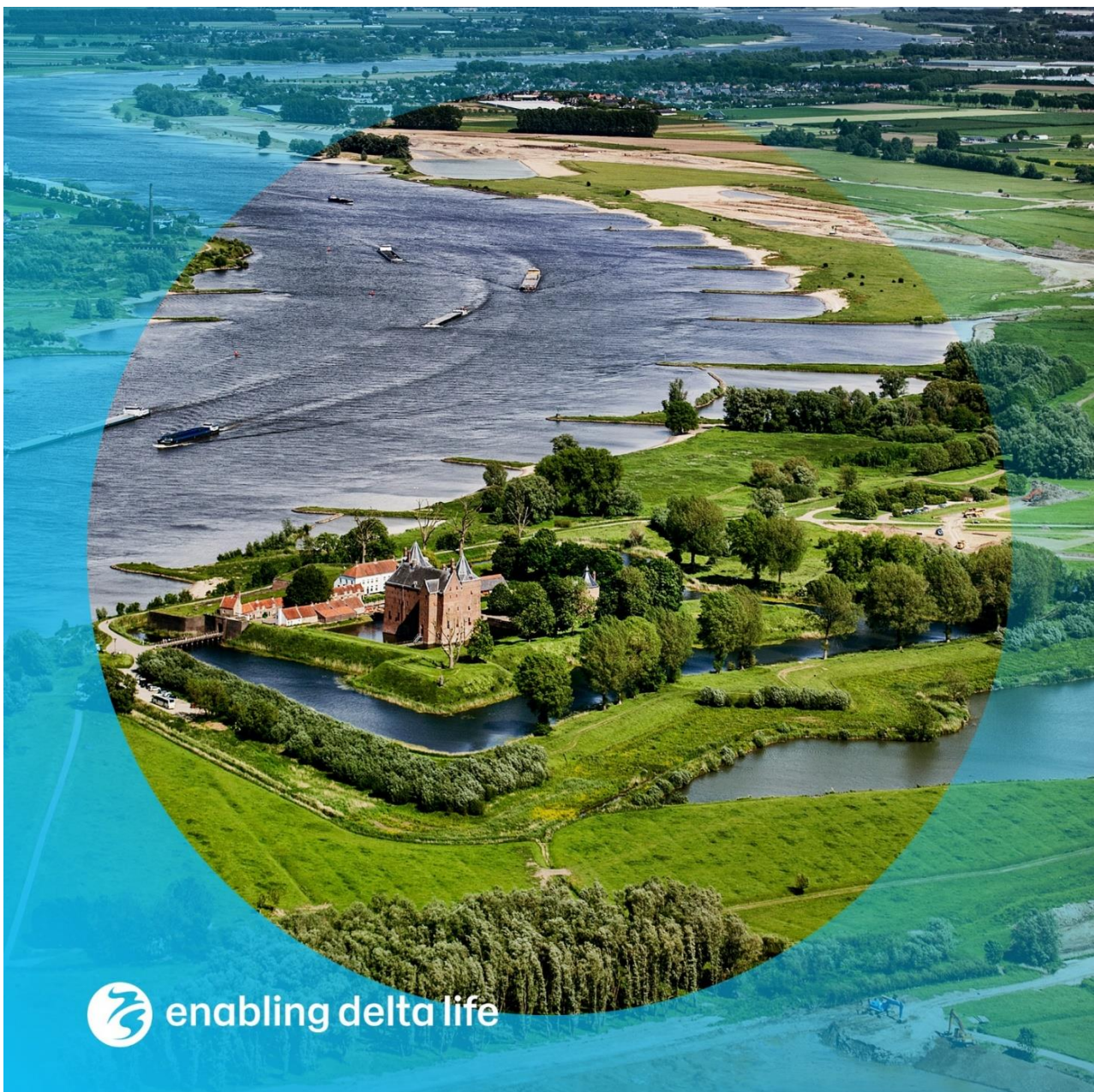


Kennis voor Keringen 2021: Achtergrondrapport Voorlanden



Kennis voor Keringen 2021: Achtergrondrapport Voorlanden

Auteur(s)

Esther Rosenbrand
Ligaya Wopereis
Ane Wiersma (A.P.)
Wim Kanning
Adam Bezuijen
Jan Binde

Kennis voor Keringen 2021: Achtergrondrapport Voorlanden

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat WVL, Kennis voor Keringen
Contactpersoon	Henk van Hemert
Referenties	
Trefwoorden	Terugschrijdende erosie, voorland, DgFlow, onderzoek, piping

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	22-02-2022
Projectnummer	11206817-010
Document ID	11206817-010-GEO-0003
Pagina's	217
Classificatie	
Status	definitief

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
0.1	Esther Rosenbrand	Vera van Beek	Goaitske de Vries	
	Ligaya Wopereis			
	Ane Wiersma			
	Wim Kanning			
	Adam Bezuijen			
	Jan Binde			
0.3	Esther Rosenbrand	Vera van Beek	Goaitske de Vries	
1.0	Esther Rosenbrand	Vera van Beek	Goaitske de Vries	

Samenvatting

Dit rapport is een onderdeel van het Kennis van Keringen programma van Rijkswaterstaat, waarin Deltares onderzoek doet naar een scherpere analyse van het faalmechanisme piping. Piping is een faalmechanisme dat voor veel dijktrajecten een grote bijdrage levert aan de berekende overstromingskans. De hoge faalkansen die worden berekend sluiten in de praktijk echter vaak niet aan bij het gevoel van de beheerder. Piping is een complex mechanisme waarvan het optreden sterk wordt bepaald door de lokale omstandigheden die moeilijk te bepalen of te schematiseren zijn. Wel bekend is dat voordat piping tot een overstroming leidt, er een aantal gebeurtenissen achter elkaar moeten optreden. In de huidige beoordeling wordt aan de hand van de initiële mechanismen (opbarsten, heave en terugschrijdende erosie) de faalkans voor piping bepaald. Daarbij worden aannames gedaan om de veelal complexere ondergrond eenvoudiger te schematiseren. Een daarvan betreft het meenemen van de intredeweerstand van het voorland voor de analyse van terugschrijdende erosie. Gangbaar is het om een fictieve voorlandlengte te berekenen en vervolgens maximaal $2 \times$ de dijkbasis aan kwelweglengte mee te nemen in de analyse. De reden voor deze limiet is dat het niet wenselijk is dat de pipe onder de dijkbasis uit komt, vanwege risico op kortsluiting of stroming door het voorland naar de pipe.

In gevallen met lange voorlanden kan het meenemen van meer dan $2 \times$ de dijkbasis tot een significante, orde 100-1000-voudige, afname van de faalkans leiden. Een geavanceerdere manier om voorland mee te nemen is door de pipelengte te berekenen met D-Geo Flow om te zien of deze onder het voorland komt. Dit is echter tijdsintensief, het model is niet gevalideerd met betrekking op pipelengte en er is geen generiek veiligheidsformat voor omgang met de resultaten. Ook een conceptueel begrip van de pipelengte ontbreekt, wat wel nodig is om voor een traject te kunnen bepalen wat representatieve doorsnedes zijn voor de pipinganalyse. Verder spelen vragen met betrekking op omgang met zeer doorlatende voorlanden in relatie tot het bepalen van de fictieve voorlandlengte, en bij zeer ondoorlatende voorlanden is het net de vraag of pipegroei onder het voorland een bezwaar is.

In het voorliggende rapport is daarom onderzoek gedaan om het meenemen van meer voorland in een analyse met de rekenregel van Sellmeijer te ondersteunen. Doel was om te komen tot een aanpak waarmee een beheerder een onderbouwde afweging kan maken voor hoeveel voorland meegenomen wordt in de piping analyse. Om te komen tot een stappenplan voor het onderbouwd meenemen van voorland zijn verschillende aspecten onderzocht die hieronder zijn samengevat.

Een conceptueel model is ontwikkeld dat inzicht geeft in de pipelengte bij kritiek verval, en welke factoren deze lengte beïnvloeden. Dit is onderzocht met proeven en numerieke modellen (DgFlow). Dit biedt inzicht in de totstandkoming van de pipelengte bij kritiek verval en relevante parameters. Op basis daarvan kan afgewogen worden welke situaties (geometrie en ondergrondkarakteristieken) leiden tot langere of kortere pipes. Dit conceptueel model is aangevuld met een serie berekeningen van pipelengte in geschematiseerde situaties waarin beheerders meer voorland mee zouden willen nemen. Op basis van het geheel zijn twee grafieken opgesteld aan de hand waarvan een beheerder in kan schatten wat de pipelengte is (zie onderstaand stappenplan in kader). Hieruit blijkt dat in veel gevallen beduidend meer voorland meegenomen kan worden in de pipinganalyse.

Een eerste verkenning van de veiligheidsbenadering en omgang met de modelonzekerheid van de berekende pipelengte is uitgevoerd. Hieruit bleek dat de in de praktijk gehanteerde modelfactor 1,5, voor de modelonzekerheid naar verwachting geschikt is in het licht van de modelonzekerheid van de pipelengte, en dat er wellicht optimalisatie mogelijk is.

Bij dikkere deklagen is de verwachting dat het risico van pipegroei onder het voorland beperkt is, temeer omdat de pipe slechts ten dele onder het voorland komt. Bij een dikke deklaag is de doorlatendheid vaak laag, en is in veel gevallen de invloed van stroming door de deklaag naar de pipe beperkt, en ook de kans dat een pipe op een zwakke plek stuit is kleiner. Locatie specifieke kenmerken blijven belangrijk, daarom zijn de overwegingen opgeschreven aan de hand waarvan een beheerder in staat is in te schatten of pipegroei onder het voorland een bezwaar zou zijn .

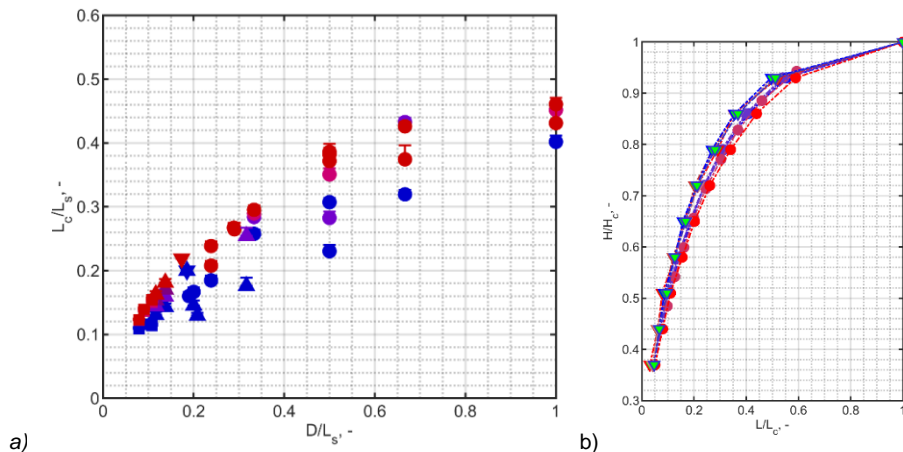
Voor situaties met dunne deklagen in het voorland is de afleiding van de fictieve voorlandlengte geanalyseerd om afwijkingen die in de praktijk worden geconstateerd te verklaren. In de praktijk was geconstateerd dat met de fictieve voorlandlengte methode in de rekenregel soms hogere kritieke vervallen worden berekend dan met D-Geo Flow. De afwijkingen hangen samen met verschillen in de aannames in verschillende methoden, maar verwachting is dat andere onzekerheden, bijvoorbeeld parameteronzekerheden en de onzekerheid door de huidige 2D aanpak, voor de praktijk een significanter effect op de overstromingskans hebben.

Het geheel van het onderzoek is samengebracht in een concept stappenplan om meer voorland mee te kunnen nemen in de pipinganalyse (zie kader hieronder). Dit stappenplan bevat curves waarmee een eerste inschatting van de pipelengte wordt gemaakt. Als vervolg wordt aanbevolen het concept stappenplan in een pilot samen met een beheerder toe te passen, de veiligheidsbenadering aan te scherpen, en indien relevant het toepassingsgebied te vergroten met aanvullende analyse.

Samenvatting van stappen in het concept stappenplan

Zie totale stappenplan in hoofdstuk 12 voor toelichting en invloed onzekerheden

1. Afweging bezwaar bij pipegroei onder voorland: *bij dikkere deklagen, indien geen risico op kortsluiting en beperkte instroom door deklaag naar de pipe, is pipegroei onder voorland geen bezwaar, en kan het hele voorland meegenomen worden.*
2. Bepaling onbegrensde fictieve voorlandlengte en kwelweglengte L_s (conform Schematiseringshandleiding Piping), op basis van doorlatendheden en diktes voorland, achterland en watervoerend pakket.
3. Bepaling kritiek verval H_c met rekenregel van Sellmeijer op basis van L_s
4. Inschatting L_c pipelengte bij H_c : *een eerste inschatting voor ondoorlatend achterland kan gemaakt worden op basis van D/L_s middels figuur S2a.*
5. Check pipelengte onder dijkbasis bij H_c : hierbij semi-probabilistische factor toepassen voor modelonzekerheid pipelengte.
6. Aanscherpingsmogelijkheden
 - a. Als $H_c >$ verval waarbij aan eis wordt voldaan: bepaling L_{eis} , de lengte van de pipe bij de waterstand waarmee aan de faalkanseis wordt voldaan (op basis van figuur S2b).
 - b. Berekening L_c middels D-Geo Flow: biedt optimalisatie bij doorlatend achterland, hiermee kan ook anisotropie en meerlaagsheid meegenomen worden.
 - c. Probabilistische analyse pipelengte.
 - d. Maatwerk risico op kortsluiting: hoe groot is de kans op kortsluiting als de pipe onder de dijkbasis uit komt, welke overwegingen spelen?
7. Sanity check: hoe stabiel is mijn uitkomst in het licht van onzekerheden en kennis in ontwikkeling?



Figuur S2: grafieken ter inschatting pipelengte. a) De rode symbolen geven een indicatie van pipelengte bij kritiek verval L_c gedeeld door kwelweglengte inclusief voorland L_s als functie van dikte watervoerend pakket D gedeeld L_s . Rode symbolen zijn voor een gesloten deklaag in het achterland en geven langste pipelengte; bij doorlatend achterland zijn pipes korter maar is geen generieke trend (paars en blauw).
b) Pipelengte L bij een gegeven verval gedeeld door kritieke pipelengte L/L_c tegen het gegeven verval H gedeeld door kritiek verval H/H_c .

Toepassing: a) Neem D/L_s voor de specifieke situatie en lees bijbehorende L_c/L_s af, waar L_c pipelengte bij kritiek verval is.

Toepassing: b) Neem voor de situatie de relevante H/H_c en lees L/L_c af. De rode curve geeft hierbij de langere pipes.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	10
1.1	Doel en aanpak	11
1.2	Leeswijzer	11
1.3	Terminologie en afkortingen	13
2	Literatuur en onderzoeksvragen	14
2.1	Literatuur	14
2.1.1	Kennis voor Keringen Voorlanden	14
2.1.2	Kennis voor Keringen Optimalisaties gecombineerd beschouwen	14
2.1.3	Kennis voor Keringen Onderzoek Faalpaden & Piping	15
2.1.4	POV voorlanden	15
2.1.5	Onderzoek voorlanden meenemen Wolferen-Sprok (WOS)	16
2.1.6	Meanderende Maas	18
2.1.7	Kennis voor Keringen Stroming naar het achterland	18
2.2	Vragen in tournee kennis voor keringen en interviews	19
2.3	Samenvatting belangrijke vragen voor meenemen meer voorland	20
3	Conceptueel model kritieke pipelengte	23
3.1	Overzicht mogelijke piping situaties	23
3.2	Situatie 1: Kritieke pipelengte	25
3.2.1	Illustratie effect van pipegroei	27
3.2.2	Hypothesen situatie 1	30
3.3	Situatie 1: Effect uitstroomopening	31
3.4	Situatie 1: Effect geometrie	35
3.4.1	Effect vorm: Dikte/Lengte verhouding	35
3.4.2	Effect schaal	38
3.5	Situatie 1: Effect eigenschappen WVP	39
3.5.1	Effect doorlatendheid	39
3.5.2	Effect d_{70}	40
3.5.3	Effect anisotropie	41
3.6	Situatie 1: Effect semi-doorlatend achterland	45
3.7	Situatie 2 en 3: Effect 3D stroming	48
3.8	Drukval in het opbarstkanaal	51
3.9	Samenvatting conceptueel model en onderbouwing	51
4	Onderbouwing hypothesen met proeven en modellen	56
4.1	Overzicht van proeven met gerapporteerde pipelengte	56
4.1.1	Silvis 1991	56

4.1.2	Dolphen, 2014	58
4.1.3	Van Beek 2015	59
4.1.3.1	Analyse BMS19	59
4.1.3.2	Analyse IMS20	60
4.1.4	Allan, 2018	61
4.1.5	Pol, concept	62
4.1.6	Overzicht proefkenmerken	62
4.2	Overzicht DgFlow modellen	67
4.3	Analyse van experimentele data en modellering	69
4.3.1	Reproduceerbaarheid duplo proeven	69
4.3.2	Vergelijking proeven en modellen	72
4.3.3	Analyse effect van uitstroomopening	74
4.3.4	Analyse effect van D/L	76
4.3.5	Analyse effect van schaal: proeven	77
4.3.5.1	Situatie 1	77
4.3.5.2	Situatie 3	79
4.3.6	Analyse effect van doorlatendheid (en RD)	82
4.3.7	Analyse effect van $d70$	83
4.3.8	Analyse effect van breedte (W/L)	84
5	Onderbouwing hypothesen met modellen op veldschaal	86
5.1	Beschrijving modellen	86
5.2	Analyse van invloed van stapgrootte H_{incr} op L_c/L_s	88
5.3	Analyse veldschaal modellen met dicht achterland	93
5.4	Analyse veldschaal modellen met semi-doorlatend achterland	96
5.5	Samenvatting modellen veldschaal en laboratoriumschaal	100
5.5.1	Dicht achterland	100
5.5.2	Semi-doorlatend en dicht achterland	101
6	Berekeningen voorlandlengte oprekken	102
6.1	Inventarisatie gegevens en varianten	102
6.1.1	Inventarisatie van gegevens	102
6.1.2	Varianten	105
6.2	Modelopzet	109
6.2.1	DgFlow & rekeninstellingen	109
6.2.2	Geometrie & randvoorwaarden	109
6.2.3	Parameters	110
6.3	Resultaten en analyse	110
6.3.1	Kritiek verval DgFlow ten opzichte van de rekenregel	113
6.3.2	Effect van achterland op pipelengte en op kritiek verval	115
6.4	Samenvatting	116
7	Analyse pipelengte < H_c	118
7.1	Modelresultaten H vs L	118
7.2	Modelresultaten H/H_c vs L/L_c	120
7.3	Analyse	120
7.4	Discussie & consequenties voor meenemen voorland	123

8	Toepasbaarheid van fictieve voorlandlengte benadering	124
8.1	Conceptuele geohydrologische beschouwing	124
8.2	Stijghoogte contouren DgFlow en verhang onder de dijk	126
8.3	Samenvatting	127
8.4	Handelingsperspectief	128
9	Toepasbaarheid rekenregel bij pipegroei onder voorland	129
9.1	Conceptueel model	130
9.2	Modelberekeningen	130
9.3	Discussie en conclusies	132
10	Beschouwing van risico's op kortsluiting bij pipegroei onder voorland	134
10.1	Grondmechanisch bezwijken	135
10.2	Bestaande gaten door invloed van flora fauna en structuurvorming	135
10.3	Landgebruik	136
10.4	Sloten en andere ontgravingen	136
11	Veiligheidsbenadering voorlanden	137
12	Concept stappenplan meenemen meer voorland in rekenregel van Sellmeijer	138
13	Aanbevelingen	146
13.1	Handvat ontwikkelen	146
13.2	D-Geo Flow doorontwikkeling en update van Factsheet D-Geo Flow	147
13.3	Nader onderzoek	147
13.4	Overige aanbevelingen	148
	Referenties	149
A	Kalibraties en gehanteerde bandbreedte D/L	151
A.1	Afleiding van de rekenregel	151
A.2	Modelkalibratie DgFlow met Sellmeijer rekenregel.	152
A.3	Kalibratie van de schadefactor	152
B	Fictieve voorlandberekening voor piping	153
C	Veiligheidsbenadering voorlanden	184
D	Ondersteunende berekeningen	217
E	Aanvullende analyses veiligheidsbenadering voorlanden	218

1 Inleiding

Piping is een mechanisme dat in veel trajecten de overstromingskans bepaalt. De erg hoge overstromingskansen die in VNK2 en de eerste beoordelingen berekend worden ($>> 1/100$ per jaar) komen echter vaak niet overeen met de verwachtingen van beheerders en experts. In het Nederlandse waterveiligheidsbeleid kunnen we hier moeilijk mee omgaan.

Piping is een complex mechanisme waarvan het optreden sterk wordt bepaald door de lokale omstandigheden die moeilijk te bepalen of te schematiseren zijn. Wel bekend is dat voordat piping tot een overstroming leidt, er een aantal gebeurtenissen achter elkaar moeten optreden.

De keten van gebeurtenissen bestaat uit (Figuur 1.1):

1. Toename van waterspanningen en opbarsten: Dit hangt af van de dikte en samenstelling van de toplaag. Afhankelijk van deze eigenschappen zal de toplaag opdrijven en niet opbarsten. Opbarsten is een voorwaarde voor het optreden van vervolgmecanismen.
2. Heave: bij voldoende verticale stroming kunnen zandkorreltjes naar het maaiveld worden getransporteerd. Dit is ook afhankelijk van zandeigenschappen. Heave is een voorwaarde voor vervolgprocessen.
3. Horizontale pipegroei tot aan kritiek verval (terugschrijdende erosie): afhankelijk van opbouw, doorlatendheden en korreldiameter(s) aquifer kan een horizontale pipe ontstaan. Het kritiek verval is het verval waarbij geen evenwicht meer is en de pipe zal doorgroeien.
4. Doorlopende pipe en hydraulische kortsluiting, verbreden en verdiepen pipe: Het kan bij een kritiek verval nog een behoorlijke tijd duren voordat een doorgaande pipe is gevormd.
5. Kruinverlaging, overloop en bresgroei: Wanneer de pipe zo groot is dat deze instort zal het dijklichaam mee zakken. Water dat over de dijk en door scheuren in de dijk stroomt veroorzaakt erosie en uiteindelijk een bres.



Figuur 1.1 Keten van gebeurtenissen piping (rode draad (Rosenbrand et al., 2021)).

Voor het bepalen van de overstromingskans door piping beschouwen we in de eenvoudige en gedetailleerde toets bij beoordelen en voor het dimensioneren van versterkingsmaatregelen alleen de eerste gebeurtenissen (opbarsten, heave en terugschrijdende erosie).

Dit rapport is gericht op het deelmechanisme terugschrijdende erosie. De rekenregel van Sellmeijer wordt gebruikt om de faalkans te bepalen met de kalibratierelatie. Semi-doorlatend voorland kan bij deze rekenregel worden meegenomen door de fictieve voorlandlengte te bepalen zoals beschreven in de schematiseringshandleiding piping (Rijkswaterstaat, 2021). De controle of de pipe bij dit verval onder de dijkbasis uit komt is een toepassingsvoorwaarde voor deze rekenregel. Twee redenen daarvoor zijn:

- De rekenregel van Sellmeijer is afgeleid voor situaties zonder instroom door de deklaag boven de pipe.
- Er bestaat risico op kortsluiting bij vervallen lager dan kritiek verval als de pipe onder het voorland groeit.

Momenteel wordt in de praktijk veelal de aanname gedaan dat de pipelengte bij kritiek verval, de kritieke pipelengte L_c , maximaal 50% van de kwelweglengte zal zijn, waardoor de totale kwelweglengte maximaal 2 maal de dijkbasis (de afstand tussen uittredepunt en buitenteen) zou kunnen zijn.

In gevallen met lange voorlanden kan het meenemen van meer dan $2 \times$ de dijkbasis tot een significante, orde 100-1000-voudige, afname van de faalkans leiden. Een geavanceerdere manier om voorland mee te nemen is door de pipelengte te berekenen met D-Geo Flow om te zien of deze onder het voorland komt. Dit is echter tijdsintensief, het model is niet gevalideerd met betrekking op pipelengte, er is geen generiek veiligheidsformat voor omgang met de resultaten, en een conceptueel begrip van de pipelengte ontbreekt om voor een traject te kunnen bepalen wat representatieve doorsnedes zijn voor de analyse. Ook spelen vragen met betrekking op omgang met zeer doorlatende voorlanden in relatie tot het bepalen van de fictieve voorlandlengte, en bij zeer ondoorlatende voorlanden is het net de vraag of pipegroei onder het voorland een bezwaar is.

1.1 Doel en aanpak

Doel van het Kennis voor Keringen Voorlanden onderzoek is te komen tot een aanpak waarmee een beheerder een onderbouwde afweging kan maken voor hoeveel voorland meegenomen wordt in de pipinganalyse. Om dit doel te bereiken is eerst een inventarisatie gemaakt van vragen die spelen rondom het meenemen van voorland op basis van literatuur, interviews met beheerders, gebruikers en experts, en ervaringen in projecten.

Op basis daarvan zijn de vragen gegroepeerd in vier onderdelen:

1. Inzicht in de totstandkoming van de kritieke pipelengte:
 - Wat is het fysische proces en waar wordt dit door beïnvloed?
 - Hoe geschikt zijn de huidige modellen om dit proces te berekenen?
 - Wat zijn de meest belangrijke parameters die de kritieke pipelengte beïnvloeden?
 - Is het mogelijk eenvoudige generieke relaties af te leiden om kritieke pipelengte in te schatten?
2. Waarom zijn er bij dunne deklagen verschillen tussen de benadering met fictieve voorlandlengte en de rekenregel en numerieke modellen (D-Geo Flow), en is in die gevallen de methode voor bepaling van fictieve voorlandlengte niet toepasbaar?
3. Is pipegroei onder het voorland in bepaalde condities geen bezwaar?
4. Hoe kan ik omgaan met onzekerheden in de veiligheidsbenadering bij het meenemen van voorland?

Deze vragen zijn in het Kennis voor Keringen onderzoek uitgewerkt. Het voorliggende rapport fungeert als een achtergrond rapport waarin alle onderzoek is gerapporteerd. Ook is een concept stappenplan uitgewerkt op basis van de inzichten.

De verwachting is dat onderdelen van dit onderzoek kunnen landen in bestaande instrumenten en handreikingen, zoals de Factsheet D-Geo Flow (Knoeff et al., 2020). Het stappenplan zelf kan in een of meerdere pilots worden toegepast, alvorens te worden doorontwikkeld naar een handreiking voor het BOI instrumentarium.

1.2 Leeswijzer

De lezer die met name geïnteresseerd is in het concept stappenplan voor het meenemen van voorlanden wordt verwezen naar hoofdstuk 12.

Hoofdstuk 2 bevat een literatuurstudie en overzicht van kennisvragen die spelen omtrent het meenemen van voorlanden in de piping analyse. Op basis van kennis van grondwaterstroming in het model van Sellmeijer is een conceptueel model voor pipegroei, gericht op het verklaren van de kritieke pipelengte, ontwikkeld in Hoofdstuk 3. Op basis

hiervan zijn hypothesen opgesteld die onderzocht zijn, gebruikmakend van een inventarisatie van bestaande experimentele data in Hoofdstuk 4. Daarbij zijn ook DgFlow modellen voor de proeven gemaakt om inzicht te hebben in de mate waarin het model overeenkomt met hypothesen en proeven. Experimenten kunnen niet alle relevante situaties beproeven, daarom is een nadere analyse van de hypothesen met veldschaal modellen uitgevoerd in DgFlow (Hoofdstuk 5).

De voornaamste bevindingen uit hoofdstukken 4 en 5 zijn in hoofdstuk 3 opgenomen, zodat dat hoofdstuk ook op zichzelf leesbaar en onderbouwd is.

Omdat proeven en eenvoudige modellen een beperkt spectrum van situaties dekken is een inventarisatieronde bij waterschappen gemaakt om inzicht te krijgen in relevante situaties waar men meer voorland mee zou willen nemen in de pipinganalyse. Op basis van de gegevens daaruit zijn kenmerkende schematisaties opgesteld, 3 geometrieën, waarvoor de pipelengte middels DgFlow berekend is met verschillende combinaties van parameters. Deze resultaten ondersteunen het conceptuele model voor een breder toepassingsgebied. Daarnaast dragen de resultaten bij aan de dataset die aan de basis ligt van twee curves op basis waarvan een gebruiker een eerste inschatting van de pipelengte kan maken. Dit onderdeel is gerapporteerd in Hoofdstuk 6.

In Hoofdstuk 7 is een analyse gemaakt van de pipelengte voor vervallen onder het kritieke verval. Dit is met name relevant voor situaties waar de pipe bij het meenemen van het voorland onder de dijkbasis uit komt, maar waar het kritieke verval dan veel hoger is dan de eis. In dergelijke gevallen kan het relevanter zijn om bij lagere waterstanden te kijken naar het risico dat de pipe onder de dijkbasis uit komt.

In hoofdstuk 8 is de vraag waarom er soms afwijkingen zijn tussen de fictieve voorlandlengte aanpak in combinatie met de rekenregel en D-Geo Flow geadresseerd. Dit is gebaseerd op een uitgebreide analyse met analytische modellen en DgFlow analyses die is gerapporteerd in Bijlage B.

In hoofdstuk 9 is met DgFlow analyses de invloed van stroming door de deklaag voor situaties met dikke deklagen onderzocht. Bij deze deklagen is ook het risico van kortsluiting bij pipegroei onder het voorland relevant, dit is nader beschouwd in hoofdstuk 10.

De veiligheidsbenadering bij omgang met de pipelengte is van belang voor het omgaan met voorlanden en met de pipelengte die volgt DgFlow berekeningen. Een eerste analyse is uitgevoerd van de veiligheidsbenadering en omgang met de modelonzekerheid van de pipelengte in probabilistisch en semi-probabilistisch format uitgevoerd en gerapporteerd in Bijlage C. Een korte samenvatting is gegeven in hoofdstuk 11.

Op basis van het gehele onderzoek is in Hoofdstuk 12 een eerste stappenplan voor de omgang met voorlanden geschetst. Op basis van twee eenvoudige grafieken, en alleen de parameters die ook voor de rekenregel nodig zijn, kan een gebruiker een eerste inschatting maken van de pipelengte. Dit stappenplan dient als basis voor een op zichzelf staand concept handvat, dan na toepassing in pilots kan worden uitgewerkt tot onderdeel van het BOI instrumentarium.

Aanbevelingen zijn in hoofdstuk 13 opgenomen.

1.3 Terminologie en afkortingen

A	Anisotropie factor ($A = K_h/K_v$).
c	Intrede- of uittredeweerstand deklaag ($c = d/K_{deklaag}$).
Cu	Uniformiteitscoëfficiënt (d_{60}/d_{10}).
d_{AL}	Dikte deklaag achterland.
d_{VL}	Dikte deklaag voorland.
d_{70}	Korrelgrootte waarvoor 70% van de korrels bij gewicht kleiner is.
D	Dikte watervoerend pakket.
H_c	Kritiek verval.
H_{incr}	Stapgrootte waarmee verval wordt aangebracht in de DgFlow berekeningen.
K_{AL}	Doorlatendheid deklaag achterland.
K_h	Horizontale doorlatendheid WVP.
K_v	Verticale doorlatendheid WVP.
K_{WVP}	Doorlatendheid van watervoerend pakket.
K_{VL}	Doorlatendheid deklaag voorland
L_c	Pipelengte bij kritiek verval.
$L_{fictief}$	Fictieve voorlandlengte.
L_S	Kwelweglengte.
L_{VL}	Lengte van het aanwezige voorland.
$U_{1,dicht AL}$	Breedte uitstroombgat bij dicht achterland.
$U_{1,open}$	Breedte uitstroombvlak bij open achterland.
U_{tot}	Totale breedte uitstroombvlak.
W	Breedte van het watervoerend pakket (haaks op de stroomrichting).
γ_{Lc}	Semi probabilistische factor voor de modelonzekerheid op de berekende pipelengte bij kritiek verval.
λ_{AL}	lek lengte van het achterland ($\lambda_{AL} = \sqrt{\frac{K_{WVP} D d_{AL}}{K_{AL}}}$).
λ_{VL}	lek lengte van het voorland .

2 Literatuur en onderzoeksvragen

2.1 Literatuur

Er zijn de afgelopen jaren meerdere projecten geweest gericht op het meenemen van meer voorland ten behoeve van de beoordeling voor piping. In dit hoofdstuk worden de resultaten van een selectie van relevante onderzoeken/publicaties kort behandeld, met de focus op inzichten rakend aan gebruik van DgFlow/D-Geo Flow en geohydrologische modellen om meer voorland mee te nemen. De inzichten die voortvloeien uit deze studies, in combinatie met de inventarisatie van situaties met voorland bij beheerders, zijn gebruikt om een overzicht van kennisvragen op te stellen die spelen rondom het meenemen van meer voorland.

2.1.1 Kennis voor Keringen Voorlanden

Het onderzoek Kennis voor Keringen Voorlanden (Lam, 2019) is samengevat in het KvK syntheserapport (Van Beek et al., 2019). Het onderzoek van 2019 heeft zich met name gericht op het voorland met als doel: het oprekken van het mee te nemen voorlanddeel bij de kwelweglengte. (Deze verkenning is in combinatie uitgevoerd met Fugro en het gezamenlijke onderzoek vanuit de Versterking Waaldijk Wolferen-Sprok (WOS) naar de rol van het voorland bij piping, zie ook 2.1.5).

In Lam (2019) is met D-Geo Flow berekeningen de pipe-lengte bij het kritieke verval beschouwd voor 2 geometrieën waarbij bleek dat het mogelijk is meer voorland mee te nemen zonder dat de pipe onder de dijkbasis uitkomt. In de verkenning is het (vooralsnog) niet gelukt om een kwantitatieve relatie te leggen tussen de kritieke pipelengte en de eigenschappen van de geometrie, de deklaag in het voorland en het watervoerende pakket. Uit de verkenning is wel gebleken dat een relatief dun watervoerend pakket of een doorlatende/ontbrekende deklaag in het achterland leidt tot relatief beperkte pipelengtes. In het KvK syntheserapport wordt geadviseerd om in berekening in D-Geo Flow (vooralsnog) geen pipegroei onder het voorland toe te staan. Om beheerredenen is het lastig om te waarborgen dat er geen zwakke plekken zijn in het voorland waardoor een pipe kan “doorbreken”/“doorgroeien” in de deklaag. Daarnaast is de berekende situatie waarbij een pipe onder de deklaag in het voorland een evenwichtssituatie vormt niet met pipingproeven gevalideerd.

2.1.2 Kennis voor Keringen Optimalisaties gecombineerd beschouwen

Het onderzoek Optimalisaties gecombineerd beschouwen (Rosenbrand and Wiersma, 2019) is ook samengevat in het KvK syntheserapport (Van Beek et al., 2019). In dit onderzoek is aan de hand van een groot aantal DgFlow sommen voor drie geometrieën gekeken naar effect van doorlatendheid van de deklaag, anisotropie en weerstand in het opbarstkanaal op het kritieke verval bij terugschrijdende erosie. Dit onderzoek was niet expliciet gericht op de berekende pipelengte. Hoewel resultaten van pipelengte wel zijn gerapporteerd en deze in zekere mate inzichten bieden die relevant zijn voor het huidige rapport is de duiding met betrekking op het effect van de doorlatendheid van de deklaag in het voor en achterland complex. Hier speelt onder meer dat de doorlatendheid van de deklaag in voor en achterland gelijk is gehouden, en dat de cases vaak complexere geometrieën betreffen. De studie laat zien dat de afname van doorlatendheid van de deklaag meestal wel leidt tot een toename van de kritieke pipelengte, doordat er relatief meer water naar de pipe stroomt in plaats van naar het achterland. Een hogere weerstand in het opbarstkanaal leidt juist tot een kortere pipelengte, omdat er relatief meer water naar het achterland stroomt, in plaats van naar de pipe. Anisotropie leidt globaal tot een langere kritieke pipelengte. De

gevoeligheid voor de verschillende parameters is sterk afhankelijk van de case (geometrie) en de bandbreedte van de overige parameters.

In rapport Optimalisaties gecombineerd beschouwen zijn effecten van parameters op het kritieke verval uitgelegd aan de hand van een conceptueel model voor kritiek verval gebaseerd op a) de instroom van water in het WVP en b) de verdeling van stroming naar de pipe en naar het achterland. Voor de pipelengte is een degelijk model nog niet ontwikkeld.

2.1.3 Kennis voor Keringen Onderzoek Faalpaden & Piping

In het onderzoek Faalpaden en Piping (Rosenbrand and Knoeff, 2020a) is voor een case in het bovenrivierengebied het effect van de leklengte van het voor- en achterland op de pipelengte bij kritiek verval onderzocht voor situaties met 100 m voorland en met 200 m voorland om vast te stellen wanneer de pipe niet onder de dijkbasis uitkomt als 3 maal de dijkbasis aan kwelweglengte meegenomen wordt. Hieruit bleek dat dit vaak mogelijk is. Wel is geconstateerd dat de rekenregel van Sellmeijer een hoger kritiek verval geeft dan D-Geo Flow wanneer de leklengte van het voorland <60 m was en er slechts 100 m voorland aanwezig was. Voor die situatie met 200 m voorland was dit niet het geval. Echter daar kwam de pipe onder de dijkbasis uit bij het kritieke verval volgens de rekenregel en is het door D-Geo Flow berekende verval dus minder betrouwbaar.

Bovengenoemde situaties waren gevallen waar het voorland niet werd afgeknot omdat het intredepunt binnen een afstand van 2 maal de dijkbasis lag. Dit suggereert dat er situaties zijn waar de fictieve voorlandlengte benadering (Schematiseringshandleiding piping Bijl. E) leidt tot een overschatting van het kritieke verval.

Wanneer het mee te nemen voorland wordt beperkt, zodat minder voorland wordt meegenomen, valt dit niet op. Echter wanneer het volledige fictieve voorland wordt meegenomen zal dit vaker voorkomen. Voor het meenemen van meer voorland is inzicht nodig in de reden van deze verschillen.

2.1.4 POV voorlanden

De Handreiking Voorland (Roode et al., 2019) gaat in op het meenemen van meer voorland voor zowel situaties met een relatief dikke en ondoorlatende deklaag in het voorland als bij een dunnere doorlatendere deklaag in het voorland.

Voor de situatie met een dikkere deklaag zijn de doorlatendheid en dikte van belang om instroom door de deklaag naar de pipe en kortsluiting te voorkomen. Op basis van engineering judgement wordt aangenomen dat bij deklaag diktes > 1,5 – 2 m er voldoende hydraulische weerstand is zodat er nagenoeg geen toestroom door de deklaag naar de pipe is en de kans op kortsluiting onwaarschijnlijk. Hierbij zal ook de lengte dat de pipe onder het voorland is ten opzichte van de lengte onder de dijkbasis een rol spelen, bij relatief meer pipe onder het voorland wordt de invloed van toestroom door het voorland groter.

Wel wordt de mogelijkheid van structuurvorming bij niet verzadigde kleilagen benoemd, wat kan zorgen voor een hogere doorlatendheid. Voor het meenemen van meer voorland bij dikke deklagen wordt ook aangegeven dat de criteria voor voorkomen van kortsluiting met name relevant zijn voor het gebied nabij de dijk, omdat de pipe bij kritiek verval tot slechts een deel van de kwelweglengte is gegroeid, in dat deel zou dus geen zwakke plek moeten zitten.

Over voorlanden met relatief dunne deklagen wordt aangegeven dat het meenemen van de intredeweerstand van de deklaag in het voorland ook van belang is, en dat dit middels de leklengte en het fictieve intredepunt meegenomen kan worden. Op basis van een casus wordt aangetoond dat de aanwezigheid van kleine onderbrekingen in de deklaag weinig effect hebben op de stijghoogte in het watervoerend pakket.

In een casus wordt met een voorland met een intredeweerstand van 25 dagen, waarin een langssloot aanwezig is met een weerstand van 1 dag, in D-Geo Flow een kritiek verval van

4,3 m gevonden, en zonder sloot van 4,7 m. Tevens wordt aangegeven dat een (minimale) intredeweerstand van 1 dag in de praktijk al heel snel aanwezig is. Een nadere onderbouwing van intredeweerstanden bij dunne deklagen, en aanvullend inzicht in tot welke afmetingen onderbrekingen in het voorland geen effect hebben kan leiden tot aanscherping in de piping analyse.

2.1.5 Onderzoek voorlanden meenemen Wolferen-Sprok (WOS)

Dit onderzoek van Fugro voor WSRL is samengevat in een publicatie (Berbee et al., 2020), en een stappenplan (Berbee and Stoop, 2020). Onderdelen hiervan zijn ook onderdeel van het kennis voor keringen onderzoek (beschreven in paragraaf 2.1.1 van dit rapport) gebruikt. In Berbee en Stoop (2020) is een stappenplan beschreven dat bestaat uit:

- Bepalen leklengte (spreidingslengte): dit wordt beschouwd als de maximale mee te nemen voorlandlengte.
- Controle of pipe onder dijkbasis blijft aan de hand van onderstaande tabel, gegeven de dikte en doorlatendheid van het watervoerend pakket, de weerstand van het voorland, en de spreidingslengte.
- Gevoelighedsanalyse in D-Geo Flow voor mee te nemen voorlandlengte van het traject uitgaande van situatie met dikste watervoerend pakket, hoogste K_{WVP} en laagste intredeweerstand.

Tabel 2.1 Uit (Berbee and Stoop, 2020)

Gebied	Korrelgrootte d_{70} [μm]	Weerstand voorland c^2 [d]	Dikte WVP D [m]	Horizontale Doorlatendheid K_h [m/d]	Spreidin gslengte λ [m]	Min. L_{kwel}^1 [N x DB]
Bovenrivieren	330	≥ 20	< 60	< 60	200	> 3
	330	≥ 20	< 40	< 60	200	> 4
	330	≥ 20	< 25	< 60	150-250	> 6
	330	≥ 100	< 60	< 60	200	> 3
	250	≥ 20	< 10	< 45	100-150	> 5
Delta/kust	130	≥ 20	< 25	< 10	100-150	$> 3^3$
	140	≥ 20	< 15	< 5	50-100	$> 2^3$

¹ Minimale kwelweglengte, niet te verwarren met voorlandlengte, die kan worden meegenomen zonder dat de pipe onder het voorland gaat groeien, uitgedrukt als aantal x dijkbasis. Uitgangspunt in het onderzoek was een dijkbasis van ca. 60 m.

² Bij weerstanden $c < 20$ dagen wordt de spreidingslengte al snel kleiner dan de dijkzate, waardoor het meenemen van meer voorland dan 1x dijkzate veelal niet interessant is. Deze situatie doet zich voor bij zeer dunne, zeer zandige en/of over de hele lengte sterk gestructureerde deklagen, zoals deklagen die in de zomer volledig droog staan.

³ Pipe groeit in deze condities bijna nooit onder het voorland, maar alleen bij hoge weerstanden kan het meenemen van meer voorland ook echt een toevoeging blijken, anders is de spreidingslengte te klein.

Bovenstaande tabel uit (Berbee and Stoop, 2020) is gebaseerd op een groot aantal berekeningen aan de hand waarvan met name voor het bovenrivierengebied al voor veel gevallen een indicatie is gegeven van mee te nemen voorland. De in deze tabel genoemde combinaties van c en $K_h D$ leiden niet altijd tot de spreidingslengtes (of leklengtes) genoemd in de voorlaatste kolom, mogelijk omdat onder en bovengrenzen genoemd worden.

Verschillende combinaties van c en $K_h D$ leiden tot andere mee te nemen voorlandlengtes, zelfs als ze dezelfde spreidingslengte/leklengte geven. Dit is omdat de vorm van het WVP mede de pipelengte bepaald.

Voor situaties met een andere breedte van de dijkbasis is de vorm ook anders bij de opgegeven D in bovenstaande tabel. Voor de toepassing bij significant langere of kortere dijken is het nodig om inzicht te hebben in die afwijking. Tevens valt op dat andere studies een duidelijk effect van de leklengte van het achterland op de berekende pipelengte tonen. Voor de toepassing van bovenstaande tabel in situaties waarvan de leklengte van het achterland significant anders is dan voor de situatie beschouwd in (Berbee and Stoop, 2020) is het ook van belang inzicht te hebben in het effect van achterland op de pipelengte.

In (Berbee and Stoop, 2020) wordt aangegeven dat de vergelijking voor effectieve (ook wel fictieve) voorlandlengte uit de schematiseringshandleiding piping de voorlandlengte

overschat bij $c < 10$ dagen en een $KD > 300 \text{ m}^2/\text{d}$. Dit lijkt een vergelijkbare bevinding als genoemd in paragraaf 2.1.3 van dit rapport waar D-Geo Flow een lager kritiek verval wordt berekend dan de rekenregel voor berekeningen waarbij de gehele fictieve voorlandlengte wordt meegenomen. In paragraaf 2.1.3 bleek dat dit mede afhankelijk is van de fysiek aanwezige voorlandlengte en de inperking van de mee te nemen voorlandlengte. Beide bevindingen suggereren dat het van belang is om meer inzicht te hebben in de situaties/parametercombinaties waar dit speelt.

Bij pipegroei onder het voorland kan de instroom door de deklaag naar de pipe ertoe leiden dat de pipe stopt met groeien waardoor hij bij een hoger evenwicht verder groeit ((Berbee and Stoop, 2020)). In (Berbee and Stoop, 2020) wordt hiervoor weliswaar een verklaring gegeven, maar aangezien het pipingproces onderzocht is in situaties met een totaal ondoorlatende deklaag moet bedacht worden dat deze situatie niet eerder getoetst is in proeven of de praktijk. Het Sellmeijer model is niet gevalideerd voor situaties met instroom door de deklaag.

In (Berbee and Stoop, 2020) wordt aangegeven dat anisotropie leidt tot langere pipelengtes. Er spelen onzekerheden omtrent de veiligheidsfilosofie en de berekende pipelengte in D-Geo Flow. Daarom is voor het onderzoek in het stappenplan een factor 1,5 toegepast op de berekende pipelengte vooruitlopend op de validatie van D Geo Flow. Tevens wordt aangegeven dat het kritieke verval en de vertaling daarvan naar een veiligheidsoordeel nog niet bepaald kan worden ten tijde van deze analyses.

De publicatie gaat ook in op situaties waarbij pipegroei onder het voorland geen bezwaar zou zijn. Hierbij zijn dikte, samenstelling, erosiesterkte en grondmechanische sterkte van belang evenals ontgravingen. De criteria om pipegroei onder het voorland acceptabel te vinden zijn in onderstaande tabel samengevat.

Tabel 2.2 Uit (Berbee and Stoop, 2020).

Voorwaarde	Bezwijkmechanisme	Eis (gegevens 1 / 200 m ²)	Suggestie beheer
1	Grondmechanisch	- $c'_d = >1 \text{ kPa}$ - deklaagdikte 2 m: 1 m voorsterkte en 1 m marge voor landgebruik ¹	- Beheren als grasland of akkerland. - Geen graverij of herstel van graverij.
2	Flora	- Voorkomen doorgaande wortelkanalen (onderkant wortelkluit 1 m boven onderkant deklaag) OF - doorgaande wortelkanalen kunnen niet (verder) eroderen (HET test i.c.m. dikte deklaag, zie eindrapportage)	- Beheren als grasland of akkerland; voorkomen houtig opschot
3a	Fauna (Gemiddeld Laagste Grondwaterstand GLG > 1 m in deklaag)	- Zone 10 m vanaf oevers niet meenemen.	- Beheren als grasland of akkerland. - Controleren op gravers, m.n. das.
3b	Fauna (Gemiddelde Laagste Grondwaterstand GLG < 1 m in deklaag)* * deklaag is voor deze situatie mogelijk te doorlatend waardoor de pipe zelden onder het voorland groeit.	- Zone 50 m vanaf oevers niet meenemen. - Doorgaande graafgangen kleine gravers (mol, worm) kunnen niet eroderen bij hoog water (HET test i.c.m. dikte deklaag, zie eindrapportage)	- Beheren als grasland i.v.m. onaantrekkelijkheid grote gravers. - Controleren op grote gravers, m.n. das. Indien aangetroffen controle op doorgraving en herstel.

*HET test = Hole Erosion Test
** c'_d = gedraineerde cohesie

In de publicatie wordt aangegeven dat het voor het uitsluiten van kortsluiting van belang is dat het grondonderzoek een hoge gegevensdichtheid heeft aangezien een lokaal zwak punt al voor kortsluiting zou kunnen zorgen.

Daar zou men echter tegenin kunnen brengen dat het de vraag is hoe groot de kans is dat een pipe vormt op de locatie van een lokaal zwak punt, als dat zwakke punt de geohydrologie niet beïnvloedt. Ook de overweging uit de POV voorlanden dat zwakke plekken op grotere afstand van de dijk minder relevant zijn aangezien de pipe bij kritiek verval een beperkte lengte heeft is hier relevant.

2.1.6 Meanderende Maas

In het innovatieproject Meanderende Maas (MeMa van Waterschap Aa en Maas) zijn stijghoogtes vlakdekkend berekend met een 3D grondwaterstromingsmodel. Deze zijn ook gebruikt om de stijghoogte onder de deklaag te berekenen om zo het effect van voorland in de pipingberekening mee te kunnen nemen. Tevens is een analyse gedaan met D-Geo Flow om te controleren of de ontwikkelde opties voor omgang met voorlanden in dat project conservatieve vereenvoudigingen zijn (van Rinsum, 2020).

De twee voornaamste bevindingen uit die analyse zijn dat:

- Het niet meenemen van het effect van opbarsten op de waterspanningen, zoals in de methode MeMa voor de beschouwde geometrie leidt tot een aanzienlijke mate van conservatisme in de schematisatie van de waterspanning voor piping. Daardoor is de aanpak voor de beschouwde situaties conservatief.
- De wijze waarop de buitenwaartse randvoorwaarde wordt opgelegd in het D-Geo Flow model effect heeft op het kritieke verval en de pipelengte. Wanneer een horizontale instroomrand wordt gehanteerd (met een stijghoogte bepaald volgens de methode MeMa) leidt dat tot een overschatting van het kritieke verval ten opzichte van een situatie met een verticale randvoorwaarde. Dit komt doordat het intredende water leidt tot krommende stroombanen. Hiervoor wordt de term radiale weerstand gehanteerd.

2.1.7 Kennis voor Keringen Strooming naar het achterland

In Hoffmans (Hoffmans, 2021) is gesuggereerd dat DgFlow geen strooming naar het achterland berekende in situaties met een semi-doorlatend achterland, en of de strooming richting een wel goed wordt berekend. In het Kennis voor Keringen achtergrondrapport Analyse van strooming naar achterland in DgFlow (Rosenbrand and Wittekoek, 2021) is aan de hand van berekeningen met DgFlow gekeken naar de rol van de doorlatendheid het achterland voor de debietbalansen in DgFlow. Deze resultaten zijn vergeleken met resultaten uit Plaxis berekeningen, en dit toont aan dat deze in DgFlow goed worden meegenomen. Tevens bieden de resultaten inzicht in het belang van het achterland voor de kritieke pipelengte. Bij het extreem van een heel doorlatende deklaag in het achterland (leklengte 2 m) is het kritieke verval in de beschouwde cases ca 10% hoger dan bij een leklengte van 300 m. De kritieke pipelengte is echter bijna 60% langer voor het geval met 300 m dan met 2 m spreidingslengte. Dit toont aan dat de leklengte van het achterland een belangrijke parameter is voor het berekenen van de pipelengte.

Daarnaast zijn gevoeligheidsanalyses gedaan naar effecten van randvoorwaarden en instellingen in DgFlow. Hieruit komen naar voren dat:

- Meshverfijning meer effect heeft op berekende pipelengte dan op kritiek verval. Hoe grover de mesh hoe langer de pipe. Het effect is het grootst bij een meer doorlatend achterland.
- De locatie van de achterrandsrand van het model heeft bij modellering met een pipe beduidend minder effect op debietbalansen dan in situaties zonder een pipe. Doordat de pipegroei de grondwaterstroming beïnvloedt kan de achterrandsrand dus dichter dan 3 maal de spreidingslengte liggen zonder significante invloed op het kritiek verval (0% verschil bij

open of dichte rand) of de pipelengte (ca 5 %), mits de ligging van de rand het ontstaan van de pipe niet beïnvloedt. Dat houdt in dat er nog steeds een behoorlijke afstand nodig is, alleen een volle 3 maal de spreidingslengte lijkt niet noodzakelijk.

2.2 Vragen in tournee kennis voor keringen en interviews

Tijdens interviews met beheerders om informatie in te winnen met betrekking tot representatieve situaties waar men meer voorland mee wil nemen, en tijdens de 'Bringen en Halen Tournee 2021 zijn ook vragen met betrekking op het meenemen van voorland aan de orde gesteld.

De vragen relevant voor het meenemen van meer voorland van zijn hieronder samengevat. Niet al deze vragen vallen binnen de doelstellingen van het huidige project, de vragen die in andere onderzoeken kunnen worden opgepakt zijn *cursief*. Tevens zijn er vragen die in de huidige/recente literatuur (grotendeels) beantwoord zijn, deze vragen worden kort geadresseerd in het huidige onderzoek met verwijzing naar nadere informatie in de literatuur.

Interviews

- Wat is de onderbouwing voor het maximaliseren van de kwelweglengte op $2 \times$ dijkbasis?
- In welke situaties is het kansrijk om meer voorland mee te nemen, hoe is het te bepalen of er meer voorland meegenomen kan worden?
- Wat is de status van D-Geo Flow, wat betekent dit voor het onderbouwen van het meenemen van meer voorland?
- Hoe ga ik om met de pipelengte uit D-Geo Flow?
- Wat het effect van vergraving in de deklaag het voorland voor het meenemen van voorland? Welk soort vergraving heeft effect: bomen, sloten, kleine vergravingen. Moet je hier iets mee voor het meenemen van voorland?
- Wanneer zou een pipe wel onder het voorland mogen groeien?
- *Hoeveel intredeweerstand kan je in geulen verwachten, en ligt deze er nog tijdens hoogwater situaties?*
- *We hebben weinig kennis van de kD (dikte & doorlatendheid) van het watervoerend pakket, heeft het zin hier veel proeven voor te doen of zijn waarden uit Regis voldoende?*

Tournee

- Is er een kalibratierelatie voor D-Geo Flow (kalibratie semi probabilistisch naar faalkans)?
- Is er al een mogelijkheid probabilistisch te rekenen met D-Geo Flow?
- Kan de onzekerheid in de berekende pipelengte van D-Geo Flow al worden aangescherpt ten opzichte van de factor 1.5 die in WOS is aangehouden?
- Wanneer is er sprake van een 3D situatie voor piping?
- Als we data hebben over de deklaag dicht bij de dijk, maar niet verder weg in het voorland, kunnen we het voorland dan meenemen?
- Wanneer zou een pipe wel onder het voorland mogen groeien?
- *Hoe bepaal je de intredeweerstand in het voorland?*
- *Hoe nemen we intredeweerstand van slib (in niet meestromende geulen of gaten in het voorland) mee?*
- *Zijn er nog doorontwikkelingen om D-Geo Flow te koppelen met regionale of 3D grondwaterstromingsmodellen.*
- *Hoe neem je metingen mee voor de kalibratie van doorlatendheden in regionale modellen en D-Geo Flow?*
- *Er is veel onzekerheid over de doorlatendheid met name in diepere lagen, hoe kunnen we die goed bepalen?*
- *Zijn er leerpunten voor meten en monitoren van waterspanningen?*

Vragen met betrekking op lokale parameterbepaling, en met name de introdeweerstand van de deklaag en de invloed van gaten hierin spelen bij veel projecten. Een groeiend aantal waterschappen werkt met, of overweegt te gaan werken met, 3D geohydrologische modellen van de ondergrond waarbij doorlatendheden worden gekalibreerd met metingen. Voor het werken met regionale modellen is al ervaring opgedaan in projecten, zoals bijvoorbeeld het Meanderende Maas project. Ten tijde van het schrijven van dit rapport wordt vanuit de Innovatieversneller (HWBP) gewerkt aan een handreiking voor het meenemen van regionale modellen in de piping analyse.

