schematisatie keuzes in het numerieke model zoals de grootte van de mesh-elementen hebben effect op het berekende verval.

In de schematisatie handleiding moet een eenduidige aanpak worden beschreven voor het schematiseren van een dwarsprofiel en ondergrond.

Voordat verder wordt gegaan met het opstellen van een schematiseringshandreiking is het raadzaam om eerst de ontwikkeling van de nieuwe rekenregel af te wachten en dan te bezien of de nu getrokken conclusies stand houden. Verder zal de nieuwe modellering van piping in MSeep moeten worden geïmplementeerd.



## 5 Literatuur

[Sellmeijer 1988] On the mechanism of piping under impervious structures, Doctoraal scriptie, Technische Universiteit Delft , oktober 1988

[Sellmeijer 1991] Verificatie piping model, proeven in de deltagoot, evaluatierapport, rapportnummer CO-317710/9, Delft, juli 1991

[TAW 1999] Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 'Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen', Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Delft, maart 1999

[GeoDelft 2007] Module MPiping-VNK voor piping-analyse in PC-Ring / Fase 2 van het project Veiligheid Nederland in Kaart, rapportnummer CO-424111.0014-v5, Delft, maart 2007

[Thonus et al 2005] Review koploper resultaten VNK, faalmechanisme piping, HKV-lijn in water, rapportnummer PR761, 10 april 2004