Vragen naar relevantie van de pipelengte, en de onderbouwing van de inperkingen op de mee te nemen pipelengte tot 2 maal de dijkzate bij het gebruik van de rekenregel komen veel voor. Dit geldt nog sterker voor de vragen rondom het gebruik van D-Geo Flow voor het bepalen van de pipelengte ter onderbouwing van het meenemen van meer voorland. Het huidige onderzoek gaat hier nader op in.

2.3 Samenvatting belangrijke vragen voor meenemen meer voorland

In de afgelopen jaren is veel onderzoek gedaan naar het meenemen van voorland in onderzoeksprogramma's en in projecten. In veel van deze onderzoeken is het model D-Geo Flow, of het rekenhart DgFlow gebruikt om de kritieke pipelengte te berekenen. Op basis van dergelijke berekeningen kon worden onderbouwd dat er meer voorland als kwelweglengte meegenomen kan worden in de analyse met de rekenregel van Sellmeijer.

In al deze onderzoeken speelde de onzekerheid rondom de toepasbaarheid van de berekende pipelengte een rol. Daarnaast ontbreekt een compleet overzicht van de relevante parameters die invloed hebben op de berekende pipelengte, waardoor de toepasbaarheid van resultaten van een situatie voor andere situaties beperkt is. Ook is er weinig inzicht in de variabiliteit of onzekerheid van de berekende pipelengte.

De vragen die betrekking hebben op het huidige onderzoek, op basis van de inventarisaties in voorgaande paragrafen en ervaringen van expert gebruikers zijn hieronder gerangschikt op onderwerp. Hierbij zijn de vragen die in dit rapport beschouwd zijn in normaal lettertype en vragen die in andere projecten worden geagendeerd zijn in *italics*.

Conceptueel begrip van pipelengte bij kritiek verval

- Waarom groeit een pipe in stappen tot het kritieke verval?
- Wat is de invloed van parameters, of parameter combinaties en geometrie op de kritieke pipelengte?
 - Welke parameters zijn het meest relevant? (Geometrie, doorlatendheden, voorland, achterland).
 - Hoe bepaal ik wat een conservatieve of juist optimistische waarde is voor de pipelengte in een gevoeligheidsanalyse?
 - Waar moet ik rekening mee houden als ik inzichten uit andere projecten wil toepassen in mijn project? Wat is het effect van een andere geometrie of parameters?
- Hoe gevoelig is de pipelengte bij kritiek verval?
- Heeft de drukval in het opbarstkanaal invloed op de pipelengte bij kritiek verval?
- Welke invloed hebben 3D effecten op de pipelengte?
- Welke aspecten van de theorie over pipelengte worden door proeven ondersteund?

Hoe ga ik om met pipegroei onder het voorland?

- Wordt het kritiek verval in DgFlow goed berekend bij instroom door semi-doorlatende deklaag?
- Is deklaag doorlatendheid of leklengte relevant voor instroom door de deklaag naar de pipe, en wanneer is dit effect verwaarloosbaar?
- Wanneer treedt grondbreuk op, gerelateerd aan eigenschappen deklaag?
- Wat is de kans dat een pipe bij een zwakke plek in het voorland ontstaat en daar kortsluiting maakt, als deze zwakke plek de stijghoogte binnendijks niet beïnvloedt? En wat is de kans dat een pipe naar een zwakke plek in de deklaag in het voorland groeit, hoe groot is het invloedsgebied van de zwakke plek?
- Welke afmeting van zwakke plekken in het voorland heeft geen effect op de stijghoogte binnendijks, en zorgt dus niet voor ontstaan van een pipe op locatie van de zwakke plek?

Modelleren van pipelengte met DgFlow:

- Wat zijn de overwegingen bij de schematisatie van de randvoorwaarden voor de berekende pipelengte?
 - Instroom rivier: via horizontaal vlak, en bij insnijding van rivier in watervoerend pakket.
 - Uitstroom achterland: afstand en keuze open/gesloten randvoorwaarde.
- Welke invloed hebben rekeninstellingen, zoals meshverfijning, stapgrootte waarmee verval wordt aangebracht, en MPicard getal voor de berekende pipelengte?

Veiligheidsfilosofie bij meer voorland meenemen in de rekenregel op basis van onderbouwende berekeningen in DgFlow

- Is het de huidige kalibratieregels voor de rekenregel nog geldig als meer voorland wordt meegenomen?
- Is de modelfit factor in DgFlow nog geldig als meer voorland wordt meegenomen?
- Wat is de onzekerheid in de berekende pipelengte met D-Geo Flow?
 - Is de gemodelleerde pipelengte gevalideerd met proeven? *En kunnen deze resultaten geëxtrapoleerd worden naar een praktijksituatie?*
- Welke parameteronzekerheden hebben een groot effect op de berekende pipelengte?
- Hoe kunnen berekende pipelengtes uit DgFlow vertaald worden naar meer mee te nemen voorland?
- Zijn er situaties waar de fictieve voorlandlengte methode ongeschikt om het voorland op te rekken, bijvoorbeeld omdat dit leidt tot een lager verval in D-Geo Flow dan in de rekenregel. Waarom is hier een probleem?
- Hoe ga ik om met het mogelijke effect van anisotropie op de pipelengte? Zelfs als ik geen anisotropie in de rekenregel meeneem heeft dit effect op de pipelengte. Aangezien veel afzettingen een zekere mate van anisotropie zullen bevatten (Hijma, 2020) en dit leidt tot langere L_c is de vraag wat dit betekent voor het oprekken van het mee te nemen voorland in de rekenregel. Het effect van anisotropie op het kritieke verval is afhankelijk van de instroom en uitstroom geometrie, waardoor het niet op voorhand te zeggen is wanneer het effect van voorland meenemen of het effect van anisotropie zelf op het kritieke verval groter zijn.
- *Hoe ga ik om met aspecten die pipelengte beïnvloeden en die niet in model zitten bijv. random fields heterogeniteit? Wat betekent dit voor het werken met de kritieke pipelengte?*
- Wat is het toepassingsgebied van D-Geo Flow?
 - *Wanneer spelen 3D effecten een rol?*
 - *Wat is het effect wanneer 3D stroming een rol speelt, buiten het toepassingsgebied voor kritiek verval en pipelengte?*

- Spelen er meer vragen rondom de veiligheidsfilosofie om D-Geo Flow resultaten te gebruiken ter onderbouwing van oprekken voorland?

Bepaling van belangrijke parameters in relatie tot het voorland

- Wat is de rol van slib op de bodem van gaten (zoals kleiputten, strangen, etc.) in het voorland voor de effectieve intredeweerstand/leklengte?
- Wat is de invloed van zwakke plekken of gaten op de grondwaterstroming? Welke afmetingen hebben nog effect op de effectieve leklengte?
- Wat zijn typische doorlatendheden bij gestructureerde klei?
- Hoe kan ik de leklengte van het voorland bepalen?

3 Conceptueel model kritieke pipelengte

Om voorland goed mee te nemen in de piping analyse is het van belang om inzicht te hebben in de fysica van het pipingproces, en in het bijzonder op de kritieke pipelengte (L_c) de pipelengte bij het kritiek verval (H_c). De rekenregel van Sellmeijer is niet toepasbaar wanneer water van bovenaf door de deklaag in de pipe stroomt, en ook voor DgFlow is het erosiemodel niet gevalideerd met instroom van bovenaf, hoewel dit wel in de berekening wordt meegenomen.

De verhouding tussen L_c en de kwelweglengte L_s , L_c/L_s , is gerelateerd aan de geometrie en parameters van de situatie. Inzicht in de effecten van parameters op L_c/L_s kan gebruikt worden om L_c te bepalen en om te onderbouwen dat de pipe bij H_c niet onder de dijkbasis uitkomt (in situaties met een semi-doorlatend voorland).

Een conceptueel model gericht op het verklaren van L_c/L_s in de context van het Sellmeijer model is opgesteld in dit hoofdstuk.

Op basis van het conceptuele model zijn hypothesen zijn opgesteld voor:

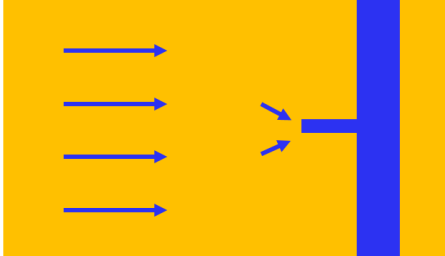
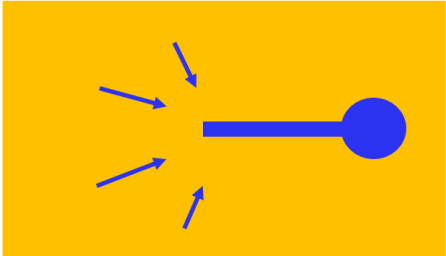
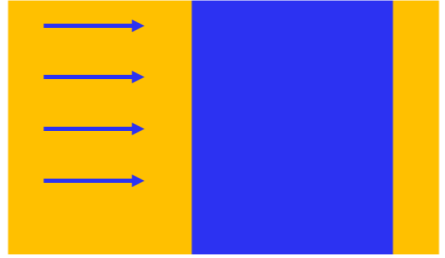
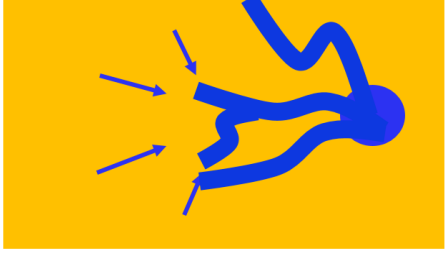
- het toepassingsgebied van DgFlow en de rekenregel van Sellmeijer, en verwachting van de effecten die buiten het toepassingsgebied spelen.
- de effecten van individuele parameters op de kritieke pipelengte, en op de pipelengte bij een gegeven verval.
De effecten van parameters op H_c en L_c kunnen anders zijn, wat een veilige aanname voor H_c is, kan een onveilige aanname zijn voor L_c/L_s .

De hypothesen worden waar mogelijk onderbouwd met resultaten uit proeven en modellen. De details met betrekking op deze proeven en modellen zijn te vinden in hoofdstukken 4 en 5. De eerste serie hypothesen hebben betrekking op een dicht achterland en situatie 1, voor de uitlegbaarheid. Vervolgens worden deze uitgebreid naar situatie 1 met een semi-doorlatend achterland. Tot slot zijn effecten van 3D stroming voor situaties 2 en 3 beschreven.

3.1 Overzicht mogelijke piping situaties

In de analyse van piping kunnen op basis van het type uitstroomopening en de hoeveelheid pipes die vormt ruwweg vier situaties worden onderscheiden. Deze zijn schematisch weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 3.1 Overzicht mogelijke pipingsituaties voor het conceptuele model. (n.b. voor al deze situaties wordt uitgegaan van een homogeen watervoerend pakket in de baan van de pipe (horizontale gelaagdheid is wel mogelijk, maar verticale gelaagdheid zoals bijv. een grofzand barrière kunnen hiermee niet beschreven worden).

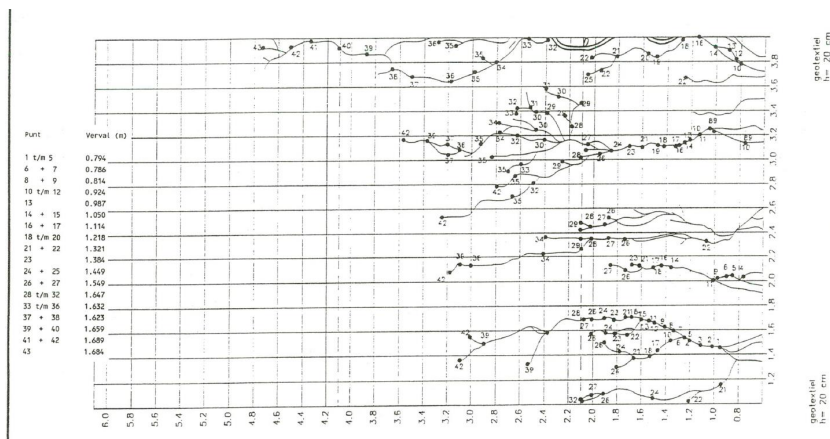
	2D uitstroom (sloot, geen deklaag)*	3D uitstroom (gat, wel door ondoorlatende deklaag)*
1 pipe ⁺	<p>Situatie 2: combinatie 2D/3D</p>  <p>Buiten toepassingsgebied rekenregel en model van Sellmeijer/DgFlow (te onderzoeken met onderzoeksversie DgFlow 3D)</p> <p>Experimentele data: proeven Allan (slot)</p>	<p>Situatie 3: puur 3D</p>  <p>Buiten toepassingsgebied rekenregel en model van Sellmeijer/DgFlow (te onderzoeken met onderzoeksversie DgFlow 3D)</p> <p>Experimentele data: proeven Van Beek, Pol, Dolphen, Allan hole</p>
Veel pipes ⁺	<p>Situatie 1: puur 2D</p>  <p>Rekenregel en model van Sellmeijer/DgFlow toepasbaar.</p> <p>Experimentele data: proeven Silvis, IJkdijk (Van Beek), Allan (slot)</p>	<p>Situatie 4: combinatie 2D/3D</p>  <p>Buiten toepassingsgebied rekenregel en model van Sellmeijer/DgFlow.</p>

* simplificatie: bij een semi doorlatende deklaag zal de situatie tussen een 2D uitstroom en een 3D uitstroom liggen.

* simplificatie van de uiteinden van een spectrum er kunnen meerdere pipes vormen op afstand van elkaar afhankelijk waarvan effecten meer op 1 pipe of op veel pipes lijken.

Het model van Sellmeijer (en daarmee de rekenregel en D-Geo Flow) is ontwikkeld voor **situatie 1**. Dit model gaat uit van een oneindig brede pipe en een 2D uitstroomopening en een homogeen zandpakket in de baan van de pipe.

Situatie 1 is vergelijkbaar met een situatie van een sloot uitstroom, en het ontstaan van meerdere pipes die in lengte gelijk oplopen, zoals geobserveerd in de proeven van Silvis (Silvis, 1991).



Figuur 3.1 Tekening ontwikkeling pipes uit (Silvis, 1991).

In voorliggend hoofdstuk wordt eerst een conceptueel model voor pipegroei en de kritieke pipelengte voor **situatie 1** uitgewerkt. Voor de piping analyse is het relevant om inzicht te hebben in het effect van de andere situaties op het piping proces. Daarom wordt het conceptuele model uitgebreid naar **situaties 2 en 3**, waarbij ingegaan wordt op de verschillen met situatie 1.

3.2 Situatie 1: Kritieke pipelengte

In deze paragraaf wordt het concept van de kritieke pipelengte uitgewerkt voor situatie 1, startend met de eenvoudigste situatie met een ondoorlatend voor- en achterland.

De pipegroei tot aan het kritieke verval wordt in de huidige methodiek (rekenregel en D-Geo Flow) beschreven met het model van Sellmeijer (Sellmeijer et al., 2011; Sellmeijer, 1988). Stroming vanuit het WVP naar de pipe leidt tot een schuifkracht op de korrels op de bodem van de pipe. Als de schuifkracht op korrels in de pipe voldoende is om korrels te transporteren groeit de pipe totdat deze een evenwicht bereikt. Het groeien houdt in dat de pipe langer en dieper wordt. Dat wil zeggen dat de pipe langer wordt als het verhang aan de pipe tip voldoende is om korrels te transporteren volgens het erosie criterium van Sellmeijer, en de evenwichtsdiepte wordt ook met dit criterium beschreven.

Opgemerkt wordt dat het Sellmeijer model niet expliciet het losmaken van korrels aan de kop van de pipe, primaire erosie, beschrijft (Robbins et al., 2018; Van Beek, 2015). Daardoor is variatie in de baan van de pipe, zoals bij een grofzand barrière ook buiten het toepassingsgebied.

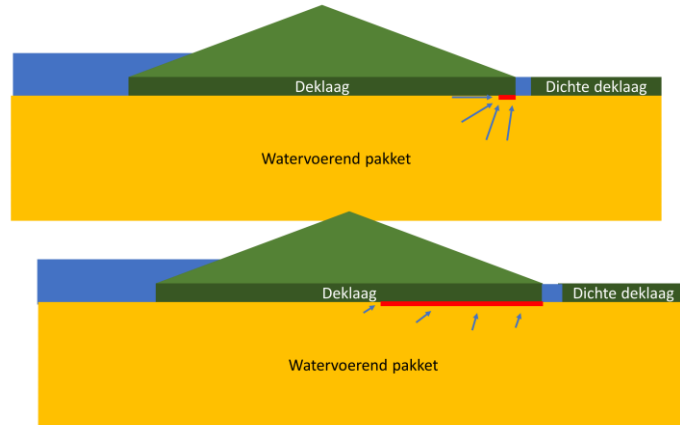
Voor homogene situaties is het Sellmeijer model wel voor kritiek verval gevalideerd, wat impliceert dat het model ook het losmaken van korrels bij de pipe tip redelijk beschrijft voor de dataset die gebruikt is bij de validatie.

Proeven en modellen laten zien dat een pipe vaak bij lage vervallen groeit maar weer tot evenwicht komt. Het verval moet verhoogd worden om de pipe weer verder te laten groeien, totdat het kritieke verval is bereikt waarbij de pipe door blijft groeien naar het intredepunt. Dit gedrag kunnen we verklaren door de stroming in de dwarsdoorsnede te beschouwen voor de situatie met een dicht achterland en een uitstroomopening zoals een sloot.

Als de pipes starten met groeien is sprake van een sterke concentratie van stroming bij de pipe, al het water moet door een relatief klein totaal uitstroomoppervlak (de pipe en sloot) naar buiten. Daardoor is het verhang bij de kop van de pipe hoog en groeit de pipe.

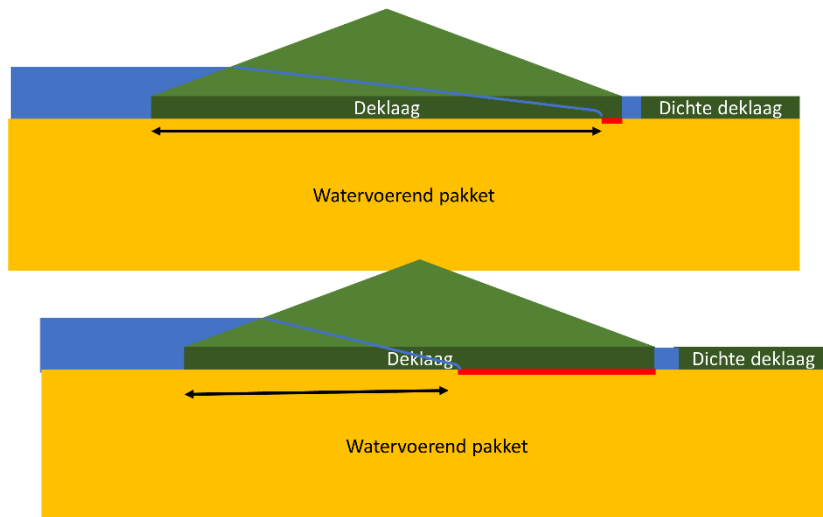
Door de pipegroei neemt het uitstroomoppervlak toe, en de concentratie van stroming bij de kop van de pipe neemt af. Daardoor is het verhang niet meer voldoende om de pipe verder te

laten groeien bij dit verval. Een verhoging van het verval is nodig om de pipe verder te laten groeien. Dit is hieronder geïllustreerd.



Figuur 3.2 Illustratie van effect van pipegroei op concentratie van stroming naar de pipe.

Gelijktijdig neemt de afstand tussen de rivier en de pipe kop door het langer worden van de pipe af. Dit effect leidt tot een toename van het verhang bovenstrooms van de pipe, omdat de drukval in de pipe kleiner is dan in het zand.



Figuur 3.3 Illustratie van effect van afname afstand tussen pipe kop en bovenstroomse randvoorwaarde op concentratie van stroming naar de pipe.

We kunnen dus spreken van 2 effecten van pipegroei:

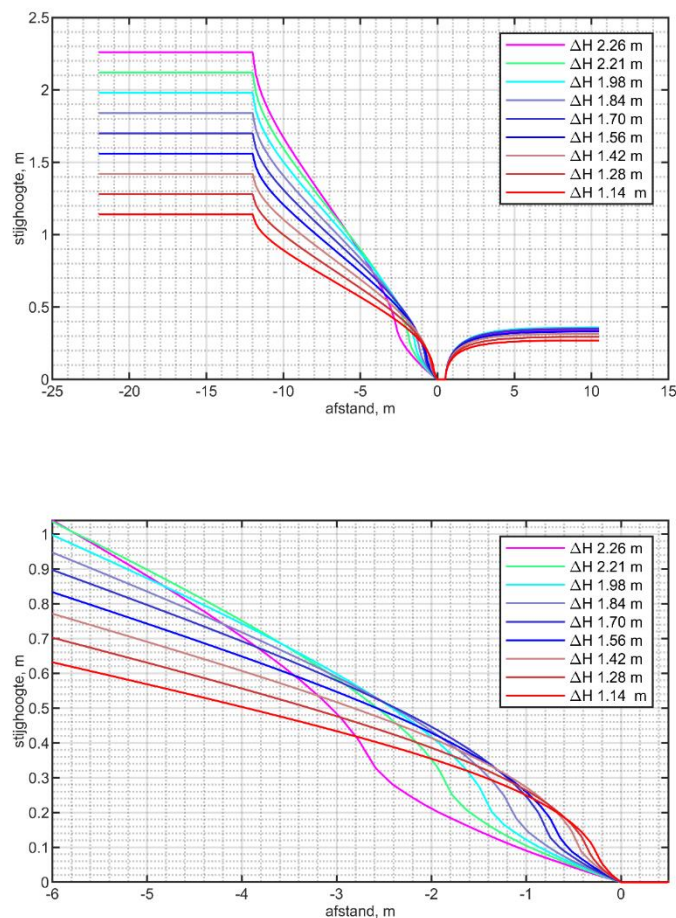
1. Effect 1: concentratie van stroming naar de pipe. De groei van de pipe leidt bij een gegeven verval tot een toename in uitstroomoppervlak, en afname in concentratie van stroming bij de kop van de pipe.
2. Effect 2: afstand tussen pipe kop en rivier. De kop van de pipe komt dichterbij het intredepunt waardoor het verhang bovenstrooms van de pipe toeneemt.

Effecten 1 en 2 vinden gelijktijdig plaats, en het netto effect op de pipe bepaalt het kritieke verval H_c en de kritieke pipelengte L_c . De L_c is het omslagpunt waar effect 2 belangrijker wordt dan effect 1 waardoor de pipe bij gelijkblijvend verval doorgroeit.

Het totale verval over het watervoerend pakket kan worden gezien als het verhang over het WVP bovenstrooms van de pipe, en het verhang in de pipe zelf¹. Dat laatste wordt bepaald door de diepte van de pipe, die volgt uit de stroming naar de pipe en het evenwichtscriterium van Sellmeijer.

3.2.1 Illustratie effect van pipegroei

De waterspanningen in de baan van de pipe zijn hieronder geïllustreerd aan de hand van de modellering van een van de proeven van Silvis (Silvis, 1991), zie hoofdstuk 4 voor details. Figuur 3.4 illustreert de gemodelleerde stijghoogte in de baan van de pipe met toenemend verval.

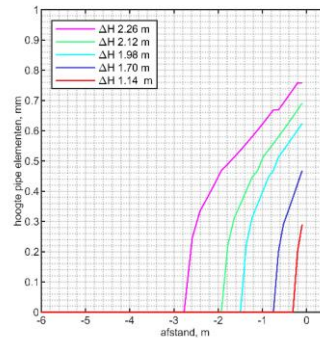


Figuur 3.4 Stijghoogteprofiel in de baan van de pipe bij verschillende vervallen ΔH voor model van Silvis proef T3 (zie ook Hoofdstuk 4). De pipe start vanaf 0 m met groeien.

¹ En de drukval in de zandmeevoerende wel indien van toepassing, deze wordt in het conceptuele model buiten beschouwing gelaten.

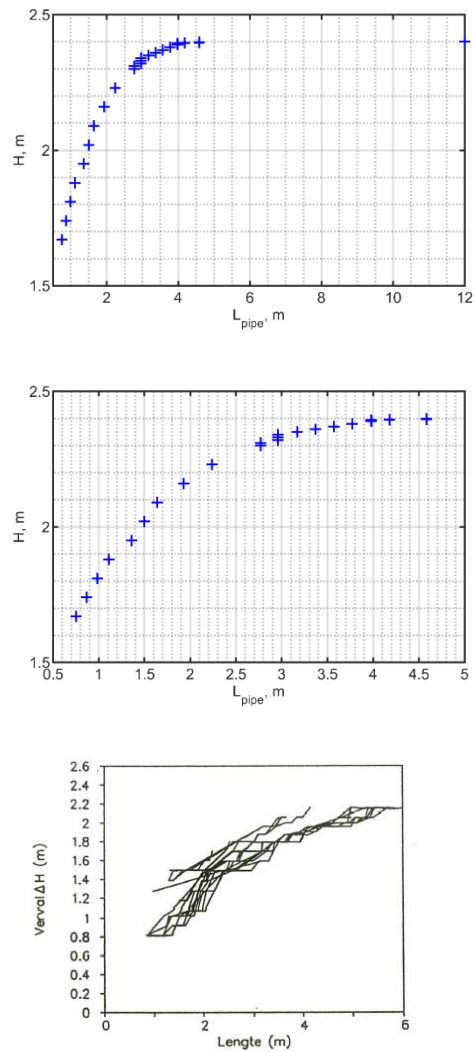
Figuur 3.4 toont:

- Een relatief steil verhang net bovenstrooms van de pipe bij aanvang van pipegroei: veel water concentreert naar een klein uitstroomvlak (bij $\Delta H 1.14 \text{ m}$). De curve is vlakker verder bovenstrooms.
- De gradiënt in het watervoerend pakket verder bovenstrooms van de pipe is aanvankelijk (voor de eerste verval stappen) vergelijkbaar. Naarmate het verval verhoogd wordt en de pipe langer wordt neemt deze gradiënt steeds meer toe, zie met name het verschil tussen $\Delta H 2.26$ en $\Delta H 2.21$, doordat de pipe met steeds grotere stappen groeit.
- In de pipe is ook een drukval, het verhang in de pipe neemt af naarmate het verval wordt verhoogt. Dit komt doordat de pipe langer en dieper wordt (zie ook Figuur 3.5).



Figuur 3.5 Hoogte van pipe elementen bij verschillende vervallen, voor model van Silvis proef T3 (referentie bijlage) het uittredepunt is bij 0 m.

- De toename van de gemodelleerde pipelengte bij een gegeven toename in verval neemt toe met toename in verval (zie ook Figuur 3.6).

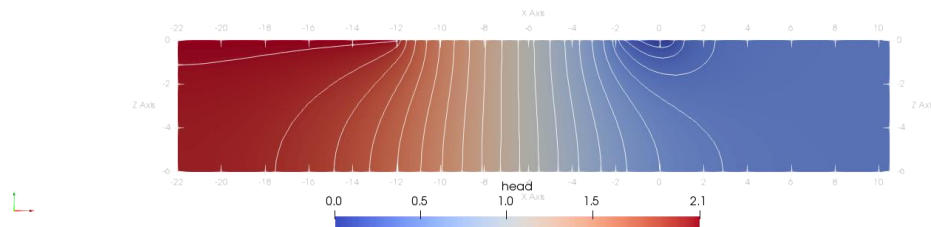


Figuur 9. Pipelengten & tegen verval ΔH . Resultaat proef T3, $L = 12$ m

Figuur 3.6 Verval tegen pipelengte, voor model van Silvis proef T3 (zie ook Hoofdstuk 4). Bovenste figuren, modelresultaten. Onderste figuur proefresultaten.

Naarmate de pipe dichterbij L_c komt heeft het langer worden van de pipe (effect 1) relatief minder effect op de waterspanningen, waardoor de pipe met grotere stappen groeit.

De stijghoogtes in het profiel bij kritiek verval zijn getoond in Figuur 3.7.



Figuur 3.7 Stijghoogteprofiel bij kritiek verval voor model van Silvis proef T3.

3.2.2 Hypothesen situatie 1

H1. De overkoepelende hypothese is dat L_c/L_s groter zal zijn bij eigenschappen van het WVP die leiden tot een groter belang van effect 1, toename van het uitstroomvlak, ten opzichte van effect 2, toename van de bovenstroomse gradiënt.

Dit zijn eigenschappen waardoor er meer concentratie van stroming naar de pipe is, gekenmerkt door een sterkere kromming van de stijghoogtecontouren bij de pipe. Globaal gezien houdt dit in dat L_c/L_s groter is wanneer:

- Er meer water in het WVP stroomt (diepere WVP pakketten).
- Er minder water naar het achterland stroomt (slecht doorlatende achterlanden, kleine uitstroomopening).
- Het watervoerend pakket anisotroop is.

Deze hypothese wordt in de volgende paragrafen nader uitgewerkt en onderbouwd.

H2. De hypothese is dat het erosiemodel zoals geïmplementeerd in DgFlow/D-Geo Flow geschikt is om L_c/L_s te berekenen voor situatie 1 (voor een homogeen watervoerend pakket in de baan van de pipe).

Aspecten die van belang zijn voor pipegroei zijn naar verwachting goed verwerkt in het model.

Bevindingen m.b.t. H2 uit analyse van proeven

Bij de proeven van Silvis is geobserveerd dat de pipes bij hogere vervallen ook sterker in lengte toenemen, en metingen van de pipelengte tijdens de proeven bevestigen dit. De proefresultaten van Silvis ondersteunen daarmee kwalitatief de gemodelleerde H vs L curves.

Hoewel L_c/L_s zoals berekend in DgFlow redelijk overeenkomt met de proeven van Silvis is er een forse bandbreedte aan onzekerheid in L_c in de proeven van Silvis. Ook de modellen kennen een onzekerheid in de orde van 5-10% op L_c vanwege de meshverfijning. De gemodelleerde L_c valt bij 2 proeven binnen die bandbreedte maar bij de proef met de met langste kwelweg wordt L_c onderschat.

Tevens is er een consistente overschatting van H_c in de modellen voor de proeven van Silvis. De overschatting is in de orde van 10-30% maar houdt wel in dat de gemodelleerde pipelengte bij het kritieke verval uit de proef ca 2-3 keer korter is dan de pipelengte in de proef bij dat verval.

Dat wil zeggen dat L_c/L_s redelijk wordt benaderd, maar dat L_{pipe} bij gegeven ΔH onder H_c wordt onderschat.

De modellen van de proeven van Allan ondersteunen H2 niet, de gemodelleerde L_c zijn langer dan in de proeven voor de 2D uitstroom (plane en slot). H_c wordt voor de plane uitstroom wel redelijk gemodelleerd maar overschat in de slot uitstroom. Voor deze proeven speelt wel de vraag of de slot en plane proeven progressie of initiatie gedomineerd zijn.

H2b: een aanvulling op H2 is dat de onzekerheid in L_c groter is dan de onzekerheid in H_c en dat de nauwkeurigheid waarmee L_c wordt bepaald sterk van H_{incr} afhangt zowel in proeven als in modellen

De vorm van de H vs L curve (zie Figuur 3.6) leidt ertoe dat de pipelengte sterk verandert rondom het kritieke verval. De kritieke pipelengte zal daardoor gevoeliger zijn voor kleine verstoringen (zoals de stapgrootte waarmee verval toeneemt in proeven en modellen H_{incr}) wat leidt tot een grotere mate van variatie en onzekerheid voor pipelengte dan voor kritiek verval.

Bevindingen m.b.t. H2b uit analyse van proeven

De variatiecoëfficiënten van L_c voor de duplo proeven zijn groter dan die voor H_c , (ca. 4 maal zo groot). Dit ondersteunt de hypothese dat de onzekerheid van L_c groter is dan voor H_c . Deze proeven waren allen 3D situaties, de aanname is dat de variabiliteit voor 2D ook groter is voor pipelengte dan voor H_c .

Bevindingen m.b.t. H2b uit analyse van modellen

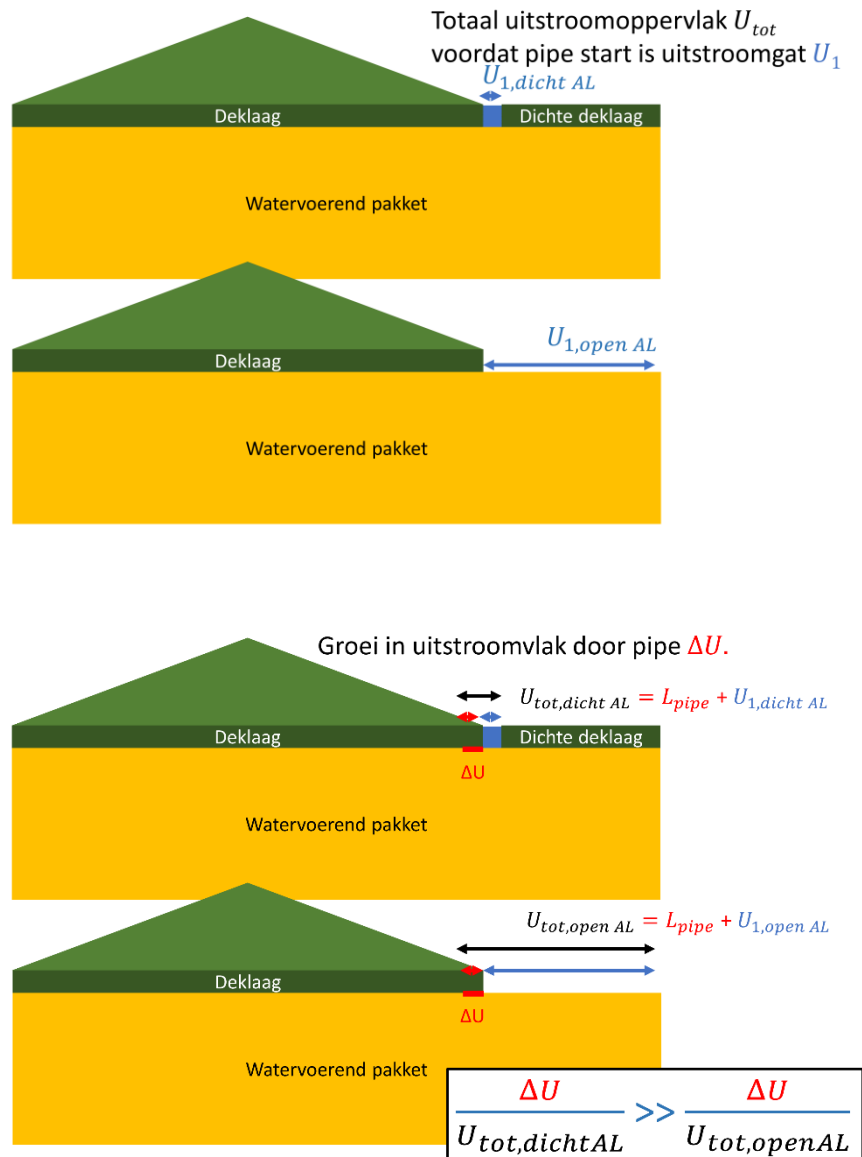
De gemodelleerde L_c is zeer gevoelig voor de gehanteerde stapgrootte H_{incr} . Wanneer $\frac{H_{incr}}{H_c} \approx 1\%$ kan L_c met ca. 15% onderschat worden. De mate van onderschatting is niet op voorhand te bepalen.

3.3 Situatie 1: Effect uitstroomopening

Deze situatie wordt eerst beschreven uitgaande van een ondoorlatend achterland. De uitbreiding naar een semi-doorlatend achterland wordt in 3.6 gemaakt.

H3: hoe langer de uitstroomopening, hoe korter L_c/L_s

Het effect van pipegroei op de waterspanningen bij de kop van de pipe, effect 1, is sterk afhankelijk van de uitstroomopening benedenstrooms van de pipe. Water kan zowel via de pipe als via de uitstroomopening uitstromen, deze samen kunnen gezien worden als het totale uitstroomoppervlak. Het effect van een toename in uitstroomoppervlak door het langer worden van de pipe is groter wanneer de uitstroomopening kleiner is. Dus een sloot met een dicht achterland leidt tot meer effect van pipegroei en een langere L_c dan een open achterland zonder deklaag. Dit is hieronder geïllustreerd.



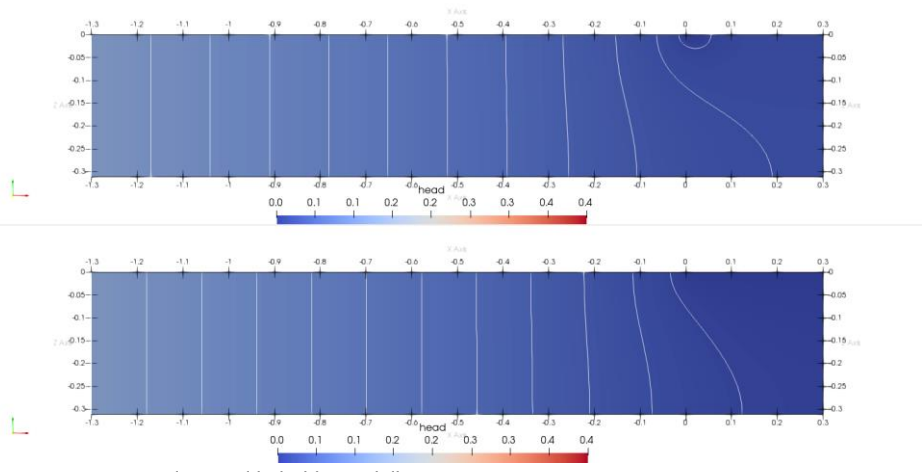
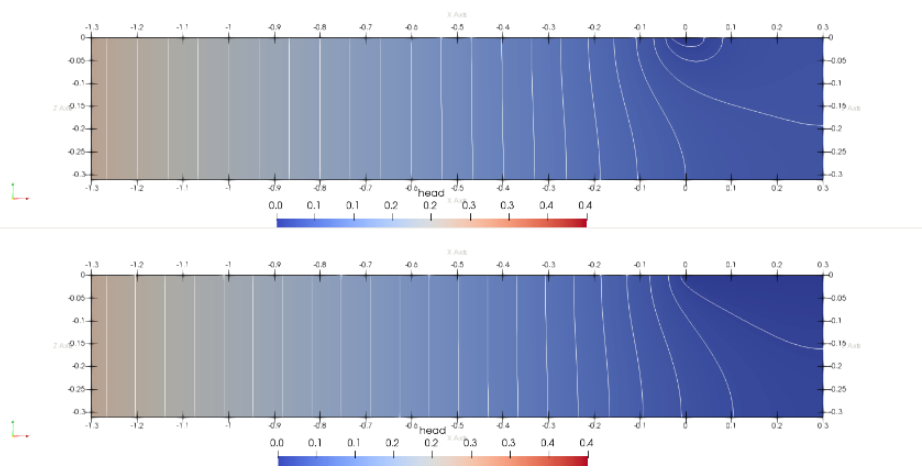
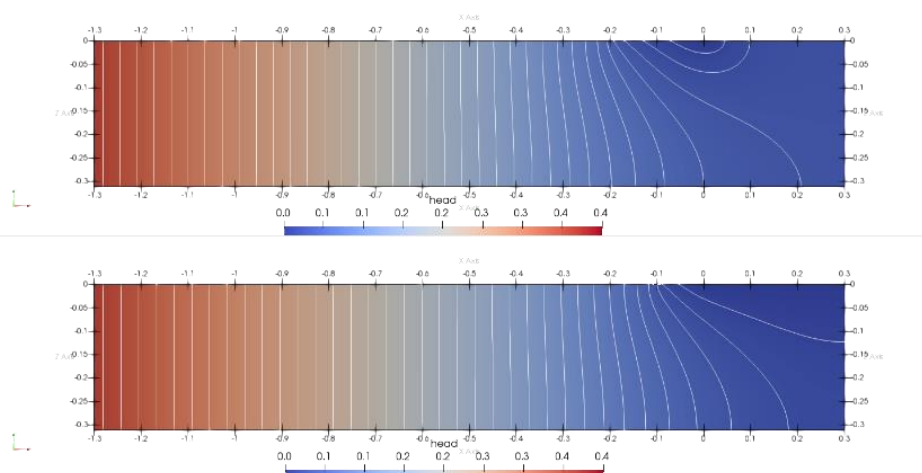
Figuur 3.8 illustratie van relatief belang pipe groei in 2D situatie met open en met dicht achterland.

Het effect van de uitstroomopening is ook zichtbaar in het beeld van de waterspanningen in de dwarsdoorsnede. Het effect van pipegroei op de waterspanningen in een geval van een open en een dicht achterland is geïllustreerd in de figuren in Tabel 3.2. Zie voor details over de gebruikte modellen hoofdstuk 4².

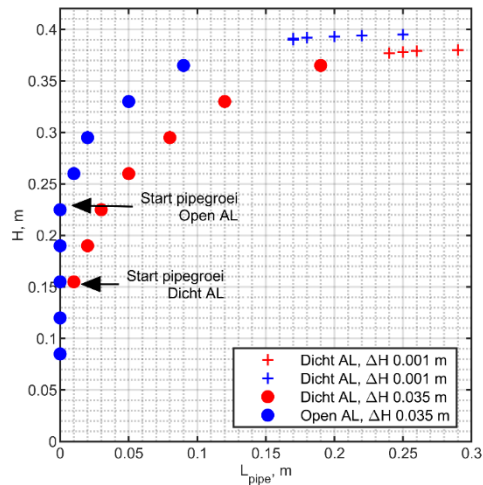
Voorafgaand aan pipegroei concentreert stroming zich sterk naar het uitstroomgat in het model met een dicht achterland. De pipe begint bij een lager verval te groeien in het model met een dicht achterland. En bij hogere vervallen is de pipe langer met een dicht achterland. Het verschil tussen de stijghoogtecontouren met een dicht en open achterland neemt wel af naarmate de pipe langer wordt; doordat de pipe ook zorgt voor een groter uitstroomvlak in het model met dicht achterland.

² Gebruikte modellen zijn ALLAN_CIRCLE en ALLAN_PLANE_kl

Tabel 3.2 Stijghoogtebeeld voor situatie met gesloten achterland (bovenste figuur) en open achterland (onderste figuur) bij verschillende vervallen (modellen ALLAN_CIRCLE en ALLAN_PLANE_kl met gelijke doorlatendheid WVP; uitstroombgat in model dichte deklaag (CIRCLE) is 0.025 m breed, uitstroom in open deklaag model (PLANE) is 0.28 m breed zie analyse in hoofdstuk 4).

Verval, m	Stijghoogtebeeld (stijghoogtecontouren van de stijghoogte zitten 0.01 m uit elkaar)
0.12	 <p data-bbox="478 806 925 840">Voor aanvang van pipegroei in beide modellen</p>
0.26	 <p data-bbox="478 1321 1021 1355">Pipegroei alleen in model met dichte deklaag achterland.</p>
0.37	 <p data-bbox="478 1848 1436 1910">Pipegroei in beide modellen pipe in model met dichte deklaag is ca 2 maal zo lang als in model met open deklaag.</p>

Naarmate de pipe langer wordt gaat in het model met het open achterland relatief meer water naar de pipe dan naar het achterland. Daardoor komen de H vs. L curves voor de twee situaties ook dichterbij, zoals geïllustreerd in onderstaande figuur, desalniettemin blijft L_c groter voor de situatie met dicht achterland. Hierdoor is ook het verschil tussen de berekende H_c in de twee situaties relatief beperkt.



Figuur 3.9 Verval versus pipelengte voor open en gesloten achterland (modellen ALLAN_CIRCLE en ALLAN_PLANE_kl met gelijke doorlatendheid WVP; uitstroomgat in model dichte deklaag (CIRCLE) is .025 m breed, uitstroom in open deklaag model (PLANE) is 0.28 m breed zie analyse in hoofdstuk 4).

Het gemodelleerde kritieke verval is hoger bij een open achterland, echter het effect is relatief klein in vergelijking met het effect op de L_c/L_s (voor dit geval is het verschil in H_c 0.015 m (ca 4% van H_c) en voor L_c 0.06 m (ca 20% van L_c).

Figuur 3.9 toont tevens het effect van de stapgrootte die in een berekening wordt gehanteerd op de H_c en L_c die gevonden worden met de DgFlow analyse. Met de stapgrootte van 0.035 m zijn de berekende L_c 35% en 65% van de berekende L_c die bij een fijnere stapgrootte van 0.001 m wordt gevonden (voor open AL en dicht AL respectievelijk). Met een nog fijnere stapgrootte, 0.0001 m is het resultaat geconvergeerd (zie ook hoofdstuk 5.2 voor de analyse van het effect van de stapgrootte op de berekende L_c).

Bevindingen m.b.t. H3 uit analyse van proeven

De resultaten van de proeven van Allan ondersteunen de hypothese, echter er zijn een aantal aandachtspunten:

- de proeven met een open uitstroomvlak (plane) hadden een andere doorlatendheid dan de proeven met een dichte uitstroom (slot of circle).
- het is de vraag of de pipegroei in de proeven (slot en plane) gedomineerd was door initiatie¹ of door progressie (zie hoofdstuk 4).
- De proeven met een gat uitstroom zijn 3D (situatie 3) terwijl de plane proeven situatie 1 zouden zijn. De slot uitstroom proeven hadden mogelijk ook een sterkere 3D component doordat maar 1 of enkele pipes vormden (situatie 2). 3D stroming zou naar verwachting ook leiden tot langere pipes voor situatie 3 (zie ook H10).

Bevindingen m.b.t. H3 uit analyse van modellen

In de DgFlow modellen wordt met een open achterland een kortere L_c berekend dan met een dicht achterland in overeenstemming met de hypothese.

Tabel 3.3 Effect van parameters op basis van conceptueel model.

Parameter	Effect op L_c/L_s	Effect op H_c/L_s	Effect op L_{pipe} bij gegeven ΔH
Uitstroomoppervlak A_{exit} bij ondoorlatend achterland	Toename $A_{exit} \rightarrow$ Afname L_c/L_s	Toename $A_{exit} \rightarrow$ Beperkte toename H_c/L_s	Toename $A_{exit} \rightarrow$ Afname L_{pipe}

In deze paragraaf zijn twee extremen beschouwd, veelal zal sprake zijn van een semi-doorlatend achterland; ook dit leidt tot een kortere L_c dan een dicht achterland. In hoofdstuk 3.6 wordt dit model uitgebreid naar de situatie met een semi-doorlatend achterland³.

3.4 Situatie 1: Effect geometrie

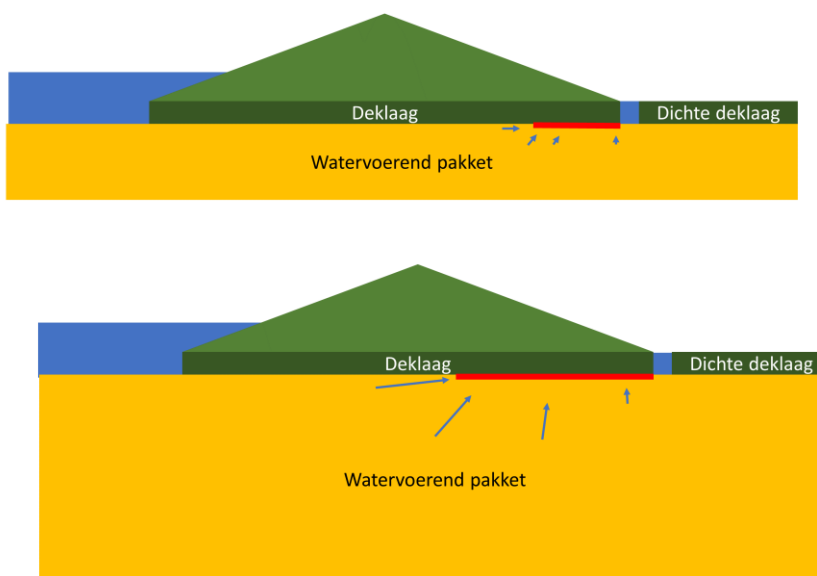
3.4.1 Effect vorm: Dikte/Lengte verhouding

H4: een dikker pakket (hogere dikte D ten opzichte van kwelweglengte $=L_s$) leidt tot een langere L_c/L_s .

De vorm van het WVP, D/L , heeft een significante invloed op de waterspanningen en daarmee op het omslagpunt, L_c/L_s . Bij een relatief dik pakket komt meer stroming van onderaf naar de pipe toe en stijghoogtecontouren zijn sterker gekromd. Daardoor heeft het toenemen van de uitstroomopening bij het langer worden van de pipe een relatief groter effect op de waterspanningen bij de pipe tip en is effect 1 belangrijker dan bij een dunner pakket.

Een toename in kwelweglengte bij constante D leidt tot een kortere L_c/L_s ; een toename in diepte bij constante L_s leidt tot een langere L_c/L_s .

Het effect van vorm is hieronder geïllustreerd.



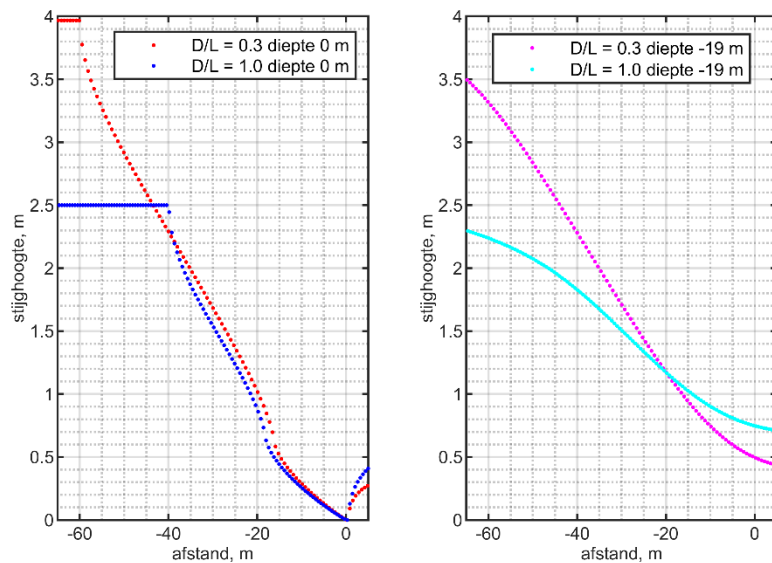
Figuur 3.10 Illustratie van het effect van D/L , bij een dikker WVP is er meer concentratie van stroming naar de kop van de pipe wat leidt tot langere L_c/L_s .

³ Deze volgorde is van belang omdat effecten van parameters zowel effect hebben op spreidingslengte als op het piping evenwicht. Deze effecten zijn complex en veelal afhankelijk van de invloed van de gehele set aan parameters.

Een hogere D/L leidt ook tot een lagere H_c/L_s doordat er bij een gegeven verval meer water door een dieper pakket stroomt. Bij een gegeven verval ΔH zal de pipe ook langer zijn bij een hogere D/L .

De boven beschreven effecten zijn zichtbaar als de stijghoogte in de baan van de pipe, en op diepte, wordt beschouwd. Hieronder worden de waterspanningen bij H_c voor twee modellen getoond. Dit zijn een model met een WVP van 20 m dik en kwelweg van 60 m (model Test 20 m LS in Hoofdstuk 5), en een model met een WVP van 40 m dik met een kwelweg van 40 m (Test 40 m).

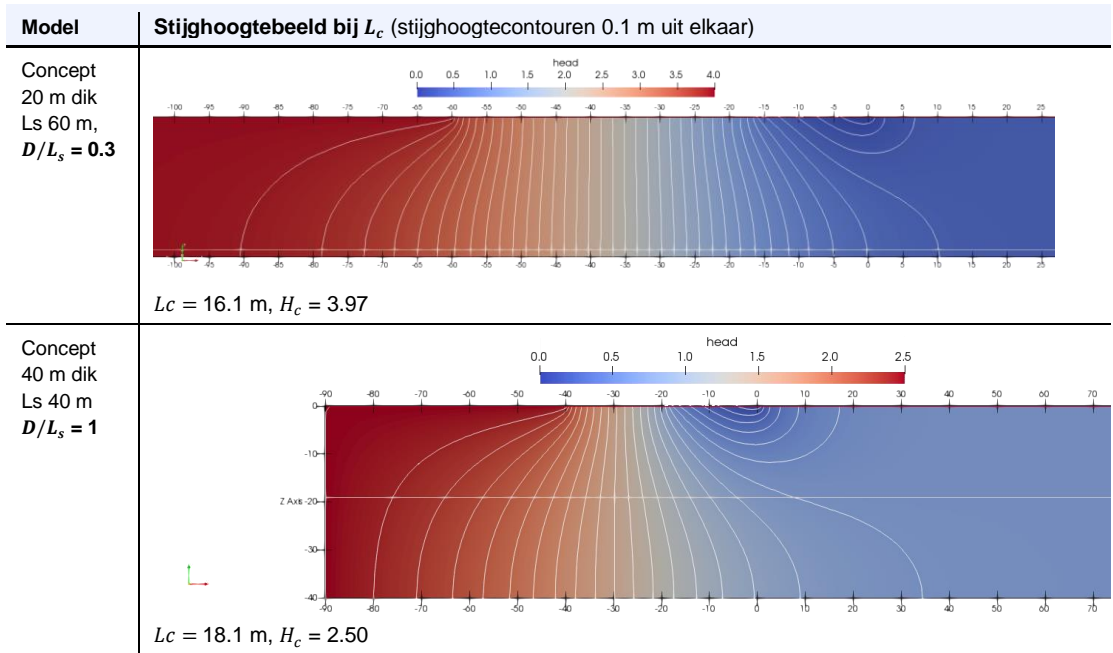
Hier is te zien dat de stijghoogte op diepte in de regio waar de pipe is (tussen ca. 0 m en -20 m afstand op de x as; de diepte is -19 m) hoger is voor het diepere model, terwijl de stijghoogte in de pipe hoger is voor het ondiepere model. Daardoor is er meer concentratie van stroming naar de pipe waardoor het langer worden van de pipe (effect 1) relatief meer effect heeft op de stijghoogte bij de pipe kop.



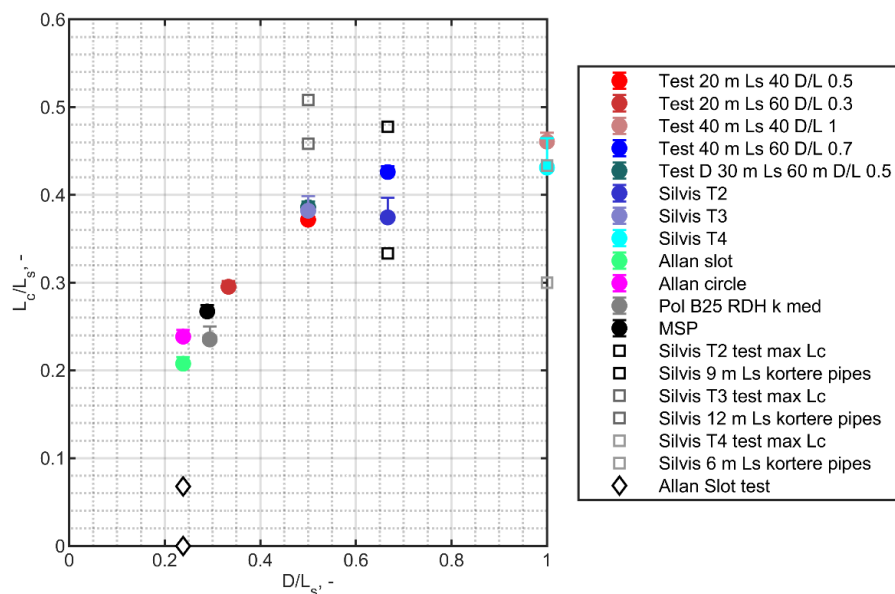
Figuur 3.11 Stijghoogte in de baan van de pipe (links op diepte 0 m) en op diepte van -19 m (rechts) voor een dunner ($D/L = 0.3, L_s = 60 \text{ m}, D = 20 \text{ m}$) WVP en een dikker ($D/L = 1, L_s = 40 \text{ m}, D = 40 \text{ m}$) WVP bij H_c . (De modellen zijn Test_20_Ls_60m en Test_40_Ls_40m voor details modellen zie hoofdstuk 5).

De sterkere concentratie van stroming is geïllustreerd in onderstaande figuren die het stijghoogtebeeld bij het kritieke verval tonen. Bij een relatief platter pakket (lagere D/L) is er relatief minder concentratie van de stroming naar de pipe, zoals te zien is aan de rechte stijghoogtecontouren.

Tabel 3.4 Illustratie stijghoogte in doorsnede bij kritiek verval voor een dikker ($D/L = 1$) en een dunner ($D/L = 0.3$) WVP (modellen Test 20m Ls en Test 40m Ls voor details modellen zie hoofdstuk 5).



Modelmatig is het effect van D/L_s onderzocht door alle modellen met dicht achterland gezamenlijk uit te zetten. Dit leidt tot onderstaande beeld wat een duidelijke relatie weergeeft van toenemende L_c/L_s als functie van D/L_s uit de modellen (de ingekleurde cirkels). Proeven zijn beperkt beschikbaar maar ondersteunen dit beeld niet geheel (de niet ingekleurde symbolen)(zie ook hoofdstuk 4 voor nadere analyse proeven en onzekerheid, en hoofdstuk 5 voor details modellen).



Figuur 3.12 Samenvatting modellen van proeven en veldschaal met een dicht achterland en proefresultaten van proeven voor situatie 1 (n.b. voor de slot proeven van Allan is de vraag of deze situatie 1 zijn, zie details van modellen in hoofdstuk 4).

Bevindingen m.b.t. H4 uit analyse van proeven

De resultaten van de proeven van Silvis ondersteunen de hypothese voor het effect van D/L niet, echter door de bandbreedte van mogelijke pipelengte is dit onvoldoende om de hypothese te ontcrachten. De modellering van de proeven duidt wel op een toename in L_c/L_s met toename in D/L .

De slot proeven van Allan in combinatie met die van Silvis ondersteunen weliswaar de verwachte toename in L_c/L_s echter hier speelt de vraag of deze initiatie of progressie gedomineerd zijn.

Bevindingen m.b.t. H4 uit analyse van modellen

In de DgFlow modellen met een dicht achterland is een duidelijke trend van toenemende L_c/L_s als functie van toenemende D/L te zien. Deze trend is voor de hier beschouwde modellen sterker dan effecten van doorlatendheid, d_{70} en schaal voor de beschouwde modellen, in overeenstemming met de hypothesen.

De effecten die op basis van het conceptuele model worden verwacht zijn in onderstaande tabel samengevat.

Tabel 3.5 Effect van parameters op basis van conceptueel model.

Parameter	Effect op L_c/L_s	Effect op H_c/L_s	Effect op L_{pipe} bij gegeven ΔH
D/L_s bij ondoorlatend achterland	Toename $D/L_s \rightarrow$ Toename L_c/L_s	Toename $D/L_s \rightarrow$ Afname H_c/L_s	Toename $D/L_s \rightarrow$ Toename L_{pipe}

3.4.2

Effect schaal

H5: schaal heeft geen significant effect op L_c/L_s

Schaal heeft naar verwachting geen significante invloed op het stijghoogtebeeld en de concentratie van stroming naar de pipe toe. Daardoor heeft schaal geen significant effect op de L_c/L_s .

Een grotere schaal leidt wel tot een lager kritiek verhang H_c/L_s doordat er meer water naar de pipe stroomt.

Bevindingen m.b.t. H5 uit analyse van proeven

Voor Situatie 1

Door de onbekende pipelengte in de IJkdijkproeven en de kanttekeningen bij de proeven van Allan zijn deze proeven i.c.m die van Silvis onvoldoende om de hypothese te onderbouwen/verwerpen. Modellen van de proeven geven aan dat schaal niet significant is in vergelijking met het effect van D/L voor L_c/L_s

Voor Situatie 3

Op basis van de proeven van Van Beek op kleine en medium schaal met hetzelfde zand is geen overtuigend effect van schaal op L_c/L_s gevonden. Echter de onzekerheden en bandbreedten van L_c zijn relatief groot voor deze proeven.

Vergelijking met andere proeven van situatie 3 (Allan en Dolphen en Pol) voor het effect van schaal zijn problematisch aangezien andere parameters hier ook variëren. Uitgaande van aanvullende hypothesen H3 en H11 (die effecten van uitstroomoppervlak en breedte van het model als significant beschrijven) en H6 en H7 (die d_{70} en doorlatendheid van het WVP als niet significant beschrijven) is een vergelijking tussen die verschillende typen proeven mogelijk. Dan is geen significant effect van schaal op L_c/L_s nodig om de proefresultaten te verklaren, wat de hypothese ondersteunt.

Bevindingen m.b.t. H5 uit analyse van modellen

Modelresultaten voor zowel proeven als veldschaal modellen laten geen significant effect van schaal zien, in overeenstemming met de hypothese.

Tabel 3.6 Effect van parameters op basis van conceptueel model.

Parameter	Effect op L_c/L_s	Effect op H_c/L_s	Effect op L_{pipe} bij gegeven ΔH
Schaal bij ondoorlatend achterland	Geen significant effect L_c/L_s	Toename schaal \rightarrow Afname H_c/L_s	Toename schaal \rightarrow Toename L_{pipe}

3.5 Situatie 1: Effect eigenschappen WVP

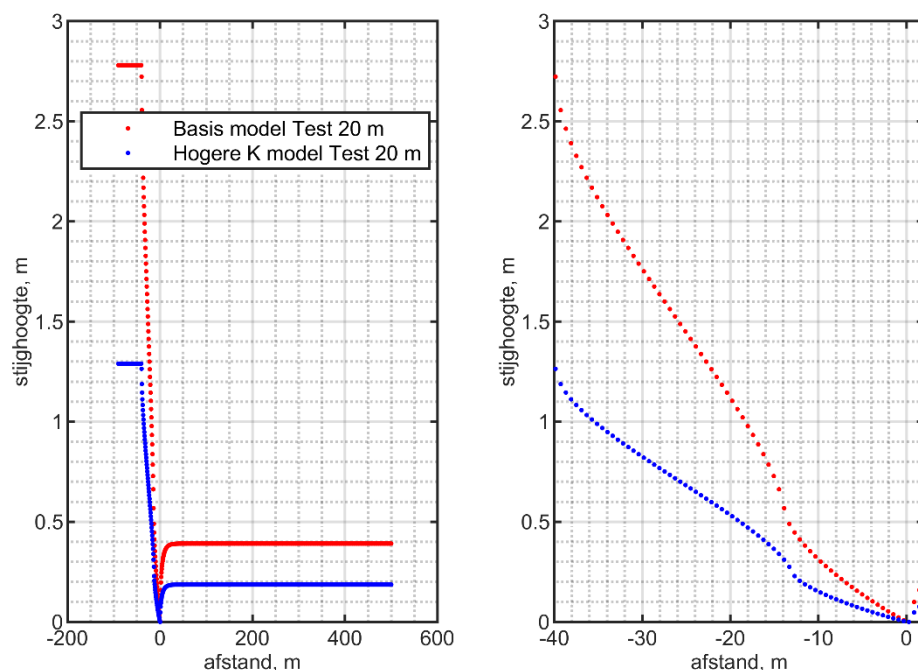
3.5.1 Effect doorlatendheid

H6: de doorlatendheid van het WVP heeft geen significant effect op L_c/L_s

Het effect van de doorlatendheid op de pipelengte bij kritiek verval is naar verwachting niet significant (indien het achterland dicht is) aangezien het stijghoogteprofiel in die situatie niet significant wordt beïnvloed door een verandering in doorlatendheid van het WVP.

Een doorlatender WVP leidt wel tot een beduidend lager kritiek verval doordat er bij een gegeven verval meer water naar de pipe stroomt, en bij een gegeven verval zal de pipe ook langer zijn.

Het effect van doorlatendheid van het watervoerend pakket K_{WVP} is hieronder geïllustreerd aan de hand van modelberekeningen waarin de doorlatendheid een factor 10 is verhoogd (dit zijn berekeningen Test 20m en Test 20m k, zie hoofdstuk 5 voor details). Een verhoging van K_{WVP} leidt tot een lager H_c . In deze figuur is ook te zien dat het verhang in de pipe bij H_c lager is voor het model met de hogere K_{WVP} ; ondanks het lagere totale verval is er door de hogere K_{WVP} meer debiet in de pipe, waardoor de pipe dieper wordt en een hogere equivalente doorlatendheid heeft. Door de meer doorlatende pipe bij een doorlatender WVP is het contrast in doorlatendheid tussen de pipe en het WVP weer vergelijkbaar in het pakket met hogere en lagere K_{WVP} . Dit is relevant omdat het contrast in doorlatendheid tussen het WVP en de pipe ook de concentratie van stroming naar de pipe, en dus effect 1, en het verhang bovenstrooms van de pipe, effect 2, bepaalt. Dit contrast lijkt in ieder geval voor deze modellen niet significant af te wijken bij verschillende doorlatendheden van het WVP.



Figuur 3.13 Effect van doorlatendheid van WVP op stijghoogteprofiel in de baan van de pipe (modellen Test_20m en Test_20m_k zie hoofdstuk 4 voor details).

Bevindingen m.b.t. H6 uit analyse van proeven

Voor Situatie 1

Er zijn geen proeven beschikbaar om dit effect te onderzoeken.

Voor Situatie 3

In proeven kan K_{WVP} niet op zichzelf veranderd worden. In de proeven van van Beek en van Pol is wel de relatieve dichtheid (RD) gevarieerd, waarmee een andere doorlatendheid wordt bereikt met dezelfde d_{70} . Door de variatie in de proefresultaten is geen definitieve conclusie te trekken met betrekking op het effect van doorlatendheid op L_c .

Bevindingen m.b.t. H6 uit analyse van modellen

Het effect van doorlatendheid van het WVP is in hoofdstuk 5 onderzocht met veldschaal modellen met een D/L van 0.5 m en van 1 m (Test 20m, en Test 40m) in beide gevallen had K_{WVP} geen significant effect op de gemodelleerde L_c/L_s maar wel op H_c/L_s , in overeenstemming met de hypothese.

Ook is met modellen van de proeven van Allan gekeken naar het effect van doorlatendheid van het WVP, in de modellen met een open achterland. Daar leidde een lagere K_{WVP} tot een iets kortere pipe (ca 4% korter). Deze afwijking is echter gelijk aan de meshgrootte van de pipe, en daarom wordt verwacht dat deze afwijking daardoor komt. Modellen van de proeven van Van Beek en Pol laten ook slechts variaties zien die in de orde grootte van de mesh elementen zijn waardoor de verwachting is dat deze niet afwijken van de hypothese.

Tabel 3.7 Effect van parameters op basis van conceptueel model.

Parameter	Effect op L_c/L_s	Effect op H_c/L_s	Effect op L_{pipe} bij gegeven ΔH
Doorlatendheid WVP K_{WVP} bij ondoorlatend achterland	Toename $K_{WVP} \rightarrow$ Geen significant effect L_c/L_s	Toename $K_{WVP} \rightarrow$ Afname H_c/L_s	Toename $K_{WVP} \rightarrow$ Toename L_{pipe}

3.5.2

Effect d_{70}

H7: de d_{70} heeft geen significant effect op L_c/L_s

Het effect van de korrelgrootte op het stijghoogteprofiel is naar verwachting niet significant, waardoor er ook weinig effect wordt verwacht op L_c/L_s . Een grotere d_{70} leidt wel tot een hoger H_c en tot een kortere pipe bij een gegeven verval.

Bevindingen m.b.t. H7 uit analyse van proeven

Voor Situatie 1

Er zijn geen proeven beschikbaar om dit effect te onderzoeken.

Voor Situatie 3

In proeven kan d_{70} niet op zichzelf veranderd worden. Wel kan d_{70} in combinatie met RD of met k_{WVP} beschouwd worden. De proeven van van Beek en van Pol laten geen sterk effect van doorlatendheid en d_{70} op L_c zien.

Bevindingen m.b.t. H7 uit analyse van modellen

Het effect van d_{70} is in hoofdstuk 5 onderzocht met veldschaal modellen met een D/L van 0.5 m en van 1 m (Test 20m, en Test 40m) in beide gevallen had d_{70} geen significant effect op de gemodelleerde L_c/L_s maar wel op H_c/L_s .

Modellen van de proeven van Van Beek en Pol laten ook slechts variaties zien die in de orde grootte van de mesh elementen zijn waardoor de verwachting is dat deze niet afwijken van de hypothese.

Tabel 3.8 Effect van parameters op basis van conceptueel model.

Parameter	Effect op L_c/L_s	Effect op H_c/L_s	Effect op L_{pipe} bij gegeven ΔH
Doorlatendheid d_{70} bij ondoorlatend achterland	Toename $d_{70} \rightarrow$ Geen significant effect L_c/L_s	Toename $d_{70} \rightarrow$ Toename H_c/L_s	Toename $d_{70} \rightarrow$ Afname L_{pipe}

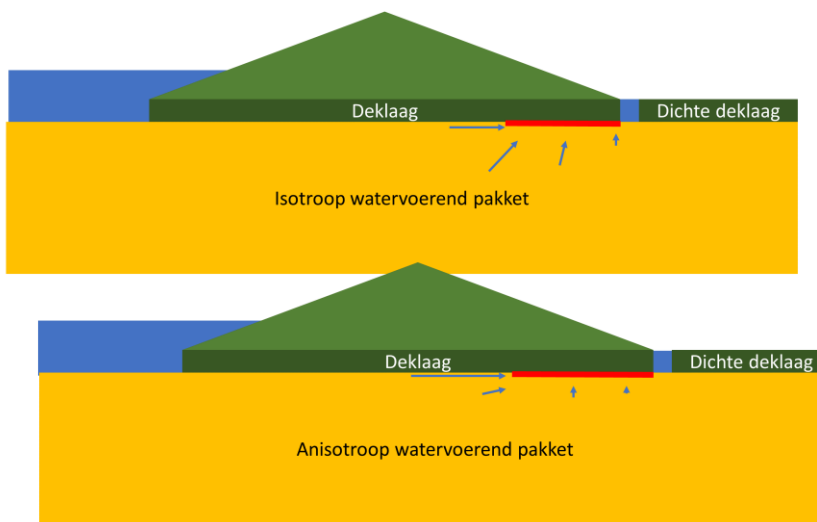
Een hogere d_{70} gaat vaak gepaard met een hogere doorlatendheid. Hier wordt het effect van d_{70} beschouwd zonder variatie in K_{WVP} .

3.5.3 Effect anisotropie

H8: anisotropie leidt tot een langere L_c/L_s

Anisotropie van het WVP houdt in dat de doorlatendheid in de horizontale richting anders (meestal hoger) is dan in de verticale richting. De anisotropiefactor is de verhouding tussen deze twee ($A = K_h/K_v$). Anisotropie heeft een beduidende invloed op het stijghoogte profiel en daarmee op L_c/L_s . Als de anisotropie factor toeneemt leidt dat tot een sterke kromming in de stijghoogtecontouren bij de kop van de pipe, vanwege de voorkeur voor horizontale stroming. Daardoor wordt de groei van de pipe relatief belangrijker voor de waterspanning bij de kop van de pipe (effect 1). Een hogere anisotropie factor leidt tot een grotere drukval in de pipe, maar ook tot een hoger verhang bovenstrooms van de pipe, daardoor is de invloed op effect 2 relatief minder belangrijk dan op effect 1, wat leidt tot een langere L_c/L_s . Dit kan ook gezien worden in termen van de hogere weerstand tegen verticale stroming van onderaf naar de pipe en de uitstroomopening; die leidt tot meer concentratie van stroming bij de kop van de pipe.

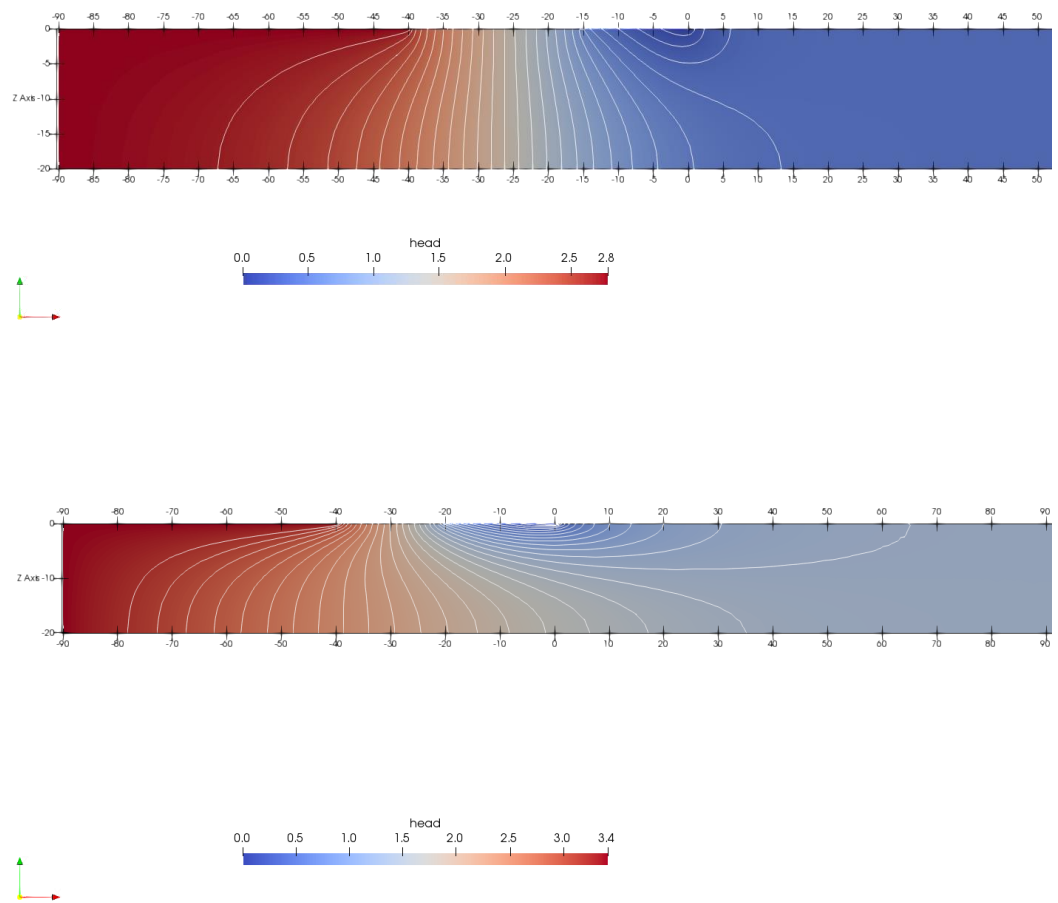
Dit is hieronder geïllustreerd.



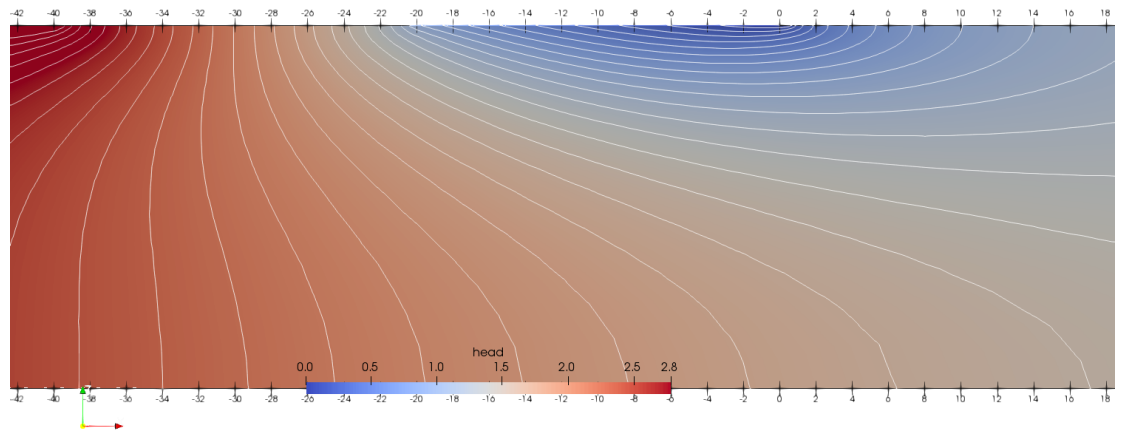
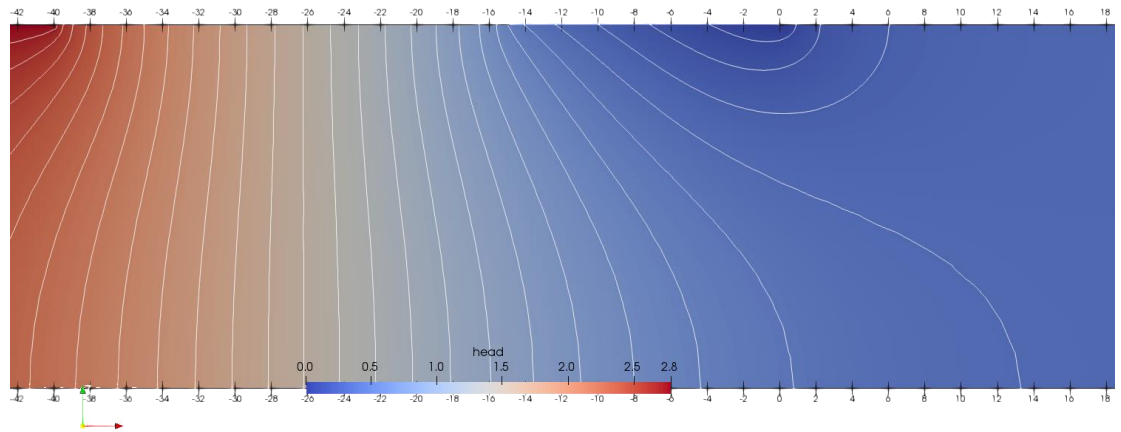
Figuur 3.14 Illustratie van het effect van anisotropie, bij een anisotroop WVP ($A > 1$) is de horizontale stroming naar de tip van de pipe groter dan de verticale stroming naar de pipe (en de uitstroom) verder stroomafwaarts, wat leidt tot langere L_c/L_s .

Anisotropie leidt tot een hoger H_c en een kortere pipe bij een gegeven verval.

Het effect van anisotropie op de stijghoogten in de doorsnede en op de waterspanningen in de baan van de pipe zijn in onderstaande figuren geïllustreerd in modellen met een isotroop WVP en met een anisotropie factor $A = K_h/K_v$ van 10.



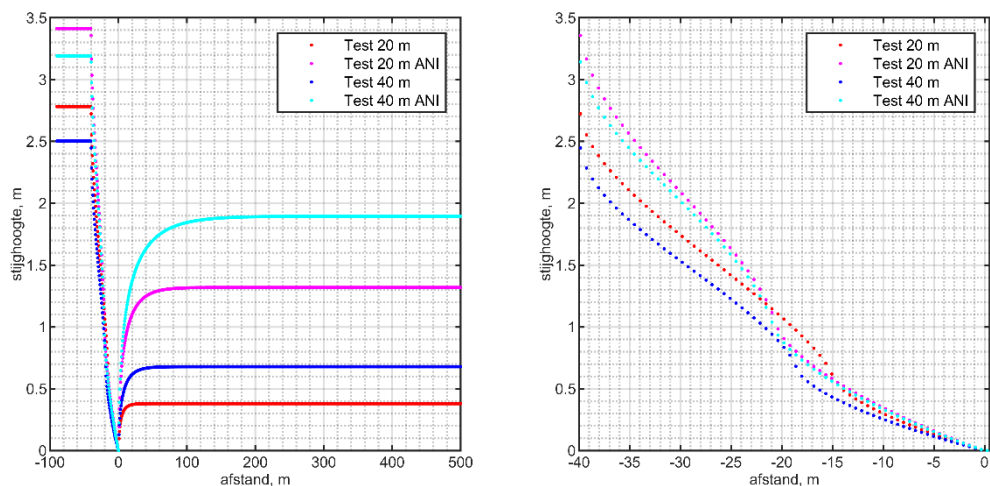
Figuur 3.15 Stijghoogten in isotroop (boven) en anisotroop (onder) model bij kritiek verval (modellen Test 20m en Test 20m ani, zie ook Hoofdstuk 5 voor details). Stijghoogte stijghoogtecontouren zijn 0.1 m uit elkaar.



Figuur 3.16 Close up stijghoogten in isotroop (boven) en anisotroop (onder) model bij kritiek verval (modellen Test_20m en Test_20m_ani, zie ook Hoofdstuk 4 voor details). Stijghoogte stijghoogtecontouren zijn 0.1 m uit elkaar.

De stijghoogtecontouren krommen veel sterker in het geval van anisotropie, zoals te zien is in bovenstaande figuren. Hier valt ook op dat de waterspanningen in het achterland hoger blijven, dat is omdat de illustratie is met een dichte deklaag, al het water moet het model verlaten door de pipe of het uitstroombgat en de anisotropie hindert de stroming vanuit de diepte naar deze uitstroombvlakken.

De stijghoogte in de baan van de pipe is hieronder getoond voor modellen met een dikte van 20 m en van 40 m.



Figuur 3.17 Stijghoogte in de baan van de pipe in modellen met een WVP van 20 m diep en 40 m diep (zie Hoofdstuk 4 voor details).

De mate van het effect van anisotropie hangt mede af van de geometrie van het WVP, en ook van de schematisatie van de instroomrandvoorwaarde. Anisotropie heeft minder effect op H_c wanneer de rivier dieper in het WVP insnijdt.

Bevindingen m.b.t. H8 uit analyse van proeven

Er zijn geen proeven beschikbaar om dit effect te onderzoeken.

Bevindingen m.b.t. H8 uit analyse van modellen

Het effect van anisotropie is in hoofdstuk 5 onderzocht met veldschaal modellen met een D/L van 0.5 m en van 1 m (Test 20m, en Test 40m) in beide gevallen leidde anisotropie tot significant langere L_c , zoals verwacht op basis van de hypothese.

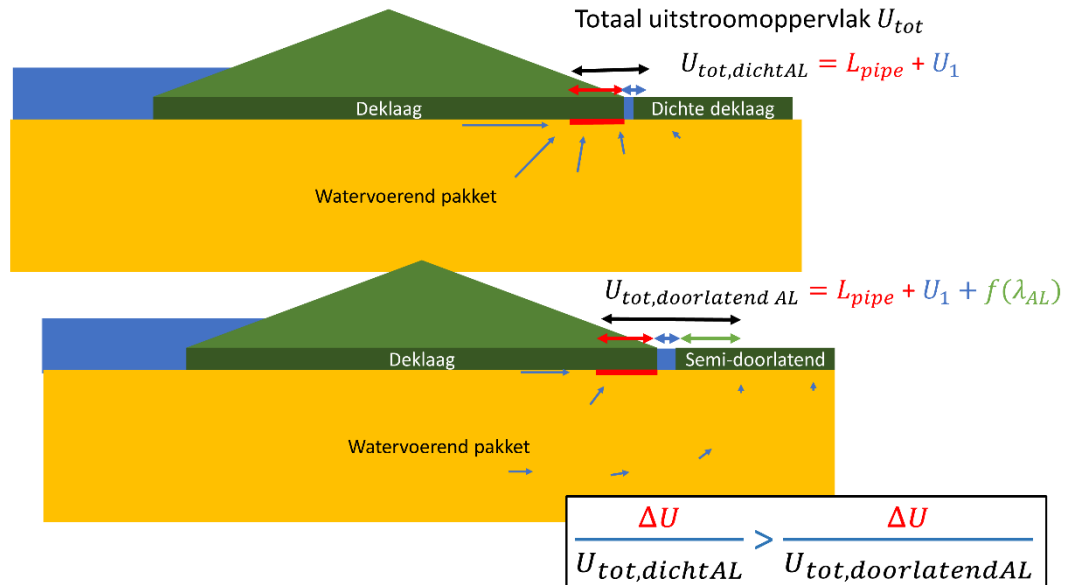
Tabel 3.9 Effect van parameters op basis van conceptueel model.

Parameter	Effect op L_c/L_s	Effect op H_c/L_s	Effect op L_{pipe} bij gegeven ΔH
Anisotropie bij ondoorlatend achterland	Toename $A \rightarrow$ Toename L_c/L_s	Toename $A \rightarrow$ Toename H_c/L_s	Toename $A \rightarrow$ Afname L_{pipe}

3.6 Situatie 1: Effect semi-doorlatend achterland

H9: een semi-doorlatend achterland leidt tot een kortere L_c/L_s dan een dicht achterland; hoe korter de lek lengte van het achterland, hoe korter L_c/L_s

Bij een semi-doorlatend achterland stroomt er meer water naar het achterland en minder naar de pipe. Daardoor is het effect vergelijkbaar met een groter uitstroomvlak, de toename in lengte van de pipe heeft relatief minder effect op het effectieve uitstroomoppervlak. Dit is hieronder geïllustreerd.



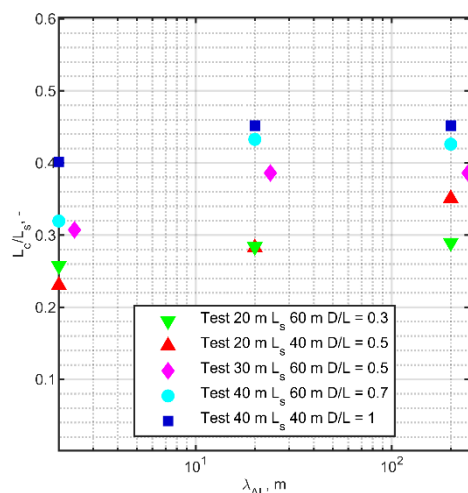
Figuur 3.18 Illustratie van effect achterland op stroming naar een pipe. In een situatie met een dicht achterland concentreert stroming naar de pipe (en het uitstroomgat). Met een semi-doorlatend achterland kan stroming ook door het achterland weg, en daardoor heeft pipegroei relatief minder invloed op de concentratie van stroming aan de kop van de pipe.

Het langer worden van de pipe heeft relatief minder effect op de waterspanning wat leidt tot een kortere L_c/L_s . De mate waarin stroming naar het achterland gaat wordt beïnvloed door de lek lengte (ook wel spreidingslengte genoemd) van het achterland.

$$\lambda_{AL} = \sqrt{\frac{K_{WVF} D d}{K_{AL}}}$$

Equation 3-1

Hoe kleiner λ_{AL} , hoe makkelijker stroming naar het achterland kan stromen, waardoor de bijdrage van het achterland aan het totale uitstroomoppervlak groter is. Daardoor wordt het effect van pipegroei kleiner, wat leidt tot kortere L_c/L_s . Daarmee worden parameters die λ_{AL} beïnvloeden nu ook van belang voor L_c/L_s , en de relatie van de pipelengte tot λ_{AL} speelt een rol waardoor schaal ook invloed heeft.



Figuur 3.19 Berekende L_c/L_s als functie van de leklengte van het achterland voor modellen met veldschaal.

Een semi-doorlatend achterland leidt ook tot een beperkte toename in H_c doordat er minder water naar de pipe stroomt dan bij een dicht achterland. Bij een gegeven ΔH zal de pipe ook korter zijn met een semi-doorlatend achterland dan bij een dicht achterland.

Tabel 3.10 Effect van parameters op basis van conceptueel model.

Parameter	Effect op L_c/L_s	Effect op H_c/L_s	Effect op L_{pipe} bij gegeven ΔH
Semi-doorlatend achterland, gekarakteriseerd door λ_{AL}	Toename $\lambda_{AL} \rightarrow$ Toename $\frac{L_c}{L_s}$	Toename $\lambda_{AL} \rightarrow$ Afname H_c/L_s	Toename $\lambda_{AL} \rightarrow$ Toename L_{pipe}

Bevindingen m.b.t. H9 uit analyse van proeven

Er zijn geen proeven beschikbaar om dit effect te onderzoeken.

Bevindingen m.b.t. H9 uit analyse van modellen

Het effect van de doorlatendheid van het achterland is in hoofdstuk 5 onderzocht met veldschaal modellen.

Daarin is ook gevonden dat voor een gegeven model een doorlatender achterland (kortere leklengte achterland) leidt tot een lagere L_c in overeenstemming met de verwachting. Het effect van de leklengte is niet lineair, een toename van de leklengte van enkele meters naar tientallen meters heeft in deze modellen meer effect dan van 200 m naar 500 m.

H3b; H4b; H5b; H6b; H7b: effecten van uitstroomopening, D/L , schaal, K_{WVP} en anisotropie zijn complex bij een semi – doorlatend achterland. De mate waarin deze parameters effect hebben hangt af van de overige parameters.

Wel leidt een toenemende λ_{AL} als gevolg van een doorlatender deklaag in het achterland voor een gegeven situatie altijd tot een gelijke of kortere L_c/L_s dan bij een dicht achterland.

De complexiteit van de effecten van andere parameters is gebaseerd op de verwachting dat de lengte van de pipe L_c in relatie tot λ_{AL} van belang is voor L_c/L_s . Doordat de λ_{AL} beïnvloed wordt door D , en door K_{WVP} zal een wijziging in deze parameters ook leiden tot een andere relatie van L_c tot λ_{AL} waardoor in de vergelijking van twee situaties meerdere effecten spelen. Ook schaal kan om deze reden met een semi-doorlatend achterland wel effect hebben. Hieronder zijn effecten toegelicht.

H3b: het effect van de uitstroomopening. Als er ook water naar het semi-doorlatende achterland kan stromen neemt de invloed van de grootte uitstroomopening op pipegroei af. Bij een semi-doorlatend achterland is er een groter totaal uitstroomoppervlak, waardoor de

relatieve invloed van de pipe of de uitstroomopening kleiner is. Hoe doorlatender het achterland, hoe minder invloed de uitstroomopening zal hebben.

H4b effect van D/L om het effect van D/L bij een semi-doorlatend achterland is het van belang om niet alleen naar het effect van een verandering in D of L_s op D/L te kijken maar ook naar het effect op de stroming naar het achterland aangezien beide de L_c/L_s beïnvloeden. Hiertoe kunnen twee situaties beschouwd worden:

- Wanneer de doorlatendheid van de deklaag in het achterland ($K_{deklaagAL}$) gelijk blijft leidt een toename in D niet alleen tot een toename in D/L maar ook tot een toename in λ_{AL} . Beide effecten, leiden naar verwachting tot een toename in L_c/L_s (maar de L_c/L_s blijft korter bij een semi-doorlatend achterland dan bij een dicht achterland).
- Een toename in L_s bij gelijke D verlaagt D/L . Daardoor verandert echter ook de relatie tussen L_c en λ_{AL} ; de pipe wordt relatief langer ten opzichte van het achterland waardoor het effect van het achterland waarschijnlijk kleiner wordt. Daarmee beïnvloed schaal (L_s) in relatie tot λ_{AL} ook L_c/L_s .

Bevindingen m.b.t. H4b uit analyse van proeven

Er zijn geen proeven beschikbaar om dit effect te onderzoeken.

Bevindingen m.b.t. H4b uit analyse van modellen

De analyses in hoofdstuk 5 tonen dat het effect van D/L bij een doorlatend achterland complex is.

H5b het effect van schaal Zoals bij H4b aangegeven heeft de verhouding schaal tot λ_{AL} ook effect op L_c/L_s . Om het effect van schaal met een semi-doorlatend achterland te beschouwen kunnen 2 situaties overwogen worden:

- De situatie waar de doorlatendheid van het achterland constant is. Beschouw hiervoor een dwarsdoorsnede met een gegeven doorlatendheid van het WVP, K_{WVP} en van de deklaag, $K_{deklaagAL}$. Indien daar de schaal met een factor X wordt vergroot, nemen de dikte van de deklaag en de dikte van het WVP met een factor X toe, wat leidt tot een toename in leklengte van een factor X . Aangezien ook de kwelweglengte en de lengte van het achterland met die factor vergroot worden heeft dit naar verwachting geen significant effect op L_c/L_s .
- De situatie waar de leklengte van het achterland constant is. Als de schaal toeneemt met een factor X moet de doorlatendheid van de deklaag afnemen met een factor X^2 om de gelijke leklengte te houden. Bij een gelijke λ_{AL} maar andere schaal is de relatie L_c ten opzichte van λ_{AL} anders waardoor het effect van het achterland anders is.

Bevindingen m.b.t. H5b uit analyse van proeven

Er zijn geen proeven beschikbaar om dit effect te onderzoeken.

Bevindingen m.b.t. H5b uit analyse van modellen

De analyses van modellen in Hoofdstuk 5 laten zoals verwacht een langere L_c/L_s zien bij kleine schaal wanneer λ_{AL} gelijk is.

H7b: doorlatendheid van het WVP Als de doorlatendheid van de deklaag in het achterland constant blijft leidt een toename in de doorlatendheid van het WVP tot een toename in de leklengte van het achterland. Dit leidt tot een langere L_c/L_s , terwijl K_{WVP} geen invloed had in situaties met een dicht achterland. Een hogere K_{WVP} leidt ook nog wel tot een lagere H_c omdat het effect van achterland op H_c kleiner is dan op L_c/L_s . Het effect van een hogere K_{WVP} hangt ook af van hoe groot de leklengte van het achterland is relatief aan L_c . Bij zeer lange λ_{AL} zal een verdere toename relatief weinig effect hebben.

Bevindingen m.b.t. H7b uit analyse van proeven

Er zijn geen proeven beschikbaar om dit effect te onderzoeken.

Bevindingen m.b.t. H7b uit analyse van modellen

Met een hogere K_{WVPV} maar dezelfde $K_{deklaagAL}$ wordt een langere L_c/L_s gemodelleerd, zoals verwacht ten gevolge van de langere λ_{AL} .

H8b: anisotropie van het WVP Hoewel de formule voor λ_{AL} uitgaat van een isotrope doorlatendheid van het WVP kan op basis van de principes van grondwaterstroming beredeneerd worden wat het effect van anisotropie is. Anisotropie zou leiden tot een hogere weerstand tegen verticale stroming, en dus een vergroting van de 'effectieve' leklengte van het achterland. Dit zou ook leiden tot een grotere L_c/L_s .

Bevindingen m.b.t. H8b uit analyse van proeven

Er zijn geen proeven beschikbaar om dit effect te onderzoeken.

Bevindingen m.b.t. H8b uit analyse van modellen

Dit effect is modelmatig niet onderzocht.

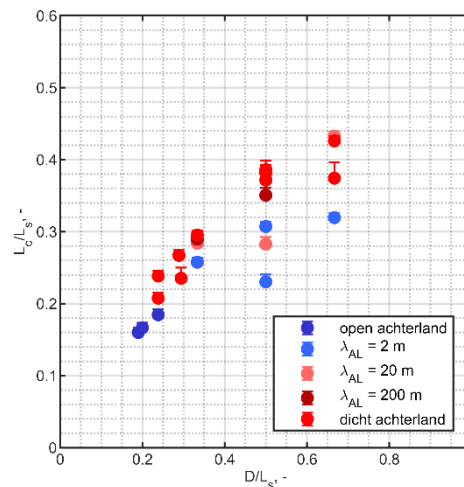
H6b het effect van d_{70} op L_c/L_s is niet afhankelijk van een semi-doorlatend achterland d_{70} had geen significant effect met een dicht achterland en zal ook met een semi-doorlatend achterland naar verwachting geen significant effect op L_c/L_s hebben.

Bevindingen m.b.t. H6b uit analyse van proeven

Er zijn geen proeven beschikbaar om dit effect te onderzoeken.

Bevindingen m.b.t. H6b uit analyse van modellen

Dit effect is modelmatig niet onderzocht.



Figuur 3.20 Resultaten van modelberekeningen met veldschaal modellen en experimenten met open en dicht achterland. Zie hoofdstuk 5 voor details modellen.

3.7 Situatie 2 en 3: Effect 3D stroming

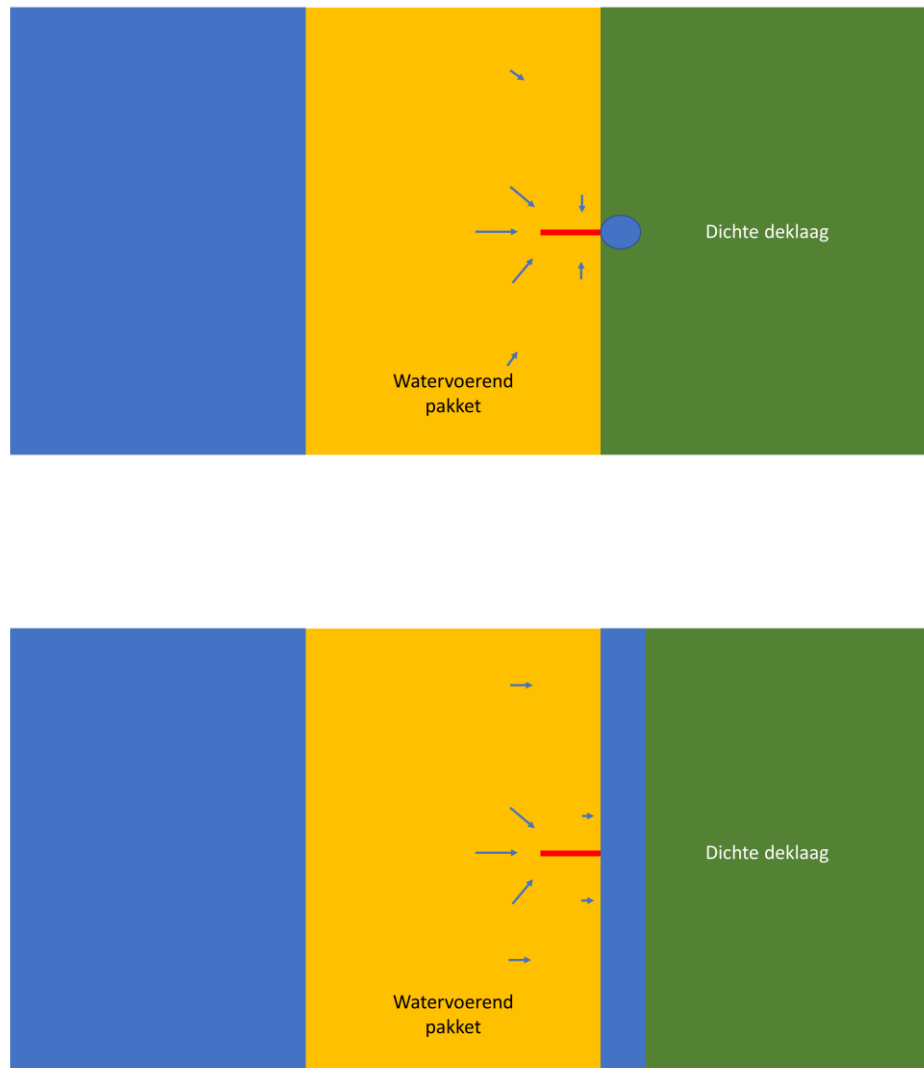
Omdat het mogelijk is dat er in de praktijk sprake is van 3D stroming, bijvoorbeeld doordat een pipe vormt bij een opbarstgat (situatie 3) of omdat er slechts enkele pipes vormen bij een 2D uitstroom in een sloot (situatie 2), is het relevant om inzicht te hebben in het effect van 3D stroming op L_c/L_s . Deze situaties zijn buiten het toepassingsgebied van het model van Sellmeijer en de rekenregel.

H10: 3D stroming leidt tot een langere L_c/L_s dan in situatie 1 (2D)

Situaties 2 en 3 beschrijven situaties waar stroming ook van de zijkanten naar de pipe convergeert. De verwachting is dat hierdoor een sterkere kromming van stijghoogtecontouren bij de kop van de pipe is, wat leidt tot een hoger verhang aan de kop van de pipe en een grotere L_c/L_s (effect 1).

De verwachting is dat het 3D effect sterker is, en dus tot langere pipes leidt, voor situatie 3 dan voor situatie 2.

In situatie 2 is de uitstroom nog 2D waardoor minder sterke concentratie van stroming naar de pipe verwacht wordt. Hierbij wordt er van uitgegaan dat het uitstroomgat in situatie 3 een beperkte afmeting heeft (denk aan een zandmeevoerende wel met onder de deklaag een beperkte erosielen). Het is nog onduidelijk hoe groot (breed en diep) een erosielen of zandmeevoerende wel kan worden. Dit effect is hieronder geïllustreerd.



Figuur 3.21 Illustratie van het effect van 3D concentratie van stroming naar een pipe in situatie 3 (met een uitstroomgat, boven) en situatie 2 (een 2D uitstroom sloot maar vorming van een enkele pipe).

Door de concentratie van stroming van de zijkanten naar de pipe is er naar verwachting in situatie 2 en 3 ook sprake van een hoger debiet per strekkende meter pipe (parallel aan de dijk) wat ook leidt tot een lager H_c en een langere pipe bij een gegeven verval.

Tabel 3.11 Hypothese voor effect van parameters op basis van conceptueel model.

Parameter	Effect op L_c/L_s	Effect op H_c/L_s	Effect op L_{pipe} bij gegeven ΔH
3D concentratie van stroming bij ondoorlatend achterland	3D concentratie van stroming → Toename L_c/L_s	3D concentratie van stroming → Afname H_c/L_s	3D concentratie van stroming → Toename L_{pipe}

Bevindingen m.b.t. H10 uit analyse van proeven

De resultaten van de proeven van Allan ondersteunen de hypothese dat L_c/L_s langer is bij een 3D situatie dan in 2D. De pipe was het langste in situatie 3 proeven (circle), korter in situatie 2 proeven (met een sloot en vorming van een of weinig pipes) en het kortste met een uitstroomvlak waar een patroon meanderende pipes vormde. Wel zijn er aandachtspunten bij deze proeven.

- de proeven met een open uitstroomvlak (plane) hadden een andere doorlatendheid dan de proeven met een dichte uitstroom (slot of circle)
- het is de vraag of de pipegroei in de proeven (slot en plane) gedomineerd was door initiatie¹ of door progressie (zie hoofdstuk 4).

De kritieke vervallen in de 3D proeven waren ook lager dan in de 2D proeven.

Bevindingen m.b.t. H10 uit analyse van modellen

Dit effect is modelmatig niet onderzocht. Wel is voor de 3D proeven van van Beek en Pol geconstateerd dat de 2D modellen de L_c/L_s onderschatten.

H10b: bij een meer doorlatend achterland neemt het 3D effect op L_c/L_s af

Bij een doorlatend achterland is er minder concentratie van stroming naar de pipe waardoor L_c/L_s ook korter wordt dan in een situatie met een dicht achterland. De relatieve invloed van het achterland op de pipelengte zal ook afhangen van de relatie tussen de L_s en λ_{AL} net zoals het geval was voor een 2D situatie.

Bevindingen m.b.t. H10b uit analyse van proeven

Er zijn geen proeven beschikbaar om dit effect te onderzoeken.

Bevindingen m.b.t. H10b uit analyse van modellen

Dit effect is modelmatig niet onderzocht.

H11: Een breder pakket (grotere W ten opzichte van kwelweglengte L leidt tot een langere L_c/L_s voor situatie 3 (3D stroming))

Bij 3D situaties zijn de afmetingen (breedte, mogelijk ook diepte en lengte) van het WVP relevant. Hoe breder het pakket dat bijdraagt aan stroming naar de pipe, hoe meer convergentie van stroombanen en hoe langer L_c/L_s . Bij een breder pakket zal ook H_c lager zijn.

Dit effect zal met name voor situatie 3 en bij een dicht achterland gelden omdat daar ook sprake is van een uitstroomgat, in plaats van een sloot zoals in situatie 2. Dan is de concentratie van stroming maximaal.

Bij een meer doorlatend achterland gaat er meer stroming naar het achterland waardoor het effect van de breedte van de zandbaan afneemt.

Tabel 3.12 Hypothese voor effect van parameters op basis van conceptueel model.

Parameter	Effect op L_c/L_s	Effect op H_c/L_s	Effect op L_{pipe} bij gegeven ΔH
Breedte zandbaan W/L bij 3D stroming	Toename $W/L \rightarrow$ Toename L_c/L_s	Toename $W/L \rightarrow$ Afname H_c/L_s	Toename $W/L \rightarrow$ Toename L_{pipe}

Bevindingen m.b.t. H10 uit analyse van proeven

De proeven van Dolphen voor situatie 3 bevestigen globaal gezien de hypothese dat L_c/L_s toeneemt met toenemende breedte van het WVP. Doordat in die proeven de absolute afmetingen van het uitstroombgat gelijk blijven bij toenemende modelbreedte is het geobserveerde effect niet alleen aan breedte toe te schrijven, maar ook aan het relatief gezien grotere uitstroom bij een smaller model. In de meest smalle modellen is het uitstroombgat relatief groot en lijkt de situatie mogelijk meer op een situatie 2.

3.8 Drukval in het opbarstkanaal

In het conceptuele model en de numerieke analyse in deze studie is de drukval in het opbarstkanaal in eerste instantie niet meegenomen. Gezien de kennisvragen met betrekking op de hoogte van deze drukval is hier nader onderzoek nodig. Ook is de vraag of er in een 2D situatie sprake zal zijn van een drukval in het opbarstkanaal, veelal zijn 2D situaties bij een insnijdende sloot waar dus ook geen deklaag aanwezig is.

Vanuit de concepten redenerend kan wel al een beeld geschetst worden van het potentiële effect van deze drukval op de L_c/L_s . Met de simpele aanname dat de drukval in het opbarstkanaal constant is tijdens het hele piping proces (wat mogelijk niet het geval is) kunnen op basis van de bovengenoemde principes de volgende hypothesen worden gesteld:

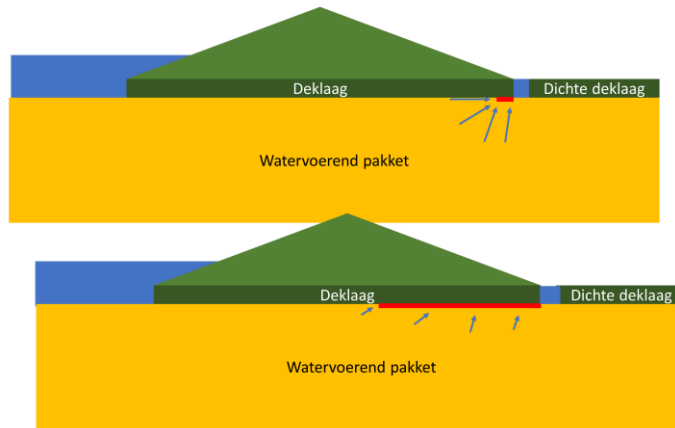
- Bij een dicht achterland waar alle stroming naar de pipe gaat heeft de druk in het opbarstkanaal wel effect op het kritieke verval, maar niet op het stromingspatroon en dus niet op L_c/L_s
- Bij een semi-doorlatend achterland zorgt een hogere druk in het opbarstkanaal voor meer stroming naar het achterland en minder naar de pipe. Daarmee wordt effect 1 relatief minder belangrijk en de verwachting is dat dit leidt tot kortere L_c/L_s .

3.9 Samenvatting conceptueel model en onderbouwing

In dit hoofdstuk is een conceptueel model uiteengezet om inzicht te bieden in de kritieke pipelengte en het effect van parameters op deze pipelengte. Hypothesen die volgen uit het model zijn onderzocht aan de hand van proeven en modelberekeningen, en samenvattingen van die analyse zijn in dit hoofdstuk gegeven. Details van de analyse met experimenten en modellen zijn beschreven in Hoofdstukken 4 en 5.

De kritieke pipelengte resulteert uit het effect van het langer worden van een pipe op de waterspanningen. We beschouwen 2 effecten van pipegroei:

1. Effect 1: effect op concentratie van stroming naar de kop van de pipe. De groei van de pipe leidt bij een gegeven verval tot een toename in uitstroomoppervlak, wat leidt tot een afname van concentratie van stroming bij de kop van de pipe.
2. Effect 2: effect op afstand tussen pipe kop en rivier. De kop van de pipe komt dichterbij het intredepunt waardoor het verhang bovenstrooms van de pipe toeneemt.



Figuur 3.22 Illustratie van effect van pipegroei op concentratie van stroming naar de pipe. Als de pipe kort is concentreert veel stroming naar de pipe, als de pipe langer is wordt stroming over een groter oppervlak verdeeld waardoor de concentratie van stroming bij de kop van de pipe minder is. (effect 1).

Effecten 1 en 2 vinden gelijktijdig plaats, en het netto effect op het verhang bij de kop van de pipe bepaald het kritieke verval H_c en de kritieke pipelengte L_c . De L_c is het omslagpunt waar effect 2 belangrijker wordt dan effect 1 waardoor de pipe bij gelijkblijvend verval doorgroeit. Dit omslagpunt is erg gevoelig, nabij het omslagpunt hebben kleine veranderingen in verval een groot effect op de pipelengte.

Bovenstaande concept leidt tot 2 hypothesen:

- H1. De overkoepelende hypothese is dat L_c/L_s groter zal zijn bij eigenschappen van het WVP die leiden tot een groter belang van effect 1 ten opzichte van effect 2.
- H2. De hypothese is dat het erosiemodel zoals geïmplementeerd in DgFlow/D-Geo Flow geschikt is om L_c/L_s te berekenen voor een 2D situatie, met een homogeen watervoerend pakket in de baan van de pipe.

H2 is onderzocht aan de hand van modellering van experimenten van waar sprake is van 2D stroming door de vorming van meerdere pipes in een opstelling met een 2D uitstroom. De modellen van deze proeven kwamen redelijk overeen met experimentele resultaten. Echter, doordat er slechts 3 proeven geschikt waren, en de bandbreedte van onzekerheid van de pipelengte daarin ruim was, is dit onvoldoende om de hypothese te bevestigen of ontkrachten.

Deze proeven en de modellering daarvan toonde wel een onderschatting van kritiek verval aan van ca. 10-30%. Dit had tot gevolg dat de pipelengte bij kritiek verval weliswaar redelijk werd gemodelleerd, maar dat de pipelengte bij vervallen onder kritiek verval werd onderschat.

H1 is uitgewerkt in 11 nadere hypothesen en onderzocht gebruik makend van een grotere dataset aan proeven. Deze proeven waren weliswaar vaak 3D maar boden desalniettemin kwalitatieve inzichten die naar verwachting ook gelden bij 2D situaties.

De hypothesen zijn in eerste instantie uitgewerkt voor een ondoorlatend achterland, aangezien proeven ook een dicht achterland hadden en veel parameters een gecombineerd effect op pipelengte en achterland hebben wat leidt tot complexere interacties.

Vervolgens is het conceptuele model uitgebreid om het effect van het semi-doorlatende achterland te beschouwen en de hypothesen aan te vullen.

Tot slot is het conceptuele model uitgebreid om effecten van 3D stroming te beschrijven. Deze hypothesen zijn niet modelmatig onderzocht maar wel aan de hand van de proeven.

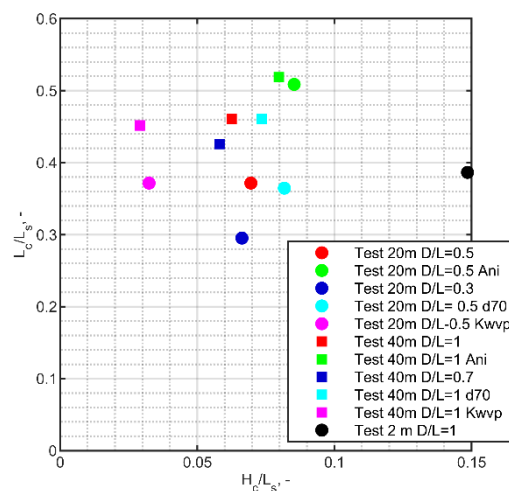
Proeven boden inzicht in de variabiliteit van de pipelengte. De variatiecoëfficiënt voor L_c is in de proeven ca. 3 maal zo hoog als voor H_c . Dit bevestigt de verwachting dat het omslagpunt van kritieke pipelengte gevoelig is voor kleine variaties, wat ook geobserveerd is in de proeven van Silvis (1991). De hogere mate van onzekerheid is van belang om mee te nemen in de omgang met pipelengte berekeningen voor de pipinganalyse.

Naast de fysieke onzekerheid zijn ook numerieke resultaten van invloed. De stapgrootte waarmee D-Geo Flow de kritieke pipelengte berekend heeft veel invloed op de resultaten (meer voor L_c dan voor H_c). Grote stapgrootten leiden tot een consistente onderschatting van de kritieke pipelengte. Dit effect is zodanig dat een stapgrootte van ca 1% van het kritieke verval kan leiden tot een onderschatting van pipelengte met ca 15%. Gebruik van een grotere stapgrootte leidt ook tot een onderschatting van H_c . De keuze van de stapgrootte zal afhangen van het doel van een analyse.

Uit de hypothesen en modelmatige analyses die hier zijn uitgevoerd volgt het beeld dat belangrijke parameters, die invloed hebben op L_c/L_s voor 2D situaties, zijn:

- bij een ondoorlatend achterland:
 - Vorm van het watervoerend pakket (D/L): grotere $D/L \rightarrow$ langere L_c (rode symbolen in Figuur 3.24).
 - Anisotropie (A): hogere anisotropie factor \rightarrow langere L_c

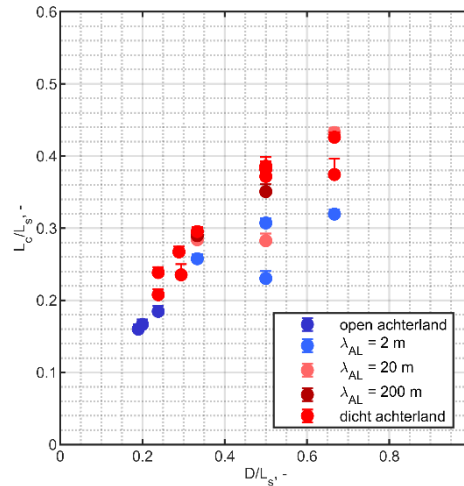
Dit is geïllustreerd aan de hand van modelberekeningen voor veldschaal modellen hieronder. Hoewel d_{70} , en doorlatendheid van het WVP K_{WVP} , en schaal, wel invloed hebben op de gemodelleerde H_c/L_s is de L_c/L_s voor deze parameters gelijk. Alleen de situaties waar de D/L anders is, of waar het WVP anisotroop is leiden tot een andere L_c/L_s .



Figuur 3.23 Resultaten van berekeningen met veldschaal modellen voor een dicht achterland. Zie hoofdstuk 5 voor details modellen.

- **Bij een semi-doorlatend** achterland is de leklengte van het achterland (λ_{AL}) van belang. Veel parameters hebben effect op de leklengte waardoor relatieve effecten complex zijn en de relatieve belangen afhangen van de hele situatie (geometrie en doorlatendheden/leklengten). Doorlatendheid van het watervoerend pakket, en schaal (leklengte ook los van D/L) spelen nu wel een rol. Waar bij een dicht achterland een trend van L_c/L_s wordt gemodelleerd die overeenkomt me de verwachting (H4) is deze trend bij een semi-doorlatend achterland niet evident door de complexe interactie.

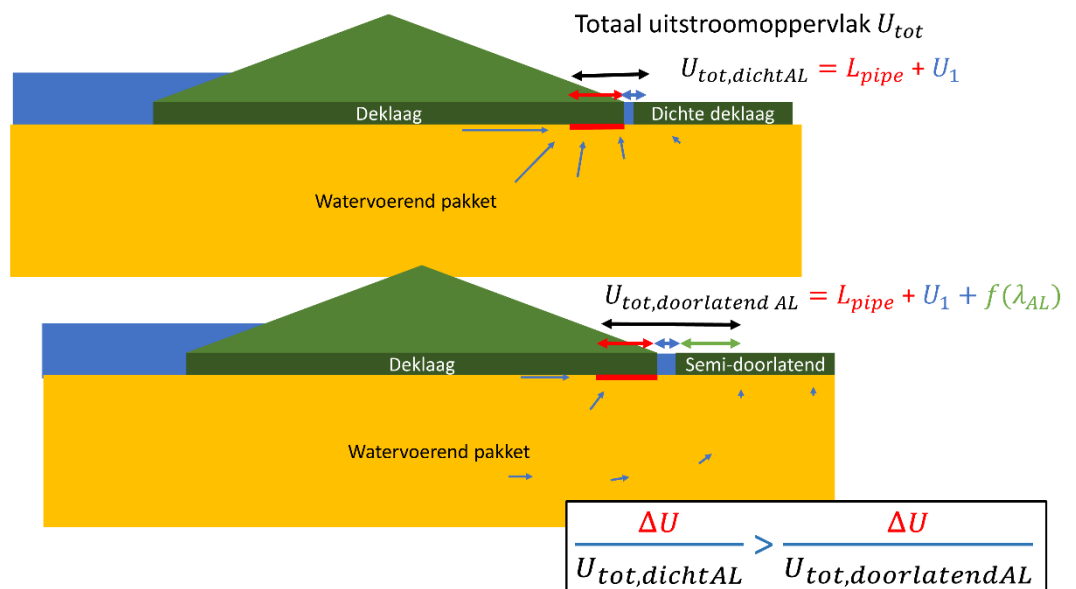
Dit is geïllustreerd aan de hand van modelberekeningen voor veldschaal modellen in onderstaande figuur.



Figuur 3.24 Resultaten van berekeningen met veldschaal modellen en experimenten. Zie hoofdstuk 5 voor details modellen.

Voor een gegeven geometrie en schaal kan wel gesteld worden dat de pipelengte met een semi-doorlatend achterland gelijk is aan of korter is dan de pipelengte bij een dicht achterland en hoe kleiner λ_{AL} hoe korter de pipe.

Vanuit het conceptuele model geredeneerd is het kwalitatieve effect van achterland logisch. Concentratie van stroming naar de kop van de pipe neemt af naarmate het totale uitstroomoppervlak groter wordt. Bij een dicht achterland is het uitstroomvlak beperkt tot de pipe en het uitstroombgat, dus heeft de pipegroei relatief veel effect op het totale uitstroomvlak. Als het achterland echter ook bijdraagt aan het uitstroomvlak, wordt het effect van de pipe relatief kleiner, zoals hieronder geïllustreerd.



Figuur 3.25 Illustratie van effect achterland op stroming naar een pipe. In een situatie met een dicht achterland concentreert stroming naar de pipe (en het uitstroombgat). Met een semi-doorlatend achterland kan stroming ook door het achterland weg, en daardoor heeft pipegroei relatief minder invloed op de concentratie van stroming aan de kop van de pipe.

In 3D zijn pipes naar verwachting vaak langer dan in 2D omdat er meer concentratie van stroming naar de pipe is, water komt nu ook van de zijkanten naar de pipe tip. Voor de mate van het 3D effect zijn de breedte van de zandbaan (W/L), de grootte van het uitstroomoppervlak en de leklengte van het achterland van belang. Hoe smaller de zandbaan (hoe kleiner het aanstroomoppervlak), hoe groter het uitstroomoppervlak of hoe kleiner de leklengte, hoe minder het 3D effect.

Van belang om te benadrukken is dat parameters die van belang zijn voor H_c niet altijd van belang zijn voor L_c . De hypothesen, en analyse van proeven en modellen suggereren dat enkele parameters weinig effect hebben op L_c bij een dicht achterland in 2D situaties. Het gaat dan om: schaal, d_{70} en doorlatendheid van het WVP. Bij een semi-doorlatend achterland hebben schaal en doorlatendheid wel een effect omdat ze ook de relatie tussen pipelengte en leklengte van het achterland beïnvloeden.

De bandbreedte van beschouwde situaties is echter niet uitputtend en interacties zijn complex, met name wanneer het achterland doorlatend is. Deze inschatting kan verbeterd worden naarmate meer ervaring beschikbaar komt, uit experimenten, modellen en projecten.

Tabel 3.13 overzicht van hypothesen voor effect van parameters op pipegroei

Parameter (hypothese nr.)	Effect op L_c/L_s	Effect op H_c/L_s	Effect op L_{pipe} bij gegeven ΔH
Uitstroomoppervlak A_{exit} bij ondoorlatend achterland (H3)	Toename $A_{exit} \rightarrow$ Afname L_c/L_s	Toename $A_{exit} \rightarrow$ Beperkte toename H_c/L_s	Toename $A_{exit} \rightarrow$ Afname L_{pipe}
D/L_s bij ondoorlatend achterland (H4)	Toename $D/L_s \rightarrow$ Toename L_c/L_s	Toename $D/L_s \rightarrow$ Afname H_c/L_s	Toename $D/L_s \rightarrow$ Toename L_{pipe}
Schaal bij ondoorlatend achterland (H5)	Geen significant effect L_c/L_s	Toename schaal \rightarrow Afname H_c/L_s	Toename schaal \rightarrow Toename L_{pipe}
Doorlatendheid WVP K_{WVP} bij ondoorlatend achterland (H6)	Toename $K_{WVP} \rightarrow$ Geen significant effect L_c/L_s	Toename $K_{WVP} \rightarrow$ Afname H_c/L_s	Toename $K_{WVP} \rightarrow$ Toename L_{pipe}
d_{70} bij ondoorlatend achterland (H7)	Toename $d_{70} \rightarrow$ Geen significant effect L_c/L_s	Toename $d_{70} \rightarrow$ Toename H_c/L_s	Toename $d_{70} \rightarrow$ Afname L_{pipe}
Anisotropie bij ondoorlatend achterland (H8)	Toename $A \rightarrow$ Toename L_c/L_s	Toename $A \rightarrow$ Toename H_c/L_s	Toename $A \rightarrow$ Afname L_{pipe}
Semi-doorlatend achterland, gekarakteriseerd door λ_{AL} (H9)	Toename $\lambda_{AL} \rightarrow$ Toename L_c/L_s	Toename $\lambda_{AL} \rightarrow$ Afname H_c/L_s	Toename $\lambda_{AL} \rightarrow$ Toename L_{pipe}
3D concentratie van stroming bij ondoorlatend achterland (H10)	3D concentratie van stroming \rightarrow Toename L_c/L_s	3D concentratie van stroming \rightarrow Afname H_c/L_s	3D concentratie van stroming \rightarrow Toename L_{pipe}
Breedte zandbaan W/L bij 3D stroming (H11)	Toename $W/L \rightarrow$ Toename L_c/L_s	Toename $W/L \rightarrow$ Afname H_c/L_s	Toename $W/L \rightarrow$ Toename L_{pipe}

4 Onderbouwing hypothesen met proeven en modellen

Het model DgFlow, evenals MSeep met de piping module zijn gevalideerd en gekalibreerd voor het kritieke verval. De pipelengte bij kritiek verval is een resultaat van de berekeningen maar is niet expliciet gevalideerd. Hier is dus een grotere onzekerheid. In Hoofdstuk 3 is een conceptueel model opgesteld om de L_c/L_s te verklaren en het effect van parameters is aan de hand van hypothesen beschreven. Daarbij zijn voorbeelden van modellen en profresultaten gebruikt om concepten te illustreren.

Dit hoofdstuk bevat de complete analyse die gedaan is om het conceptuele model en de daaruit voortvloeiende hypothesen waar mogelijk te verifiëren. Dit hoofdstuk dient als achtergrondreportage voor het conceptuele model. Het hoofdstuk bevat eerst een overzicht van de beschikbare proeven waarin L_c gerapporteerd is. Vervolgens worden de DgFlow modellen gepresenteerd die gebruikt zijn om deze proeven te modelleren in 4.2. De analyse van de proeven en modellen is in 4.3 behandeld.

4.1 Overzicht van proeven met gerapporteerde pipelengte

In dit hoofdstuk wordt de pipelengte in experimenten onderzocht. De pipelengte was voorheen van ondergeschikt belang in het piping onderzoek en hier is nog niet expliciet aandacht aan besteed.

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gemaakt van proeven die bruikbaar zijn om de pipelengte modellering te onderzoeken, omdat de pipelengte expliciet vermeld is. Proeven die zijn gebruikt komen uit onderzoeken van SBW, de IJkdijk proeven, het promotieonderzoek van Van Beek (Van Beek 2015), het promotieonderzoek van Pol voor Allrisk (proeven worden gepubliceerd in Pol et al., in review), het promotieonderzoek van Allan (2018), proeven van Dolphen (gebruikt voor het promotieonderzoek van Vandenboer (Dolphen, 2014; Vandenboer, 2019)). In totaal gaat het om 52 proeven.

In niet alle onderzoeksrapporten zijn pipelengtes gerapporteerd. Op basis van de beschikbare data is een overzicht gemaakt van proeven waarin dit wel het geval was in Tabel 4.3 aan het eind van deze paragraaf.

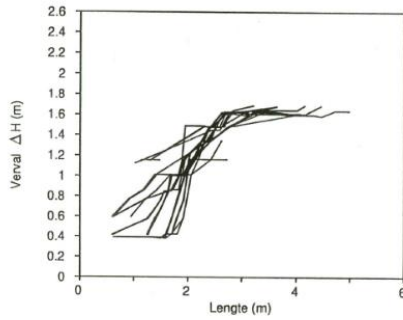
De gedetailleerde beschrijving van de experimenten is terug te lezen in onderliggende rapportages en publicaties. In dit hoofdstuk worden de voor het huidige onderzoek meest kenmerkende aspecten van de proeven toegelicht.

4.1.1 Silvis 1991

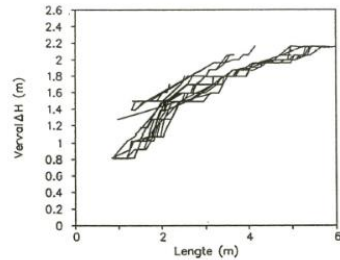
De experimenten van Silvis (Silvis, 1991) zijn in de Deltagoot uitgevoerd met een sloot uitstroom. Er vormden meerdere pipes (tussen 5 en 8) die gelijk opliepen in lengte naarmate het verval werd verhoogd tot aan het kritieke verval waar 1 pipe verder groeide. De pipes vertakken, waarschijnlijk als gevolg van kleine verschillen in pakkingsdichtheid of korrelgrootte lokaal. Daardoor zal ook het stromingspatroon naar verwachting meer overeenkomen met een 2D situatie, dus situatie 1. Er zijn 3 proeven waarin de kwelweglengte gevarieerd is bij gelijke dikte van het watervoerend pakket ($D = 6\text{ m}$; $L_s = 6, 9$ en 12 m , $W = 5\text{ m}$), daarmee zijn deze proeven geschikt om het effect van vorm (D/L) op L_c/L_s te onderzoeken.

In de observaties wordt opgemerkt dat de pipes bij hogere vervallen ook sterker in lengte toenemen, de toename in lengte bij een vervalstap is groter dan bij lagere vervallen. Dit komt overeen met de verwachting voor de kritieke pipelengte voor situatie 1 zoals beschreven in

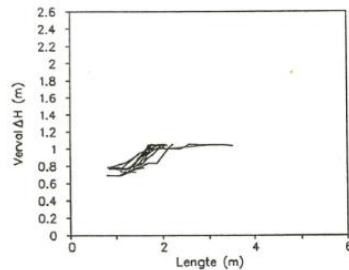
Hoofdstuk 3. Onderstaande curves uit (Silvis, 1991) geven gemeten pipelengte als functie van verval weer.



Figuur 8. Pipelengten & tegen verval ΔH . Resultaat proef T2, L = 9 m



Figuur 9. Pipelengten & tegen verval ΔH . Resultaat proef T3, L = 12 m



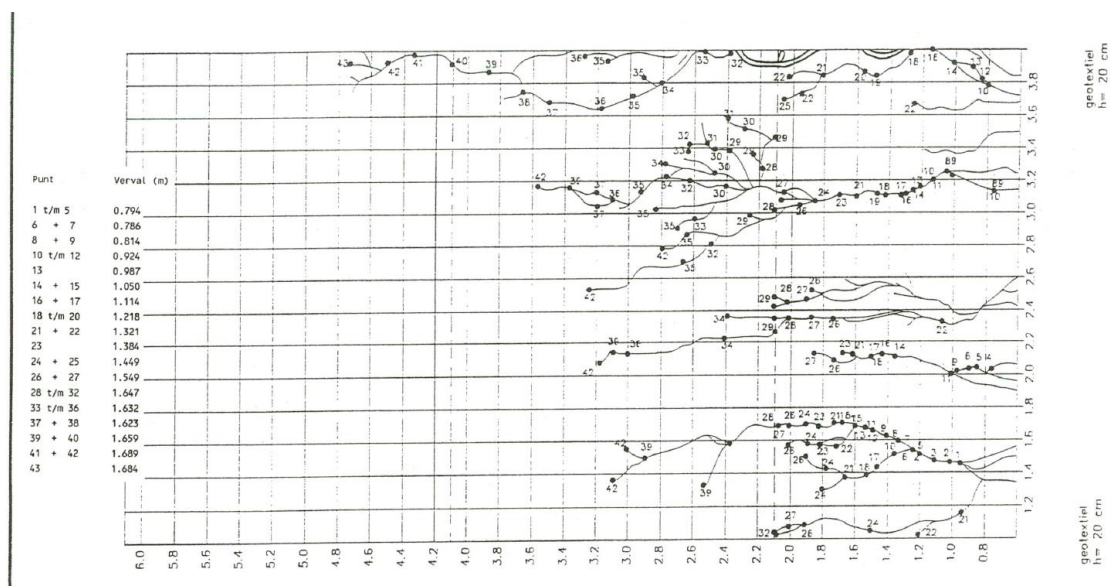
Figuur 10. Pipelengten & tegen verval ΔH . Resultaat proef T4, L = 6 m

Figuur 4.1 Verloop van pipelengte als functie van verval uit (Silvis, 1991).

De proeven zijn gestopt als een pipe bij gelijk verval doorgroeit, het verval is dus rondom (of iets hoger dan) het kritieke verval. De in de rapportage genoemde pipelengte is de lengte van de langste pipe bij het einde van de proef. Op dit punt is de kritieke pipelengte naar verwachting al overschreden. Het werkelijke kritieke verval zal tussen het maximaal aangebrachte verval en het verval net daaronder in liggen. Daarom is op basis van figuren van het pipe patroon in Silvis (zie voorbeeld van proef T2 in onderstaande figuur en rapportage (Silvis, 1991)) een inschatting gemaakt van de lengte van de langste pipe op het punt dat het kritieke verval wordt aangebracht (dus voordat deze pipe door blijft groeien) en van kortere pipes bij dat verval om een indruk te geven van de mogelijke bandbreedte van de pipelengte rondom het kritieke verval.

Tabel 4.1 Pipelengtes bij kritiek verval uit (Silvis, 1991) en indicatie van lengte van kortere pipes bij kritiek verval.

Proef	Kritiek verval, m	Gerapporteerde pipelengte einde proef, m	Pipelengte bij kritiek verval langste pipe, m	Indicatie pipelengte kortere pipes bij voorlaatste verval stap, m	Stapgrootte bij laatste aangebrachte verval, m
T2	1.69	4.7	4.4	3.0-3.6	0.030
T3	2.16	6.1	6.1	5.5-5.9	0.004
T4	1.05	3.5	2.6	1.8-2.2	0.053



Figuur 4.2 Tekening ontwikkeling pipes uit (Silvis, 1991).

De stagsgrootte waarmee het verval werd aangebracht, H_{incr} is niet constant maar gebaseerd op de predicties en observaties tijdens de proef. De stagsgrootte rondom het kritieke verval was:

- Voor proef T2 (9 m L_s) ca 0.03 m (2% van H_c).
- Voor proef T3 (12 m L_s) ca 0.11 m (5% van H_c).
- Voor proef T4 (6 m L_s) ca 0.05 m (5% van H_c).

4.1.2 Dolphen, 2014

De kleine schaal proeven van Dolphen (Dolphen, 2014) zijn onder meer gebruikt in het onderzoek van (Vandenboer, 2019). Deze proeven beschouwen een situatie met een uitstroom gat, dus situatie 3. In de proeven worden 4 verschillende breedtes van het WVP onderzocht (1, 10, 20 en 30 cm).

Twee zandtypen zijn onderzocht, M32 is meer doorlatend en heeft een grotere d_{70} dan M34 en de proeven zijn met een hoge pakkingsdichtheid uitgevoerd.

Het verval is aangebracht in stagsgrootten van 0.005 m rond het kritieke verval (tussen de 3 en 8% van H_c).

Kenmerken en resultaten van deze proeven zijn opgenomen in Tabel 4.3 en in Tabel 4.4.

4.1.3 Van Beek 2015

Laboratorium proeven op verschillende schalen, evenals proeven in het veld van de IJkdijk zijn in (Van Beek et al., under review; Van Beek, 2015) samengevat. In het voorliggende onderzoek worden proeven met Baskarp zand in de kleine- en medium- schaal opstellingen en de IJkdijk proeven beschouwd die ook gebruikt in het onderzoek naar het modelleren van pipes in 3D in (Van Beek et al., under review). De pipelengtes in de proeven zijn uit de achterliggende datasheets verzameld.

De kleine- en medium-schaal proeven betreffen een uitstroom gat, en zijn daarmee representatief voor situatie 3. De IJkdijk proeven betreffen een uitstroom vlak, en meerdere pipes leken te vormen, daarmee zijn deze kenmerkend voor situatie 1.

Het verval is aangebracht in stappen van:

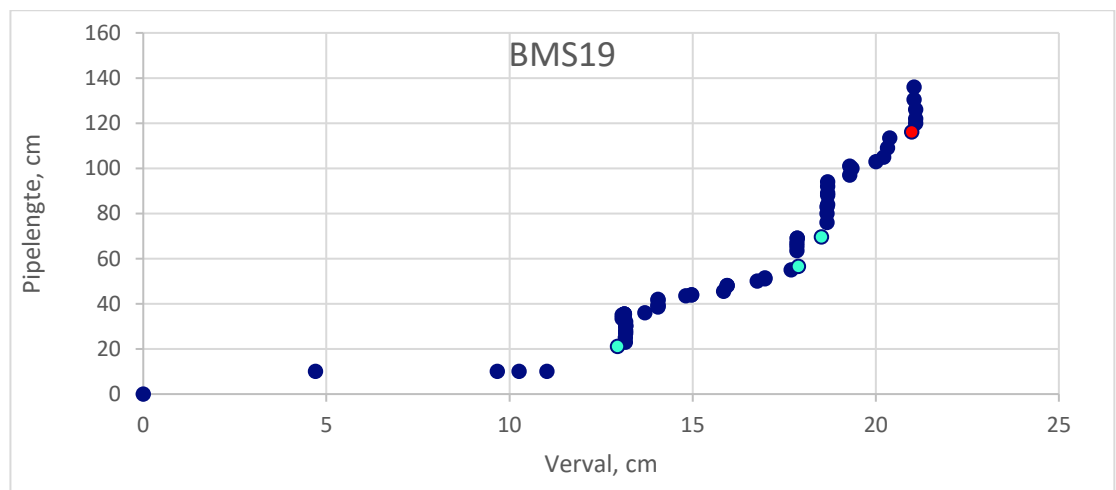
- 0.005 m voor de kleine schaal proeven (ca 6-8% van H_c).
- 0.01 m voor de medium schaal proeven (ca 6-8% van H_c).
- 0.10 m voor de IJkdijkproeven (ca. 3% van H_c).

Voor de medium schaal proeven is op basis van de observaties in de proef (Van Beek and Vandenboer, 2013) een nadere analyse gedaan van de kritieke pipelengte in de medium schaal proeven. De gerapporteerde pipelengte in proef BMS19 is ca 80% van de kwelweg; gezien het conceptuele model lijkt dit onwaarschijnlijk lang. Deze nadere analyse is hieronder beschreven.

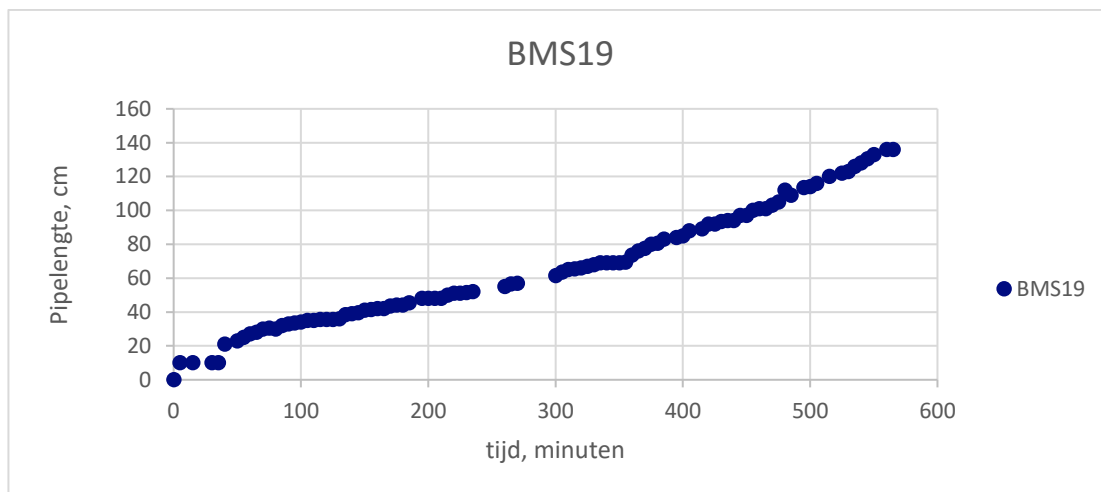
Aanvullend op de proeven in (Van Beek et al., under review) is medium schaal proef IMS20 beschouwd om meer inzicht te krijgen in ook het effect van d_{70} in medium- schaal proeven. In een eerdere proef met IJterbeck zand had gelaagdheid in de baan van de pipe een significant effect op het kritieke verval (en pipelengte), in IMS20 was dit effect minder sterk. Deze analyse is hieronder beschreven.

4.1.3.1 Analyse BMS19

In de rapportage wordt aangegeven dat er bij deze proef mogelijk een gelaagdheid in de baan van de pipe was waardoor de pipe op een afstand van 80% van de kwelweglengte nog stopte. In de observaties is aangegeven dat de pipe meandert, onderstaande figuren geven de pipegroei als functie van tijd en verval weer.



Figuur 4.3 Pipelengte in proef BMS 19 als functie van verval. Gerapporteerd kritiek verval is 21 cm (rood), sprongen waarbij de pipe bij een bepaald verval beduidend in lengte toeneemt zijn turquoise.



Figuur 4.4 Pipelengte in proef BMS 19 als functie van tijd. Gerapporteerd kritiek verval is 21 cm

De sprongen waar de pipe bij een gegeven verval beduidend in lengte toeneemt kunnen indicatoren zijn van het kritieke punt. Deze zijn hieronder weergegeven met de pipelengte bij aanvang van de groeistap.

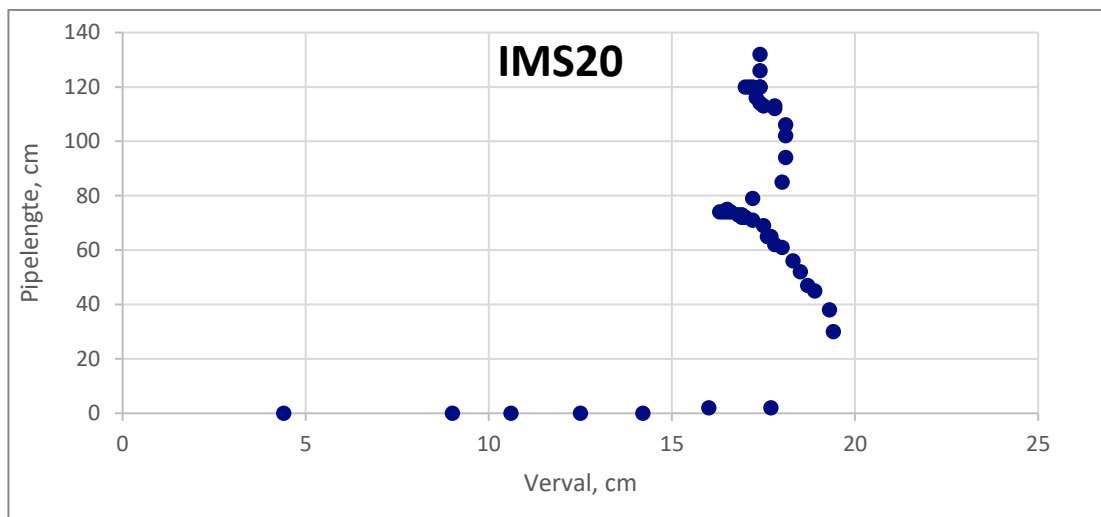
Tabel 4.2 Verval waarbij pipe daarna bij constant verval doorgroeide, en pipelengte bij aanvang van groei.

Verval, cm	Pipelengte voor groei, cm	Fractie van kwelweglengte
12.95	21	15%
17.9	56	40%
18.5	70	51%
21	114	82%

Het kritieke verval in de proef is gerapporteerd als 21 cm. Op basis van eerdere proeven ligt een pipelengte van 40-60% van L_s meer voor de hand.

4.1.3.2 Analyse IMS20

In de proef met Itterbeck zand nam de weerstand van het filter bij de instroom sterk toe vanaf de initiatie van pipegroei. Onderstaande figuur toont de pipelengte als functie van gecorrigeerd verval. Het maximaal aangebrachte verval is 19.4 cm hierbij groeit de pipe zelfs bij lagere wordende vervallen door. Dit suggereert dat de proef gedomineerd wordt door initiatie.



Figuur 4.5 Resultaten van medium schaal proef op Itterbeck zand (Van Beek and Vandenboer, 2013) .

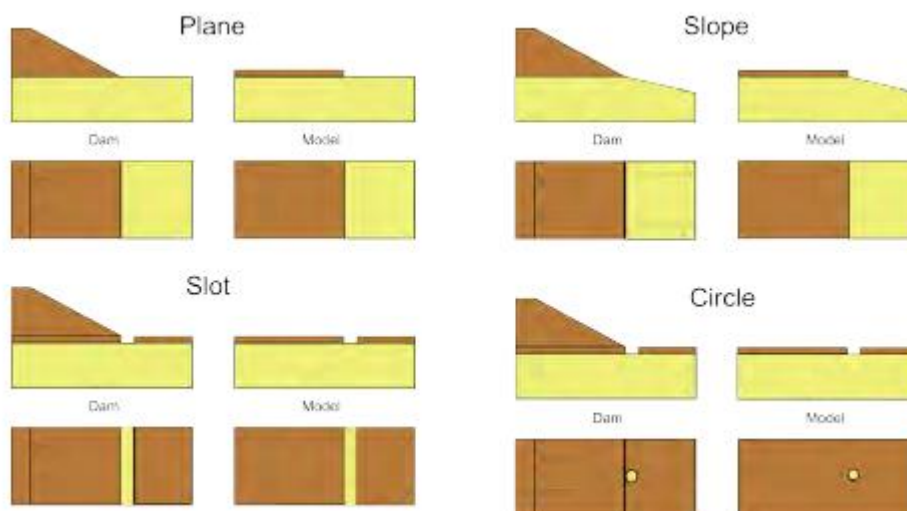
4.1.4 Allan, 2018

In het onderzoek van Allan (Allan, 2018) is het effect van de uitstroomopening onderzocht door te variëren met een slot (vergelijkbaar met een sloot), slope (een helling), plane (open vlakke uitstroom), en een circle (vergelijkbaar met een wiel). Omdat de resultaten met een helling minder betrouwbaar lijken voor de pipelengte bij het kritieke verval worden deze in voorliggend rapport niet nader onderzocht.

De plane proeven zijn mogelijk representatief voor situatie 1, echter omdat de pipe na initiatie zonder verdere verhoging van het verval doorgroeide waren deze proeven mogelijk niet representatief voor progressie (en dus voor het Sellmeijer model). Dit was ook het geval in sommige proeven met een slot maar in sommige daarvan stopte de pipe wel en wat een aanvullende verhoging van het verval nodig. Die proeven zouden dan representatief kunnen zijn voor situatie 2. Bij de circle proeven was voor alle proeven een aanvullende verhoging van het verval nodig na aanvang van pipegroei en deze zijn kenmerkend voor situatie 3. De proeven zijn bij een hoge pakkingsdichtheid uitgevoerd.

De stapgrootte waarin het verval werd aangebracht is niet expliciet gerapporteerd maar lijkt op basis van de observatie sheets variabel te zijn geweest.

Kenmerken en resultaten van deze proeven zijn opgenomen in Tabel 4.3 en in Tabel 4.4.



Figuur 4.6 Illustratie van uitstroom openingen uit (Allan, 2018).

4.1.5 **Pol, concept**

In dit onderzoek zijn twee zanden beproeft met zowel hogere als lagere pakkingsdichtheid. Het doel van het onderzoek is gericht op de pipegroeisnelheid (Pol et al., under review). De uitstroomopening is een gat, en door middel van doorlatende filters wordt de pipe door het midden van de opstelling geleid. De kleine schaal opstelling heeft dezelfde grootte als de opstelling in (Van Beek, 2015). De stapgrootte waarmee het verval werd verhoogd lag in de orde van 0.002 tot 0.003 mm (ca 3-4 % van H_c).

4.1.6 **Overzicht proefkenmerken**

Onderstaande tabel toont een overzicht van de kenmerken van de hier beschouwde proeven.

Tabel 4.3 Overzicht van de kenmerken van verschillende proeven.

Proeven serie	Typering*	Experiment Nr	Kweweg lengte, M	Dikte WVP, m	Breedte WVP, m	Uitstroom type	Zand type	d_{70} , mm	Cu (d_{60}/d_{10})	Relatieve dichtheid, -	Doorlatendheid, m/s
Allan (2018)	Circle	22	1.3	0.31	0.45	Circle	Sydney sand	0.400	1.30		3.11E-04
Allan (2018)	Circle	20	1.3	0.31	0.45	Circle	Sydney sand	0.400	1.3		
Allan (2018)	Circle	27	1.3	0.31	0.45	Circle	Sydney sand	0.400	1.3		2.95E-04
Allan (2018)	Circle	34	1.3	0.31	0.45	Circle	Sydney sand	0.400	1.3		3.73E-04
Allan (2018)	Circle	23	1.3	0.31	0.45	Slot	Sydney sand	0.400	1.3		3.11E-04
Allan (2018)	Slot	21	1.3	0.31	0.45	Slot	Sydney sand	0.400	1.3		3.42E-04
Allan (2018)	Slot	25	1.3	0.31	0.45	Slot	Sydney sand	0.400	1.3		3.11E-04
Allan (2018)	Slot	29	1.3	0.31	0.45	Slot	Sydney sand	0.400	1.3		3.57E-04
Allan (2018)	Slot	37	1.3	0.31	0.45	Slot	Sydney sand	0.400	1.3		3.73E-04
Allan (2018)	Plane	28	1.3	0.31	0.45	Plane	Sydney sand	0.4	1.3		6.37E-04
Allan (2018)	Plane	30	1.3	0.31	0.45	Plane	Sydney sand	0.4	1.3		5.59E-04
Allan (2018)	Plane	32	1.3	0.31	0.45	Plane	Sydney sand	0.4	1.3		7.77E-04
Van Beek et al. (2015)	Bas1_RDH_SS	B115	0.344	0.10	0.30	Circle	Baskarp 1	0.154	1.54	0.89	5.43E-05
Van Beek et al. (2015)	Bas1_RDH_SS	B118	0.344	0.10	0.30	Circle	Baskarp 1	0.154	1.54	0.89	6.30E-05
Van Beek et al. (2015)	Bas1_RDL_SS	B132	0.344	0.10	0.30	Circle	Baskarp 1	0.154	1.54	0.65	9.30E-05
Van Beek et al. (2015)	Bas1_RDL_SS	B133	0.344	0.10	0.30	Circle	Baskarp 1	0.154	1.54	0.65	9.50E-05
Van Beek et al. (2015)	Bas1_RDH_SS	B142	0.344	0.10	0.30	Circle	Baskarp 1	0.154	1.54	0.91	6.20E-05
Van Beek et al. (2015)	Bas1_RDH_SS	B143	0.341	0.10	0.30	Circle	Baskarp 1	0.154	1.54	0.91	5.50E-05
Van Beek et al. (2015)	Bas1_RDH_SS	B144	0.341	0.10	0.30	Circle	Baskarp 1	0.154	1.54	0.91	5.30E-05
Van Beek et al. (2015)	Bas1_RDL_SS	B145	0.341	0.10	0.30	Circle	Baskarp 1	0.154	1.54	0.65	8.00E-05
Van Beek et al. (2015)	Bas1_RDL_SS	B146	0.341	0.10	0.30	Circle	Baskarp 1	0.154	1.54	0.65	8.00E-05
Van Beek et al. (2015)	Bas_RDH_MS	Bms19	1.385	0.40	0.88	Circle	Baskarp 2	0.152	1.50	0.94	8.00E-05
Van Beek et al. (2011)	IJkdijkGrof	IJkfs02	15	2.85	12.00	Plane	Coarse IJkdijk	0.260	1.80	0.75	1.40E-04

Proeven serie	Typering*	Experiment Nr	Kwelweg lengte, M	Dikte WVP, m	Breedte WVP, m	Uitstroom type	Zand type	d_{70} , mm	Cu (d_{60}/d_{10})	Relatieve dichtheid, -	Doorlatendheid, m/s
Van Beek et al. (2011)	IJkdijk Fijn	IJkfs03	15	3	12.00	Plane	Fine IJkdijk	0.180	1.60	0.60	8.00E-05
Silvis (1991)	Deltagoot_M	T2	9	6	5.00	Slot	Marsdiepzand	0.247	1.57	0.65	5.11E-05
Silvis (1991)	Deltagoot_L	T3	12	6	5.00	Slot	Marsdiepzand	0.247	1.57	0.65	5.11E-05
Silvis (1991)	Deltagoot_K	T4	6	6	5.00	Slot	Marsdiepzand	0.247	1.57	0.65	5.11E-05
Dolphen	Breed01M32	Test 7/10	0.3	0.1	0.01	Circle	M32	0.206	1.54	0.92	3.43E-04
Dolphen	Breed01M34	Test 5/11	0.3	0.1	0.01	Circle	M34	0.156	1.47		1.48E-04
Dolphen	Breed10M32	test13/03	0.3	0.1	0.10	Circle	M32	0.206	1.54	0.88	3.43E-04
Dolphen	Breed10M32	test 17/03	0.3	0.1	0.1	Circle	M32	0.206	1.54	0.88	3.43E-04
Dolphen	Breed20M34	test 24/02	0.3	0.1	0.20	Circle	M34	0.156	1.58	0.94	1.48E-04
Dolphen	Breed20M32	test 4/03	0.3	0.1	0.2	Circle	M32	0.206	1.54	0.76	3.43E-04
Dolphen	Breed30M32	test 13/02	0.3	0.1	0.3	Circle	M32	0.206	1.54	0.86	3.43E-04
Dolphen	Breed30M32	test 20/02	0.3	0.1	0.3	Circle	M32	0.206	1.54	0.95	3.43E-04
Dolphen	Breed30M34	test 11/02	0.3	0.1	0.3	Circle	M34	0.156	1.47		1.48E-04
Dolphen	Breed30M34	test 18/02	0.3	0.1	0.3	Circle	M34	0.156	1.47	0.93	1.48E-04
Pol 2021	Bas25_RDH_SS	B25_217	0.344	0.10	0.30	Circle	Baskarp 25	0.260	1.6	0.80	3.00E-04
Pol 2021	Bas25_RDH_SS	B25_220	0.344	0.10	0.30	Circle	Baskarp 25	0.260	1.6	0.80	2.80E-04
Pol 2021	Bas25_RDH_SS	B25_221	0.344	0.10	0.30	Circle	Baskarp 25	0.260	1.6	0.79	2.70E-04
Pol 2021	Bas25_RDH_SS	B25_222	0.344	0.10	0.30	Circle	Baskarp 25	0.260	1.6	0.81	2.70E-04
Pol 2021	Bas25_RDH_SS	B25_232	0.344	0.10	0.30	Circle	Baskarp 25	0.260	1.6	0.80	2.70E-04
Pol 2021	Bas25_RDH_SS	B25_243	0.344	0.10	0.30	Circle	Baskarp 25	0.260	1.6	0.79	2.60E-04
Pol 2021	Bas25_RDH_SS	B25_236	0.344	0.10	0.30	Circle	Baskarp 25	0.260	1.6	0.78	2.50E-04
Pol 2021	Bas25_RDL_SS	B25_245	0.344	0.10	0.30	Circle	Baskarp 25	0.260	1.6	0.58	3.10E-04
Pol 2021	Bas25_RDL_SS	B25_233	0.344	0.10	0.30	Circle	Baskarp 25	0.260	1.6	0.55	3.60E-04
Pol 2021	Bas25_RDL_SS	B25_234	0.344	0.10	0.30	Circle	Baskarp 25	0.260	1.6	0.55	3.70E-04
Pol 2021	FS35_RDH_SS	FS35_239	0.344	0.10	0.30	Circle	FS35	0.462	1.35	0.768	9.00E-04

Proeven serie	Typering*	Experiment Nr	Kwelweg lengte, M	Dikte WVP, m	Breedte WVP, m	Uitstroom type	Zand type	d_{70} , mm	Cu (d_{60}/d_{10})	Relatieve dichtheid, -	Doorlatendheid, m/s
Pol 2021	FS35_RDH_SS	FS35_246	0.344	0.10	0.30	Circle	FS35	0.462	1.35	0.718	9.00E-04
Pol 2021	FS35_RDH_SS	FS35_238	0.344	0.10	0.30	Circle	FS35	0.462	1.35	0.67	1.00E-03
Pol 2021	FS35_RDL_SS	FS35_241	0.344	0.10	0.30	Circle	FS35	0.462	1.35	0.49	1.20E-03
Pol 2021	FS35_RDL_SS	FS35_240	0.344	0.10	0.30	Circle	FS35	0.462	1.35	0.49	1.20E-03

*Typering is samenstelling van de kenmerkende eigenschappen van de proef (details zijn samengevat op basis van kenmerken in de overige kolommen). RDH = hoge relatieve dichtheid, RDL = laag; SS = kleine schaal, MS=medium schaal; Bas1, Bas2 en Bas25 zijn typen Baskarp zand, FS35, en M32 en M34 zijn tevens zandtypen.

Tabel 4.4 Overzicht van de resultaten van verschillende proeven.

Proeven serie	Typering*	Experiment Nr	Kritiek verval, M	1 of meerdere pipes	Pipelengte bij kritiek verval, m
Allan (2018)	Circle	22	0.195	1 pipe	0.292
Allan (2018)	Circle	20	0.233	1 pipe	0.361
Allan (2018)	Circle	27	0.213	1 pipe	0.348
Allan (2018)	Circle	34	0.203	1 pipe	0.418
Allan (2018)	Circle	23	0.256	3 pipes at initiation, 1 progresses	0.027
Allan (2018)	Slot	21	0.271	pipe concentration at edge	0
Allan (2018)	Slot	25	0.271	pipe pattern	0
Allan (2018)	Slot	29	0.234	2 initiated 1 progressed	0
Allan (2018)	Slot	37	0.237	pipe pattern	0.088
Allan (2018)	Plane	35	0.293	pipe pattern	0.012
Allan (2018)	Plane	33	0.313	pipe pattern	0
Allan (2018)	Plane	36	0.331	pipe pattern	0
Van Beek et al. (2015)	Bas1_RDH_SS	B115	0.08	1 pipe	0.065
Van Beek et al. (2015)	Bas1_RDH_SS	B118	0.08	1 pipe	0.07
Van Beek et al. (2015)	Bas1_RDL_SS	B132	0.065	1 pipe	0.13
Van Beek et al. (2015)	Bas1_RDL_SS	B133	0.065	1 pipe	0.09
Van Beek et al. (2015)	Bas1_RDH_SS	B142	0.08	1 pipe	0.03
Van Beek et al. (2015)	Bas1_RDH_SS	B143	0.084	1 pipe	0.165
Van Beek et al. (2015)	Bas1_RDH_SS	B144	0.085	1 pipe	0.15
Van Beek et al. (2015)	Bas1_RDL_SS	B145	0.069	1 pipe	0.18
Van Beek et al. (2015)	Bas1_RDL_SS	B146	0.07	1 pipe	0.165
Van Beek et al. (2015)	Bas_RDH_MS	Bms19	0.21	1 pipe	1.14
Van Beek et al. (2011)	IJkdijkGrof	IJkfs02	0.194	1 pipe meanders	0.02
Van Beek et al. (2011)	IJkdijk Fijn	IJkfs03	1.75	1 main pipe*	very short
Silvis (1991)	Deltagoot_M	T2	2.1	multiple pipes*	very short
Silvis (1991)	Deltagoot_L	T3	1.69	pipe pattern	4.3
Silvis (1991)	Deltagoot_K	T4	2.16	pipe pattern	0.04
Dolphen	Breed01M32	Test 7/10	1.05	pipe pattern	0.04
Dolphen	Breed01M34	Test 5/11	0.18	1 pipe	0
Dolphen	Breed10M32	test13/03	0.1	2 pipes	0.07
Dolphen	Breed10M32	test 17/03	0.11	2 pipes	0.16
Dolphen	Breed20M34	test 24/02	0.1	pipe pattern	0.085
Dolphen	Breed20M32	test 4/03	0.09	pipe pattern	0.125
Dolphen	Breed30M32	test 13/02	0.07	pipe pattern	0.13
Dolphen	Breed30M32	test 20/02	0.075	pipe pattern	0.15
Dolphen	Breed30M34	test 11/02	0.065	1 pipe	0.155
Dolphen	Breed30M34	test 18/02	0.06	1 pipe	0.195

Proeven serie	Typering*	Experiment Nr	Kritiek verval, M	1 of meerdere pipes	Pipelengte bij kritiek verval, m
Pol 2021	Bas25_RDH_SS	B25_217	0.067	1 pipe	0.156
Pol 2021	Bas25_RDH_SS	B25_220	0.059	1 pipe	0.168
Pol 2021	Bas25_RDH_SS	B25_221	0.068	1 pipe	0.186
Pol 2021	Bas25_RDH_SS	B25_222	0.064	1 pipe	0.197
Pol 2021	Bas25_RDH_SS	B25_232	0.061	1 pipe	0.127
Pol 2021	Bas25_RDH_SS	B25_243	0.058	1 pipe	0.174
Pol 2021	Bas25_RDH_SS	B25_236	0.054	1 pipe	0.139
Pol 2021	Bas25_RDL_SS	B25_245	0.062	1 pipe	0.179
Pol 2021	Bas25_RDL_SS	B25_233	0.045	1 pipe	0.189
Pol 2021	Bas25_RDL_SS	B25_234	0.059	1 pipe	0.186
Pol 2021	FS35_RDH_SS	FS35_239	0.064	1 pipe	0.213
Pol 2021	FS35_RDH_SS	FS35_246	0.062	1 pipe	0.04
Pol 2021	FS35_RDH_SS	FS35_238	0.055	1 pipe	0.04
Pol 2021	FS35_RDL_SS	FS35_241	0.055	1 pipe	0
Pol 2021	FS35_RDL_SS	FS35_240	0.1	2 pipes	0.07

*Typering is samenstelling van de kenmerkende eigenschappen van de proef (details zijn samengevat op basis van kenmerken in de overige kolommen). RDH = hoge relatieve dichtheid, RDL = laag; SS = kleine schaal, MS=medium schaal; Bas1, Bas2 en Bas25 zijn typen Baskarp zand, FS35, en M32 en M34 zijn tevens zandtypen.

4.2 Overzicht DgFlow modellen

De proeven zijn in DgFlow (2D) gemodelleerd. Aangezien veel proeven in 3D configuraties waren zijn afwijkingen met de modellen te verwachten en deze worden in de analyse behandeld. Voor alle modellen is MPicard 1000, en de correctiefactor van 0,89 is toegepast voor overeenkomst met de rekenregel.

Voor alle modellen is de stapgrootte van H_{incr} stapsgewijs verfijnd waardoor uiteindelijk de stapgrootte van H_{incr} voor alle modellen kleiner dan 0.04% van H_c is. Uit de analyse in 5.2 blijkt dit voldoende voor de meeste gevallen. Voor modellen waar het doel was om heel kleine verschillen in pipelengte tussen modellen vast te stellen zijn stapgroottes verder verkleind.

Doorlatendheden, korrelgroottes en randvoorwaarden komen overeen met de experimentele waarden en randvoorwaarden. Voor proevenseries met duplo proeven is een gemiddelde doorlatendheid van de proevenserie gehanteerd.

De meshgrootte is gekozen om voldoende verfijning van de resultaten te bereiken, op basis van expert judgement. De grootte van de mesh elementen van de pipe was in de orde van 5% van de berekende L_c .

Onderstaande tabel vat de 31 modellen samen. Hier worden alleen de resultaten van de fijnste H_{incr} getoond (d.w.z. de geconvergeerde resultaten; in totaal zijn 75 berekeningen uitgevoerd). De stapgrootte waarmee verval in de modellen is aangebracht is significant kleiner dan de stapgrootte in de proeven. De keuze is gemaakt om niet dezelfde stapgrootte als in de proeven te hanteren. Dat zou wel overwogen kunnen worden om de vergelijking tussen proeven en modellen te maken. Echter door verder te verfijnen wordt de onzekerheid

in de modeluitkomsten verkleind. Daarmee kunnen ook effecten van parameters worden onderzocht door de vergelijking te maken tussen modellen.

Tabel 4.5 Overzicht van de resultaten van de DgFlow berekeningen voor de modellen met de fijnste stapgrootte van verval H_{incr} . De precisie waarmee H_c en L_c zijn gerapporteerd komt overeen met de stapgrootte van verval en de meshgrootte.

Modelnaam	Stapgrootte H_{incr} , m	H_{incr}/H_c , %	Meshgrootte, m	H_c model, m	L_c model, m
POL_B25_RDH	0.00001	0.008%	0.005	0.12438	0.090
POL_B25_RDH	0.00001	0.008%	0.005	0.13264	0.080
POL_B25_RDH	0.00001	0.008%	0.005	0.1285	0.080
POL_B25_RDL	0.00001	0.006%	0.005	0.1749	0.080
POL_FS_RDH	0.00001	0.009%	0.005	0.10633	0.075
POL_FS_RDL	0.00001	0.001%	0.005	0.9871	0.085
BEEK_B1_RDH	0.00001	0.006%	0.005	0.16927	0.085
BEEK_B1_RDL	0.00001	0.007%	0.005	0.15014	0.070
ALLAN_SLOT	0.0001	0.027%	0.01	0.3761	0.27
ALLAN_CIRCLE	0.0001	0.026%	0.01	0.3807	0.31
ALLAN_PLANE	0.00001	0.003%	0.01	0.31597	0.24
ALLAN_PLANE_ki	0.00001	0.003%	0.01	0.39509	0.25
ALLAN_SLOT	0.0001	0.027%	uitstroomgat 0.005 rest 0.01	0.3761	0.27
SILVIS_T4	0.0001	0.007%	pipe tot 12 m 0.2; rest 0.5; sloot 0.1	1.3673	2.6
SILVIS_T3	0.0001	0.004%	pipe tot 12 m 0.2; rest 0.5; sloot 0.1	2.3995	4.6
SILVIS_T2	0.0001	0.005%	pipe tot 12 m 0.2; rest 0.5; sloot 0.1	1.8881	3.4
IJKDIJK_FS02	0.001	0.037%	pipe 0.1; elementen 0.25	2.683	2.4
IJKDIJK_FS03	0.001	0.036%	pipe 0.1; elementen 0.25	2.759	2.5
DOLPHEN_MS32	0.00001	0.011%	0.005	0.09318	0.080
DOLPHEN_MS34	0.00001	0.009%	0.005	0.10938	0.090
MSP	0.00001	0.002%	0.01	0.40255	0.37
MSP_I20	0.00001	0.003%	0.01	0.352	0.39

4.3 Analyse van experimentele data en modellering

De proeven worden in dit hoofdstuk geanalyseerd. Deze analyse is gestructureerd om aan te sluiten bij Hoofdstuk 3 door eerst te kijken naar de gevoeligheid van L_c/L_s , en vervolgens de hypothesen te onderzoeken.

Doordat veel van de proeven 3D aspecten hebben zijn deze buiten toepassingsbereik van de modellen. De modellering en analyse van de proeven is wel relevant omdat dit inzicht biedt in:

- De reproduceerbaarheid van pipelengte in duplo proeven.
- Effecten van parameters in 3D
- De prestatie van het 2D model, ook ter vergelijking met het conceptuele model.
- De mate van onder/overschatting in 2D ten opzichte van 3D..
- Onderzoeksvragen voor 3D.

In dit hoofdstuk ligt de nadruk op de vergelijking van proef en model resultaten. De modellen voor sommige proeven worden ook in Hoofdstuk 5 gebruikt om effecten van parameters modelmatig nader uit te werken.

4.3.1 Reproduceerbaarheid duplo proeven

Deze analyse biedt inzicht in *Hypothese H2b*

Door de variatie in de pipelengte en het kritieke verval in duplo proeven te vergelijken krijgen we een inzicht in de reproduceerbaarheid van de proeven en de invloed van kleine verstoringen op de kritieke pipelengte. De variatie in de proeven kan zo inzicht bieden in de mate van onzekerheid van L_c . Hierbij wordt aangenomen dat variatie in 3D proeven en 2D proeven vergelijkbaar is.

Voor series waarin 3 of meer duplo proeven gedaan zijn worden de standaardafwijking en variatie coëfficiënten (COV = standaardafwijking/gemiddelde) van het kritieke verval en van de kritieke pipelengte vergeleken.

De resultaten van de proeven zijn in onderstaande tabellen samengevat.

Tabel 4.6 Samenvatting proefresultaten (Allan, 2018)

Allan Circle	Hc, m	Lc, m	k, m/d	D70, mm
Gemiddelde	0.21	0.35	3.26E-04	0.400
Mediaan	0.21	0.35	3.11E-04	0.400
Max	0.23	0.42	3.73E-04	0.400
Min	0.20	0.29	2.95E-04	0.400
Standaardafwijking	0.016	0.052	3.36E-05	0.000
CoV	0.08	0.15	0.10	0.000
aantal proeven	4	4	4	4

Allan Slot	Hc, m	Lc, m	k, m/d	D70, mm
Gemiddelde	0.25	0.02	3.39E-04	0.400
Mediaan	0.26	0.00	3.42E-04	0.400
Max	0.27	0.09	3.73E-04	0.400
Min	0.23	0.00	3.11E-04	0.400
Standaardafwijking	0.018	0.038	2.76E-05	0.000

CoV	0.07	1.66	0.08	0.000
aantal proeven	5	5	5	5

Allan Plane	Hc, m	Lc, m	k, m/d	D70, mm
Gemiddelde	0.31	0.00	6.58E-04	0.400
Mediaan	0.31	0.00	6.37E-04	0.400
Max	0.33	0.01	7.77E-04	0.400
Min	0.29	0.00	5.59E-04	0.400
Standaardafwijking	0.019	0.007	1.10E-04	0.000
CoV	0.06	nvt	0.17	0.000
aantal proeven	3	3	3	3

De resultaten van de proeven zijn in onderstaande tabellen samengevat.

Tabel 4.7 Samenvatting profresultaten Van Beek (2015) kleine schaal proeven

Van Beek Baskarp 1 kleine schaal hoge RD	Hc, m	Lc, m	k, m/d	D70, mm
Gemiddelde	0.08	0.10	5.75E-05	0.154
Mediaan	0.08	0.07	5.50E-05	0.154
Max	0.09	0.17	6.30E-05	0.154
Min	0.08	0.03	5.30E-05	0.154
Standaardafwijking	0.002	0.058	4.67E-06	0.000
CoV	0.03	0.61	0.08	0.000
aantal proeven	5	5	5	5

Van Beek Baskarp 1 kleine schaal lage RD	Hc, m	Lc, m	k, m/d	D70, mm
Gemiddelde	0.07	0.14	8.70E-05	0.154
Mediaan	0.07	0.15	8.65E-05	0.154
Max	0.07	0.18	9.50E-05	0.154
Min	0.07	0.09	8.00E-05	0.154
Standaardafwijking	0.003	0.040	8.12E-06	0.000
CoV	0.04	0.28	0.09	0.000
aantal proeven	4	4	4	4

Tabel 4.8 Samenvatting profresultaten Pol (Pol et al., under review)

Pol Baskarp 25 hoge RD	Hc, m	Lc, m	k, m/d	D70, mm
Gemiddelde	0.06	0.16	2.72E-04	0.260
Mediaan	0.06	0.16	2.70E-04	0.260
Max	0.07	0.20	3.00E-04	0.260
Min	0.06	0.10	2.50E-04	0.260
Standaardafwijking	0.004	0.031	1.72E-05	0.000
CoV	0.06	0.19	0.06	0.000
aantal proeven	7	7	6	6

Pol Baskarp 25 lage RD	Hc, m	Lc, m	k, m/d	D70, mm
Gemiddelde	0.05	0.17	3.47E-04	0.260
Mediaan	0.05	0.17	3.60E-04	0.260
Max	0.06	0.20	3.70E-04	0.260
Min	0.05	0.13	3.10E-04	0.260
Standaardafwijking	0.009	0.036	3.21E-05	0.000
CoV	0.16	0.21	0.09	0.000
aantal proeven	3	3	3	3

Pol FS 35 hoge RD	Hc, m	Lc, m	k, m/d	D70, mm
Gemiddelde	0.06	0.17	9.33E-04	0.462
Mediaan	0.06	0.18	9.00E-04	0.462
Max	0.06	0.19	1.00E-03	0.462
Min	0.06	0.14	9.00E-04	0.462
Standaardafwijking	0.003	0.026	5.77E-05	0.000
CoV	0.04	0.16	0.06	0.000
aantal proeven	3	3	3	3

Uit dit overzicht blijkt dat de standaardafwijking en de variatiecoëfficiënt van de pipelengte in de proeven hoger is dan de standaardafwijking en de variatiecoëfficiënt van het kritieke verval. Dit komt overeen met hypothese H1b dat de onzekerheid in pipelengte groter is dan die voor H_c .

Dit is van belang voor de nauwkeurigheid waarmee ook getracht wordt de pipelengte bij kritiek verval te modelleren om de vergelijking tussen modellen en proeven te maken, en ook later om de onzekerheid in de pipelengte goed mee te nemen in de analyse.

De variatiecoëfficiënten zijn in de orde van 0.03 tot 0.07 met een uitschieter van 0.16 voor H_c . De variabiliteit van de doorlatendheid in de duplo proeven is veelal in dezelfde orde grootte als de variabiliteit van H_c . Aangezien doorlatendheid H_c beïnvloedt kan dit de variabiliteit in H_c mogelijk verklaren, echter de verwachting is niet dat dit de variabiliteit in L_c verklaart (hypothese $h6$).

Voor L_c zijn de waarden van de CoV tussen 0.11 en 0.28 met een uitschieter naar 0.61 (daarbij zijn waarden van 1.66 en 1.73 voor de proeven van Allan met een slot en met een plane uitstroom hier niet meegenomen aangezien de gemiddelde pipelengte in deze proeven nabij 0 was wordt de CoV erg groot).

Voorts valt op dat de CoV van L_c voor de kleine schaal proeven van Pol kleiner is dan die voor Van Beek. Doordat de opstelling gelijk is, en deels vergelijkbare zanden zijn beproeft, lijkt een plausibele verklaring dat dit verschil komt doordat het verval in de proeven van Van Beek met grotere stappen is opgehoogd dan in de proeven van Pol. Voor H_c is dit verschil niet evident. Dit sluit aan bij de verwachting dat H_c bepaald kan worden met een grotere stapgrootte dan L_c . (in de proeven van Van Beek was de pipelengte ook niet een parameter die expliciet werd onderzocht, en voor bepaling van H_c was de stapgrootte voldoende verfijnd).

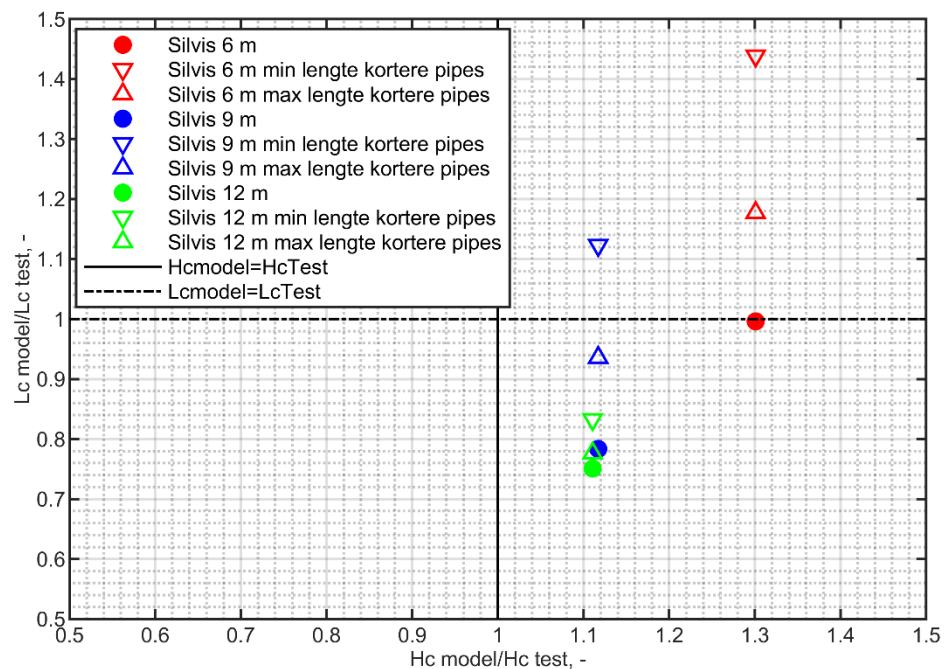
Conclusie: de variatie in L_c/L_s is groter dan de variatie in H_c/L_s in de proeven. De proeven waren allen 3D situaties, de aanname is dat de variabiliteit voor 2D ook groter is voor L_c dan voor H_c .

4.3.2 Vergelijking proeven en modellen

Deze analyse biedt inzicht in *Hypothese H2* en *Hypothese H2b*

De proeven van Silvis bieden inzicht in de gevoeligheid van de pipelengte rondom het kritieke verval en de mate waarin het erosiemodel in DgFlow geschikt is om voor situatie 1 de L_c/L_s te berekenen.

Voor de analyse van de gemodelleerde pipelengte in een 2D situatie zijn de proeven van Silvis het meest geschikt omdat dit proeven zijn waarbij duidelijk is dat progressie het dominante mechanisme is (het verval moet verhoogd worden om de pipe door te laten groeien na initiatie). Deze proeven zijn ook gebruikt bij de ontwikkeling van de rekenregel van Sellmeijer. Onderstaande figuur toont de H_c en L_c in de proeven en modellen voor de 3 proeven. De pipelengte bij kritiek verval is berekend met een stapgrootte van 0.001 m en 0.0001 aangezien de lengte rondom het kritieke verval erg gevoelig is voor stapgrootte van H_c . De stapgrootte van 0.001 bleek voldoende geconvergeerd (zie ook 5.2).



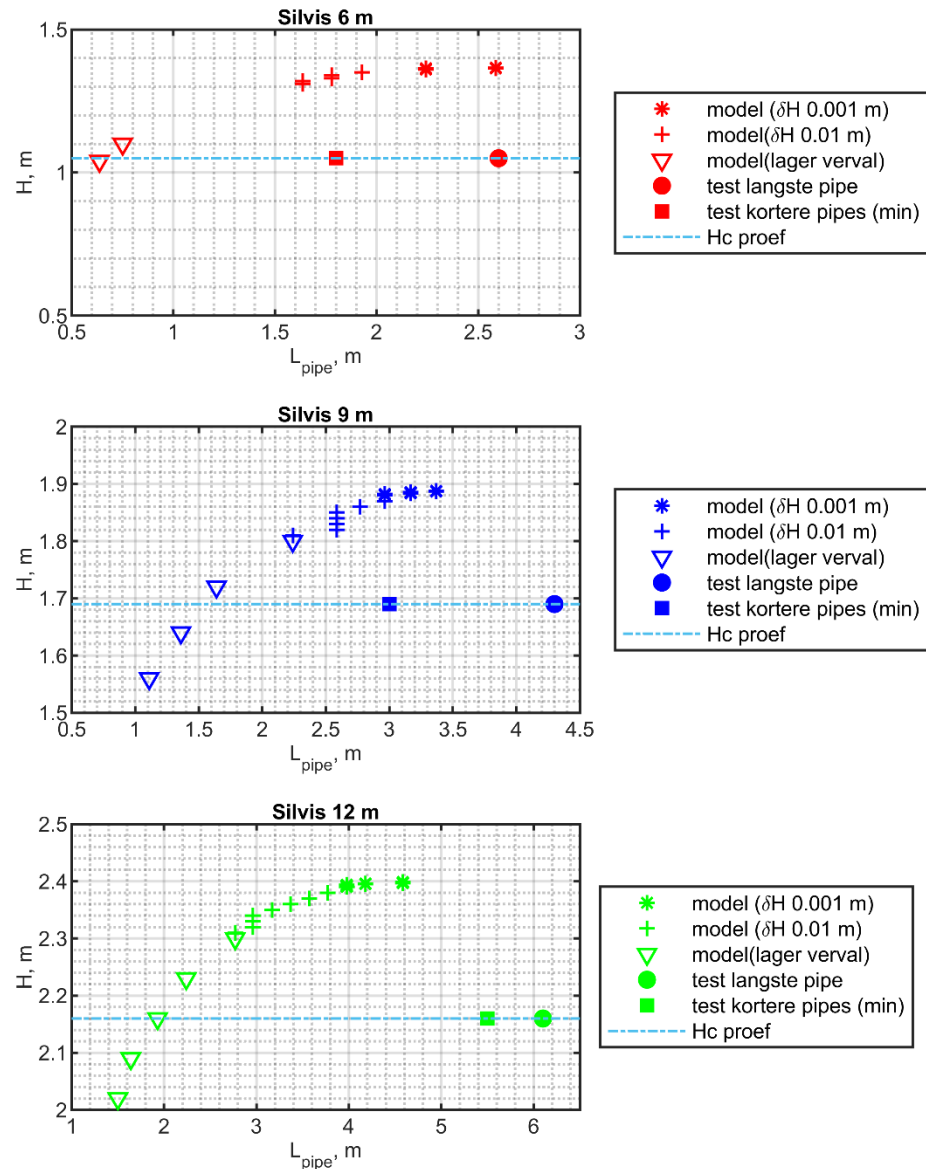
Figuur 4.7 Proeven Silvis, vergelijking proeven en modellen pipelengte bij kritiek verval en kritiek verval (meerdere markers voor 9 m proef hebben betrekking op gevoeligheidsanalyses voor modelinstellingen).

Hier is de lengte van de langste pipe bij kritiek verval, evenals de lengte van kortere pipes, zoals geschat in 4.1.1 gebruikt voor de vergelijking.

Hier zien we dat H_c in alle gevallen overschat wordt door het model (met ca. 10-30%). Met de rekenregel van Sellmeijer wordt het kritiek verval iets minder overschat, 8-14%. De grotere overschatting met DgFlow heeft wellicht te maken met de correctiefactor in DgFlow. Wellicht doordat de aanname van een oneindig brede pipe nog altijd een overschatting is van het werkelijke oppervlak dat de pipes innemen. Er is immers nog veel zand tussen de pipes.

De kritieke pipelengte wordt door de modellen onderschat voor de proef met 12 m kwelweg, maar redelijk benaderd voor de proeven met 9 m en 6 m kwelweg. Er is echter wel een flinke bandbreedte in de pipelengten in de proeven (verschil tussen de langste pipe en kortere pipes) in de proeven van Silvis.

Onderstaande figuur toont de ontwikkeling van de pipe in het model als functie van verval rondom het kritieke verval. De resultaten van de proeven zijn hier eveneens opgenomen.



Figuur 4.8 Proeven Silvis, gemodelleerde verval vs. pipelengte rondom het kritieke verval en metingen.

Ondanks dat de kritieke pipelengte goed wordt berekend, wordt de pipelengte bij een gegeven verval onderschat (in het model is de pipelengte bij het kritieke verval uit de proef ca. 2-3 keer korter is dan de pipelengte in de proef).

De proeven van Allan met een 'plane' uitstroom zijn minder geschikt om de vergelijking tussen proeven en modellen te trekken omdat de pipes na initiatie doorgroeiden. Dit was ook het geval in sommige 'slot' proeven, en in de slot proeven waar pipes wel stopten was dit eerder een situatie met een 2D uitstroom en enkele pipes. Daarom worden de proeven van Allan later in dit hoofdstuk gebruikt om situaties 2 en 3 te onderzoeken en om effecten van parameters te onderzoeken, maar niet voor de directe vergelijking proeven en modellen.

Voor de IJkdijk proeven was de pipelengte niet gerapporteerd daarom zijn deze hier niet gebruikt voor de directe vergelijking tussen proeven en modellen.

Conclusie: Hoewel L_c/L_s zoals berekend in DgFlow redelijk overeenkomt met de proeven is er een forse bandbreedte aan onzekerheid in L_c in de proeven. Tevens zijn er maar 3 proeven. Doordat de proeven H_c met ca 10-30% onderschatten wordt ook L bij gegeven ΔH onderschat. De kwalitatieve vorm van de H vs L curve in de modellen wordt weerspiegeld door observaties en metingen tijdens de proeven.

4.3.3 Analyse effect van uitstroomopening

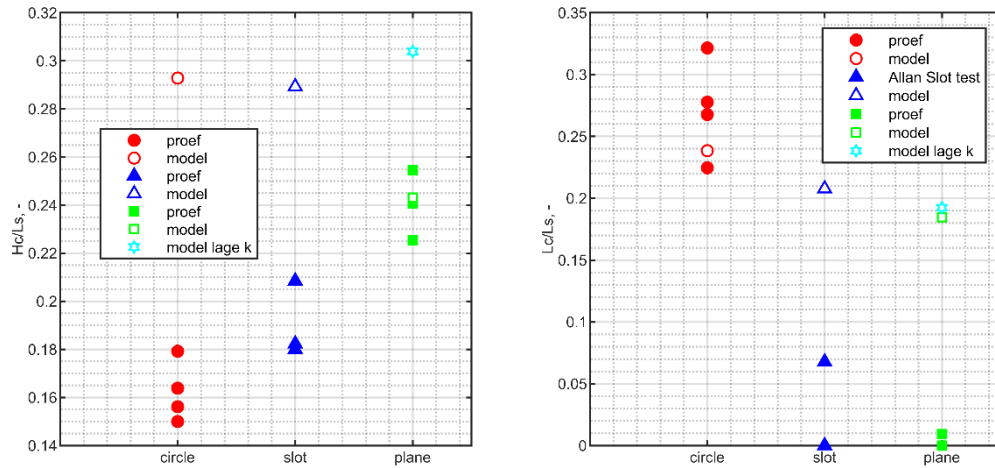
Deze analyse biedt inzicht in *Hypothese H3*, maar ook in *Hypothese H2* en *Hypothese H10*

De proeven van Allan lenen zich in principe voor de analyse van het effect van de grootte van de uitstroomopening. De proeven van Allan met een 'plane' en 'slot' uittredevorm hebben in principe een 2D uitstroom. De pipes bleef bij de plane proeven doorgroeien na initiatie, er vormde een meanderend patroon van meerdere pipes. Dit zou, vergelijkbaar met Silvis, een situatie met 2D uitstroom en meerdere pipes kunnen zijn. Mogelijk zijn deze proeven echter initiatie-gedomineerd en dan is DgFlow niet van toepassing. Dit is onderzocht door de proeven te modelleren.

Bij de helft van de slot proeven bleven pipes na initiatie ook doorgroeien, bij twee andere slot proeven niet, daar was een verhoging van verval nodig (een indicatie dat de proef mogelijk progressie gedomineerd was). In een daarvan vormen eerst 2 pipes, maar die stopten met groeien en bij het kritieke verval startte een nieuwe pipe die doorgroeide. Dit kan gezien worden als een situatie met een 2D uitstroom maar 1 pipe (situatie 2). In de andere slot proef wordt ook gerapporteerd dat er 1 pipe was en dat het verval in vier stappen tussen 0.185 en 0.237 m verhoogd is. Doordat de proef 's nachts doorliep was wel sprake van clogging echter dit leek ook weer vanzelf op te lossen. De resultaten hier zijn mogelijk minder betrouwbaar. Ook de slot proeven zouden initiatie-gedomineerd kunnen zijn.

Voor de proeven met een gat (circle) uitstroom is de pipegroei wel progressie gedomineerd, het verval waarbij de pipe start is niet voldoende om de pipe door te laten groeien. Hier vormde steeds 1 pipe, de situatie 3D uitstroom en 1 pipe (situatie 3). Ter vergelijking zijn deze proeven hier ook opgenomen, al zijn deze buiten het toepassingsgebied van het model. Ze zijn illustratief om het effect van de grootte van de uitstroom opening (H3) te onderzoeken, echter er is ook sprake van 3D stroming wat naar verwachting ook tot een langere pipe leidt (H10).

Onderstaande figuren tonen het kritieke verval en de pipelengte in proeven en modellen, in de modellen is het verval met stappen van 0.00001 m verhoogd om de pipelengte zo nauwkeurig mogelijk te bepalen.



Figuur 4.9 Resultaten proeven Allan (Allan, 2018) en modellen en proeven, links kritiek verval/kwelweglengte, onder pipelengte bij kritiek verval/kwelweglengte.

De resultaten van de proeven tonen duidelijk een toename in L_c met een afname in uitstroomoppervlak en ondersteunen daarmee de hypothese.

De modellen tonen ook deze trend, echter het effect is daar minder sterk. Hierbij wordt opgemerkt dat de gemodelleerde lengte voor de slot proef korter is dan voor de circle proef, terwijl in een 2D model deze geometrieën identiek zijn. Op basis van het conceptuele model zou geen verschil worden verwacht in die situatie. Het verschil is wel dusdanig klein dat dit te wijten zou kunnen zijn aan numerieke onzekerheid, door de eindige grootte van de pipe elementen en de iteratie procedure.

Het verschil tussen de proeven en modellen wat betreft de trend voor het effect van uitstroomvlak heeft mogelijk te maken met de 3D componenten van de stroming in de slot en circle proeven, en met het mogelijke initiatie gedomineerd zijn van de slot en plane proeven.

De circle proeven zijn 3D en daardoor is het ook de verwachting dat een 2D model de pipelengte onderschat (H10). De berekende pipelengte komt echter redelijk overeen, mogelijk speelt hier ook dat de W/L_s relatief klein is voor deze proeven (H11), zodat het 3D effect beperkt is.

Het model overschat L_c voor zowel de plane als de slot proeven. Mogelijk is dit doordat de modellen initiatie gedomineerd zijn, dan zou DgFlow niet toepasbaar zijn. Zoals boven beschreven zijn er ook vragen met betrekking op de betrouwbaarheid van de resultaten van de slot proeven.

Het effect van uitstroom opening op H_c is deels vertekend doordat de plane proeven een hogere doorlatendheid hebben dan de slot en circle proeven (volgens (Allan, 2018)). Het beeld van een hoger kritiek verval bij een groter uitstroomvlak, en een lager kritiek verval in een 3D situatie is echter zoals verwacht in het conceptueel model. DgFlow overschat het kritieke verval sterk voor zowel de slot als voor de circle proeven. Voor de circle proeven is dit te verwachten gezien het effect van 3D stroming, en mogelijk speelde bij de slot proeven ook dat hier slechts enkele pipes vormden in plaats van een heel netwerk.

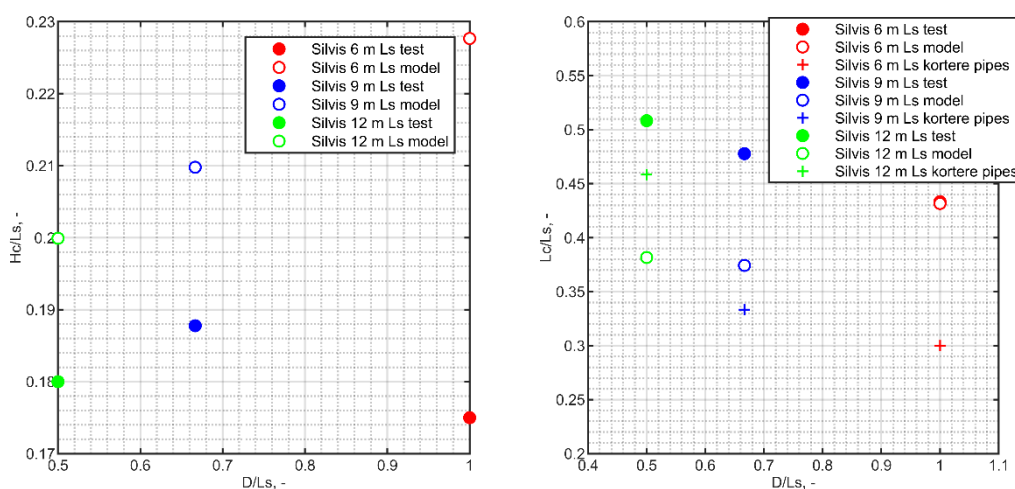
Conclusie: Hoewel de resultaten H3 en H10 ondersteunen en dus verklaarbaar zijn is het voor 2 van de 3 typen proef (plane en slot) onzeker of de proeven initiatie gedomineerd waren. Tevens spelen zowel uitstroomoppervlak als 3D stroming een rol en is het niet mogelijk de afzonderlijke effecten te isoleren.

De proeven met een 2D situatie (plane) ondersteunen H2 niet voor L_c , de gemodelleerde L_c zijn langer dan in de proeven. H_c wordt voor de plane uitstroom wel redelijk gemodelleerd. De proeven met een 2D uitstroom maar slechts enkele pipes (situatie 2) evenals de proeven met 3D (situatie 3) worden door het model overschat wat betreft H_c . L_c wordt voor situatie 2 overschat en voor situatie 3 redelijk gemodelleerd.

4.3.4 Analyse effect van D/L

Deze analyse biedt inzicht in *Hypothese H4*.

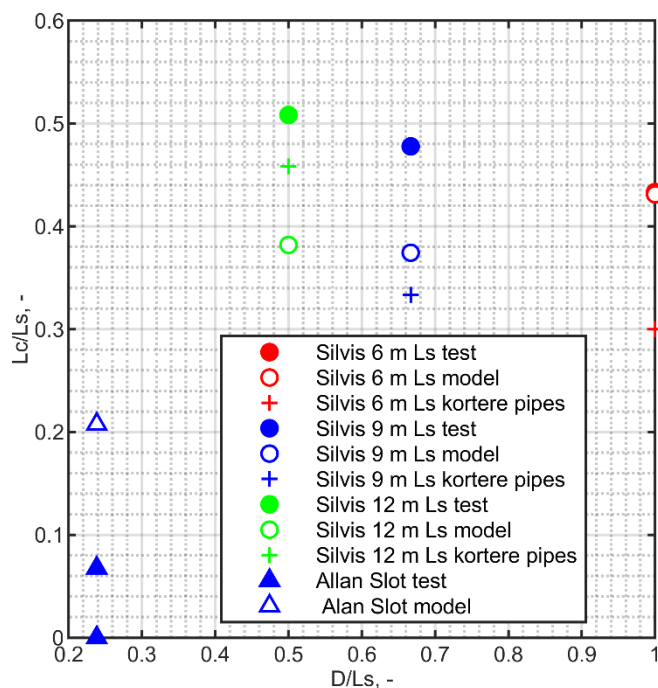
De verwachting Hypothese (H4) is dat L_c/L_s toeneemt met toename van D/L . De dikte is constant in de 3 proeven van Silvis maar de kwelweglengte verschilt, waardoor de D/L verhouding ook verandert. In de modellen leidt dit tot een constante afname in kritiek verhang (H_c/L_s) maar in de proeven is deze trend minder duidelijk. In de modellen is de L_c/L_s vrijwel gelijk voor de modellen met 12 m en 9 m kwelweglengte maar wel beduidend hoger voor een model met een kwelweglengte van 6 m. In de proeven lijkt eerder sprake te zijn van een afname in L_c/L_s met toenemende D/L .



Figuur 4.10 Resultaten proeven Silvis (Silvis, 1991) en modellen van proeven, links kritiek verval/kwelweglengte, onder pipelengte bij kritiek verval/kwelweglengte als functie van D/L verhouding

De kritieke pipelengte wordt door de modellen onderschat voor de laagste D/L verhouding, en het beste benaderd bij de grootste D/L . Hierbij wordt wel opgemerkt dat de proeven een mate van spreiding tussen de langste en kortere pipes binnen een proef hebben die relatief groot is. Het is dus de vraag in hoeverre de afwijkingen een significante trend aangeven.

De proeven van Allan met een slot uitstroom hebben een andere schaal, zandsoort, en andere D/L verhouding dan de proeven van Silvis. Omdat de hypothese is dat D/L de belangrijkste van deze parameters is voor L_c/L_s , zijn deze proeven en de modellen daarvan ook hieronder opgenomen. Deze proeven met een beduidend lagere D/L dan die van Silvis ondersteunen de hypothese wel, de pipelengte is korter in de proeven van Allan. Echter, het is de vraag of de proefresultaten van Allan progressie gedomineerd zijn, en het lijkt er op basis van de beschrijving op dat hier doordat er maar enkele pipes vormen sprake is van 3D effecten.



Figuur 4.11 Resultaten proeven Silvis (Silvis, 1991) en Allan (Allan, 2018), en modellen van proeven voor pipelengte bij kritiek verval/kwelweglengte als functie van D/L verhouding.

Conclusie: De resultaten van de proeven van Silvis ondersteunen de hypothese voor het effect van D/L niet, echter door de bandbreedte van mogelijke pipelengte is dit onvoldoende om de hypothese te ontkrachten. De modellering van de proeven duidt wel op een toename in L_c/L_s met toename in D/L .

De slot proeven van Allan in combinatie met de proeven van Silvis ondersteunen weliswaar de verwachte toename in L_c/L_s echter hier speelt de vraag of deze initiatie of progressie gedomineerd zijn.

4.3.5 Analyse effect van schaal: proeven

4.3.5.1 Situatie 1

Deze analyse biedt inzicht in *Hypothese H5* maar ook in *Hypothese H4*.

Hoewel proeven van Silvis, de IJkdijkproeven Van Beek en de plane uitstroom van Allan andere schalen hebben en allen 2D situaties behelzen is hier de vorm (D/L) en de uitstroom, open versus sloot, anders. Die laatste twee parameters hebben volgens hypothesen H3 en H4 een effect op L_c/L_s en schaal niet. De proeven van Allan met een plane uitstroom hebben een kritieke pipelengte van 0 m, en deze zijn mogelijk initiatie gedomineerd, voor de IJkdijk proeven was de pipelengte niet vastgesteld.

Een kwalitatieve vergelijking van de proeven, en een vergelijking van de modellen is hieronder gemaakt om de resultaten te analyseren aan de hand van de hypothesen. Onderstaande tabel vat deze relevante parameters samen.

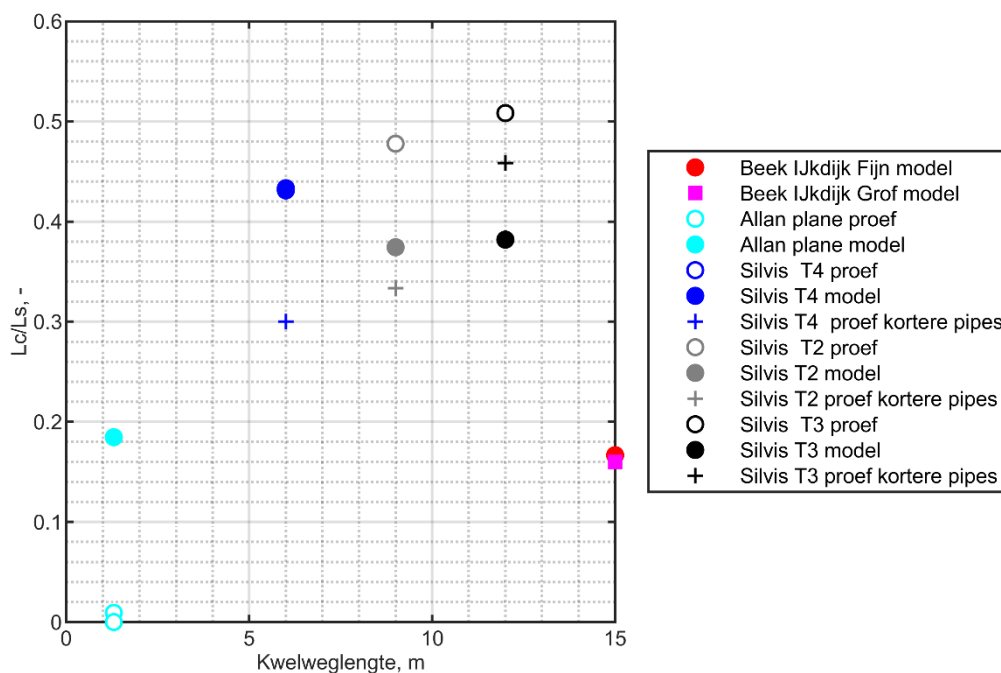
Tabel 4.9 Overzicht van kenmerken van proeven voor analyse effect schaal.

Proef	d_{70} mm	k m/s*	D/L	W/L
IJkdijk FS02	0.260	1.04×10^{-4}	0.18	0.80
IJkdijk FS03	0.180	8.0×10^{-5}	0.20	0.80
Silvis T4	0.247	5.11×10^{-5}	1.0	0.83
Silvis T2	0.247	5.11×10^{-5}	0.67	0.56
Silvis T3	0.247	5.11×10^{-5}	0.5	0.42
Allan plane	0.260	6.7×10^{-4}	0.29	0.34

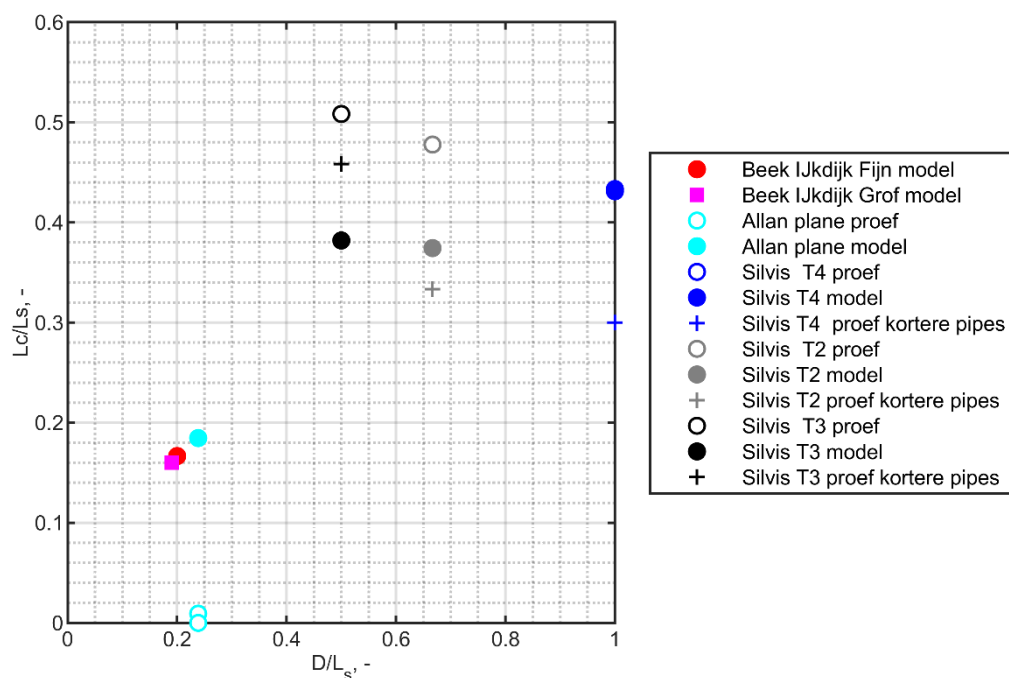
*bij duplo proeven wordt gemiddelde gebruikt in model.

Onderstaande figuur toont de pipelengten als functie van kwelweglengte. De resultaten van de modellen voor de IJkdijk en Allan zijn vergelijkbaar. Dit zijn ook beide geometrieën met een vergelijkbare D/L en beide hebben een open uitstroom. De proeven van Silvis hebben allen een langere pipelengte wat ook verwacht zou worden op basis van de hogere D/L en de sloot uitstroom. Daarmee is H4 wel geschikt dit patroon te verklaren.

Onderstaande figuur bevestigt deze het beeld dat D/L een bepalende factor is voor L_c/L_s (en schaal minder relevant is). Echter door het ontbreken van experimentele metingen van de pipelengte in de IJkdijkproeven, en het mogelijk initiatie-gedomineerd zijn van de proeven van Allan, zijn het met name de modelresultaten die het beeld bepalen. Dat wil zeggen dat het model zich gedraagt zoals de hypothese, maar dat experimentele data nog onvoldoende is om de hypothese te bevestigen of ontkrachten.



Figuur 4.12 Pipelengte bij kritiek verval gedeeld door kwelweglengte voor proeven met 2D uitstroom en meerdere pipes als functie van kwelweglengte.



Figuur 4.13 Pipelengte bij kritiek verval gedeeld door kwelweglengte voor proeven met 2D uitstroom en meerdere pipes als functie van D/L_s .

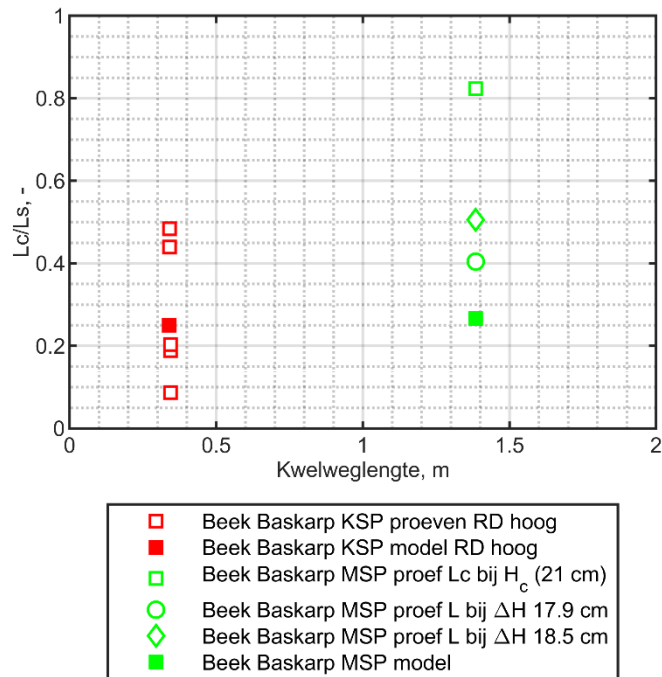
Conclusie: Door vragen omtrent de pipelengte in de IJkdijkproeven en de proeven van Allan zijn deze proeven i.c.m die van Silvis onvoldoende om de hypothese te onderbouwen/verwerpen. Modellen van de proeven bevestigen H5 dat schaal minder belangrijk is, en H4 dat D/L wel bepalend is voor L_c/L_s .

4.3.5.2 Situatie 3

Deze analyse biedt inzicht in *Hypothese H5* maar ook in *Hypothese H10*.

Het effect van schaal kan goed onderzocht worden voor situatie 3 aan de hand van de medium schaal en de kleine schaal proeven van Van Beek (2015). Deze hebben vergelijkbare zanden en dezelfde geometrie (D/L).

Onderstaande figuur toont de proeven met Baskarp zand, hoge RD van de kleine en medium schaal. Doordat er bij de medium schaal proef een extreem lange pipelengte bij kritiek verval is gerapporteerd, die mogelijk de consequentie was van een lokale heterogeniteit is het aannemelijk dat het kritieke verval lager was en dat daar een kortere pipelengte bij hoorde. De pipelengte bij die lagere vervallen zijn ook getoond.



Figuur 4.14 Pipelengte in proeven met Baskarp zand met hoge RD en een 3D uitstroom voor de kleine en medium schaal.

Er is een behoorlijke spreiding in de L_c/L_s van de kleine schaal proeven. De aannemelijk geachte L_c/L_s van de medium schaal proeven (bij iets lagere vervallen) zitten aan de hoge kant maar niet buiten de L_c/L_s van de kleine schaal. Daarmee ondersteunen deze proeven H5.

De modellen bevestigen ook de verwachting dat schaal geen significant effect op L_c/L_s heeft. De modellen onderschatten L_c voor de medium schaal proeven, wat verwacht zou zijn op basis van H10. Voor de kleine schaal proeven wordt L_c redelijk benaderd, wat niet de verwachting is.

Hoewel H7 en H6 ervan uitgaan dat doorlatendheid en d_{70} geen significant effect op L_c/L_s hebben wordt in deze analyse getracht zo vergelijkbaar mogelijke proeven te vergelijken (aangezien die hypothesen ook nog niet bevestigd zijn).

Zo wordt inzicht wordt verkregen met de proeven met vergelijkbare d_{70} van (Pol et al., under review) op FS zand ($d_{70} = 0.462 \mu m$), in combinatie (Allan, 2018) op Sydney zand ($d_{70} = 0.400 \mu m$). De doorlatendheid in de proeven van Pol is wel hoger ca. $1 \times 10^{-3} m/dag$ vergeleken met ca. $3 \times 10^{-4} m/dag$.

Proeven met vergelijkbare doorlatendheid zijn proeven van Pol met Baskarp zand ($d_{70} = 0.260 \mu m$) en doorlatendheid ca $3 \times 10^{-4} m/dag$ kunnen vergeleken worden met die van Allan, hier is dan wel de d_{70} lager.

De vorm van de opstelling verschilt wel, de D/L zijn vergelijkbaar maar W/L bij Allan is veel kleiner en volgens H11 heeft dit ook effect. De proeven van Dolphen bevatten daarentegen zowel proeven met dezelfde W/L als Pol als proeven met een vergelijkbare W/L als Allan. Daarom worden deze experimenten en modellen daarvan hieronder vergeleken.

Het gaat hier dus om een vergelijking van het effect van schaal waarbij rekening gehouden wordt met effecten van andere geometrische parameters en zandeigenschappen op basis van de hypothesen uit het conceptuele model.

Kenmerkende karakteristieken van de proeven zijn hieronder samengevat.

Tabel 4.10 Overzicht van kenmerken van proeven voor analyse effect schaal.

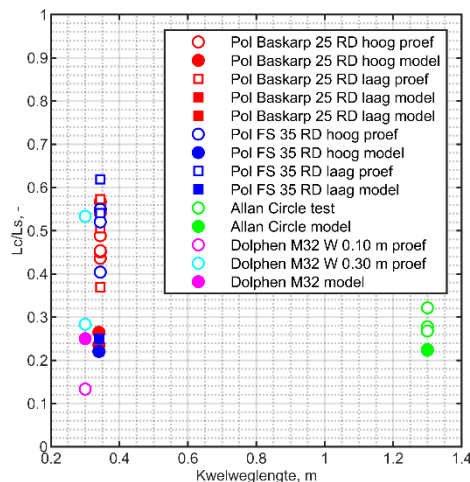
Proef	d_{70} mm	K m/s*	D/L_s	W/L
Pol FS hoge RD	0.462	9.3×10^{-4}	0.24	0.87
Pol B25 hoge RD	0.260	2.7×10^{-4}	0.24	0.87
Pol B25 lage RD	0.260	3.5×10^{-4}	0.24	0.87
Allan	0.260	3.3×10^{-4}	0.29	0.34
Dolphen MS32 W = 0.10	0.206	3.5×10^{-4}	0.33	0.33
Dolphen MS32 W = 0.30	0.206	3.5×10^{-4}	0.33	1

*bij duplo proeven wordt gemiddelde gebruikt in model.

De vergelijking tussen de proeven met een breedte van 0.10 m van Dolphen en die van Allan geven een beeld van het effect van schaal bij gelijke W/L . Dit suggereert dat L_c/L_s toeneemt met schaal wat H5 niet ondersteunt. Echter de uitstroom is relatief gezien groter in de proeven van Dolphen, wat ook kan bijdragen aan kortere pipelengtes in die proeven (volgens H3).

De vergelijking tussen de modelresultaten voor de proeven van Dolphen wordt in de analyse van het effect van W/L gemaakt.

De proeven van Pol leiden tot langere pipes en een grotere mate van overschatting van de pipelengte dan proeven van Allan met vergelijkbare d_{70} of k . Het is de verwachting dat dit verschil echter eerder samenhangt met de W/L_s verhouding dan met schaal de proeven van Allan hebben een kleinere W/L . De proeven van Dolphen met een breder model tonen een zeer grote spreiding.



Figuur 4.15 Effect van schaal in proeven van Pol, Dolphen en Allan met 3D uitstroom.

Conclusie: samenvattend wordt op basis van de proeven van Van Beek op kleine en medium schaal met hetzelfde zand geen overtuigend effect van schaal op L_c/L_s gevonden, wat H5 ondersteunt. Echter de onzekerheden en bandbreedten van L_c zijn groot voor deze proeven. Vergelijking met andere proeven van situatie 3 (Allan en Dolphen en Pol) voor het effect van schaal zijn problematisch aangezien andere parameters hier ook variëren. Hoewel een kwalitatieve analyse (met aanvullend hypothesen H3 en H11 voor relevantie van effect uitstroomvlak en W/L en H6 en H7 voor het niet relevant zijn van K_{wvp} en d_{70}) geschikt is om

de L_c/L_s te verklaren, uitgaande van geen significant effect van schaal zoals in H5 is dit onvoldoende om de hypothese geheel te onderbouwen.

Modelresultaten laten geen significant effect van schaal zien voor deze proeven zoals verwacht met H5.

4.3.6 Analyse effect van doorlatendheid (en RD)

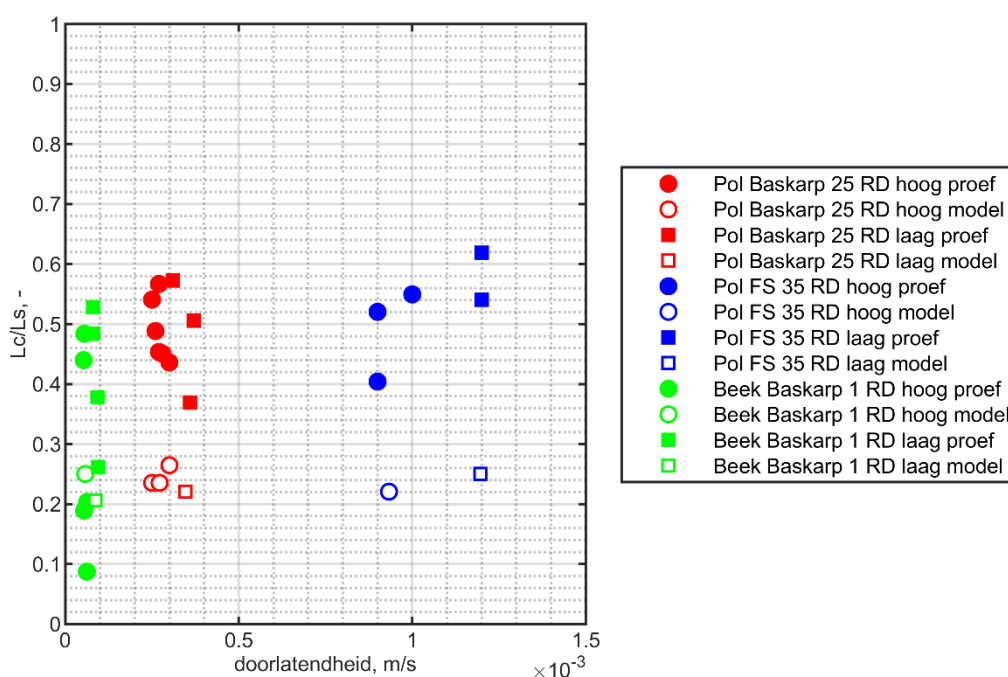
Deze analyse biedt inzicht in *Hypothese H6* en *Hypothese H10*.

Er zijn geen situatie 1 proeven waarin het effect van doorlatendheid is beproefd. Deze analyse is gedaan met situatie 3 proeven. Ook is de doorlatendheid niet op zichzelf te veranderen, door proeven met dezelfde korrelgrootte maar een andere relatieve dichtheid (RD) te doen is een indruk van het effect van doorlatendheid in combinatie met RD verkregen.

Ook kan met dezelfde dichtheid maar andere zandsorten gekeken worden naar het effect van doorlatendheid in combinatie met korrelgrootte.

Van Beek en Pol hebben proeven in dezelfde kleine schaal opstelling uitgevoerd met verschillende zandsorten en relatieve dichtheid. De proeven met relatieve dichtheden van 0.65 of lager zijn in deze analyse als lage relatieve dichtheid gegroepeerd. De modellen zijn gebaseerd op de gemiddelde doorlatendheid van de proeven. Voor de proeven van Pol met B25 bij hoge RD is een gevoeligheidsanalyse gedaan door in het model ook de minimum en maximum doorlatendheid van de proeven te hanteren. De stapgrootte waarmee het verval in de modellen verhoogd werd is 0.00001 m.

Onderstaande figuur toont de pipelengte als fractie van de kwelweglengte (L_c/L_s) in proeven en modellen.



Figuur 4.16 Pipelengte in proeven en modellen voor kleine schaal Van Beek en Pol.

De proefresultaten laten voor Baskarp (zowel bij Van Beek als Pol) geen eenduidige relatie tussen L_c/L_s en doorlatendheid & RD zien. Voor FS 35 lijkt er een iets grotere L_c te zijn in de proeven van Pol. Maar het is de vraag hoe significant dat is.

De gemodelleerde L_c/L_s laten geen consistente trend zien. De verschillen tussen gemodelleerde L_c zijn in de orde grootte van 1 a 2 mesh elementen en reflecteren naar verwachting eerder numerieke effecten.

Daarmee stemmen de proefresultaten en modellen overeen met H6 dat k_{WVP} geen significant effect voor L_c/L_s lijkt te hebben in situaties met een dicht achterland.

De modellen onderschatten L_c voor de proeven van Pol, dit is verwacht gezien de 3D situatie van de proef, terwijl de modellen 2D zijn. Bij de proeven van Van Beek is dit minder het geval. Wel wordt opgemerkt dat de stapgrootte waarmee verval in de proeven van Pol is aangebracht kleiner is dan bij Van Beek, en dat dit mogelijk bijdraagt aan een hogere experimentele L_c . Gezien de vorm van de H vs L curve zouden zowel proeven als modellen bij grotere stapgrootten in H_{incr} L_c meer onderschatten.

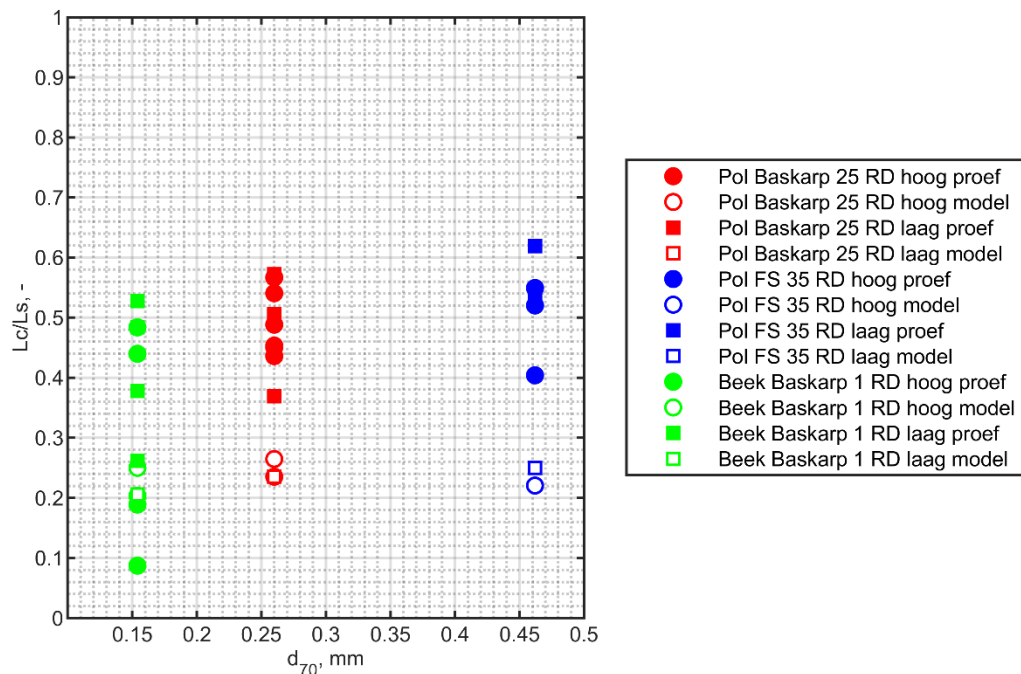
Conclusie: In proeven kan k_{WVP} niet op zichzelf veranderd worden. Wel kan k_{WVP} in combinatie met RD of met korrelgrootte beschouwd worden. De proeven van Van Beek en van Pol laten geen sterk effect van doorlatendheid en RD en/of korrelgrootte op L_c zien. De modellen van deze proeven ondersteunen dit beeld wat ook de verwachting is in H6.

DgFlow modelleert L_c voor de kleine schaal situatie 3 proeven van Van Beek redelijk, echter hier is veel spreiding in pipelengte. Voor de proeven van Pol in dezelfde opstelling wordt L_c onderschat, wat de verwachting is van H10. De proeven van Pol zijn met kleinere stapgrootte van H_{incr} uitgevoerd waardoor de verwachting is dat deze L_c beter benaderen.

4.3.7 Analyse effect van d_{70}

Deze analyse biedt inzicht in *Hypothese H7* en *Hypothese H10*.

De waarde van d_{70} kan niet los van doorlatendheid gevarieerd worden in proeven. De resultaten uit die paragraaf zijn hieronder als functie van d_{70} getoond.



Figuur 4.17 Pipelengte in proeven en modellen voor kleine schaal Van Beek en Pol.

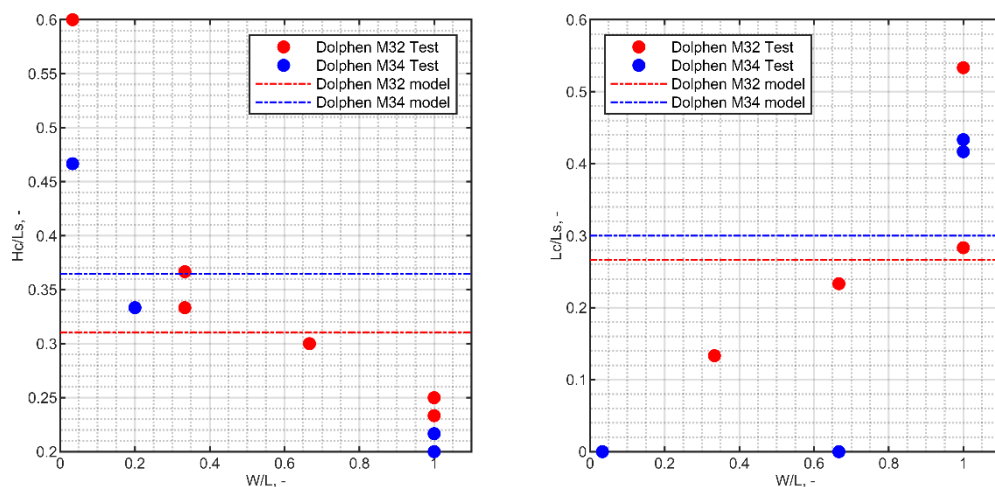
Deze proef resultaten tonen geen duidelijke relatie van L_c/L_s met d_{70} zoals ook verwacht wordt in H7. Dat geldt ook voor de modelresultaten daarom geldt hier een vergelijkbare conclusie als voor H6.

Conclusie: In proeven kan d_{70} niet op zichzelf veranderd worden. Wel kan d_{70} in combinatie met RD of met k_{WVP} beschouwd worden. De proeven van Van Beek en van Pol laten geen sterk effect van doorlatendheid en d_{70} op L_c zien. De modellen van deze proeven ondersteunen dit beeld wat ook de verwachting is in H7.

4.3.8 Analyse effect van breedte (W/L)

Deze analyse biedt inzicht in *Hypothese H10* en *Hypothese H11*.

Om deze hypothese te onderzoeken worden de proeven van Dolphen (Dolphen, 2014) gebruikt. Deze proeven zijn gedaan met gelijke uitstroom opening (een gat) en toenemende breedte van de opstelling. Hierbij geeft een bredere opstelling een groter 3D effect doordat water uit een grotere breedte naar de pipe convergeert. De modellen hanteren een stapgrootte van 0.00001 m om de pipelengte te berekenen.



Figuur 4.18 Resultaten proeven Dolphen (Dolphen, 2014) en modellen en proeven, links kritiek verval/kwelweglengte, onder pipelengte bij kritiek verval/kwelweglengte als functie van breedte van de opstelling. Zandsorten M32 (grover) en M34 (fijner)

Kritieke pipelengte neemt toe met model breedte, zoals verwacht in H11. Er is voor M32 wel een grote spreiding in de 2 resultaten bij een breedte van 0.3 m. In de resultaten van de proef met M32 (proef 25/04) is te zien dat de pipe geleidelijk groeit tot een lengte van ca 0.08 m, en daarna sterk toeneemt naar 0.16 m (de pipelengte bij kritiek verval) voordat de pipe doorgroeit. Een sterke toename van pipelengte rondom het kritieke verval is verwacht op basis van de theorie. Echter het stoppen van een pipe kan ook het gevolg zijn van kleine heterogeniteit in de baan van de pipe wat zou betekenen dat de kortere lengte representatiever is voor het proces. Hoewel dit een mogelijke verklaring is voor het verschil tussen de 2 duplo proeven is blijft dit onduidelijk.

De gemodelleerde pipelengte komt redelijk overeen met de pipelengte bij een W/L verhouding van ca 1.

Voor M34 (het fijnere zand) is de kritieke pipelengte in de proeven van 0.3 m breed veel groter dan in de proeven met M32, terwijl de lengte voor de overige proeven juist heel kort is.

Kritiek verval neemt af met model breedte zoals verwacht, omdat het instroomvlak daar relatief kleiner is, dit leidt tot een meer 2D situatie omdat de afmetingen van de pipe en het uitstroomgat groot zijn in relatie tot de totale breedte.

Conclusie: globaal gezien bevestigen deze proeven het beeld dat L_c/L_s toeneemt met toenemende breedte van het WVP in H11. Doordat de absolute afmetingen van het uitstroomgat gelijk blijven bij toenemende modelbreedte is het geobserveerde effect echter niet alleen aan breedte toe te schrijven, maar ook aan het relatief gezien grotere uitstroom bij een smaller model, wat ook leidt tot kortere pipes volgens H3.

5 Onderbouwing hypothesen met modellen op veldschaal

Het conceptuele model beschrijft het verwachte effect van geometrie en parameters op L_c/L_s , geïllustreerd met enkele voorbeelden. In dit hoofdstuk worden deze effecten nader onderzocht aan de hand van modelanalyses in DgFlow in modellen op veldschaal. Daarmee dient dit ter onderbouwing en ondersteuning van de hypothesen, en als achtergrondrapportage.

5.1 Beschrijving modellen

Er zijn modellen opgesteld om de volgende effecten te onderzoeken:

- Dikte WVP: 20 m en 40 m en 2 m (2 m model enkel gebruikt voor analyse effect van schaal).
- Kwelweglengte L_s : 40 m en 60 m (4 m bij model voor effect schaal).
- Effect achterland: dicht en open met λ van 2 m, 20 m, 200 m, en 500 m.
- Effect doorlatendheid k_{WVP} 3^e-11 m² en 3^e-10 m².
- Effect d_{70} 200 μ m en 300 μ m.
- Anisotropie A : factor 1 en 10.
- Effect van stapgrootte waarmee H_c wordt bepaald, H_{incr} van 0.1 m, 0.01 m en 0.001 m (en 0.0001 m voor model effect van schaal).

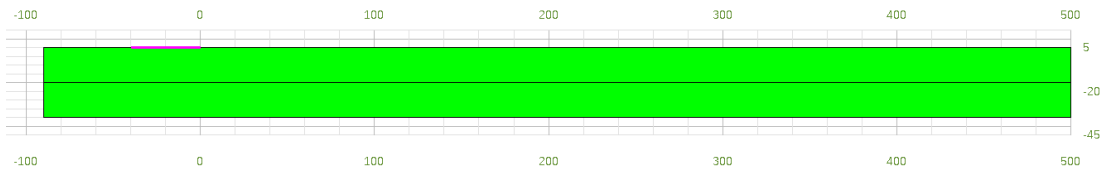
De proeven zijn in DgFlow (2D) gemodelleerd. Voor alle modellen is MPicard 1000, en de correctiefactor van 0,89 is toegepast voor overeenkomst met de rekenregel.

De dichte achterrand van het model is 500 m vanaf de binnenteen. In de modellen met een ondoorlatend achterland verlaat alle stroming het model door de pipe en de sloot en heeft de afstand van de achterrand geen invloed op de resultaten.

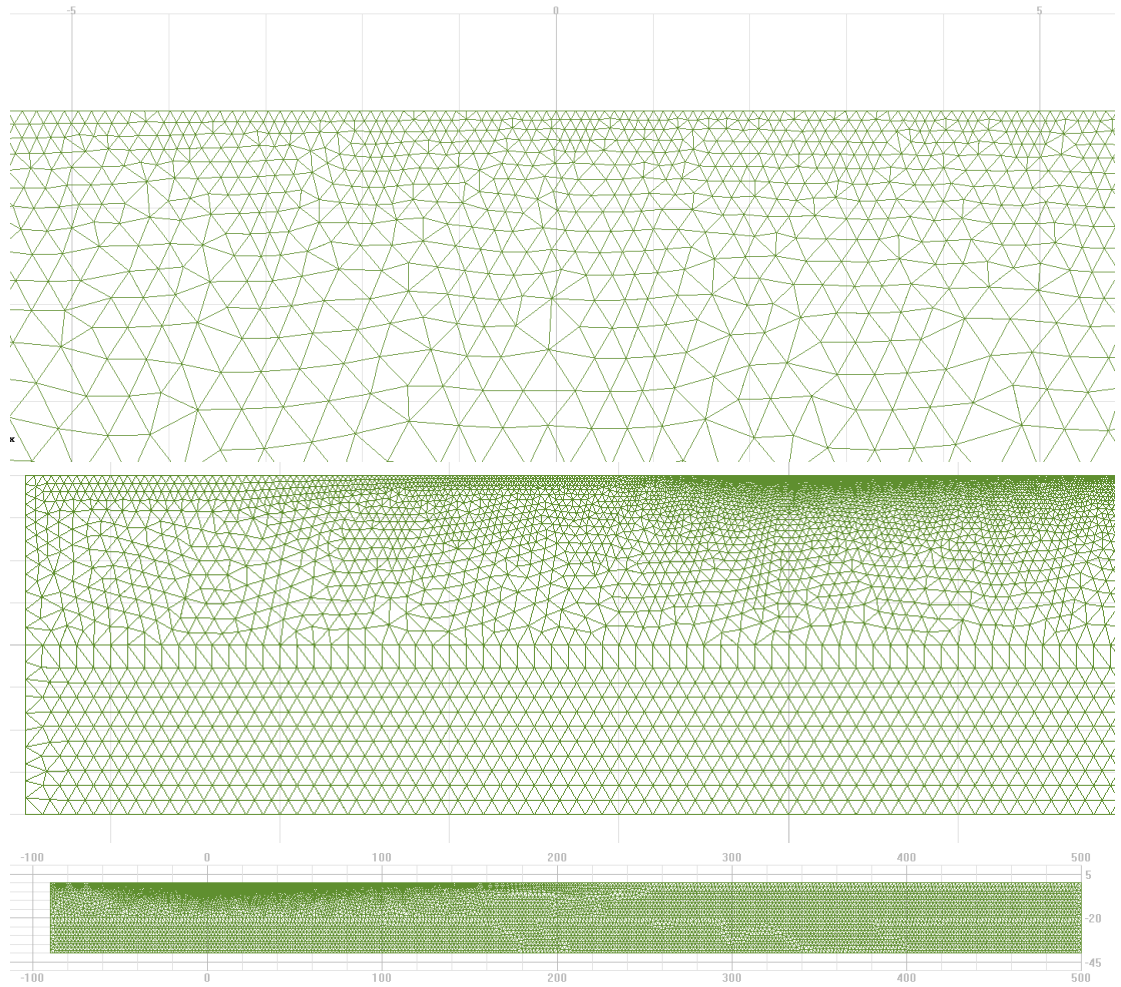
Voor de modellen met een semi-doorlatend achterland is deze achterrand op bijna 3 maal de leklengte voor modellen met λ_{AL} van 200 m en daarmee voldoende om geen significant effect op resultaten te hebben. De berekende H_c en L_c met de langste λ_{AL} van 500 m zijn gelijk aan die met een λ_{AL} van 200 m wat aangeeft dat de achterrand ook hier ver genoeg weg ligt. Een waarschijnlijke verklaring voor de constatering dat de achterrand in piping berekeningen dichter bij gelegd kan worden dan voor reguliere grondwaterstromingsberekeningen is het drainerende effect van de pipe. Daardoor gaat bij kritiek verval minder stroming naar het achterland, waardoor de invloed van die randvoorwaarde relatief kleiner is. Dit geldt bij kritiek verval, voor aanvang van pipegroei zal de locatie meer effect hebben.

De meshgrootte is gekozen om voldoende verfijning van de resultaten te bereiken, op basis van expert judgement. De mesh had elementen van 2 m als grootste elementen, de mesh was bij de pipe geleidelijk verfijnd naar 0.4 m elementen. Alle modellen hadden een sloot van 0.5 m breed als uitstroomvlak, hier was de mesh 0.1 m. (In het model voor het effect van schaal zijn ook mesh parameters met een factor 10 geschaald).

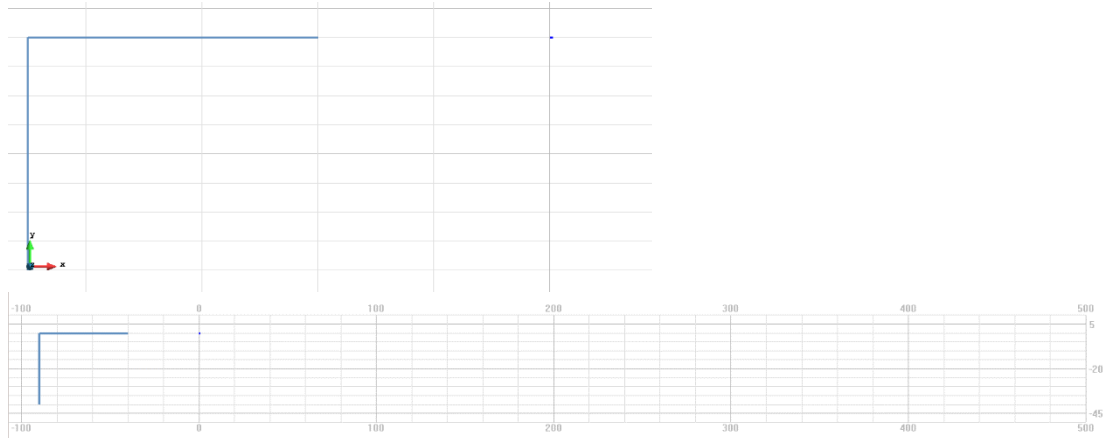
Onderstaande figuren tonen de geometrie met de materialen, randvoorwaarden, en de mesh.



Figuur 5.1 Geometrie in DgFlow, groen is het WVP roze is de pipe (getoond model WPV 40 m dik en $L_s=40$ m). De dijk is niet gemodelleerd maar zou boven de pipe aanwezig zijn.



Figuur 5.2 Mesh in DgFlow (boven close up bij uitstroompunt, midden uitgezoomd van uitstroompunt tot linker rand van model, onder gehele model. Elementen zijn maximaal 2 m groot, bij de pipe zijn elementen 0.40 m lang, en bij de uitstroomsloot 0.10 m.

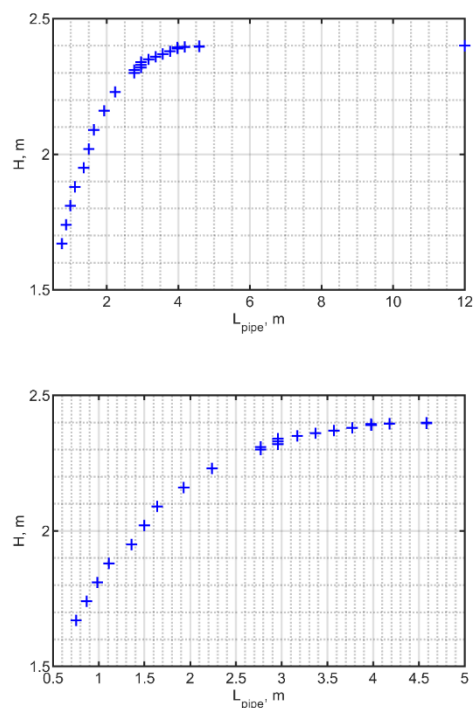


Figuur 5.3 Randvoorwaarden in DgFlow, linkzijdig is instroom randvoorwaarde, aangebracht over een lengte van 60 m horizontaal en de hele dikte van het WVP. De uitstroomrand is de sloot van 0.5 m breed (getoond model WPV 40 m dik en $L_s = 40$ m).

Een convergentie analyse is gedaan voor de stapgrootte van H_{incr} deze is beschreven in de volgende paragraaf.

5.2 Analyse van invloed van stapgrootte H_{incr} op L_c/L_s

De vlakke top van de H vs L curve, zoals onder getoond, betekent dat de stapgrootte waarmee het verval wordt verhoogd om H_c te bepalen (H_{incr}) meer invloed heeft op de bepaling van L_c dan op H_c . Hypothese H2b stelt dat H_{incr} daardoor een belangrijke invloed heeft op de modelresultaten voor L_c (het effect voor H_c is veel kleiner).



Figuur 5.4 Verval tegen pipelengte, voor model van Silvis proef T3 (zie ook Hoofdstuk 4)

Vanwege de overige onzekerheden in de piping analyse zal het niet altijd nodig zijn om met extreem kleine stappen te rekenen. Voor de onderbouwing of bepaalde parameters al dan niet een effect hebben is echter wel een hoge mate van precisie nodig. Voor de analyse of de

modellen de proeven benaderen is het ook van belang om rekening te houden met de mate van onderschatting ten gevolge van de numerieke instellingen. Daarom is een convergentie-analyse gedaan.

In het huidige hoofdstuk worden de resultaten van de modellen van de proeven van Allan (Allan Plane, Allan Circle, en Allan Plane K) en die van Silvis, evenals van modellen op veldschaal gebruikt om te onderbouwen wat een goede stapgrootte is voor de analyse van modellen van de proeven, en voor analyse van de modellen op veldschaal die het conceptuele model onderbouwen.

In de proeven is het ook goed mogelijk dat de stapgrootte waarmee het verval werd aangebracht invloed heeft op de geobserveerde pipelengte. De pipelengte waarmee verval werd verhoogd is daarom behandeld bij de analyse van de proeven in hoofdstuk 4.

Voor de proeven van Silvis is onderzocht welke stapgrootte in het model nodig was om convergentie van de berekende L_c te krijgen. Deze resultaten zijn in onderstaande tabellen opgenomen.

Tabel 5.1 Analyse van convergentie van berekende L_c als functie van de stapgrootte waarmee verval wordt aangebracht. H_{incr} , $H_{c, reken}$ en $L_{c, reken}$ zijn berekende kritiek verval en kritieke pipelengte bij deze stapgrootte. $H_{c, reken}$ en $L_{c, reken}$ zijn kritiek verval en kritieke pipelengte met H_{incr} waarbij resultaten geconvergeerd zijn.

model naam	H_{incr} m	$H_{c, reken}$ m	$L_{c, reken}$ m	$H_{c, conv}$ m	$L_{c, onv}$ m	$\frac{H_{c, reken}}{H_{c, conv}}$, %	$\frac{L_{c, reken}}{L_{c, conv}}$, %	$\frac{H_{incr}}{H_{c, conv}}$, %
Silvis_T2	0.01	1.88	2.96	1.8881	3.37	99.6%	87.9%	0.53%
Silvis_T2	0.001	1.888	3.37	1.8881	3.37	100.0%	100.0%	0.05%
Silvis_T2	0.0001	1.8881	3.37	1.8881	3.37	100.0%	100.0%	0.005%

Tabel 5.2 Analyse van convergentie van berekende L_c als functie van de stapgrootte waarmee verval wordt aangebracht. H_{incr} , $H_{c, reken}$ en $L_{c, reken}$ zijn berekende kritiek verval en kritieke pipelengte bij deze stapgrootte. $H_{c, reken}$ en $L_{c, reken}$ zijn kritiek verval en kritieke pipelengte met H_{incr} waarbij resultaten geconvergeerd zijn.

model naam	H_{incr} m	$H_{c, reken}$ m	$L_{c, reken}$ m	$H_{c, conv}$ m	$L_{c, onv}$ m	$\frac{H_{c, reken}}{H_{c, conv}}$, %	$\frac{L_{c, reken}}{L_{c, conv}}$, %	$\frac{H_{incr}}{H_{c, conv}}$, %
Silvis_T3	0.01	2.39	3.98	2.3995	4.58	99.6%	86.8%	0.42%
Silvis_T3	0.001	2.399	4.58	2.3995	4.58	100.0%	99.9%	0.04%
Silvis_T3	0.0001	2.3995	4.58	2.3995	4.58	100.0%	100.0%	0.004%

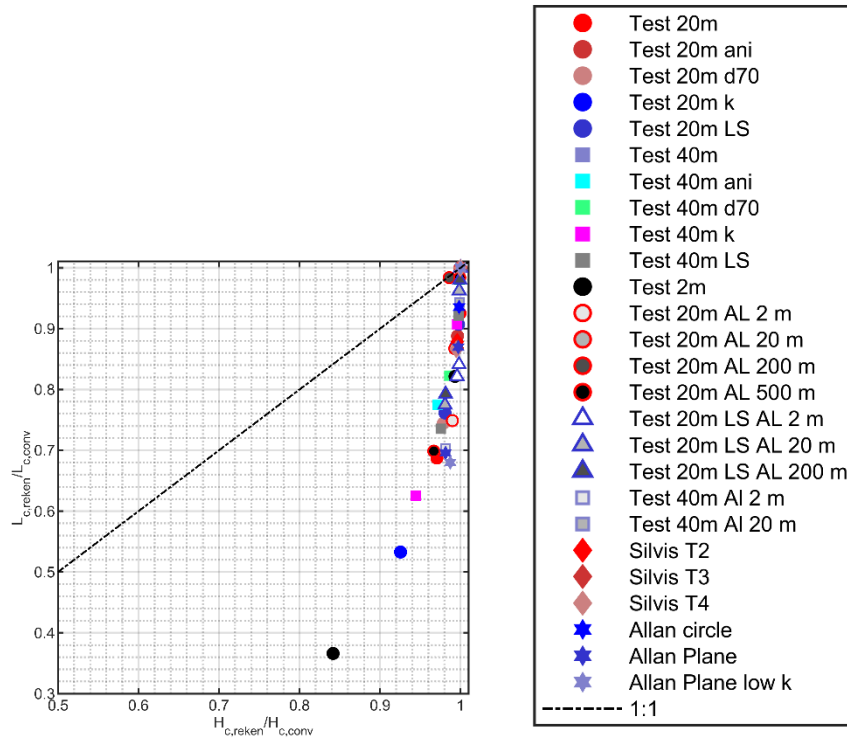
Tabel 5.3 Analyse van convergentie van berekende L_c als functie van de stapgrootte waarmee verval wordt aangebracht. H_{incr} , $H_{c, reken}$ en $L_{c, reken}$ zijn berekende kritiek verval en kritieke pipelengte bij deze stapgrootte. $H_{c, reken}$ en $L_{c, reken}$ zijn kritiek verval en kritieke pipelengte met H_{incr} waarbij resultaten geconvergeerd zijn.

model naam	H_{incr} m	$H_{c, reken}$ m	$L_{c, reken}$ m	$H_{c, conv}$ m	$L_{c, onv}$ m	$\frac{H_{c, reken}}{H_{c, conv}}$, %	$\frac{L_{c, reken}}{L_{c, conv}}$, %	$\frac{H_{incr}}{H_{c, conv}}$, %
Silvis_T4	0.01	1.36	2.24	1.3673	2.59	99.5%	86.6%	0.73%
Silvis_T4	0.001	1.367	2.59	1.3673	2.59	100.0%	100.0%	0.07%
Silvis_T4	0.0001	1.3673	2.59	1.3673	2.59	100.0%	100.0%	0.007%

Omdat de resultaten van L_c bij een stapgrootte van 0.001 m vrijwel gelijk zijn aan die bij een stapgrootte van 0.0001 m wordt geconcludeerd dat de stapgrootte van 0.001 m voldoende is voor convergentie voor deze proeven. Deze fijne stapgrootte is ca 0.04-0.07% van H_c betreft. Deze kleine stapgrootte is vanuit fysiek oogpunt niet realistisch, in de proeven is verval ook

met grotere stappen aangebracht. Echter bij een stapgrootte van 0.01 m (ca 0.4-0.7% van H_c) is de berekende pipelengte al ca 15% korter dan de pipelengte waarbij de berekening convergeert. Hoewel dat voor sommige toepassingen voldoende zou zijn is voor de analyse van de effecten van parameters een hogere precisie nodig.

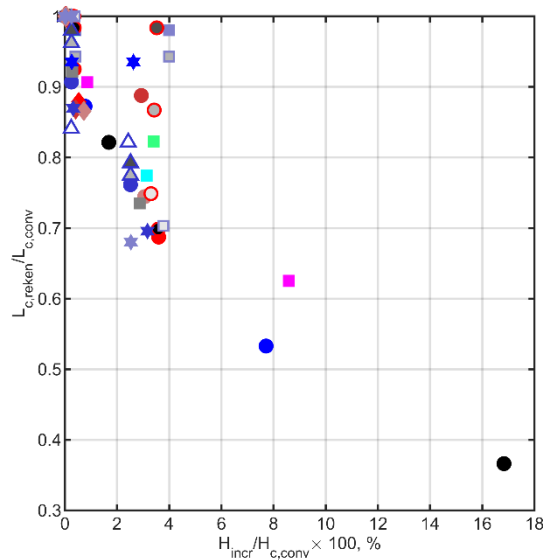
Om de convergentie te onderzoeken is voor modellen op veldschaal en de modellen van Silvis en Allan bij verschillende H_{incr} gekeken naar de verhouding tussen de gemodelleerde L_c en H_c en de L_c en H_c die gemodelleerd worden met een H_{incr} van 0.001 of 0.0001 m (al nagelang de schaal van het model). Die laatste waarden worden beschouwd als de geconvergeerde waarden $L_{c,conv}$ en $H_{c,conv}$. Onderstaande figuur toont de relatie.



Figuur 5.5 Resultaten van convergentie analyse.

Bovenstaande figuur toont dat de onderschatting van L_c significant groter is dan van H_c . Voor de veldschaal modellen, met 20 m en 40 m dikke WVP zijn de resultaten van H_c zijn allen boven 90% terwijl de berekende L_c beduidend kleiner zijn. Alle modellen, zowel met open, dicht als semi-doorlatend achterland lijken redelijk op een lijn te vallen. Ook lijkt vorm geen invloed te hebben, er is geen duidelijk onderscheid tussen de modellen met een D/L van 0.5 (de modellen van 2 m dikte en van 20 m dikte, m.u.v. Test 20 LS waar $D/L = 1/3$) en die met D/L van 1 (modellen van 40 m dikte, m.u.v. Test 40 LS waar $D/L = 2/3$); de resultaten lijken redelijk op een curve te plotten.

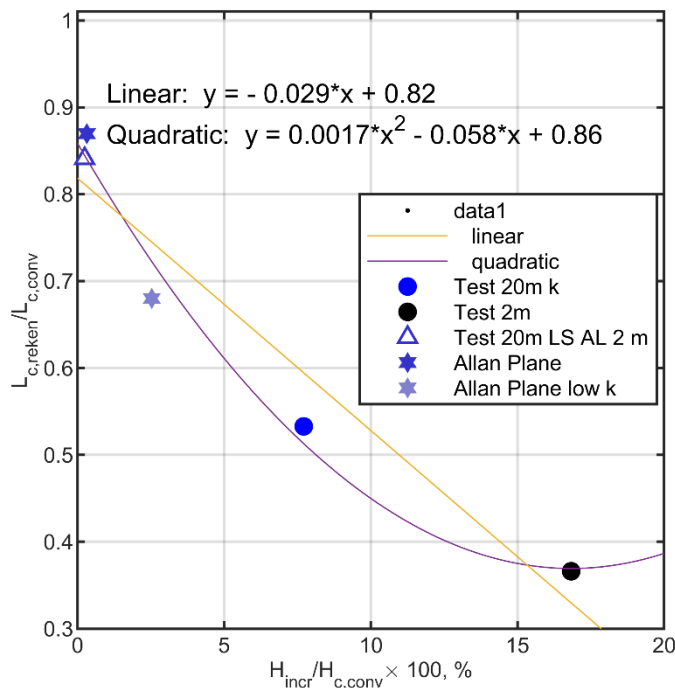
Echter hier kan niet direct een correlatie van afgeleid worden voor toepassing om de fout in L_c te schatten. De onzekerheid in H_c bij een bepaalde stapgrootte van verval H_{incr} zal immers niet op voorhand bekend zijn. Wel is H_{incr} bekend en de relatie daarvan is hieronder getoond.



Figuur 5.6 Resultaten van convergentie analyse voor 'test' modellen (zie details Hoofdstuk 4). (H_{incr} is stapgrootte waarmee verval was aangebracht, zie ook legenda van Figuur 5.1 voor overige symbolen).

Bovenstaande figuur toont de afwijking van de berekende pipelengte als functie van de stapgrootte waarmee verval is aangebracht. Hier is meer spreiding omdat de afwijking in L_c niet alleen afhangt van de stapgrootte H_{incr} maar ook van waar binnen die stapgrootte het kritieke verval valt. De verwachting zou zijn dat de maximale onderschatting van L_c optreedt wanneer de afstand van $H_{c, reken}$ tot $H_{c, conv}$ nagenoeg gelijk is aan H_{incr} . Echter, de punten die het laagste liggen zijn niet altijd die punten waar de afwijking van $H_{c, reken}$ in de orde grootte van H_{incr} ligt (dus waar $\frac{(H_c - H_{c, reken})}{H_{incr}} \rightarrow 1$).

Onderstaande figuur toont de punten aan de onderzijde van de curve. Voor modellen Test20m k en Test 2m is $\frac{(H_c - H_{c, reken})}{H_{incr}}$ bijna 1. Voor *Allan Plane low k* en *Test 20 m LS AL 2 m* echter is $\frac{(H_c - H_{c, reken})}{H_{incr}}$ echter 0.5 en 0.8 respectievelijk wat suggereert dat de onderschatting van L_c nog groter zou kunnen zijn. Mogelijk speelt hier wel een rol dat de pipe relatief kort is in deze modellen, doordat er relatief veel stroming naar het open/semi-doorlatende achterland kan stromen. Dit geeft aan dat de mate van maximale onderschatting ook model specifiek zal zijn en dat het op voorhand niet eenvoudig is aan te geven welke stapgrootte voldoende verfijning biedt.



Figuur 5.7 Resultaten van convergentie analyse waar de afwijking van $L_{c,reken}$ het grootste is

Ter indicatie zijn een lineaire en kwadratische curve gefit op de data in bovenstaande figuur. Deze fits geven een eerste inschatting van de maximale afwijking ten gevolge van de stapgrootte van H_{incr} in de berekeningen maar zijn niet bedoeld voor generieke toepassing. In bovenstaande figuur is te zien dat de onderschatting groter is dan met de lijn wordt ingeschat. De kwadratische functie lijkt beter en geeft aan dat de curve afvlakt, echter er zijn weinig punten om deze te fitten. Wel zou op basis van de H vs L curve ook verwacht worden dat de gevoeligheid van L voor H afneemt naarmate men verder van H_c komt door een grotere stapgrootte. Opgemerkt wordt dat ook andere instellingen, mesh fijnheid en MPicard getal invloed hebben op de convergentie van L_c . Mede daarom zijn bovenstaande functies niet geschikt om de onzekerheid voor andere modellen te bepalen.

De bovengrens van de bandbreedte is theoretisch gezien gelijk aan 1. In theorie is het zelfs mogelijk om met een hele grove stapgrootte exact $H_{c,conv}$ te bepalen en dus een minimale afstand te hebben.

Zeker voor veldschaal modellen is het onwenselijk om met extreem fijne stappen verval aan te brengen vanwege de lange rekentijden. Door van grof naar fijn te werken is in de huidige analyse eerst met grotere rekenstappen en dan fijnere H_c bepaald.

Om inzicht te krijgen of de ontwikkeling van de pipe in de stappen voor H_c informatie bevat waaruit afgeleid kan worden hoeveel L_c nog onderschat wordt zijn deze rekenresultaten (output van DgFlow in pip files) geanalyseerd. Hier bleken geen consistente trends uit. Met de fijnste stapgrootte, $<0.03\%$ van H_c of kleiner groeit de pipe vaak niet in een aantal stappen onder H_c . De resultaten bij een stapgrootte van 0.3% tonen geen consistente relaties die gekoppeld zouden kunnen worden aan de verwachtingen op basis van de fysica van pipegroei. Mogelijk speelt hierbij een rol dat de dataset nog te beperkt is, of dat ook andere parameters (meshgrootte, MPicard) invloed hebben wanneer zo nauwkeurig wordt gekeken. Mogelijk zou een andere implementatie van het model van Sellmeijer, of een iteratie algoritme de mogelijkheid bieden L_c effectiever en sneller te bepalen.

Samenvattend kan worden gesteld dat:

- $H_{conv} - H_{reken} < H_{incr}$.
- $L_{conv} > L_{c,reken}$; de maximale onderschatting is afhankelijk van zowel H_{incr}/H_c als model specifieke eigenschappen en rekeningstellingen.

In de voorliggende analyse was een stapgrootte H_{incr} van ca. 0.3% van H_c voor de meeste modellen wel voldoende voor convergentie (dat wil zeggen dat de resultaten van L_c veelal gelijk waren of minder dan 5% afweken van de resultaten met een H_{incr} van 0.03% van H_c). Echter er waren wel nog enkele gevallen waarmee dan nog een onderschatting van tot ca 10% optrad.

Daarom is voor de modellen van de proeven de analyse gedaan met een H_{incr} van 0.04%; deze stapgrootte is ook gehanteerd voor het grootste deel van de veldschaal modellen, behalve daar waar de te bepalen effecten deze nauwkeurigheid niet vereisten.

5.3 Analyse veldschaal modellen met dicht achterland

De resultaten van de veldschaal modellen met een gesloten achterland zijn in onderstaande tabel samengevat voor $H_{incr} = 0.001$ m en de analyse is voor deze resultaten uitgevoerd.

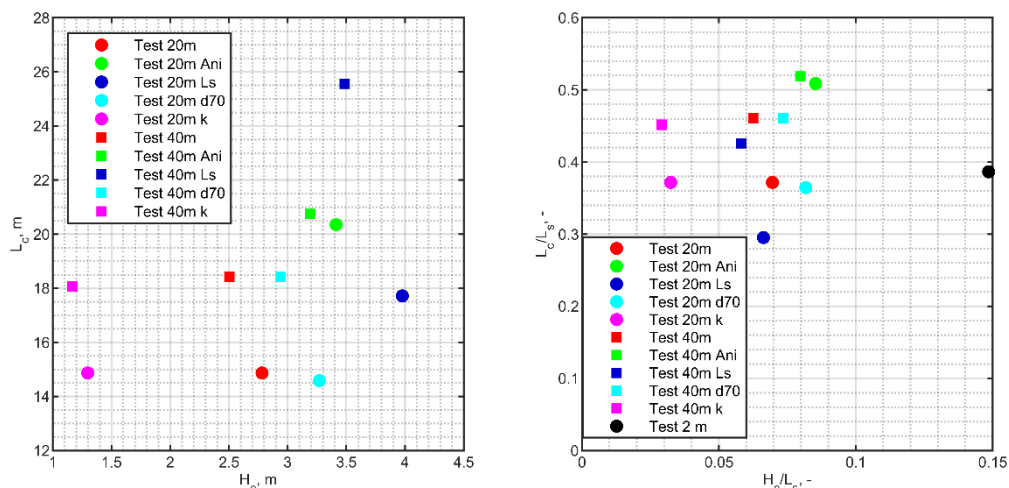
Voor al deze modellen zijn ook berekeningen met grovere stapgrootten van 0.01 m en 0.1 m gedaan, daaruit bleek dat de nauwkeurigheid van de berekende L_c onvoldoende was om de verwachte relatieve effecten van parameters te onderbouwen.

Tabel 5.4 Overzicht resultaten van berekeningen op veldschaal modellen (en een kleiner model voor analyse schaal effecten) met dicht achterland ($H_{incr} = 0.001$ voor alle modellen m. u. v. Test 2 m daar is $H_{incr} 0.0001$).

Modelnaam	D m	L_s m	d_{70} , m	k_{WVP} m ²	A	H_c	L_c
Test 20m	20	40	2.00E-04	3.00E-11	1	2.782	14.9
Test 20m Ani	20	40	2.00E-04	3.00E-11	10	3.413	20.4
Test 20m d70	20	40	3.00E-04	3.00E-11	1	3.270	14.6
Test 20m Ls	20	60	2.00E-04	3.00E-11	1	3.977	17.7
Test 20m k	20	40	2.00E-04	3.00E-10	1	1.297	14.9
Test 40m	40	40	2.00E-04	3.00E-11	1	2.503	18.4
Test 40m Ani	40	40	2.00E-04	3.00E-11	10	3.191	20.8
Test 40m d70	40	40	3.00E-04	3.00E-11	1	2.942	18.4
Test 40m Ls	40	60	2.00E-04	3.00E-11	1	3.486	25.6
Test 40m k	40	40	2.00E-04	3.00E-10	1	1.165	18.1
Test 2 m	2	4	2.00E-04	3.00E-11	1	0.5941	1.55
Test 30 m L60 m*	30	60	2.00E-04	3.00E-11	1	3.652	23.16

*Dit model is niet gebruikt voor de basis gevoeligheidsanalyse maar toegevoegd in het kader van de analyse van het gecombineerde effect van vorm en de doorlatendheid van het achterland.

Het effect van de verschillende parameters is in onderstaande figuur duidelijk herkenbaar.



Figuur 5.8 Resultaten van berekeningen met veldschaal modellen voor een dicht achterland. (n.b. effect van schaal alleen toegevoegd in rechter figuur t.b.v. interpretatie)

Samenvattend zijn de resultaten voor L_c in overeenstemming met het conceptuele model:

- k_{WVP} heeft geen significant effect op L_c/L_s (zoals verwacht met *hypothese H6*).
- d_{70} heeft geen significant effect op L_c/L_s (zoals verwacht met *hypothese H7*).
- L_s een langere kwelweglengte, 60 m ipv 40 m, leidt tot een kleinere D/L en een kleinere L_c/L_s (zoals verwacht met *hypothese H4*).
- A leidt tot een hogere L_c/L_s (zoals verwacht met *hypothese H8*).
- D een grotere dikte bij gelijke kwelweglengte leidt tot een hogere L_c/L_s (zoals verwacht met *hypothese H4*).
- *Schaal* heeft geen significant effect op L_c/L_s (zoals verwacht met *hypothese H5*).

Onderstaande tabel toont ook de effecten van parameters relatief aan de basis berekening (test 20 m en test 40 m respectievelijk).

Tabel 5.5 Samenvatting van effecten van parameters relatief aan de basis berekening.

Effect van parameter ten opzichte van basis berekening	$\frac{L_c \text{ variant}}{L_s} \frac{L_c \text{ basis}}{L_c}$ bij 20 m diep WVP	$\frac{H_c/L_s \text{ variant}}{H_c/L_s \text{ basis}}$ bij 20 m diep WVP	$\frac{L_c \text{ variant}}{L_s} \frac{L_c \text{ basis}}{L_c}$ bij 40 m diep wvp	$\frac{H_c/L_s \text{ variant}}{H_c/L_s \text{ basis}}$ bij 40 m diep WVP
anisotropie = 10	1.4	1.23	1.1	1.3
$d_{70} \times 1.5$	1.0	1.18	1.0	1.2
Dijkbasis $\times 1.5$	0.8	0.95	0.9	0.93
Doorlatendheid WVP $\times 10$	1.0	0.47	1.0	0.47
Schaal factor 10 kleiner	1.0	2.14	n.v.t.	n.v.t

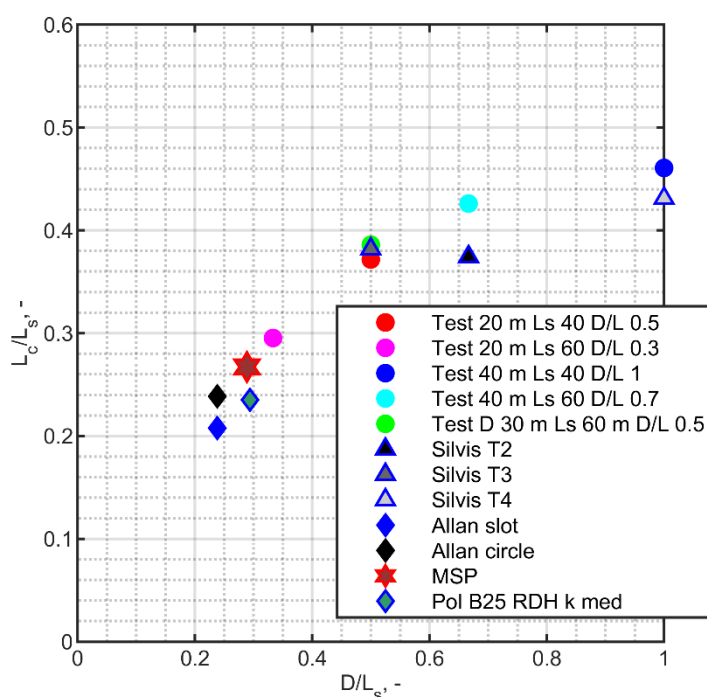
De onderstaande tabel toont het effect van dikte voor zowel de basis berekening als voor alle parameters.

Tabel 5.6 Samenvatting effect van dikte van het watervoerend pakket voor veldschaal modellen met een dicht achterland

Variant	$\frac{L_c}{D}$ 20 m WVP	$\frac{H_c}{H_c}$ 20 m WVP
	$\frac{L_c}{D}$ 40 m WVP	$\frac{H_c}{H_c}$ 40 m WVP
basis	0.8	1.11
anisotropie = 10	1.0	1.07
$d_{70} \times 1.5$	0.8	1.11
Dijkbasis $\times 1.5$	0.7	1.14
Doorlatendheid WVP $\times 10$	0.8	1.11

Een aantal zaken vallen op met betrekking op het relatieve belang van de verschillende parameters voor L_c/L_s .

- Anisotropie heeft een groter effect op L_c/L_s bij het dunnere pakket. Bij een anisotroop dik en dun pakket is de pipelengte nagenoeg gelijk. Het effect van D/L wordt dus kleiner wanneer anisotropie een rol speelt. Waarschijnlijk is het effect van anisotropie op de kromming van de stijghoogtecontouren voor deze modellen zodanig groot dat het effect van D/L op de vorm van de stijghoogtecontouren relatief minder belangrijk wordt.
- Het effect van dikte op L_c/L_s is niet afhankelijk van d_{70} of van k_{WVP} .
- Het effect van dikte voor de modellen met een grotere kwelweg is kleiner, maar hier speelt ook de relatieve verandering van D/L . De relatie tussen gemodelleerde L_c/L_s en D/L is hieronder weergegeven op basis van deze modellen, en de modellen van de proeven uit hoofdstuk 4 met een dicht achterland.



Figuur 5.9 Resultaten van berekeningen met veldschaal modellen voor een dicht achterland en modellen voor experimenten met een dicht achterland.

5.4 Analyse veldschaal modellen met semi-doorlatend achterland

Het effect van een semi-doorlatend achterland op de pipelengte is geanalyseerd met modellen met een stapgrootte van H_{incr} van 0.01 m en 0.001 m. Hierin is de leklengte $\lambda_{AL} = \sqrt{k_{WVP} D d / k_{deklaag}}$ gevarieerd ($k_{deklaag}$ is doorlatendheid van de deklaag, d is dikte deklaag). Modellen met een dikte van 20 m en 40 m zijn gebruikt, met dezelfde k_{WVP} , d , en variatie in λ_{AL} ; dat wil zeggen dat de $k_{deklaag}$ voor deze modellen anders is. Hierdoor kon ook het effect van D/L bij een semi-doorlatend achterland geanalyseerd worden (H4b).

Tevens is een analyse gedaan om het effect van k_{WVP} bij een semi-doorlatend achterland te beschouwen. De hypothese (H6) is dat k_{WVP} geen effect heeft op L_c bij een dicht achterland. Maar door het effect op λ_{AL} (indien $k_{deklaag}$ constant is) beïnvloed k_{WVP} L_c wel (H6b). In deze analyse is λ_{AL} dus anders.

Onderstaande tabel toont de resultaten met stapgrootte 0.01 m. Omdat de toename van λ_{AL} van 200 m naar 500 m niet significant is zijn de verdere analyses met een stapgrootte van 0.001 m uitgevoerd met λ_{AL} van 2 m, 20 m en 200 m.

Tabel 5.7 Overzicht resultaten van berekeningen op veldschaal modellen met semi-doorlatend achterland ($H_{incr} = 0.01$) voor analyse effect van achterland leklengte (λ_{AL}).

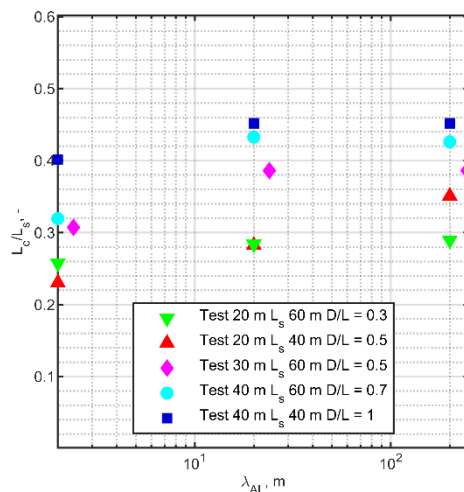
Modelnaam	D m	L_s m	d_{70} , m	k_{WVP} m ²	λ_{AL}	H_c	L_c
Test 20m AL2	20	40	3.00E-11	2.00E-04	2	3.03	9.2
Test 20m AL20	20	40	3.00E-11	2.00E-04	20	2.92	11.3
Test 20m AL200	20	40	3.00E-11	2.00E-04	200	2.80	13.8
Test 20m AL500	20	40	3.00E-11	2.00E-04	500	2.79	13.8
Test 20m Ls 60m AL2	20	60	3.00E-11	2.00E-04	2	4.11	13.0
Test 20m Ls 60m AL20	20	60	3.00E-11	2.00E-04	20	3.97	16.4
Test 20m Ls 60m AL200	20	60	3.00E-11	2.00E-04	200	3.97	16.7
Test 20m Ls 60m AL500	20	60	3.00E-11	2.00E-04	500	3.97	16.7
Test 40m AL2	40	40	3.00E-11	2.00E-04	2	2.65	16.1
Test 40m AL20	40	40	3.00E-11	2.00E-04	20	2.50	17.0
Test 40m AL200	40	40	3.00E-11	2.00E-04	200	2.50	18.1
Test 40m AL500	40	40	3.00E-11	2.00E-04	500	2.50	18.1
Test 40m Ls 60m AL2	40	60	3.00E-11	2.00E-04	2	3.63	19.2
Test 40m Ls 60m AL20	40	60	3.00E-11	2.00E-04	20	3.48	22.8
Test 40m Ls 60m AL200	40	60	3.00E-11	2.00E-04	200	3.48	24.0
Test 40m Ls 60m AL500	40	60	3.00E-11	2.00E-04	500	3.48	24.0

De resultaten van de modellen met stapgrootte 0.001 m zijn hieronder samengevat.

Tabel 5.8 Overzicht resultaten van berekeningen op veldschaal modellen met semi-doorlatend achterland ($H_{incr} = 0.001$) voor analyse effect van achterland leklengte (λ_{AL}) (voor het onderzoek naar schaafeffecten zijn 2 kleinere modellen opgenomen).

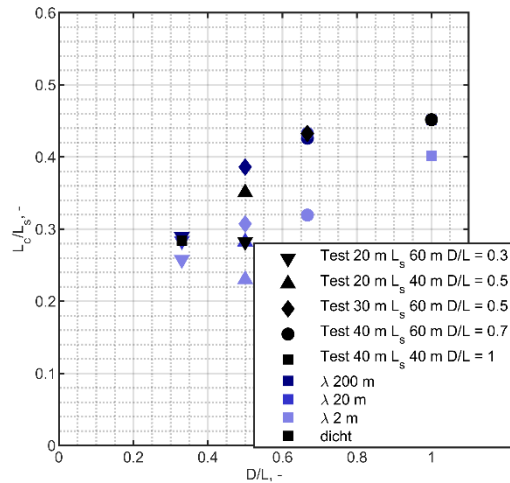
Modelnaam	D m	L_s m	d_{70} , m	k_{WVP} m ²	λ_{AL}	H_c	L_c
Test 20m AL2	20	40	3.00E-11	2.00E-04	2	3.031	9.2
Test 20m AL20	20	40	3.00E-11	2.00E-04	20	2.921	11.3
Test 20m AL200	20	40	3.00E-11	2.00E-04	200	2.804	14.0
Test 20m AL500	20	40	3.00E-11	2.00E-04	500	2.793	14.0
Test 20m Ls 60m AL2	20	60	3.00E-11	2.00E-04	2	4.118	15.5
Test 20m Ls 60m AL20	20	60	3.00E-11	2.00E-04	20	3.977	17.0
Test 20m Ls 60m AL200	20	60	3.00E-11	2.00E-04	200	3.974	17.4
Test 40m AL2	40	40	3.00E-11	2.00E-04	2	2.650	16.1
Test 40m AL20	40	40	3.00E-11	2.00E-04	20	2.504	18.1
Test 40m AL200	40	40	3.00E-11	2.00E-04	200	2.502	18.1
Test 40m Ls 60m AL2	40	60	3.00E-11	2.00E-04	2	3.630	19.2
Test 40m Ls 60m AL20	40	60	3.00E-11	2.00E-04	20	3.489	25.6
Test 40m Ls 60m AL200	40	60	3.00E-11	2.00E-04	200	3.486	25.6
Test 2 m AL 0.2 ⁺	4	2	3.00E-11	2.00E-04	0.2	0.647	1.01
Test 2 m AL 2 ⁺	4	2	3.00E-11	2.00E-04	2	0.624	1.29
Test 30 m Ls 60 m AL2	30	60	3.00E-11	2.00E-04	2	3.797	18.43
Test 30 m Ls 60 m AL24	30	60	3.00E-11	2.00E-04	24	3.655	23.16
Test 30 m Ls 60 m AL244	30	60	3.00E-11	2.00E-04	245	3.652	23.16

⁺Stapgrootte 0.0001 vanwege kleinere schaal van dit model.



Figuur 5.10 Berekende L_c/L_s als functie van de leklengte van het achterland voor modellen met veldschaal.

Een kortere leklengte leidt tot een kortere L_c/L_s voor een gegeven modelgeometrie zoals verwacht op basis van hypothese H9. De toename van spreidingslengte van 20 m naar 200 m heeft een relatief kleiner effect dan de toename van 2 m naar 20 m. Het relatieve effect van de leklengte van het achterland hangt ook af van de geometrie zoals hieronder getoond. Onderstaande figuur toont het effect van vorm D/L op L_c/L_s bij een ondoorlatend en semi-doorlatend achterland.



Figuur 5.11 effect van D/L in veldschaal modellen met dicht en semi-doorlatend achterland.

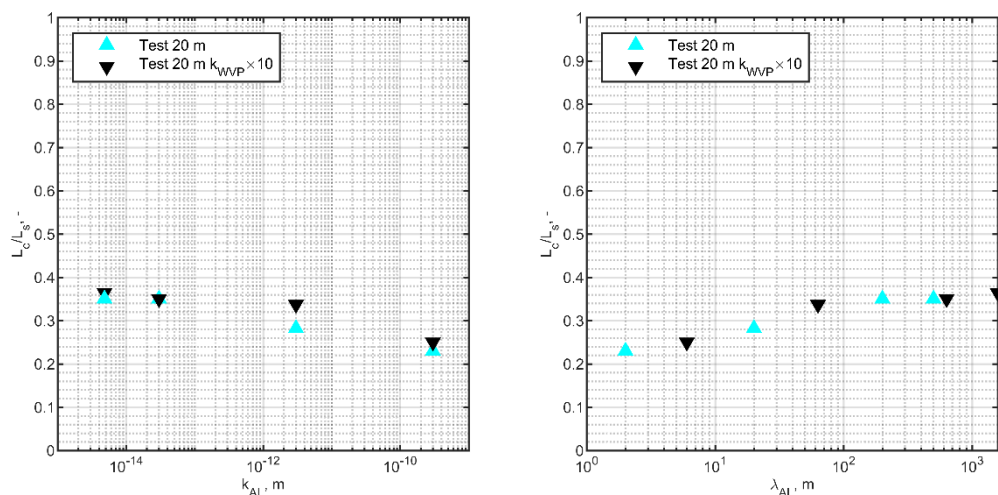
Een semi-doorlatend achterland leidt tot een kortere L_c/L_s dan een dicht achterland bij een gegeven D/L en L_s . De mate van het effect van zowel λ_{AL} en D/L varieert en wordt ook beïnvloed door schaal (L_s) omdat deze elkaar beïnvloeden.

Een hogere D/L leidt voor de meeste gevallen wel tot langere L_c/L_s maar dit beeld is complexer. Met een semi-doorlatend achterland speelt ook de relatie van de λ_{AL} tot L_c en D/L een rol.

Voor een semi-doorlatend achterland is bij de modellen met de kleinste D/L van 0.3 (model 20 m dik L_s 60 m) nauwelijks effect van de doorlatendheid van het achterland. Mogelijk is dit omdat bij dergelijke dunne pakketten het grootste deel van de stroming al naar de pipe gaat, zodat het achterland relatief minder invloed heeft.

Als we kijken naar het effect van D/L bij een gegeven λ_{AL} valt op dat bij een λ_{AL} van 2 m de toename in D/L niet altijd leidt tot een toename van L_c/L_s . Dit kan mogelijk worden verklaard aan de hand van de kortere L_s in dit model en de complexe interactie tussen schaal, vorm en λ_{AL} . Omdat een semi-doorlatend achterland effect heeft op de totale uitstroombuig (zie *hypothese H9*) wordt de verhouding van λ_{AL} ten opzichte van L_c ook relevant. Deze effecten maken de analyse en interpretatie van de effecten van individuele parameters complex.

Een andere doorlatendheid van het WVP heeft geen significant effect bij een dicht achterland (Hypothese H6) maar wel als het achterland semi-doorlatend is met een gegeven doorlatendheid van de deklaag. In dat geval beïnvloedt k_{WVP} λ_{AL} . Dit is geanalyseerd met modellen waarin k_{WVP} met een factor 10 is verhoogd. De resultaten zijn hieronder weergegeven.



Figuur 5.12 effect van k_{WVP} in veldschaal modellen met semi-doorlatend achterland.

Omdat het model met de basis doorlatendheid en het model met de hogere doorlatendheid dezelfde doorlatendheid van de deklaag in het achterland ($k_{deklaag,AL}$) hadden was de lek lengte niet gelijk. De linker figuur toont langere pipes bij het meer doorlatende pakket. De rechter figuur toont de verwachte trend als resultaten in termen van lek lengte worden gepresenteerd. Dit ondersteunt hypothesen 6b en 9. Ook hier geldt dat de complexiteit toeneemt door de verschillende effecten die samen een rol spelen.

Het effect van schaal bij een doorlatend achterland is complex zoals ook beschreven bij de analyse van D/L . De verwachting is dat de relatie van de absolute pipelengte tot de lek lengte van belang is, dan zal het effect van de lek lengte achterland ook afhankelijk zijn van schaal.

Het effect van schaal is onderzocht met het model Test 2 m AL 2 m. Voor een dicht achterland (model Test 2 m) was L_c/L_s voor dit model vrijwel gelijk aan L_c/L_s voor het model Test 20 m waardoor het effect van schaal insignificant bleek voor die situatie.

Met een doorlatend achterland is de relatie van de lek lengte tot de pipelengte, en dus tot de schaal van belang. Onderstaande tabel toont dat L_c/L_s voor dezelfde λ_{AL} groter is voor het model met de kleinere schaal. Dit is omdat de λ_{AL} relatief groter is ten opzichte van de pipelengte. Maar ook met een vergelijkbare verhouding tussen λ_{AL} en L_s is L_c/L_s nog hoger bij het kleine schaal model (het verschil is echter relatief klein, ca <10% van L_c).

Tabel 5.9 modellen effect schaal bij semi-doorlatend achterland.

Modelnaam	L_s , m	λ_{AL} , m	$K_{deklaag,AL}$, m ²	L_c	L_c/L_s %
Test 20 m	40	Dicht	Dicht	14.9	37
Test 20 m AL 2	40	2	3E-10	9.2	23
Test 20 m AL 20	40	20	3E-12	11.3	28
Test 20 m AL 200	40	200	3E-14	14.0	35
Test 2 m	4	Dicht	Dicht	1.55	39
Test 2 m AL 0.2	4	2	3E-10	1.01	25
Test 2 m AL 2	4	0.2	3E-12	1.29	32

5.5 Samenvatting modellen veldschaal en laboratoriumschaal

Modellen op de veldschaal en de laboratoriumschaal zijn in hoofdstukken 4 en 5 onderzocht om de hypothesen uit het conceptuele model te onderbouwen. Hieruit blijkt dat voor isotrope pakketten, de vorm van het WVP en de lek lengte van het achterland het grootste effect op L_c/L_s hebben voor situatie 1. De doorlatendheid van het WVP zelf, evenals de d_{70} of de schaal blijken weinig tot geen effect te hebben.

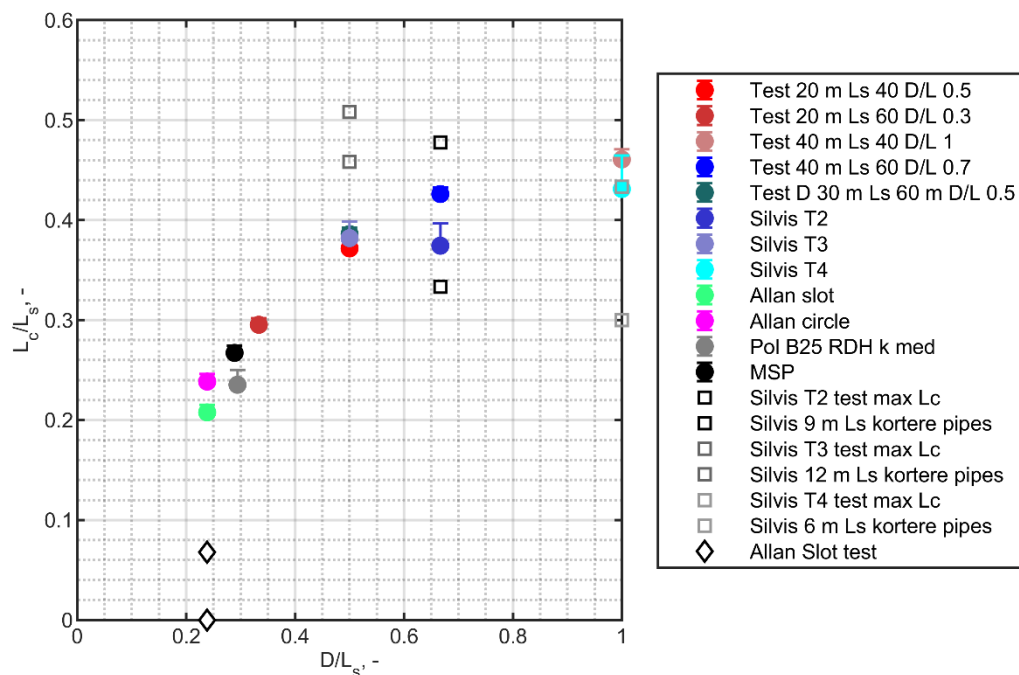
Deze parameters hebben wel significant effect op H_c/L_s , zoals in eerdere onderzoeken is aangetoond (bijv. (Sellmeijer, 1988; Vera. M. van Beek, 2015)).

Deze alinea verzameld de resultaten van de modellen uit hoofdstukken 4 en 5 in relatie tot het effect van D/L en achterland.

In de convergentie analyse is het effect van de H_{incr} onderzocht, grovere stappen van H_{incr} kunnen tot onderschatting van L_c leiden. Naast H_{incr} hebben ook de mesh, en met name de lengte van de pipe elementen en het MPicard getal invloed op de nauwkeurigheid van de resultaten. Het MPicard getal is in alle modellen 1000 geweest, de standaard waarde voor analyses met DgFlow. De grootte van de pipe elementen was in de modellen over het algemeen kleiner dan 5% van L_c . In deze paragraaf wordt de elementgrootte van de pipe elementen als onzekerheid in de pipelengte meegenomen.

5.5.1 Dicht achterland

De modellen met een dicht achterland, en waar beschikbaar proeven van situatie 1 met een dicht achterland zijn hieronder getoond. De modellen hebben andere schaal, d_{70} en k_{WVP} (zie details van modellen in hoofdstuk 4 en 5) echter een duidelijke trend is herkenbaar.

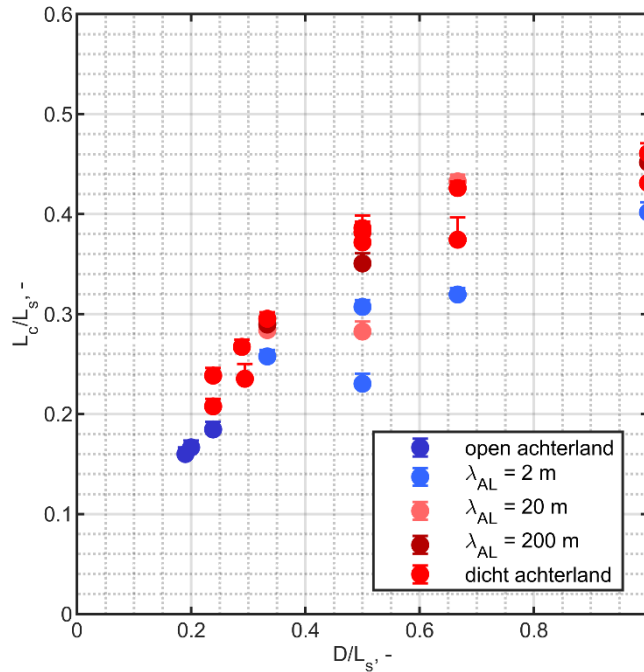


Figuur 5.13 Samenvatting modellen van proeven en veldschaal met een dicht achterland en proefresultaten van proeven voor situatie 1 (n.b. voor de slot proeven van Allan is de vraag of deze situatie 1 zijn, zie details van modellen in hoofdstuk 4).

5.5.2 Semi-doorlatend en dicht achterland

De resultaten van modellen met open, dicht en met semi-doorlatend achterland zijn in onderstaande figuur samengevat. Hier is te zien dat de modellen met een dicht achterland leiden tot de langste L_c/L_s . Daar lijkt ook een trend te zijn voor L_c/L_s ten opzichte van D/L die overeenkomt met de verwachting op basis van het conceptuele model.

Voor een gegeven geometrie leidt een toename in de doorlatendheid van het achterland (afname in de λ_{AL}) tot een afname in L_c/L_s , maar de grootte van het effect is mede afhankelijk van de geometrie en schaal. Dit verklaart dat er voor een geometrie met een dicht achterland wel sprake lijkt te zijn van een trend voor L_c/L_s ten opzichte van D/L maar dat dit met een semi-doorlatend achterland niet het geval is.



Figuur 5.14 Resultaten van modelberekeningen van proeven en op veldschaal.

Het conceptuele model verklaart kwalitatief het effect van verschillende parameters, en ook hun invloed op elkaar. Maar dit strekt niet tot het bepalen van kwantitatieve effecten, zodat enige voorzichtigheid geboden is bij het interpreteren van bovenstaande trend. Aangezien hier slechts een beperkt aantal modellen is opgenomen, en verschillende (numerieke) parameters invloed hebben op de modelresultaten zou een verdere analyse met een bredere dataset nodig zijn om effecten van D/L in relatie tot λ_{AL} nader te duiden en om aan te geven wat het kwantitatieve effect van het achterland is in specifieke situaties.

6 Berekeningen voorlandlengte oprekken

In dit hoofdstuk wordt het effect van voorland meenemen voor cases in verschillende gebieden in Nederland uitgewerkt. Doel hiervan is om voor in het veld voorkomende situaties de pipelengte te berekenen en na te gaan of de effecten van parameters, geometrie, en doorlatendheid van de deklaag, in lijn zijn met de verwachting op basis van het conceptuele model. Op basis van gesprekken met Waterschappers zijn kenmerkende geometrieën en parametersets bepaald. Hiervoor is de pipelengte berekend, en in het hoofdstuk wordt duiding gegeven aan de effecten van parameters. Tevens wordt expliciet aandacht besteed aan het werken met DgFlow en keuzes in numerieke instellingen en meshgrootte in relatie tot pipelengte berekeningen.

6.1 Inventarisatie gegevens en varianten

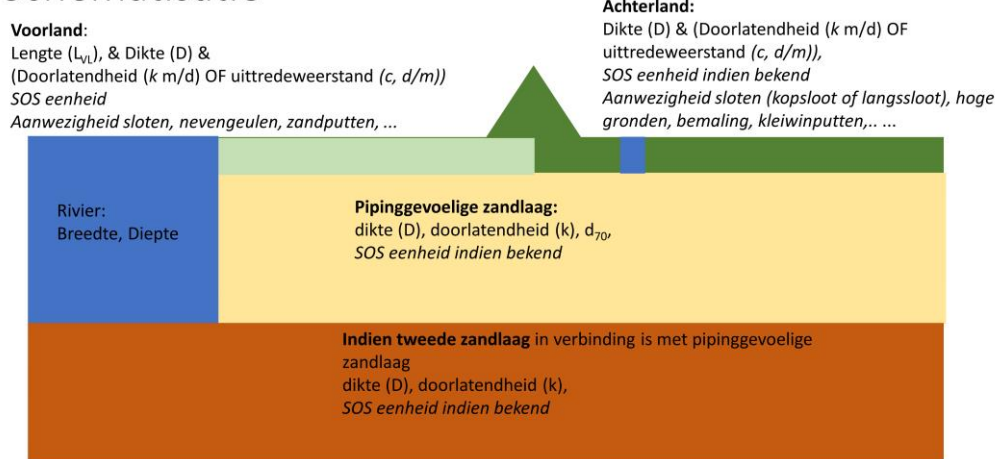
6.1.1 Inventarisatie van gegevens

Waterschappen zijn benaderd om deel te nemen aan interviews waarbij een schematisatie wordt gemaakt van gevallen in hun gebied waar:

1. Terugschrijdende erosie een relevant faalmechanisme is.
2. Er fysiek gezien (veel) meer voorland aanwezig is dan nu wordt meegenomen.

In de interviews is gevraagd om inzicht in de kenmerkende waarden van parameters en bandbreedtes daarvan. Hierbij wordt nadrukkelijk opgemerkt dat er veel variatie is in de gebieden en dat de schematisatie bedoeld is om een eerste indruk te geven van wat globaal gezien verwacht kan worden. In sommige gevallen was het tijdens gesprekken niet mogelijk bepaalde parameters of bandbreedtes te benoemen en hebben waterschappers de informatie naderhand aan de hand van gegevens in recente projecten (bijv. uit het SOS) ingevuld. De relevante parameters worden in Figuur 6.1 weergegeven.

Schematisatie



Figuur 6.1 Schematisatie waarvoor gegevens gevraagd worden om relevante scenario's te bepalen voor verdere analyse.

Gegevens zijn omgerekend naar transmissiviteit van het watervoerend pakket WVP:

$$KD = \text{doorlatendheid WVP}(K_{WVP}) \times \text{dikte WVP}(D) \text{ [m}^2\text{/dag]}.$$

En intrede c.q. uittrede weerstand van de deklaag in het voor en achterland respectievelijk.

$$c = \frac{\text{dikte deklaag } (d)}{\text{doorlatendheid deklaag } (K_{deklaag})} \text{ [dagen]}$$

Een overzicht van de bandbreedtes van de relevante parameters is getoond in Tabel 6.1. Hier zijn de gegevens ingedeeld op gebied waarop deze betrekking hebben. Opgemerkt wordt dat niet alle benaderde waterschappen ingegaan zijn op het verzoek tot een gesprek, mede doordat voor sommige waterschappen piping geen belangrijk onderdeel van de overstromingskans vormt.

Tabel 6.1 Overzicht van gegevens van waterschappen omgerekend naar KD waarden (rep is representatief, min is ca 5% ondergrens, max is ca. 5% bovengrens)

Gebied	Dijk basis, m	Lengte Voorland			Gewogen K_{WVP} , m/dag			Dikte WVP totaal, m			$K_{WVP}D$, m ² /dag			c voorland, dagen			c achterland, dagen			d_{70} , μm
		Rep	Rep	Min	Max	Rep	Min	Max	Rep	Min	Max	Rep	Min	Max	Rep	Min	Max	Rep	Min	
Getijdengebied	100	600	400	960	10	15	24	42	31	53	408	455	1295	900	225	1125	525	100	900	125
Getijdengebied	60	100	50	400	2	1	4	25	10	40	50	10	160	250	75	1300	1	0	10	150
Getijdengebied	75	450	300	600	8	6	12	12	8	15	96	48	180	150	3	4000	140	0	2800	133
Rivieren beneden	50	250	200	300	30	25	40	30	20	40	900	500	1600	15	5	40	15	5	40	0
Rivieren tussen	50	300	50	1000	56	28	75	44	22	87	2460	620	6540	2	10	200	2	12	240	300
Rivieren tussen	60	100	10	500	39	29	48	42	31	60	1624	907	2850	50	1	500	120	4	850	200
Rivieren boven	30	200	50	500	63	20	90	30	14	54	1875	280	4860	3	2	6	3	2	6	275
Rivieren boven	43	50	30	200	48	43	52	30	10	40	1426	432	2074	40	0	450	40	0	450	280
Rivieren boven	40	300	80	400	40	26	60	26	20	33	1040	518	1996	35	3	500	35	3	500	240
Rivieren boven	50	300	80	1500	40	26	60	26	20	33	1040	518	1996	10	0	200	10	0	200	240

In de data vallen enkele zaken op:

1. De dijkbasis is beduidend groter voor het getijdengebied dan voor het rivierengebied.
2. Er is geen duidelijk onderscheid tussen doorlatendheden en diktes van het WVP voor verschillende delen van het rivierengebied.
3. De kD -waarden in het rivierengebied zijn wel hoger dan in het getijdengebied.

Opgemerkt wordt dat de (gewogen gemiddelde) doorlatendheden van het watervoerend pakket relatief hoog lijken. Dat kan deels zijn omdat het vaak een 2-laags situatie betreft waarbij het minder doorlatende holocene zand in direct contact staat met het doorlatendere pleistocene zand. Dit verklaart ook de relatief grote totale dikte van het WVP in de meeste gevallen⁴.

Naast vragen over de geometrie is ook gevraagd naar heterogeniteit of gaten in het voorland en achterland. In veel gevallen is sprake van voorlanden met gaten (bijv. ten gevolge van kleiwinning, nevengeulen, oude geulen, strangen, zandwinning etc.) of sloten. In het achterland is vaak ook sprake van langsloten, met name in het getijdengebied en beneden en tussen rivieren gebied.

6.1.2 Varianten

De belangrijkste parameters die de kritieke pipelengte beïnvloeden zijn naar verwachting:

1. De verhouding dikte WVP gedeeld door de kwelweglengte (D/L_s).
2. De leklengte (of spreidingslengte $\lambda_{VL} = \sqrt{\frac{k_{WVP} D_{WVP} D_{deklaag,VL}}{k_{deklaag,VL}}} = \sqrt{k D c_{VL}}$) van het voorland.
3. De leklengte van het achterland ($\lambda_{AL} = \sqrt{k D c_{AL}}$).

De leklengte combineert verschillende parameters, die ook afzonderlijk effecten hebben, een verandering in leklengte door een verandering in D verandert ook de D/L verhouding, terwijl dit niet het geval is bij een verandering van c .

De d_{70} is op basis van Hoofdstuk 3 niet direct van belang voor pipelengte bij kritiek verval. De lengte van de dijkbasis is wel van belang omdat het mee te nemen voorland wordt uitgedrukt als factor van de dijkbasis, bijvoorbeeld de kwelweglengte is 3 keer de dijkbasis (dus 2 keer de dijkbasis aan voorland wordt meegenomen).

Voor de variantenstudie is het van belang om relevante combinaties van deze parameters te beschouwen. Gezien het belang van de leklengten van voor en achterland, en de grote onzekerheid m.b.t. die waarden, wordt de voornaamste variatie in deze parameters onderzocht. De dikte en doorlatendheid van het WVP worden gekozen om zo goed mogelijk aan te sluiten bij de representatieve waarden voor de gebieden, waarbij geologisch inzicht in de eigenschappen van de gebieden ook gebruikt is in de afweging.

⁴ Mogelijk worden ook relatief conservatieve waardes aangegeven. Aangezien het doel van deze studie is om voor situaties die beheerders in hun analyse gebruiken handvatten te bieden zijn deze waarden wel als uitgangspunt gehanteerd bij het opstellen van varianten.

De intredeweerstand (en uittredeweerstand) is zeer variabel en hier spelen grote onzekerheden een rol. Hierbij spelen onder meer:

1. Onzekerheid over de doorlatendheid van de deklaag zelf.
2. Onzekerheid over de dikte van de deklaag in het voorland, de top van het watervoerend pakket in rivierengebieden kan variëren, en hier bovenop is de deklaag afgezet.
3. Onzekerheid over de invloed van menselijk ingrijpen op de deklaag (kleiputten, zandwinputten, nevengeulen, etc.).
4. De invloed van structuurvorming op de doorlatendheid (met name bij dunnere deklagen die onverzadigd zijn).
5. Onzekerheid over de aanwezige weerstand voorland tijdens een hoog water, door autonome ontwikkelingen voorafgaand aan, en hoogwater gerelateerde gebeurtenissen tijdens, de hoogwatersituatie.

Opgemerkt wordt dat het voor piping van belang is rekening te houden met de effectieve intredeweerstand/uitredeweerstand van de deklaag, deze wordt dus beïnvloed door de aanwezigheid van gaten en heterogeniteit, maar het gaat om de bulkeigenschappen. De lage waarden in Tabel 6.1 in sommige gevallen zijn ook deels het gevolg van voorland met gaten, terwijl hogere waarden eerder uitgaan van een homogene deklaag van klei. Ook bij de keuze van intredeweerstanden en uittredeweerstanden is gebruik gemaakt van een combinatie van geologisch inzicht en de door de waterschappen gerapporteerde waarden.

Om een representatieve set varianten te onderzoeken zijn de volgende afwegingen per gebied gemaakt:

1. **Voor alle berekeningen:** wordt voor de leklengte van het achterland als minimale waarde 2 m genomen, overeenkomstig met een vrijwel afwezige deklaag (of waterpartijen zonder beduidende hydraulische weerstand op de bodem). Om ook een situatie te hebben met een zeer ondoorlatend achterland, vergelijkbaar met de situatie waarvoor de rekenregel is afgeleid wordt als maximale leklengte van het achterland 1000 m genomen voor alle gevallen. De twee tussenliggende waarden zijn op basis van de inventarisatie bepaald.
Voor de hydraulische weerstand van het voorland wordt een minimale waarde van 2 dagen genomen (voor situaties met nagenoeg geen deklaag). Echter aangezien dit bij het getijdengebied zou leiden tot een fictief intredepunt dat minder dan 1 keer de dijkbasis weg ligt (waardoor de huidige werkwijze al gevolgd kan worden) is in die schematisatie 15 dagen als minimum aangehouden.
2. **Voor het getijdengebied** is de dijkbasis beduidend breder dan in het rivierengebied. Naar verwachting is in getijdenplaatafzettingen piping geen issue, daarom is een situatie genomen met een relatief dik watervoerend pakket zoals verwacht is voor een getijdengeul die insnijdt in het pleistocene zand. De doorlatendheid van het WVP is gekozen op basis van de gegevens van de waterschappen. De hydraulische weerstanden van het voorland bestrijken grotendeels de bandbreedte van de gegevens van de inventarisatie. De hydraulische weerstanden van het achterland zijn voor dit gebied lager dan de weerstanden van het voorland aangezien aangegeven is dat de deklagen in het achterland dunner zijn dan in het voorland. Daarom is voor deze een 30% lagere hydraulische weerstand aangehouden in de berekeningen (met uitzondering van de laagste waarde waarvoor 2 m aan leklengte wordt gehanteerd en de hoogste waarvoor 1000 m wordt gehanteerd).
3. **Voor het rivierengebied** was de verwachting dat er een duidelijker verschil tussen beneden en bovenrivierengebied zou zijn in de kD waardes en c waardes. Dit blijkt niet zozeer uit de data. Voor beide delen is veel variatie. Wellicht zijn de waarden die voor het benedenrivierengebied zijn gegeven ook met name die situaties waar holocene zanden in contact staan met het Pleistocene zand, resulterend in hoge gewogen gemiddelde

doorlatendheden en diktes.

Omdat piping van groot belang is voor de overstromingskans in het rivierengebied en de dikte van het WVP relevant is, worden voor het rivierengebied 2 schematisaties gemaakt. Een met een dikker pakket met hogere (gemiddelde) doorlatendheid en een met een dunner pakket en een lagere (gemiddelde) doorlatendheid. Hiermee worden de waarden die in de inventarisatie naar voren komen redelijk gedekt (waarbij opgemerkt wordt dat het in beide situaties zou gaan om een situatie van een holocene laag in contact met een pleistocene laag).

De hydraulische weerstand van het voorland voor deze twee schematisaties is op basis van de waarden uit de inventarisatie. Hierbij is wel beschouwd dat er aangegeven is dat er vaak sprake is van heterogeniteit en gaten. Deze zullen de effectieve weerstand enigermate verlagen ten opzichte van een homogene situatie. Daarom is ook een geval van 2 dagen weerstand gehanteerd, en zijn globaal gezien lagere waarde waarden genomen dan de weerstanden die verwacht zouden worden voor homogene kleilagen. Ook structuurvorming zou bij kunnen dragen aan een lagere hydraulische weerstand dan dat verwacht zou worden op basis van de doorlatendheid van homogene klei. De variatie in de hydraulische weerstand van het achterland wordt gelijk genomen aan die van het voorland (met uitzondering van de laagste waarde waarvoor 2 m aan leklengte wordt gehanteerd en de hoogste waarvoor 1000 m wordt gehanteerd).

Voor alle modellen wordt uitgegaan van een langssloot in het achterland, dus een uittredevlak van 1 m breed. Voor de 3 modellen: getijdengebied, rivierengebied dikker en rivierengebied dunner, worden 4 waarden van hydraulische weerstand voor het voorland gecombineerd met 4 waarden van hydraulische weerstand van het achterland, resulterend in 48 schematisaties zoals in onderstaande tabellen getoond.

Hoewel uit de inventarisatie bleek dat de deklaag dikte en doorlatendheid in het voorland en achterland veelal vergelijkbaar zullen zijn, zijn voor de berekeningen wel alle combinaties van doorlatendheden in het voorland met achterland beschouwd. Dit omdat het zowel in het voor en in het achterland sprake kan zijn van lokale zwakke plekken en waterpartijen. Ook biedt dit inzicht in de gevoeligheid van de uitkomsten voor de hydraulische weerstand in voor en achterland. Onderstaande tabellen geven de parameters in de basiscases aan.

Tabel 6.2 Varianten voor analyse: parameters kD en intredeweerstand voorland

	dijkbasis	Dikte WVP, m	K WVP, m/dag	$K_{WVP}D$ zand, m ² /dag	Intredeweerstand voorland $c_{vl,1}$ dagen*	Intredeweerstand voorland $c_{vl,2}$ dagen	Intredeweerstand voorland $c_{vl,3}$ dagen	Intredeweerstand voorland $c_{vl,4}$ dagen	fysiek voorland lengte, m	Fysiek voorland/dijkbasis
Getijdengebied	70	35	9	300	15	250	500	1000	450	6.4
Rivieren dik	40	50	40	2000	2	10	40	120	250	6.3
Rivieren Dun	40	25	30	750	2	10	40	120	200	5.0

*bij een intredeweerstand van 2 m/dag zou de fictieve voorlandlengte korter zijn dan 1 keer de dijkbasis, die variant zou niet relevant zijn voor het oprekken van de mee te nemen voorlandlengte.

De parameters zijn omgerekend naar lek lengten en fictieve voorland lengten (c.f. SH Piping bijlage E) resulterend in de onderstaande varianten. Hieruit blijkt dat met deze set aan parameters onderzocht wordt of de totale kwelweglengte kan worden opgerekt van 3 maal de dijkbasis (2x dijkbasis aan voorland) naar maximaal 6 maal de dijkbasis (5 keer aan voorland voor $L_{fictief4}$).

Tabel 6.3 Varianten voor analyse: parameters lek lengte en fictieve voorlandlengte voorland

	λ_{VL1} , m	λ_{VL2} , m	λ_{VL3} , m	λ_{VL4} , m	$L_{fictief1}$	$L_{fictief2}$	$L_{fictief3}$	$L_{fictief4}$	$L_{fictief1}$ /dijkbasis	$L_{fictief2}$ /dijkbasis	$L_{fictief3}$ /dijkbasis	$L_{fictief4}$ /dijkbasis
Getijdengebied	67	274	387	548	67	254	318	370	1.0	3.6	4.5	5.3
Rivieren dik	63	141	283	490	63	133	200	230	1.6	3.3	5.0	5.8
Rivieren Dun	39	87	173	300	39	85	142	175	1.0	2.1	3.5	4.4

Tabel 6.4 Varianten voor analyse: parameters lek lengte achterland en d_{70}

	λ_{AL1} , m	λ_{AL2} , m	λ_{AL3} , m	λ_{AL4} , m	d_{70} , μm
Getijdengebied	2	229	346	1000	130
Rivieren dik	2	63	141	1000	300
Rivieren Dun	2	39	99	1000	250

Om de gevoeligheid voor de doorlatendheid van het WVP ook te onderzoeken is voor de schematisatie Rivieren Dik aanvullend een set berekeningen gedaan waar de doorlatendheid van het WVP verhoogd is naar 60 m/dag en verlaagd naar 20 m/dag. Deze situaties zijn berekend zowel met dezelfde leklengte van het voorland en achterland als de basis case (de doorlatendheden van de deklagen in het voor en achterland zijn aangepast) maar ook met dezelfde doorlatendheden van de deklagen in het voor en achterland als de basis case (dus andere leklengten).

6.2 Modelopzet

6.2.1 DgFlow & rekeninstellingen

Voor deze analyses is de rekenkernel van DgFlow versie 1.4 gebruikt. De berekeningen zijn opgezet in GiD versie 14.03 en uitgelezen in Paraview versie 5.6.1. Om consistentie met de rekenregel en de user interface te borgen is gerekend met het aangepaste model (analoog aan de rekenregel in Bijlage III) en is de kalibratiefactor voor DgFlow resultaten van 0.89 gehanteerd in de rekenkernel (deze is ook vast geïmplementeerd in de GUI D-Geo Flow, op basis van de analyses in (van Esch, 2017)).

De rekenparameters en randvoorwaarden hebben invloed op de nauwkeurigheid waarmee het kritieke verval en de kritieke pipelengte bepaald worden, en op de rekentijd. In de huidige analyse is het van belang veel effecten door te rekenen om een indicatie van relatieve belangen te hebben.

Daarom is een grovere MPicard gebruikt dan voor een beoordeling (het MPicard getal heeft betrekking op de nauwkeurigheid waarmee het pipe evenwicht wordt berekend).

Ook voor de mesh is een afweging van rekentijd tegen nauwkeurigheid gemaakt. Omdat de voorlanden lang zijn, zijn de pipes ook lang en het is met name het uitrekenen van pipe elementen dat veel tijd kost. Daarom zijn onderstaande mesh instellingen gehanteerd voor lokale verfijning:

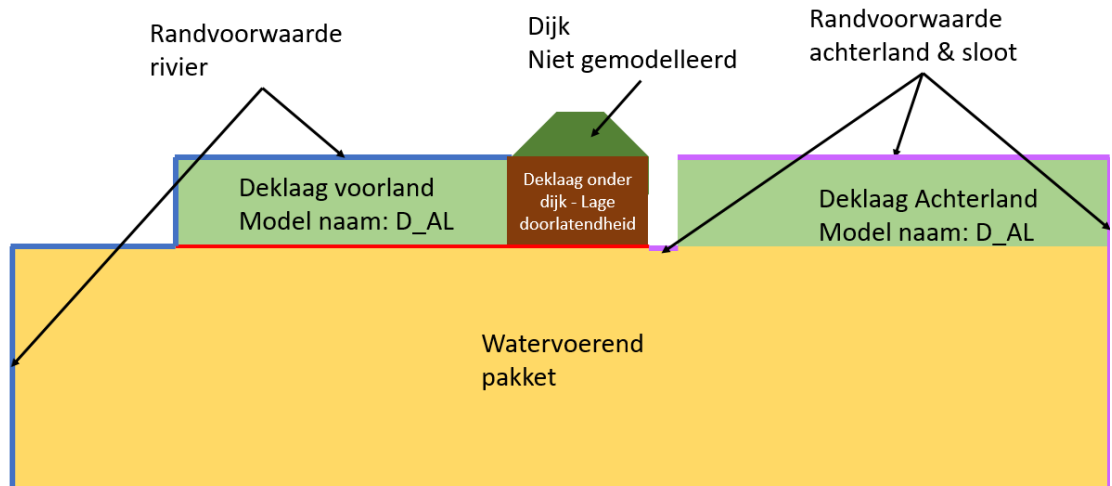
- Bij pipe: elementen van 1 m lengte.
- Bij sloot: 0.5 m elementen (om meerdere elementen in het oppervlak van de sloot te hebben).

Zoals in 5.2 was onderzocht is de stapgrootte waarin verval wordt aangebracht, H_{incr} , met name van belang voor een nauwkeurige bepaling van de pipelengte.

In deze analyses is een stapgrootte van 0.001 m gehanteerd om de pipelengte te bepalen voor de cases waar de pipe niet onder de dijkbasis uitkomt. Voor gevallen waar de pipe onder de dijkbasis uitkomt is de pipelengte niet nauwkeuriger bepaald omdat instroom door het voorland dan een rol speelt. Instroom door het voorland wordt niet in de rekenregel meegenomen, en mag daarom ook geen rol spelen voor deze berekeningen die tot doel hebben een handvat te ontwikkelen om meer voorland mee te nemen in de rekenregel. Om te bepalen of de pipe onder de dijkbasis uitkomt zijn alle cases eerst uitgerekend met een stapgrootte van 0.1 m. Hoe groter de stapgrootte hoe meer de pipelengte bij kritiek verval onderschat wordt. Dus als de pipe bij deze stapgrootte al onder de dijkbasis uit komt zal hij dat zeker doen bij fijnere stapgrootten.

6.2.2 Geometrie & randvoorwaarden

De schematisatie is hieronder weergegeven inclusief randvoorwaarden. De buitenwaterstand wordt op de verticale en horizontale instroomrand van het watervoerend pakket en op het voorland toegepast. Er wordt geen weerstand in het opbarstkanaal meegenomen, de stijghoogte in de sloot is gelijk aan die op maaiveld, een volle sloot. De slootbodem is 1 m breed.



Figuur 6.2 Schematisatie en randvoorwaarden de bodem van het model is gesloten, evenals de randvoorwaarde op de locatie van de dijk. De achterland randvoorwaarde ligt op maaiveld. De deklaagdikte in het model is 2 m, de achterrandsloot ligt op 1000 m vanaf de sloot. De overige afmetingen staan in Tabel 6.2.

De dijk wordt niet gemodelleerd, deze wordt verondersteld ondoorlatend te zijn en niet bij te dragen aan stroming naar de pipe. De deklaag onder de dijk heeft een lage doorlatendheid van 0.001 m/d, zodat daar vrijwel geen stroming doorheen gaat.

6.2.3 Parameters

Stroming is verzadigd en stationair. Water heeft een dichtheid van 1000 kg/m³ en een viscositeit van 1.3E-3 Pa.s, uitgaande van de eigenschappen van zoet water bij ca. 10°C.

De doorlatendheid van de deklaag in het voorland en achterland wordt aangepast om de intredeweerstand te variëren (daarbij blijft de dikte gelijk), en de variaties in Tabel 6.2 te modelleren.

6.3 Resultaten en analyse

De resultaten van de berekeningen met een stapgrootte H_{incr} van 0.1 m voor de basisvarianten staan in onderstaande tabellen. Door de grove stapgrootte is L_c voor deze berekeningen onderschat. Voor de situaties waar de pipelengte niet onder de dijkbasis uit komt is een vervolganalyse gedaan met H_{incr} van 0.01 en 0.001 m. De resultaten met die fijnste stap zijn in Tabel 6.8 getoond. Voor situaties waar de pipe wel onder de dijkbasis uitkomt is deze analyse met fijnere stapgrootte niet uitgevoerd omdat pipegroei onder een semi-doorlatend sowieso buiten het toepassingsgebied van de rekenregel ligt.

Tabel 6.5: Resultaten DgFlow analyse voor getijden gebied, berekeningen met stapgrootte H_{incr} van 0.1 m.

λ_{VL} , m	λ_{AL} , m	$H_{c, rekenregel}$, m	$H_{c, DgFlow}$, m	$H_{c, DgFlow} / H_{c, rekenregel}$, m	L_c , m
67	2	7.56	7.9	1.05	410.00
	229	7.56	7.9	1.05	410.00
	346	7.56	7.9	1.05	410.00
	1000	7.56	7.9	1.05	410.00
274	2	16.38	18.4	1.12	35.92
	229	16.38	18	1.10	44.94
	346	16.38	18	1.10	46.95

λ_{VL} , m	λ_{AL} , m	$H_{c,regelen}$, m	$H_{c,DgFlow}$, m	$H_{c,DgFlow} / H_{c,regelen}$, m	L_c , m
	1000	16.38	18	1.10	49.96
387	2	19.28	22.3	1.16	38.93
	229	19.28	21.9	1.14	46.95
	346	19.28	21.9	1.14	48.95
	1000	19.28	21.9	1.14	49.96
548	2	21.61	25.6	1.18	44.94
	229	21.61	25.2	1.17	50.96
	346	21.61	25.2	1.17	51.96
	1000	21.61	25.1	1.16	48.95

Tabel 6.6: Resultaten DgFlow analyse voor rivieren dun, berekeningen met stapgrootte H_{incr} van 0.1 m.

λ_{VL} , m	λ_{AL} , m	$H_{c,regelen}$, m	$H_{c,DgFlow}$, m	$H_{c,DgFlow} / H_{c,regelen}$, m	L_c , m
39	2	4.35	4.3	0.99	13
	39	4.35	4.1	0.94	15
	99	4.35	4.1	0.94	181
	1000	4.35	4.1	0.94	181
87	2	6.55	6.7	1.02	15
	39	6.55	6.5	0.99	18
	99	6.55	6.5	0.99	22
	1000	6.55	6.5	0.99	110
173	2	9.15	10	1.09	24
	39	9.15	9.8	1.07	24
	99	9.15	9.7	1.06	25
	1000	9.15	9.7	1.06	33
300	2	10.64	12	1.13	23
	39	10.64	11.9	1.12	30
	99	10.64	11.8	1.11	31
	1000	10.64	11.7	1.10	28

Tabel 6.7: Resultaten DgFlow analyse voor rivieren dik basis, berekeningen met stapgrootte H_{incr} van 0.1 m.

λ_{VL} , m	λ_{AL} , m	$H_{c, \text{rekenregel}}$, m	$H_{c, DgFlow}$, m	$H_{c, DgFlow} / H_{c, \text{rekenregel}}$, m	L_c , m
63	2	4.65	4.7	1.01	237
	39	4.65	4.7	1.01	237
	99	4.65	4.7	1.01	237
	1000	4.65	4.7	1.01	238
141	2	7.31	7.4	1.01	141
	39	7.31	7.4	1.01	144
	99	7.31	7.4	1.01	148
	1000	7.31	7.4	1.01	152
283	2	9.79	10.3	1.05	77
	39	9.79	10.2	1.04	80
	99	9.79	10.2	1.04	94
	1000	9.79	10.1	1.03	96
490	2	10.87	12	1.10	53
	39	10.87	11.9	1.09	70
	99	10.87	11.7	1.08	70
	1000	10.87	11.6	1.07	83

Voor de cases waar de pipe niet onder de dijkbasis uit komt is met H_{incr} van 0.01 en vervolgens met H_{incr} van 0.001 m de pipelengte nauwkeuriger bepaald. Dit heeft geen effect op het kritieke verval berekend met de rekenregel. Het effect op het kritieke verval is maximaal 0.1 m (de stapgrootte van de eerste sommen). Het effect op de berekende pipelengte is wel significant.

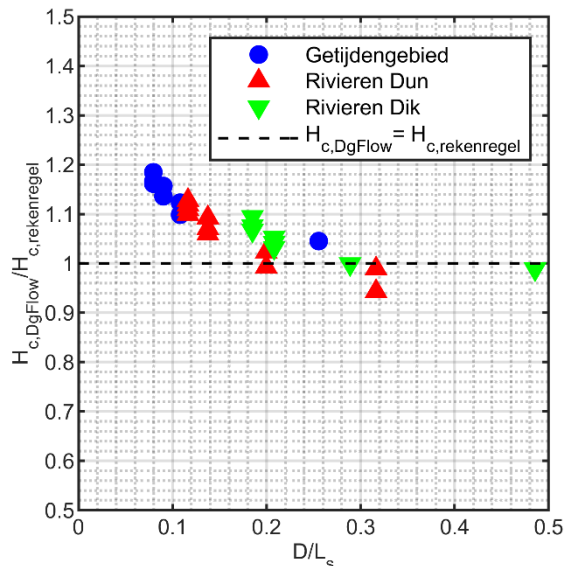
De berekeningen met de fijnere stapgrootte van 0.001 m zijn hieronder samengevat.

Tabel 6.8 Samenvatting berekeningen met stapgrootte H_{incr} 0.001m.

Case	λ_{AL} , m	λ_{vL} , m	$H_{c,DgFlow}$, m	L_c , m
Rivieren Dun VL 173 AL1000	1000	173	9.702	33
Rivieren Dun VL 300 AL1000	1000	300	11.774	35
Getijden VL 274 AL 1000	1000	272	18.003	50
Getijden VL 387 AL 1000	1000	387	21.297	54
Getijden VL 548 AL 1000	1000	548	25.199	54
Rivieren Dun VL 39 AL 2	2	39	4.314	14
Rivieren Dun VL 87 AL 2	2	87	6.743	18
Rivieren Dun VL 173 AL 2	2	173	10.014	26
Rivieren Dun VL 300 AL 2	2	300	12.066	28
Getijden VL 274 AL 2	2	274	18.423	37
Getijden VL 387 AL 2	2	387	22.348	45
Getijden VL 548 AL 2	2	548	25.626	48
Rivieren Dik VL 283 AL 2	2	283	10.344	31
Rivieren Dik VL 490 AL 2	2	490	11.932	54
Rivieren Dun VL 39 AL 39	39	39	4.15	20
Rivieren Dun VL 173 AL 39	39	173	9.845	29
Rivieren Dun VL 300 AL 39	39	300	11.924	31
Rivieren Dun VL 87 AL 99	99	87	10	24
Rivieren Dun VL 173 AL 99	99	173	9.765	31
Rivieren Dun VL 300 AL 99	99	300	11.835	33
Getijden VL 274 AL 229	299	274	18.046	49
Getijden VL 387 AL 229	299	387	21.968	53
Getijden VL 548 AL 229	299	229	25.244	54

6.3.1 Kritiek verval DgFlow ten opzichte van de rekenregel

Het kritiek verval, H_c is berekend met de rekenregel van Sellmeijer op basis van het fictieve intredepunt, (zonder afknotting) om een vergelijking met het resultaat van DgFlow te kunnen maken. Verschillen kleiner dan 0.1 m zijn niet relevant aangezien de nauwkeurigheid mede bepaald wordt door de stapgrootte waarmee het verval in DgFlow wordt aangebracht.



Figuur 6.3 Kritiek verval (H_c) berekend met DgFlow gedeeld door H_c berekend met de rekenregel als functie van de vorm van het watervoerend pakket (fictieve kwelweglengte (L_s) gedeeld door dikte (D)).

Hier kunnen afwijkingen worden geconstateerd, in twee varianten:

- DgFlow geeft een lagere H_c dan de rekenregel:
 - Dit gebeurt in situaties met een korte lek lengte van het voorland, zoals:
 - Rivieren Dun met λ_{VL} van 39 m en lek lengtes van het achterland langer dan 40 m, hier is $H_{c,DgFlow}$ 96% van $H_{c,rekenregel}$.
 - Rivieren Dik met K_{WVP} 20 m/dag en λ_{VL} 44 m, hier is $H_{c,DgFlow}$ 95% van $H_{c,rekenregel}$.

Het is relevant om te constateren dat dit effect samenhangt met de lek lengte van het voorland, niet specifiek met de intredeweerstand of doorlatendheid van het voorland. In de modellen Rivieren dik met dezelfde doorlatendheid van het voorland maar een hogere K_{WVP} en dus een hogere λ_{VL} is het verschil tussen de rekenregel en DgFlow niet significant.

De reden voor deze afwijking is in Bijlage B onderzocht en in Hoofdstuk 8 toegelicht.
- DgFlow geeft een hogere H_c dan de rekenregel:
 - Rivieren Dun bij voorland intredeweerstand van 40 dagen of meer, λ_{VL} van 170 of meer. Dit is voor D/L_s verhoudingen van 0.14 of kleiner. Het verschil is groter met een minder doorlatend voorland, dus een langere fictieve kwelweglengte. Voor deze cases is $H_{c,DgFlow} / H_{c,rekenregel}$ tussen 106 en 113%.
 - Getijden: Voor alle cases is $H_{c,DgFlow} / H_{c,rekenregel}$ 105% tot 118%. De kleinste afwijking is bij de kortste λ_{VL} waarbij D/L_s 0.26 is.
 - Rivieren Dik: hier is $H_{c,DgFlow} / H_{c,rekenregel}$ meestal minder dan 105%, alleen voor de gevallen met de hoogste intredeweerstand (120 dagen) is de verhouding 107-108%.

Voor alle bovenstaande gevallen waar DgFlow een hoger kritiek verval berekent dan de rekenregel geldt dat het verschil wat groter is bij minder doorlatende achterlanden. De doorlatendheid van het achterland heeft geen invloed op het kritiek verval in de rekenregel, en wel licht effect op het kritiek verval berekend met DgFlow (ca. 1-3% effect op H_c voor deze cases). Hoe minder doorlatend het achterland, hoe lager het kritiek verval aangezien er meer stroming naar het achterland gaat in het DgFlow model.

De afwijking tussen de rekenregel en DgFlow die toeneemt met toenemende D/L ligt naar verwachting aan de wijze waarop de grondwaterstroming is berekend in DgFlow en MSeep

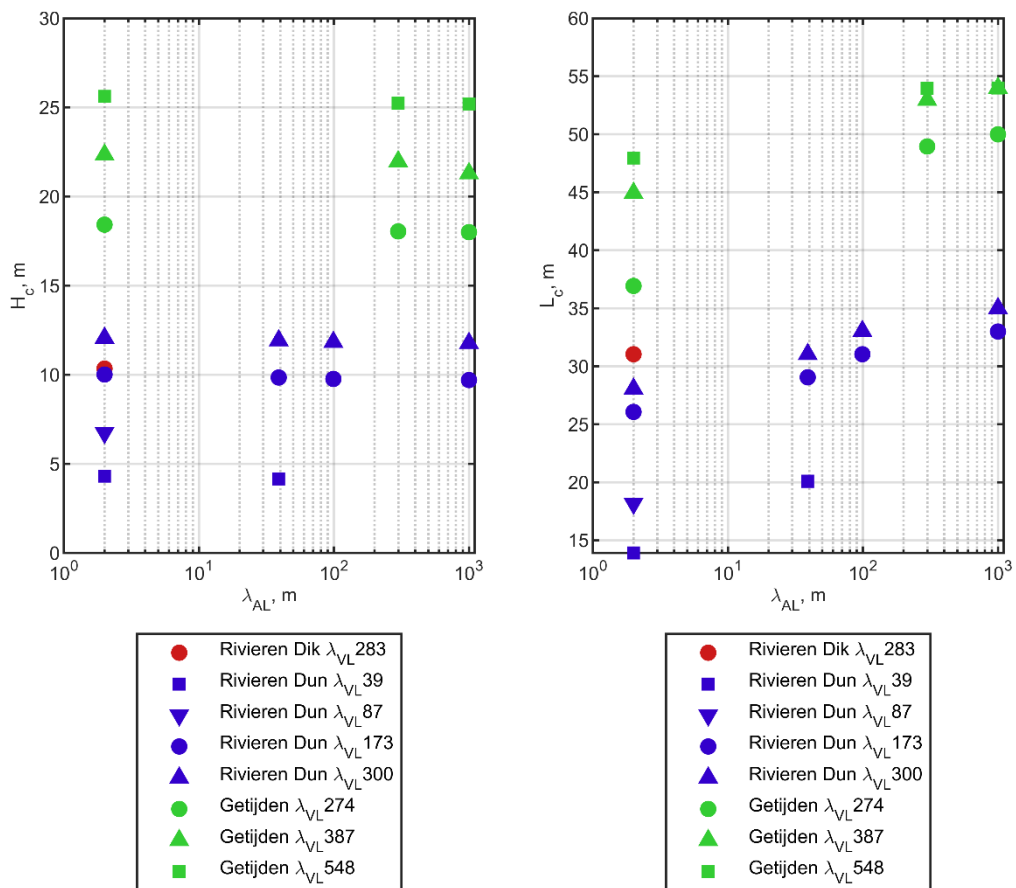
(waarop de rekenregel is gebaseerd). Er is geen aanleiding om aan te nemen dat DgFlow dit minder goed doet dan MSeep, de verwachting is juist dat DgFlow dit beter doet. In veel van de bovenstaande gevallen komt de pipe wel onder de dijkbasis uit bij het kritieke verval. Daardoor komt er ook stroming van bovenaf de pipe in en dit wordt in de rekenregel niet meegenomen. Hoewel D-Geo Flow de stroming van bovenaf naar de pipe wel meeneemt is het model van Sellmeijer niet gevalideerd met instroom van bovenaf, en is de onzekerheid van deze resultaten groter.

Met de rekenregel van Sellmeijer worden voor langere pakketten, lagere D/L_s , veelal lagere H_c berekend dan met D-Geo Flow (bij eenzelfde schematisatie). D-Geo Flow bevat een modelkalibratiefactor om aan te sluiten bij de rekenregel (die gekalibreerd is aan proeven voor H_c). Deze modelkalibratiefactor is afgeleid voor een beperkte bandbreedte van D/L (zie ook 13.4A).

Buiten die bandbreedte is geen experimentele data beschikbaar. Echter de wijze waarop D-Geo Flow rekt is naar verwachting bij dunnere pakketten geschikter dan de berekeningen van MSeep die gebruikt zijn voor de afleiding van de rekenregel. Daarom is de verwachting dat resultaten van D-Geo Flow betrouwbaarder zijn dan de rekenregel en dat geen verdere correctie nodig is.

6.3.2 Effect van achterland op pipelengte en op kritiek verval

Het conceptuele model geeft aan dat de leklengte van het achterland een belangrijk effect op de pipelengte heeft. Dit effect wordt terug gezien in de resultaten van de cases. Het effect van de leklengte van het achterland op de berekende pipelengte en het berekende kritieke verval is hieronder getoond voor de basis cases die berekend zijn met de fijnste stapgrootte (H_{incr} 0.001 m). Dit zijn dus de situaties waar de pipe niet onder de dijkbasis uit is gekomen.



Figuur 6.4 Kritiek verval (links) en kritieke pipelengte (rechts) als functie van leklengte van het achterland, voor modellen met verschillende leklengten van het voorland.

Een langere λ_{AL} heeft relatief weinig effect op H_c maar een significant effect op L_c . De leklengte van het voorland beïnvloedt zowel H_c als L_c aangezien dit een grote rol heeft voor de fictieve kwelweglengte.

6.4 Samenvatting

In dit hoofdstuk zijn drie schematisaties opgesteld aan de hand van verwachte situaties waarin een lang voorland fysiek aanwezig is. Voor iedere schematisatie zijn waarden van de deklaag doorlatendheid in het voor en achterland gevarieerd binnen een ruime bandbreedte om het effect op kritiek verval en pipelengte te onderzoeken.

In een deel van de gevallen komt de pipe onder de dijkbasis uit, door het lange voorland. Voor de situaties waar dit niet het geval is, zijn de berekeningen gebruikt om het effect van de leklengte, λ , van het voor en van het achterland op het kritieke verval en de kritieke pipelengte te onderzoeken. Ook zijn deze resultaten vergeleken met de resultaten wanneer de fictieve voorlandlengte in de rekenregel van Sellmeijer worden geanalyseerd.

Hieruit blijkt dat:

- Met de rekenregel een hoger kritiek verval wordt berekend dan met D-Geo Flow in gevallen van een relatief korte lek lengte van het voorland. Dit is waarschijnlijk het gevolg van de schematisatie van de randvoorwaarden in de modellen, zoals nader geanalyseerd in Hoofdstuk 8.
- Voor langgerekte modellen (kleine D/L) geeft D-Geo Flow een hoger kritiek verval dan de rekenregel. Dit is waarschijnlijk het gevolg van een andere manier waarop de grondwaterstroming wordt berekend in D-Geo Flow, maar er is geen reden aan te nemen dat D-Geo Flow dan minder betrouwbaar is.
- De lek lengte van het achterland heeft voor deze (2D) modellen geen significant effect op H_c maar wel op L_c .
- De effecten van vorm D/L_s en de doorlatendheid van de deklaag in het achterland (λ_{AL}) zijn in lijn met de verwachting op basis van het conceptuele model.

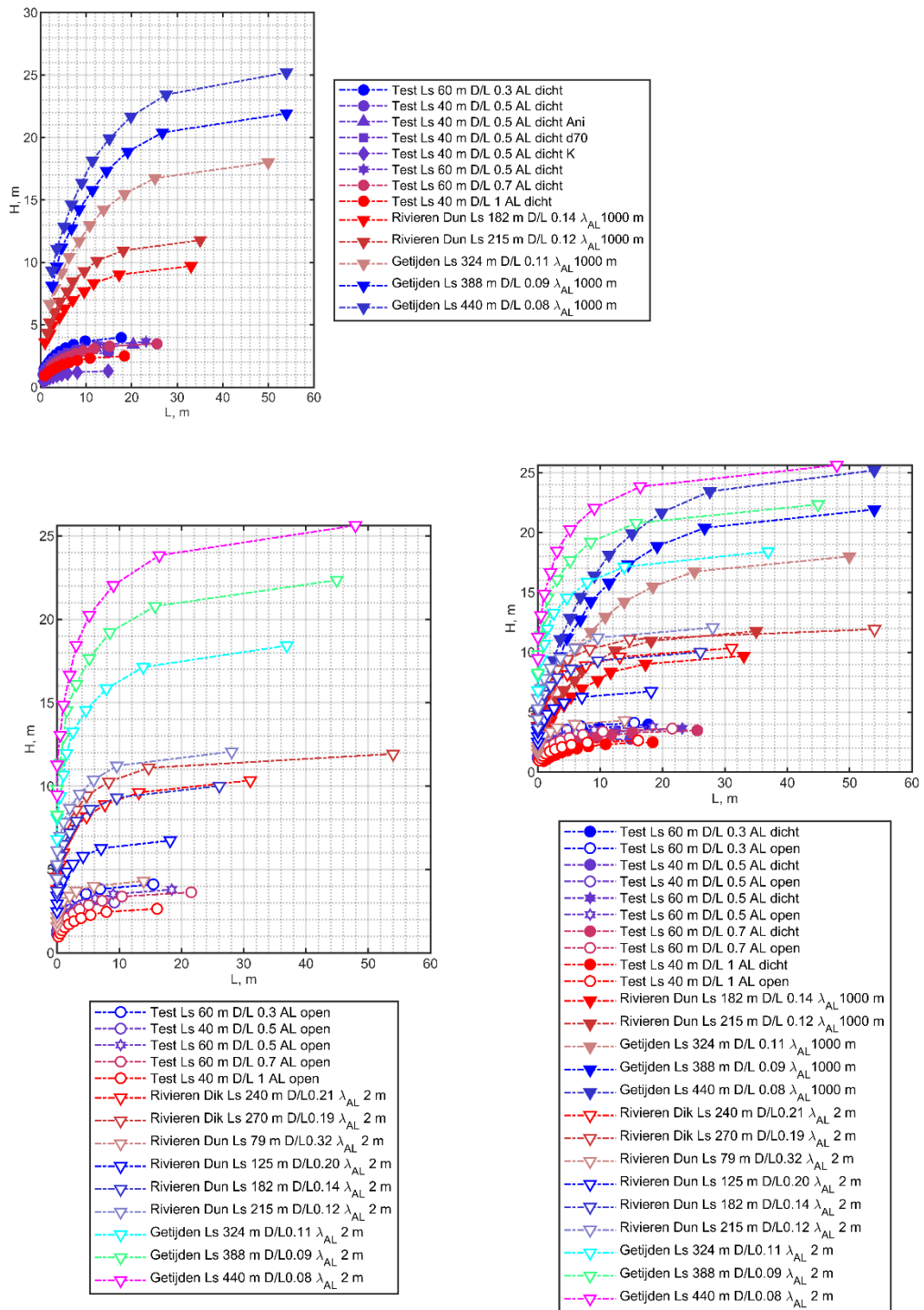
In Hoofdstuk 7 worden deze cases nader geanalyseerd met betrekking op de pipegroei bij vervallen onder het kritieke verval.

7 Analyse pipelengte $< H_c$

Wanneer het volledige voorland meegenomen wordt kan dit leiden tot een H_c dat ver boven de te keren waterstand ligt. In dergelijke situaties is het wenselijk om inzicht te hebben in de mate van reductie van de pipelengte bij lagere vervallen. Immers de waterkering zal niet het kritieke verval hoeven te keren (wellicht dat andere faalmechanismen al opgetreden zijn bij lagere waterstanden).

7.1 Modelresultaten H vs L

Curves van H vs L bieden inzicht in de toename van pipelengte met toename van verval. In onderstaande figuren zijn deze curves getoond voor modellen uit de analyses in Hoofdstuk 5 en 6. Voor hoofdstuk 6 zijn alleen de resultaten van cases waar de pipe onder de dijkbasis bleef meegenomen, aangezien in cases waar de pipe bij H_c onder de dijkbasis uit kwam vaak een zeer hoge L_c is berekend (door de invloed van stroming door de deklaag boven de pipe). Deze resultaten bieden daardoor geen inzicht in de ontwikkeling van de pipelengte voor de situatie zonder instroom van bovenaf naar de pipe.

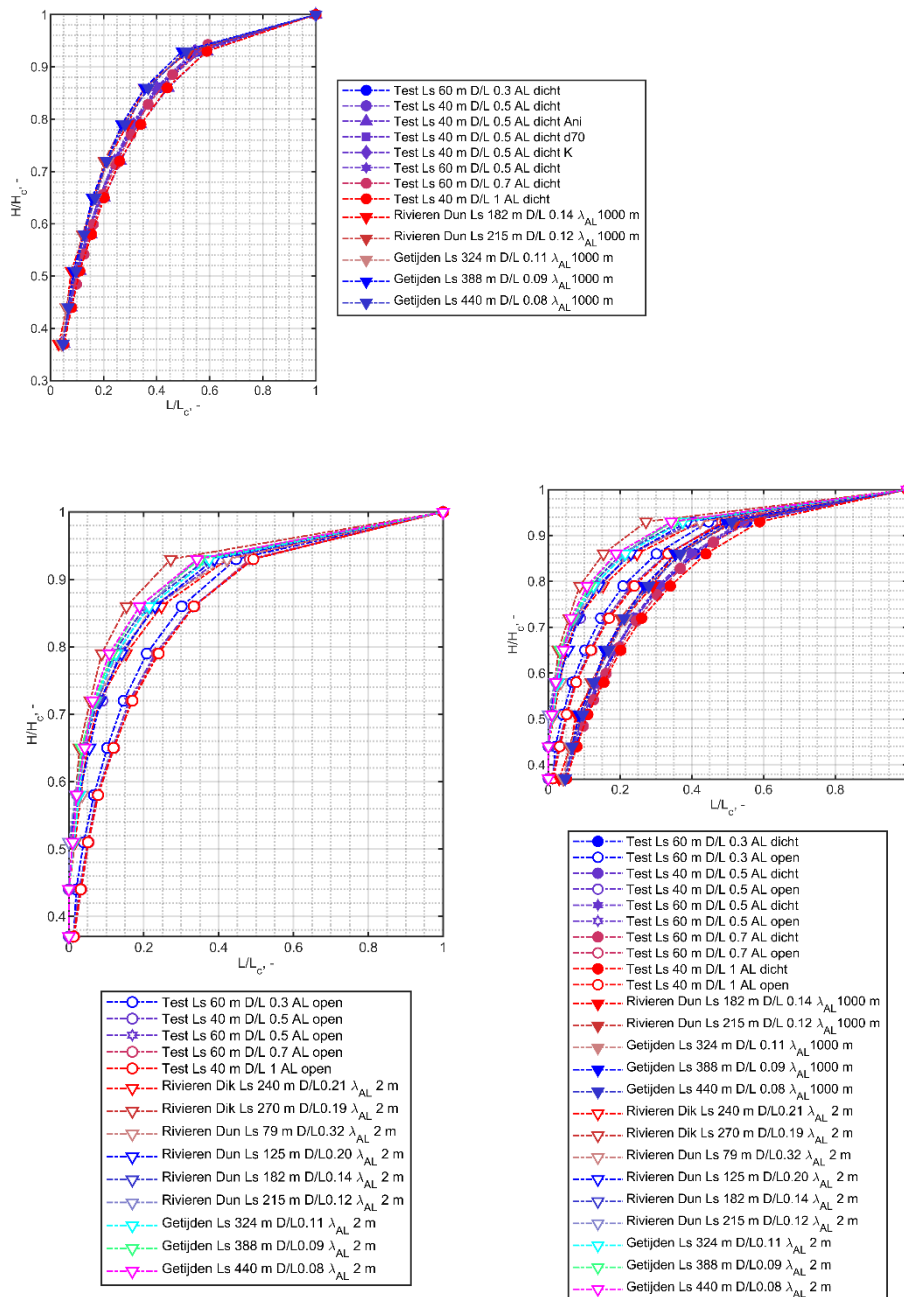


Figuur 7.1 Berekenende H versus L curves voor modellen uit hoofdstuk 5, en voor de representatieve schematisaties uit hoofdstuk 6. Alleen situaties waar de pipe onder de dijkbasis blijft zijn getoond. Boven modellen met een ondoorlatend achterland, onder links modellen met een open achterland, onder rechts alle modellen.

Deze curves tonen dat zowel materiaal parameters (K_{WVP} , d_{70} , λ_{VL} en λ_{AL}) als ook geometrie en schaal de hoogte en vorm van de H versus L curve, en dus de absolute pipegroei, beïnvloeden.

7.2 Modelresultaten H/H_c vs L/L_c

Door de curves te schalen met H_c en L_c blijkt dat de belangrijkste parameter die invloed heeft op de relatie tussen H/H_c en L/L_c het onderscheid tussen een dicht en een doorlatend achterland is.

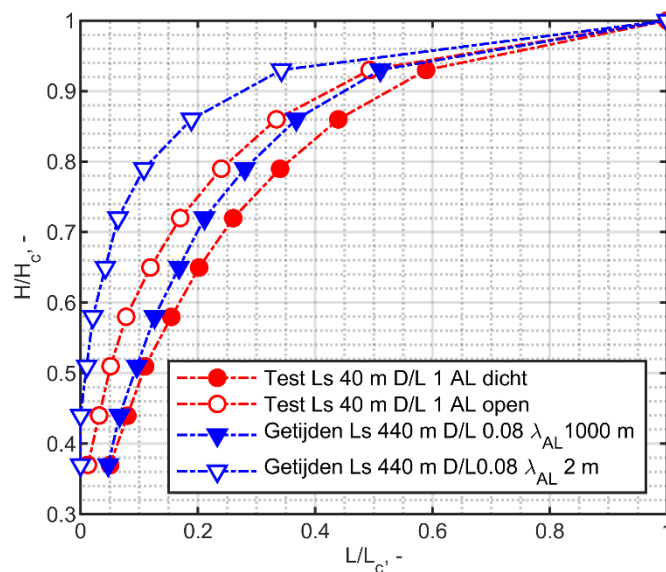


Figuur 7.2 Berekende H/H_c versus L/L_c curves voor modellen uit hoofdstuk 5, en voor de representatieve schematisaties uit hoofdstuk 6. Alleen situaties waar de pipe onder de dijkbasis blijft zijn getoond. Boven modellen met een ondoorlatend achterland, onder links modellen met een open achterland, onder rechts alle modellen.

7.3 Analyse

De belangrijke rol van het achterland voor L_c/L_s is in het conceptuele model behandeld. Bij een doorlatend of open achterland is de invloed van pipegroei op de concentratie van stroming naar de pipe kleiner, wat leidt tot een kortere L_c .

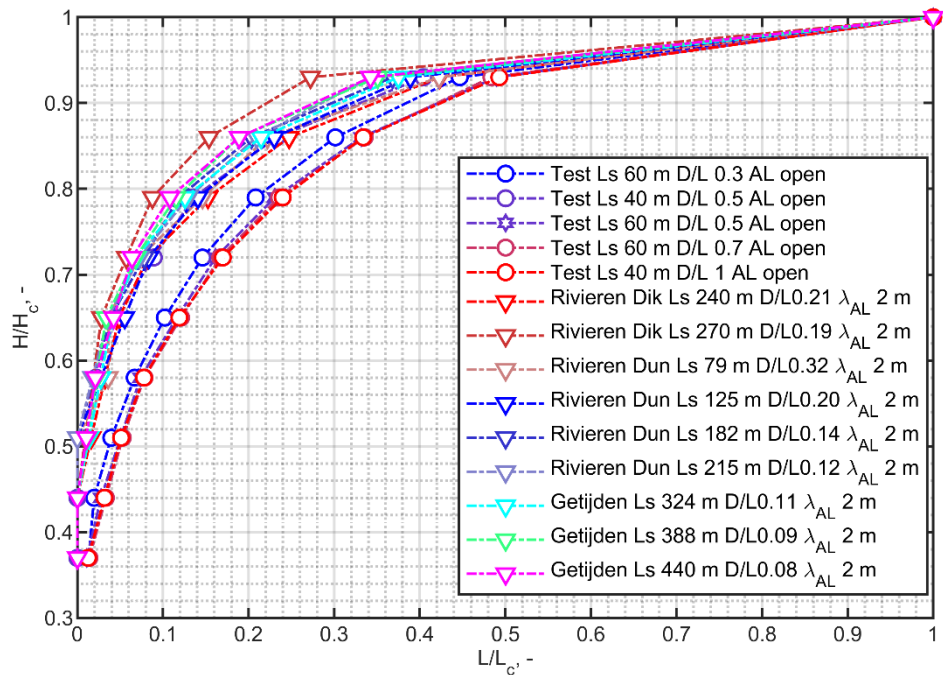
Een vergelijkbare redenering kan ook verklaren waarom de curves met een open achterland afwijken van die met een dicht achterland.



Figuur 7.3 Berekende H/H_c versus L/L_c curves voor twee geometrieën, met een D/L van 1 en met een D/L van 0.08. De berekende pipelengte is korter bij een gegeven verval voor een open achterland (symbolen met een witte vulling), en toename van pipelengte nabij het kritieke verval is groter (de curves lopen vlakker nabij H_c).

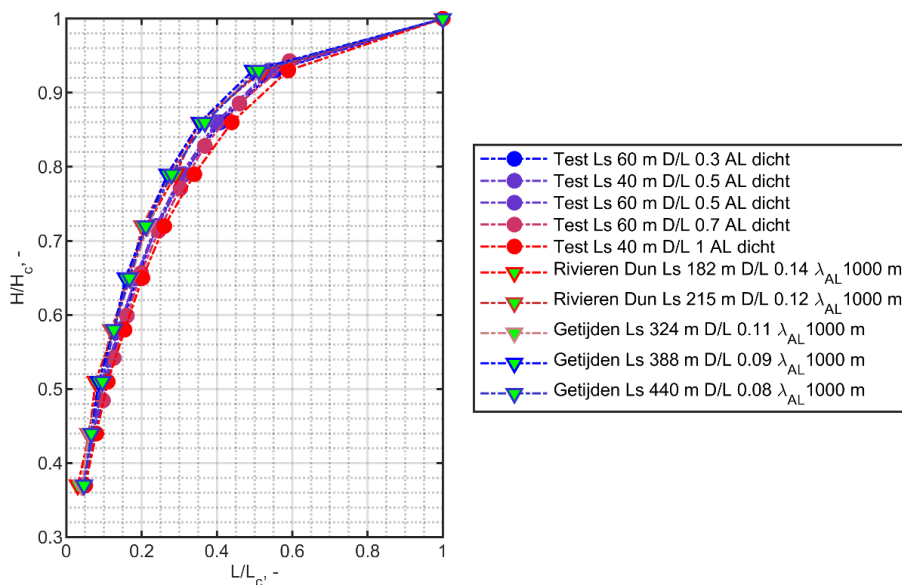
Door de stroming naar het achterland start de pipegroei pas bij hogere vervallen dan bij een dicht achterland. In het begin is de pipe tip nog dicht bij het achterland en het groeien van de pipe heeft naar verwachting relatief minder effect op concentratie van stroming. Het verschil tussen een open en dicht achterland is dan het grootste. Naarmate de pipe langer wordt en de kop dicht bij het intredepunt komt wordt de invloed van pipegroei groter ten opzichte van de invloed van het achterland. Hierdoor vlakt bij een open achterland de H vs L curve sterker af als het kritieke verval wordt benaderd dan bij een dicht achterland.

Nadere analyse van de curves met een open achterland toont dat de curves voor de cases uit Hoofdstuk 6 (met een langere L_s en kleinere D/L) globaal gezien boven de curves uit hoofdstuk 5 (met een kleinere L_s en hogere D/L) liggen. En dus dat de pipelengte bij hetzelfde verval korter is met een open achterland.



Figuur 7.4 Berekende H/H_c versus L/L_c curves voor modellen uit hoofdstuk 5, en voor de representatieve schematisaties uit hoofdstuk 6. Alleen situaties waar de pipe onder de dijkbasis blijft en met een dicht achterland zijn getoond. Groene symbolen zijn modellen uit hoofdstuk 6 met langere L_s dan overige modellen.

Met een dicht achterland vallen de curves voor verschillende modellen redelijk dicht op elkaar. Een nadere beschouwing van die curves toont dat deze H/H_c vs L/L_s curves ook iets hoger liggen voor de modellen met van de cases uit hoofdstuk 6. Deze hebben een kleinere D/L en een langere L_s . Dit verschil is minimaal en kan ook te maken hebben met de minder fijne rekeninstellingen (MPicard en meshgrootte) in die grotere modellen.



Figuur 7.5 Berekende H/H_c versus L/L_c curves voor modellen uit hoofdstuk 5, en voor de representatieve schematisaties uit hoofdstuk 6. Alleen situaties waar de pipe onder de dijkbasis blijft en met een dicht achterland zijn getoond. Groene symbolen zijn modellen uit hoofdstuk 6 met langere L_s dan overige modellen.

7.4 Discussie & consequenties voor meenemen voorland

De groei van de pipe als functie van verval is afhankelijk van meerdere parameters die invloed hebben op kritiek verval en op kritieke pipelengte. De relatieve pipegroei (H/H_c vs L/L_c) lijkt echter met name beïnvloed door de leklengte van het achterland. Bij een open achterland start pipegroei bij een verval dichtbij H_c en de relatieve toename van pipelengte is groter dichtbij H_c .

In de modellen is een beperkt effect van D/L waargenomen. Een lagere D/L leidt net als een open achterland tot de meeste relatieve toename in L nabij H_c (de absolute L_c is kleiner bij een lage D/L). Echter dit effect lijkt zeker bij een ondoorlatend achterland in de orde van de numerieke onzekerheid te liggen. Andere parameters zoals d_{70} en K_{WVP} hebben wel effect op H_c en daarom op de hoogte van de H vs L curve maar niet op de relatieve vorm van de curves.

Dit betekent dat een indicatie gegeven kan worden van de pipelengte bij vervallen lager dan H_c op basis van de hier beschouwde curves.

Voor het meenemen van meer voorland kan dit wenselijk zijn wanneer L_c onder de dijkbasis uit zou komen maar de bijbehorende H_c ruim boven het te keren verval ligt. Aangezien de afname van L/L_c als functie van H/H_c het kleinste is voor situaties met een dicht achterland en een hoge D/L zou die curve voor een eerste inschatting kunnen worden gebruikt.

8 Toepasbaarheid van fictieve voorlandlengte benadering

De rekenregel van Sellmeijer veronderstelt een ondoorlatend voorland. Bij een ondoorlatend voorland is de kwelweglengte gelijk aan het voorland plus de basis van de dijk en afstand tot uittredepunt. Bij een doorlatend voorland is de kwelweglengte korter. Dan kan een fictieve lengte van het voorland berekend worden (SH Piping Bijlage E). De totale kwelweglengte is dan gelijk aan de fictieve lengte van het voorland en de basis van de dijk en afstand tot uittredepunt.

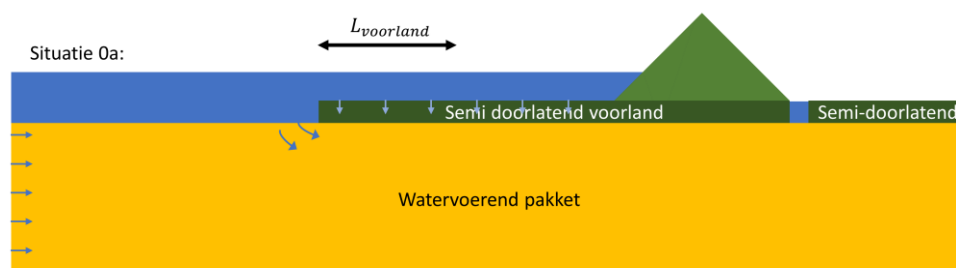
Met het beschikbaar komen van DgFlow is er ook de mogelijkheid om bovenstaande werkwijze te onderzoeken. DgFlow is een numeriek rekenprogramma en heeft daarom de mogelijkheid om een berekening uit te voeren met een doorlatend voorland en met een ondoorlatend voorland met een lengte gelijk aan de fictieve lengte van het doorlatende voorland. Deze berekeningen zouden dezelfde uitkomst moeten geven wat betreft pipinggevoeligheid. Dit blijkt echter niet het geval, in enkele situaties met een voorland met korte lek lengte (zie bijv. (Berbee et al., 2020; Rosenbrand and Knoeff, 2020b)). Bij een korte lek lengte van het voorland is de berekening met een doorlatend voorland gevoeliger voor piping dan die met een kort ondoorlatend voorland.

Waarom dit zo is, is in Bijlage B onderzocht. Dit hoofdstuk vat dat onderzoek samen en geeft handvatten voor de toepassing.

8.1 Conceptuele geohydrologische beschouwing

Een geohydrologische beschouwing van de situaties in de werkelijkheid en de vertaling daarvan naar modellen biedt direct inzicht in het probleem.

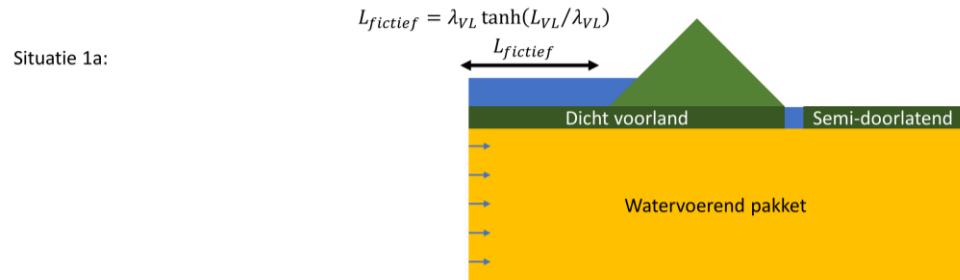
Situatie 0a, zie Figuur 8.1 hieronder, is een schematische weergave van een situatie die voor kan komen, voorafgaand aan pipegroei. Er is een semi-doorlatend voorland waardoor water intreedt, dit stroomt min of meer verticaal door de deklaag. Bij het einde van het voorland maakt de rivier contact met het WVP. Hier kan sprake zijn van radiale intredeweerstand, met name als het voorland relatief ondoorlatend is. Verder voorbij het voorland is in dit geval geschematiseerd dat de rivier ook insnijdt waardoor er langs de verticaal water horizontaal in het WVP stroomt.



Figuur 8.1 Schematisatie van een veldsituatie met een semi-doorlatend voorland. Pijltjes geven intredend water weer.

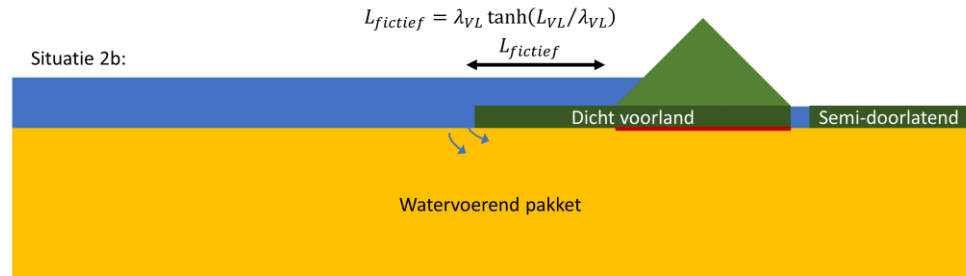
De fictieve voorlandlengte kan berekend worden voor deze situatie (zoals beschreven in de Schematiseringshandleiding Piping (Rijkswaterstaat, 2021)). De aanname in deze afleiding is dat water horizontaal stroomt in het WVP. Dit zou overeenkomen met situatie 1a, Figuur 8.2, met een ondoorlatend voorland waarbij de verticale intredeweerstand direct aan het einde van het

voorland ligt. Hierbij is geen sprake van radiale intredeweerstand aan het einde van het voorland: de stijghoogte van de rivier is direct over de gehele dikte van het WVP aanwezig.



Figuur 8.2 Schematisatie met ondoorlatend voorland met fictieve voorlandlengte, de instroom in het WVP is door de verticale rand bovenstreams, de aanname is dat water in het WVP horizontaal stroomt.

In de rekenregel van Sellmeijer kan alleen ondoorlatend voorland meegenomen worden. Deze regel is afgeleid voor situaties zoals situatie 2b, waarbij het water aan het einde van het voorland horizontaal intreedt. Hier is dus wel sprake van radiale intredeweerstand en aan het einde van het voorland is de stijghoogte niet geheel constant over de diepte.



Figuur 8.3 Schematisatie met ondoorlatend voorland voor de rekenregel van Sellmeijer. Instroom is door de horizontale rand waardoor sprake is van radiale intredeweerstand.

Er is dus sprake van een beperkt verschil tussen de schematisaties. De grootte van dit verschil hangt sterk af van de beschouwde situatie (geometrie en parameters) maar ook van of er al een pipe gevormd is, zoals hieronder wordt uitgewerkt.

Het gemiddelde verhang in het watervoerend pakket hangt af van de totale weerstand tegen stroming in het systeem. Radiale intredeweerstand is onderdeel van de weerstand tegen stroming, maar het relatieve belang daarvan hangt af van de overige weerstanden in het systeem.

Het effect van de aanvullende weerstand is relatief groter als:

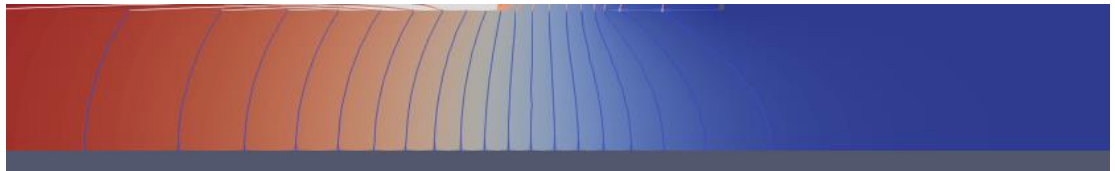
- Er sprake is van pipegroei, waardoor de overige weerstanden lager worden.
- De verhouding tussen de fictieve voorlandlengte $L_{fictief}$ en de dikte van het watervoerend pakket kleiner wordt. Dit leidt tot sterkere kromming van stroombanen juist bovenstrooms van het dichte voorland en meer stromingsweerstand.

Dit is in Bijlage B uitgewerkt met D-Geo Flow sommen met verschillende schematisaties voor intrederandvoorwaarden en verhoudingen $L_{fictief}/D$ en een analytische beschouwing.

8.2 Stijghoogte contouren DgFlow en verhang onder de dijk

De stijghoogtecontouren geven het effect van de radiale introdeweerstand goed weer. Hieronder is een selectie van de resultaten uit Bijlage B gemaakt om de boven beschreven effecten te illustreren.

Deze illustraties zijn voor de situatie met pipe. De stijghoogten voor een model met lek lengte van het voorland 39 m; lengte voorland 200 m en fictieve voorlandlengte 39 m is hieronder getoond. In de deklaag zijn de stijghoogte contouren nagenoeg horizontaal (water stroomt verticaal in). In het WVP zijn de stijghoogtecontouren onder het voorland licht gekromd naar de diepte, er is vrijwel alleen horizontale stroming. Nabij de pipe onder de dijk zijn stijghoogte contouren gekromd door het effect van de pipe.



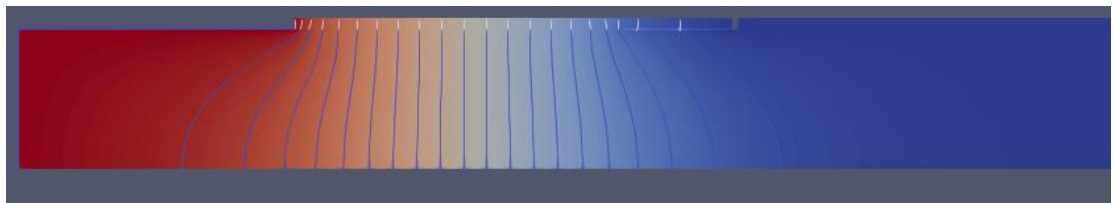
Figuur 8.4 Stijghoogte contouren voor model met semi-doorlatend voorland, leklengte van het voorland 39 m; lengte voorland 200 m en fictieve voorlandlengte 39 m. Model 25 m dik.

In een model met slechts 39 m ondoorlatend voorland, gelijk aan de fictieve voorlandlengte, en direct een verticale instroom zijn stijghoogtecontouren onder het voorland recht. De buitenwaterstand is over de gehele diepte van het WVP aanwezig.



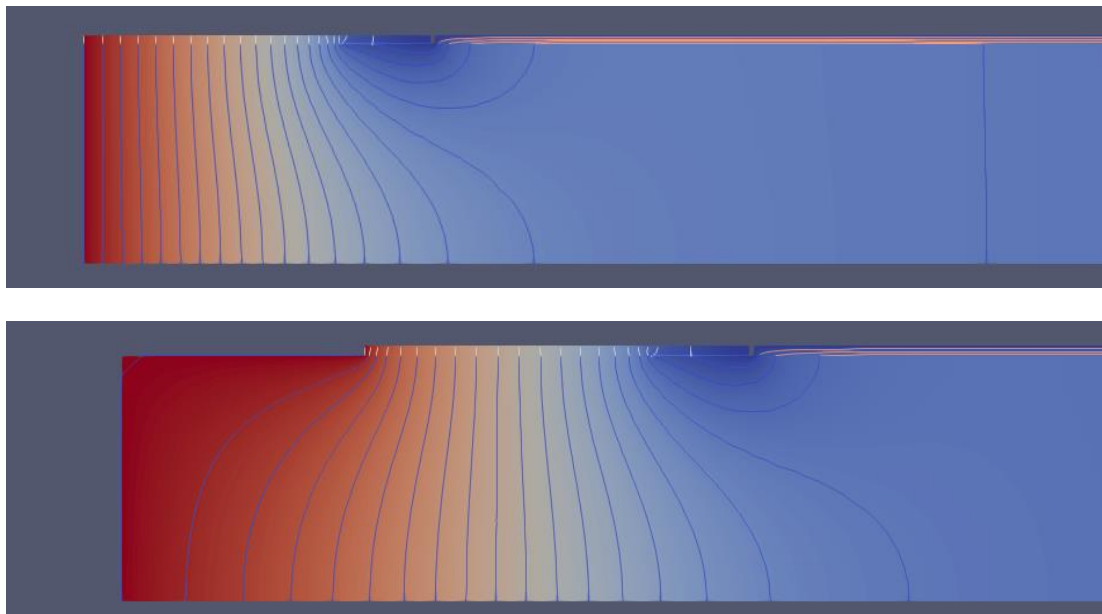
Figuur 8.5 Stijghoogte contouren in model met 39 m ondoorlatend voorland, gelijk aan de fictieve voorlandlengte, en horizontale instroom door verticale rand. Model 25 m dik.

In een model met 39 m ondoorlatend voorland maar een horizontale instroom is de stijghoogte onderin het WVP lager bij het einde van het voorland. Dit leidt tot sterker gekromde stroombanen, en minder instromend water bij een gegeven verval dan bij een verticale instroom.



Figuur 8.6 Stijghoogte contouren in model met 39 m ondoorlatend voorland en instroom door het horizontale vlak aan het einde van het voorland en door de verticale rand. Model 25 m dik.

Dit effect wordt nog sterker wanneer een dieper WVP wordt beschouwd. Met dezelfde fictieve voorlandlengte maar een WVP van 50 m dik is het verschil tussen een verticale en horizontale instroom hieronder getoond.



Figuur 8.7 Stijghoogte contouren in modellen met ondoorlatend voorland en: instroom door verticale rand aan einde van voorland (boven); instroom door horizontaal vlak aan einde voorland i.c.m. instroom door verticale rand (onder).

Uit de analytische berekeningen blijkt dat het effect op het verhang onder de dijk kleiner is dan 14% zolang $L_{fictief}/D > 1$.

8.3 Samenvatting

Verschillen die geconstateerd zijn, waarbij het kritieke verval met de rekenregel van Sellmeijer en een fictieve voorlandlengte hoger is dan het kritieke verval in D-Geo Flow met een semi-doorlatend voorland komen waarschijnlijk voort uit het tussen aannames in de rekenregel en de geohydrologische schematisatie in D-Geo Flow.

De fictieve voorlandlengte-benadering geeft een equivalente lengte van een ondoorlatend voorland weer, uitgaande van horizontale stroming in het WVP (een verticale instroomrand aan het einde van het voorland). Hierdoor speelt radiale intredeweerstand geen rol.

De rekenregel van Sellmeijer is afgeleid voor een situatie met een ondoorlatend voorland/dijkbasis maar met instroom door een horizontaal vlak. Hierdoor speelt radiale intredeweerstand wel een rol.

Het toepassen van de fictieve voorlandlengte in de rekenregel geeft daardoor een beperkte overschatting van het kritieke verval. Deze overschatting wordt groter naarmate de verhouding $L_{fictief}/D$ kleiner wordt. Uit de analytische berekeningen blijkt dat het effect op het verhang onder de dijk kleiner is dan 14% zolang $L_{fictief}/D > 1$. Dit zal in veelvoorkomende situaties het geval zijn.

8.4 Handelingsperspectief

De relevantie van onzekerheid door aannames in de analytische beschouwing moet in het licht van overige onzekerheden gezien worden. De onzekerheid in ondergrondparameters zal over het algemeen een beduidend groter effect op de overstromingskans hebben. Ook de onzekerheid door 3D concentratie van stroming, die ook invloed heeft op de analytische beschouwingen, heeft een groter effect op de overstromingskans.

Daarom lijkt het verdedigbaar om de huidige aanpak met de fictieve voorlandlengte, te blijven hanteren voor situaties waar $L_{fictief}/D \gg 1$, dan zijn de onzekerheden door aannames in analytische bepaling relatief klein.

Voor situaties waar $L_{fictief}/D < 1$ wordt de afwijking van het verhang onder de dijk groter en die situaties zou een geohydrologische gekoppelde analyse, zoals met D-Geo Flow een uitkomst bieden. Kortweg zijn dit situaties met:

- Situaties met een kort voorland: als $L_{fysiek} < D$.
- Situaties met een lang voorland maar met een korte λ_{VL} waar $\lambda_{VL} < D$ (dus $K_{WVP}c_{VL} < D$ (de doorlatendheid van het WVP maal de intredeweerstand $<$ dikte WVP).

In tussenliggende gevallen zal de beslissing over een nadere analyse (bijv. D-Geo Flow) mede afhangen van de grootte van andere onzekerheden, en de mate waarin het handelingsperspectief beïnvloed wordt.

9 Toepasbaarheid rekenregel bij pipegroei onder voorland

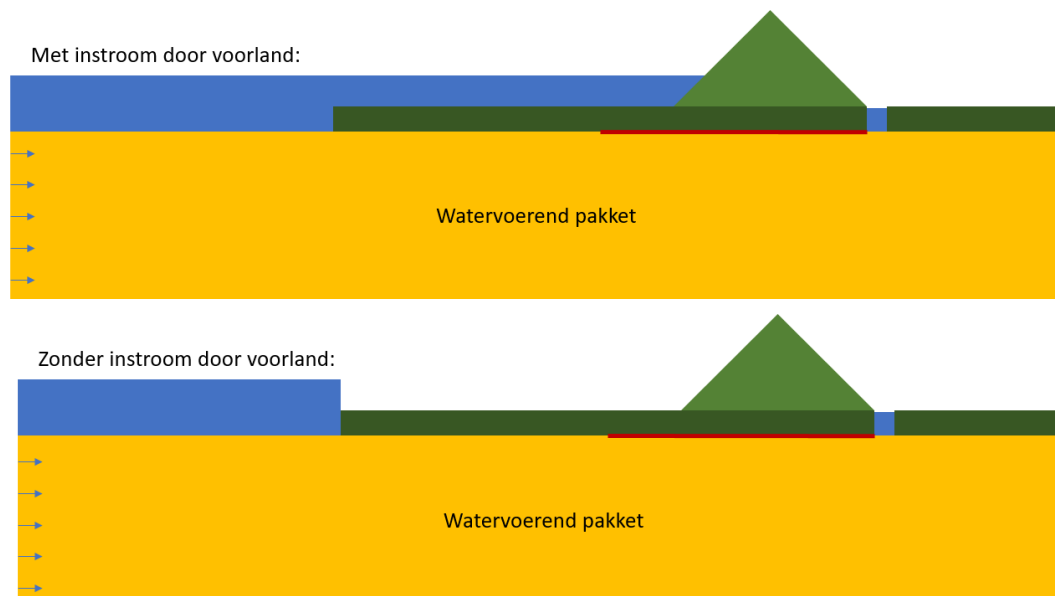
Bij relatief ondoorlatende voorlanden hoeft pipegroei onder voorland geen bezwaar te zijn, indien er geen sprake kan zijn van kortsluiting. Wanneer de pipe onder het voorland groeit kan er stroming van bovenaf naar de pipe komen, een situatie waarvoor het Sellmeijer model niet is gevalideerd. Dit hoofdstuk gaat over de toepasbaarheid van de rekenregel in situaties waar pipegroei onder het voorland toegestaan is. In situaties met een relatief dikke deklaag is de verwachting dat de intredeweerstand c zodanig hoog is dat instroom door het voorland naar de pipe een verwaarloosbaar effect heeft op pipegroei.

Eerst wordt een conceptueel model gebruikt om aan te duiden wat de relevante parameters zijn bij stroming door het voorland naar de pipe. Vervolgens worden de belangrijkste aan de hand van een case uit Hoofdstuk 6 onderzocht. Hoewel analytische formules gebruikt kunnen worden om een inschatting te maken van het debiet dat intreedt door het voorland, geven deze geen inzicht in de invloed daarvan op de pipe ontwikkeling. Daarom wordt DgFlow gebruikt om dit te onderzoeken in het voorliggende hoofdstuk. Hierbij is de aanname dat de invloed van instroom door het voorland verwaarloosbaar is wanneer de resultaten van een D-Geo Flow berekening met instroom door het voorland vergelijkbaar zijn met de resultaten zonder instroom door het voorland.

De analyse wordt gedaan door de pipelengte en het kritieke verval te vergelijken voor een situatie die wordt gemodelleerd:

- **Met** een stijghoogterandvoorwaarde op het voorland (bovenste figuur hieronder).
- **Zonder** een stijghoogterandvoorwaarde op het voorland. (onderste figuur hieronder).

In het geval zonder stijghoogterandvoorwaarde op het voorland is er geen stroming door de deklaag naar de pipe, en is de situatie dus vergelijkbaar met de rekenregel. In het geval met stijghoogterandvoorwaarde is er wel stroming. Met de analyse wordt nagegaan of bij een lange leklengte, deze stroming zodanig klein is dat het kritieke verval en de pipelengte niet significant beïnvloedt worden.



Figuur 9.1 Illustratie van situatie waarbij stroming door het voorland mogelijk is (bovenste) en waar geen stroming door het voorland komt (onderste).

9.1 Conceptueel model

De verwachting is dat het effect van stroming door de deklaag in het voorland naar de pipe af hangt van:

- Het effect van deze stroming op de waterspanning onder de deklaag in de baan van de pipe. Voor pipegroei is de verwachting dat de gradiënt bij de kop van de pipe bepaald of een pipe groeit (primaire erosie). Met het rekenmodel van Sellmeijer in D-Geo Flow wordt ook aan de hand van het verhang aan de kop van de pipe bepaald of de pipe langer wordt (echter in het rekenmodel wordt hier het model van Sellmeijer voor secundaire erosie voor gebruikt).
- Het effect van stroming door de deklaag op het totale debiet in de pipe, het debiet in de pipe beïnvloedt de diepte en drukval in de pipe.

Relevante eigenschappen zijn:

- $K_{WVP}D$ en c , λ_{VL} .
- Bij hoge c en hoge $K_{WVP}D$, dus bij hoge λ is de bijdrage van stroming door de deklaag naar verwachting klein.
- L_s en *Dijkbasis* en λ_{AL} de pipe vormt nooit geheel onder het voorland, over het algemeen zal een groot deel van de pipe zich onder de dijkbasis bevinden. Dus de stroming door het voorland beïnvloedt slechts een deel van de pipe. De L_c wordt voornamelijk door D/L_s en λ_{AL} bepaald.

9.2 Modelberekeningen

DgFlow berekeningen met het model Rivieren Dik zijn gebruikt om het effect van stroming door het voorland te onderzoeken. Het model is zoals beschreven in Hoofdstuk 6 met de enkele wijzigingen.

In deze berekeningen zijn de doorlatendheid van het watervoerend pakket en van de deklaag in het voorland aangepast om te zorgen voor een situatie met een lange lek lengte in het voorland, 1550 m en dus naar verwachting weinig invloed van instroom door het voorland.

De fysieke voorlandlengte is 250 m (evenals in hoofdstuk 6) en met deze λ_{VL} is het fictieve intredepunt 248 m van de buitenteen. Een lange lengte van het achterland (141 m en 1000m m) wordt gehanteerd om lange pipes te krijgen. De stapgrootte van de berekeningen is 0.001 m.

Om te onderzoeken of het effect van het wijzigen van $K_{WVP}D$ of van c bij gelijke lek lengte leidt tot een ander resultaat voor het effect van instroom door de deklaag naar de pipe op H_c of L_c zijn berekeningen gedaan met:

- $\lambda_{VL} = 1500 \text{ m} : K_{WVP}=40 \text{ m/d} , c = 1200 \text{ d}$.
- $\lambda_{VL} = 1500 \text{ m} : K_{WVP}=400 \text{ m/d} , c = 120 \text{ d}$.

Doorlatendheden van klei kunnen zeer variabel zijn. Voor de situatie waar we willen zien of er nog significante stroming door de deklaag naar de pipe gaat wordt in eerste instantie uitgegaan van deklagen van 2-3 m dik waarbij minstens 1 m klei altijd verzadigd is en er geen scheuren zijn. Voor 1 m onverzadigde gerijpte klei worden intredeweerstand in de orde van 100 tot >1000 dagen genoemd in (Van Meerten, 2020). In de inventarisatie langs waterschappen in hoofdstuk 6 worden voor het Getijdengebied bovengrenswaarden > 1000 dagen genoemd, maar ook in het rivierengebied zijn waarden > 100 dagen veelal genoemd. De 400 dagen voor doorlatendheid van het watervoerend pakket is niet realistisch maar gekozen om een berekening met doorlatender voorland met gelijke lek lengte uit te voeren om aan te tonen dat het de λ is die relevant is voor het effect van stroming door de deklaag naar de pipe op H_c en L_c en niet c alleen.

De basiscase voor Rivieren dik in hoofdstuk 6 heeft de combinatie $K_{WVP} = 40 \text{ m/d} , c=120 \text{ d}$. De λ_{VL} is daarmee 480 m en de fictieve kwelweglengte 270 m ten opzichte van 288 m in deze aanvullende cases. Het kritieke verval is 11.7 m in DgFlow (10.9 m met de rekenregel).

De cases met een achterland lek lengte van 141 m en 1000 m worden gebruikt omdat dit in de langste pipes resulteert. De parameters zijn hieronder weergegeven.

Tabel 9.1 Berekeningen case Rivieren dik met een relatief ondoorlatend voorland.

Model	K_{WVP} m/d	$C_{deklaag,VL}$ d	λ_{VL} , m	λ_{AL} , m	L_s , m	H_c , m	L_c , m
Rivieren Dik instroom door voorland case 1 λ_{AL} kort	40	1200	1550	141	288	12.69	61
Rivieren Dik instroom door voorland case 1 λ_{AL} lang	40	1200	1550	1000	288	12.59	63
Rivieren Dik geen instroom door voorland case 1 λ_{AL} kort	40	1200	1550	141	288	12.81	58
Rivieren Dik geen instroom door voorland case 1 λ_{AL} lang	40	1200	1550	1000	288	12.71	58
Rivieren Dik instroom door voorland case 2 λ_{AL} kort	400	120	1550	141	288	5.91	63
Rivieren Dik instroom door voorland case 2 λ_{AL} lang	400	120	1550	1000	288	5.87	62
Rivieren Dik geen instroom door voorland case 2 λ_{AL} kort	400	120	1550	141	288	5.97	60
Rivieren Dik geen instroom door voorland case 2 λ_{AL} lang	400	120	1550	1000	288	5.92	64

Om het effect van stroming door de deklaag te analyseren is in onderstaande tabel per case de invloed van stroming door de deklaag weergegeven.

Tabel 9.2 Effect van stroming door de deklaag op L_c en H_c .

Case	H_c met stroming door deklaag/ H_c zonder stroming door deklaag/ %	L_c met stroming door deklaag/ L_c zonder stroming door deklaag/ %
Rivieren Dik case 1 λ_{AL} kort	99	105
Rivieren Dik case 1 λ_{AL} lang	99	109
Rivieren Dik case 2 λ_{AL} kort	99	105
Rivieren Dik case 2 λ_{AL} lang	99	97

9.3 Discussie en conclusies

Zelfs met een λ_{VL} van 1500 m heeft stroming door het voorland een effect op H_c en L_c . Dit effect is echter klein, de berekende H_c met stroming door de deklaag is 99% van de berekende H_c zonder stroming door de deklaag voor alle cases. De berekende L_c laat geen consistent beeld zien, deze is in 3 gevallen hoger dan en in 1 geval lager met stroming door de deklaag. Het verschil is minder dan 10% en naar verwachting niet significant. In deze berekeningen was de pipelengte bij kritiek verval ca 60 m en de dijkbasis 40 m breed. De pipe kwam dus ca. 20 m onder de dijkbasis uit, 30% van de totale pipelengte.

Voor het model met een hogere $K_{WVP}D$ en een lagere c is het effect van de stroming door de deklaag op L_c en H_c redelijk vergelijkbaar met het model met de lagere $K_{WVP}D$ en hogere c . Dit duidt op het belang van de λ_{VL} en niet de individuele parameters $K_{WVP}D$ en c .

Het verschil door de invloed van stroming door het voorland is voor deze cases kleiner dan het verschil tussen het DgFlow en de rekenregel. Met de rekenregel wordt voor case 1 een kritiek verval van 11.50 m en voor case 2 een kritiek verval van 5.34 m berekend. Dat is ca 90% van H_c berekend met DgFlow.

Met de relatief lange leklengte van het voorland in de basis case, 490 m, is de fictieve kwelweglengte toch nog bijna 10 m korter dan met de leklengte van 1550 m in de aanvullende cases; voor deze geometrie met 250 m voorland. Dit geeft aan dat stroming door het voorland ook bij vrij lange leklengtes t.o.v. de fysieke voorlandlengte relevant is.

Samenvattend:

- In situaties met een relatief ondoorlatend voorland is het niet alleen de weerstand van het voorland maar de weerstand in relatie tot de $K_{WVP}D$, dus de λ_{VL} die relevant is. Bij een zeer doorlatend WVP zal al bij een lagere introdeweerstand weinig effect van stroming door het voorland zijn. Daardoor is de λ_{VL} een relevante parameter.
- Het effect van stroming door het voorland naar de pipe hangt ook af van hoe ver de pipe onder dijkbasis komt, de lengte van de pipe onder het voorland.
- Bij relatief ondoorlatende voorlanden leidt de stroming door de deklaag in het voorland tot een iets lager kritiek verval dan wanneer er geen stroming door het voorland zou zijn. In het onderzochte geval was dit verschil echter kleiner dan het verschil tussen DgFlow en de rekenregel.
- In het onderzochte geval was de kritieke pipelengte met stroming door het voorland iets langer dan in de situatie zonder stroming door het voorland. Het verschil was echter verwaarloosbaar in het licht van andere onzekerheden.

Handelingsperspectief:

- Doordat de combinatie van de pipelengte die onder het voorland komt (afhankelijk van L_s , D en λ_{AL}) en de λ_{VL} van belang is voor de invloed van stroming door het voorland op de pipe groei is het van belang om een locatie specifieke afweging te maken. Daarnaast is het van belang het risico dat stroming door de deklaag invloed heeft op de pipegroei naar de pipe te zien in het licht van andere onzekerheden, bij relatief ondoorlatende deklagen en lange voorlanden kunnen verschillen tussen D-Geo Flow en de rekenregel, onzekerheden in ondergrondparameters, en onzekerheid in de pipelengte al snel dominant zijn boven de onzekerheid door stroming door de deklaag.

10 Beschouwing van risico's op kortsluiting bij pipegroei onder voorland

Een van de risico's bij pipegroei onder het voorland is dat de pipe kortsluiting maakt bij een onderbreking in de deklaag bij een waterstand lager dan het kritieke verval. Dit hoofdstuk geeft een beschouwing van de aspecten die in relatie tot kortsluiting relevant zijn, het gaat dus om het risico op kortsluiting tussen de buitenteen en de kritieke pipelengte. Het andere risico, dat de rekenregel minder betrouwbare resultaten geeft als gevolg van stroming door de deklaag naar de pipe is in hoofdstuk 9 behandeld.

Het risico op kortsluiting hangt nauw samen met de deklaag dikte in het voorland, en met de inrichting van het voorland. Onderstaande tabel geeft een indicatie in welke situaties kortsluiting verwacht kan worden. De categoriegrenzen in onderstaande tabel slaan op verwachte deklaagdikte, enige mate van spreiding zal in de praktijk te verwachten zijn.

Tabel 10.1 Risico op kortsluiting (aanwezig - geel, verwaarloosbaar – groen, groot - oranje)

	0-0,5 m	Dikte deklaag		
		0,5-1 m	1-2 m	> 2m
Grondmechanisch: grondbreuk boven de pipe	Niet relevant, onvoldoende fictieve voorlandlengte voor pipegroei onder het voorland			
Bestaande gaten door invloed van flora en fauna en structuurvorming		grote dierlijke gaten via scenario's		
Bestaande gaten door landgebruik		Bij bouwvoor dieper dan 0,5 m risico kortsluiting.		
Sloten en andere ontgravingen		Meenemen in schematisatie, kopsloten als scenario		

Bij dunne deklagen, 0 – 0,5 m dik is het onwaarschijnlijk dat de fictieve voorlandlengte zodanig lang is dat een pipe onder de dijkbasis uit komt, de veronderstelling is dat de intredeweerstand relatief laat is. Op deze situatie wordt daarom in dit hoofdstuk niet ingegaan.

Het falen van leidingen, omwaaien van bomen, falen van niet waterkerende objecten, of afschuiving van het voorland, dient apart beschouwd te worden en wordt hier niet meegenomen. De globale stijghoogteverdeling en grondwaterstroming onder en achter de dijk wordt bepaald door de bulkweerstand van het voorland. Lokale kleine afwijkingen in de weerstand hebben maar een gering effect op de stijghoogte en grondwaterstroming. Slechts als de pipe dicht in de buurt van zo'n kleine afwijking (gat) in het voorland komt kan deze richting de afwijking (gat) groeien. Alleen de afwijkingen (gaten) die tussen de buitenteen en de kop van de kritieke pipe voorkomen zijn relevant zijn voor de faalkans.

Het risico bij kortsluiting hangt af van de kans van optreden en de consequenties. De vier typen oorzaken van kortsluiting zijn in onderstaande paragrafen toegelicht.

10.1 Grondmechanisch bezwijken

Grondmechanisch bezwijken, of groundbreuk, kan leiden tot een verbinding tussen de pipe onder het voorland en het onder water staande voorland.

Als de deklaag van het voorland uit enigszins samenhangende grond bestaat, (grond met enige cohesie) dan is het niet aannemelijk dat deze zal bezwijken als er zich een pipe onder ontwikkelt. Pipes zijn in de fase van terugschrijdende erosie nog klein, de breedte zal eerder enkele centimeters bedragen dan decimeters. Als de pipes worden overspannen door enigszins samenhangende grond met een dikte van meer dan de pipebreedte, is het niet waarschijnlijk dat het gewicht van het water de grond doet scheuren.

Daarom wordt de kans op kortsluiting door groundbreuk voor een samenhangende deklaag dikker dan 0,5 m als verwaarloosbaar ingeschat.

10.2 Bestaande gaten door invloed van flora fauna en structuurvorming

Bij alle bestaande gaten door invloed van flora, fauna en structuurvorming is het voor de kans op kortsluiting en het gevolg van kortsluiting van belang dat het gat ook open blijft staan tijdens het hoogwater. De diepte van dergelijke gaten is sterk afhankelijk van de fluctuatie in de grondwaterstand in het voorland en de deklaagdikte. Wortels en graverijen gaan naar verwachting niet dieper dan de gemiddelde laagste grondwaterstand (GLG)

Structuurvorming, krimpscheuren, kan dieper gaan deze is gevoeliger voor de fluctuaties in de grondwaterstand.

Flora

Bij flora wordt gedacht aan de invloed van begroeiing, wortels van planten, in het voorland (akkerbouw wordt apart benoemd onder landgebruik). Langs de wortelkanalen van dode planten zouden kleine gaten in de deklaag aanwezig kunnen zijn. Bij kleine gaten is de verwachting dat deze een verwaarloosbare invloed hebben op pipegroei, en dat ze vaak bij hoogwater dicht zullen zwellen of verstopt raken. Zeker bij dikkere deklaag is het ook minder waarschijnlijk dat wortelkanalen door de gehele deklaag heen groeien. Bij sterk fluctuerende grondwaterstanden en periodes van droogte zal in de wortelzone van stuiken en bomen structuurvorming optreden. De invloed van dergelijke gaten en structuurvorming op de bulk intredeweerstand moet wel meegenomen worden bij het bepalen van de leklengte en de mogelijke invloed van stroming door de deklaag naar de pipe.

Fauna

Onder fauna wordt de invloed van dierlijke graverijen verstaan. Graverijen zoals vossenholen en mollengangen kunnen tot kortsluiting leiden indien de pipe contact maakt met het hol of de gang. De kans hierop kan worden afgewogen door middel van scenario's waar de kans van voorkomen van het scenario met het hol of gangengebied ingeschat wordt aan de hand van de frequentie van voorkomen van de hopen of gangengebieden. Dit kan omdat dergelijke vergravingen naar verwachting de locatie van het ontstaan van de pipe binnendijks niet beïnvloeden omdat ze geen of een beperkte invloed hebben op de stijghoogte en grondwaterstroming. Het wordt aanbevolen om een handreiking te ontwikkelen om de kans op de scenario's, en de consequentie, beter in te kunnen schatten.

Structuurvorming

Structuurvorming treedt op door aanwezigheid van krimpscheuren in kleilagen die droog staan. In gevallen met dunne deklaag, 0,5-1 m, in combinatie met een relatief diepe grondwaterstand kan de deklaag zeer gestructureerd zijn. Dit leidt tot een lagere intredeweerstand die meegenomen dient te worden bij de bepaling van de leklengte. Daardoor zal de weerstand waarschijnlijk zodanig laag zijn dat pipegroei onder het voorland onwenselijk is vanwege de instroom door de deklaag naar de pipe, waardoor kortsluiting niet meer relevant is.

Bij minder structuurvorming waarbij nog intacte (verzadigde) deklaag aanwezig is, is de verwachting dat eventuele structuurscheuren mits klein tijdens hoogwater grotendeels dicht gaan, door het zwellen van de klei. Onderzoek heeft aangetoond dat grotere scheuren niet

door zwel dicht gaan (Alterra, 2013). Bij een permanent verzadigde zone van minimaal een halve meter is het risico op kortsluiting via structuurvorming te verwaarlozen.

10.3 Landgebruik

Landgebruik, zoals akkerbouw, kan tot een diepere verstoring van de deklaag leiden. Deze invloed verlaagt de intredeweerstand, en dit effect kan meegenomen worden bij de bepaling van de bulk intredeweerstand en lek lengte. De verwachting is dat landgebruik zoals akkerbouw niet leidt tot gaten waar kortsluiting op kan treden bij deklagen dikker dan 1 m. Uitgangspunt hierbij is dat de bouwvoor niet dieper is dan 0,5 m en dat er dus nog minimaal 0,5 m samenhangende grond aanwezig is.

10.4 Sloten en andere ontgravingen

Als er voor de dijk evenwijdig aan de dijk sloten voorkomen of grote waterpartijen voorkomen die de deklaag doorsnijden, dan kan daar kortsluiting optreden als de pipe bij de waterpartij komt. Hiervoor zijn alleen de waterpartijen tussen de buitenteen en de kop van de kritieke pipe van belang. (Waterpartijen verderop in het voorland hebben wel invloed op de bulk intredeweerstand en dat effect dient meegenomen te worden, maar voor kortsluiting en de faalkans voor terugschrijdende erosie zijn deze niet meer relevant).

De bodem van sloten en waterpartijen heeft vaak nog een redelijke weerstand. Deze kan wel meegenomen worden in de bepaling van de bulk intredeweerstand, maar biedt niet voldoende weerstand tegen kortsluiting wanneer er een pipe onder ontwikkelt.

Voor sloten haaks op de dijk en kleine waterpartijen (poelen) die de deklaag doorsnijden is, net als voor de grotere gaten in 10.2, de kans dat de pipe bij een dergelijk gat komt relevant. Dit kan middels scenario's meegenomen worden omdat het ontstaan van de pipe binnendijks is niet afhankelijk van de locatie van de kopsloot of poel als de sloot of poel de grondwaterstroming niet beïnvloedt. Sloten en poelen in het voorland hebben veelal een beperkt effect op de globale stijghoogteverdeling en grondwaterstroming, zeker doordat vaak een laag slib aanwezig is.

11 Veiligheidsbenadering voorlanden

In de bestaande WBI aanpak wordt het berekende kritieke verval uit de rekenregel van Sellmeijer gebruikt om de faalkans te bepalen met behulp van de kalibratierelatie. Door het meenemen van voorland komt hier een controle bij, namelijk of de pipe onder de dijkbasis uit komt. Dit is een extra toepassingsvoorwaarde voor de rekenregel van Sellmeijer. De rekenregel van Sellmeijer is afgeleid voor situaties zonder instroom door de deklaag boven de pipe, en er bestaat risico op kortsluiting bij vervallen lager dan kritiek verval als de pipe onder het voorland groeit.

Momenteel wordt in de praktijk veelal de aanname gedaan dat de pipelengte maximaal 50% van de kwelweglengte zal zijn, waardoor de totale kwelweglengte maximaal 2 maal de dijkzate mag zijn zonder onder de dijkzate uit te groeien met kans op kortsluiting als gevolg. . In sommige gevallen wordt middels D-Geo Flow een pipelengte bepaald, waarop een factor wordt toegepast om onzekerheden in de berekende pipelengte te verdisconteren.

In de voorgaande hoofdstukken van dit rapport is onderzoek gedaan naar de pipelengte. Op basis van een conceptueel model en modelberekeningen zijn grafieken opgesteld om een eenvoudige inschatting te maken van de pipelengte, zonder D-Geo Flow analyse (de grafieken zijn wel op basis van DgFlow analyses) zie hoofdstuk 12. Ook is naar de variatie van de pipelengte bij kritiek verval in experimenten gekeken om een inschatting te maken van de variabiliteit van de pipelengte in hoofdstuk 4. Voor 3 geschikte experimenten is de pipelengte met het rekenmodel DgFlow gevalideerd, waaruit bleek dat modelresultaten voor pipelengte redelijk binnen de bandbreedte van de onzekerheid in de pipelengte vielen (4.3.2).

Om aan de hand van de inschatting van de pipelengte te onderbouwen dat de pipe met voldoende veiligheid onder de dijkbasis blijft voor de piping analyse in het licht van het BOI veiligheidsformat is het nodig om de onzekerheden goed mee te nemen. In bijlage C is een eerste analyse gedaan van de semi-probabilistische verificaties die nodig zijn om aan de veiligheid te voldoen, op basis van de onzekerheid in de berekende pipelengte. Middels probabilistische analyses is voor zeven situaties onderzocht of een semi-probabilistische veiligheidsfactor van 1,5 op de pipelengte consistent is met de variatiecoëfficiënt van 0,3 van de pipelengte bij kritiek verval die ingeschat is op basis van de in Hoofdstuk 4 beschouwde proeven. Hierbij is gekeken naar cases waarbij het kritiek verval dicht bij de waterstand ligt waarbij voldaan wordt aan de eis, maar ook naar cases waarbij het kritieke verval door het meenemen van voorland veel hoger ligt.

De analyses laten zien dat er geen redenen zijn om te veronderstellen dat de semi-probabilistische aanpak met een factor van 1,5 op de pipelengte tot onveilige situaties leidt. Ze laten ook zien dat er waarschijnlijk nog aanscherping mogelijk is. Het wordt aanbevolen om de probabilistische analyses toe te passen op een groot aantal echte cases om zo een nog beter beeld te krijgen van de voorlandveiligheid, en vooral goed te kijken naar de overlap tussen kritiek verval en falen door kortsluiting voorland.

12 Concept stappenplan meenemen meer voorland in rekenregel van Sellmeijer

In dit hoofdstuk zijn de inzichten uit de voorgaande hoofdstukken verwerkt tot een concept stappenplan voor het meenemen van voorland in de analyse met de rekenregel van Sellmeijer. Dit concept stappenplan dient als basis voor een toepassing in pilot cases en kan uitgewerkt worden tot een handvat.

Aanleiding: In de rekenregel wordt voorland vaak niet meegenomen of alleen bij hele dikke deklagen. Bij zeer dikke deklagen in het voorland, > ca. 2-3 m kan het zijn dat het effect van instroom door het voorland naar de pipe, zowel als de kans op zwakke plekken waar kortsluiting ontstaat, klein is, en dan kan het hele voorland meegenomen worden. Ook bij dunnere deklagen kan de invloed van het voorland worden meegenomen. In dat geval is effectieve intredeweerstand van het voorland van belang, zelfs een dunne laag klei biedt een zekere intredeweerstand die een significant effect op piping kan hebben. Het is daarom van belang om het hele voorland in beschouwing te nemen, op een verantwoorde manier.

Doel en afbakening:

Doel is de beheerder in staat te stellen om een onderbouwde inschatting te maken van hoeveel voorland meegenomen kan worden in de pipinganalyse. Aanbevolen wordt om met dit stappenplan een eerste inschatting te maken van de mee te nemen voorlandlengte. Aangezien het stappenplan gebaseerd is op een conceptueel model dat is gevalideerd met berekeningen en proeven voor een beperkt aantal situaties wordt aanbevolen om de inschatting voor enkele locaties waarbij het effect van onzekerheden op het handelingsperspectief het grootste is te verifiëren met een D-Geo Flow berekening. Parameterbepaling is geen onderdeel van het stappenplan, wel wordt aangegeven hoe van grof naar fijn ook parameters aangescherpt kunnen worden.

Toepassingsgebied: het toepassingsgebied van dit stappenplan is gelijk aan het toepassingsgebied van de rekenregel van Sellmeijer. Het stappenplan is toepasbaar voor 2D situaties (uitstroom in een sloot of bij een relatief doorlatend achterland waar meerdere pipes vormen), een homogeen 1-laags watervoerend pakket met een isotrope doorlatendheid. De effecten van kennisonzekerheden zoals: 3D stroming, anisotropie en meerlaagsheid worden in de laatste stap, sanity check, benoemd en de kwalitatieve invloed wordt specifiek voor gerelateerd aan het voorland beschreven. Deze kunnen voor zowel optimalisatie als een ongunstigere uitkomst leiden en het is van belang de relevantie voor een gegeven situatie in te schatten.

Onderbouwing: De stappen zijn gebaseerd op een conceptueel model voor pipelengte bij kritiek verval dat is onderbouwd met analyse van experimenten en berekeningen met het model DgFlow. In het onderzoek is een eerste curve voor de relatie tussen geometrie en pipelengte bij kritiek verval ontwikkeld, waarmee een eerste inschatting van de pipelengte bij kritiek verval kan worden gemaakt. Er waren echter weinig proeven beschikbaar met een 2D situatie, slechts 3, met een brede spreiding op de pipelengte. Dit is onvoldoende voor een volledige validatie van het conceptuele- en het rekenmodel dat ten grondslag ligt aan dit stappenplan. Modelresultaten uit het 2D rekenmodel lijken logisch en plausibel, en komen overeen met het conceptuele model, echter aanvullende validatie is wenselijk. De tweede ontwikkelde curve met het verval ten opzichte van pipelengte, om zo ook bij lagere vervallen dan het kritieke verval de pipelengte te kunnen bepalen, is niet aan de hand van proeven gevalideerd.

Toepassing van het stappenplan, en verificatie van de ingeschatte pipelengtes met D-Geo Flow berekeningen in een bredere set praktijksituaties, en kennisontwikkeling, kan ertoe leiden dat dit handvat in de toekomst wordt aangepast. De voornaamste onzekerheden worden in onderstaande stappen aangegeven, met suggestie voor de afweging daarvan.

Benodigde gegevens: De parameters die nodig zijn voor de analyse zijn gelijk aan die voor de pipinganalyse met de rekenregel. Daarnaast zijn de parameters van het voorland en achterland van belang, te weten de leklengte λ (zie kader), de deklaag dikte, en de lengte. Evenals bij de gebruikelijke piping analyse is het van belang stil te staan bij de kwaliteit van de beschikbare data en of het inwinnen aanvullende data leidt tot een ander handelingsperspectief.

Leklengte

De intredeweerstand c (ofwel de dikte & doorlatendheid $c = d_{deklaag}/K_{deklaag}$) in combinatie met de dikte en doorlatendheid van het watervoerend pakket (WVP) geven de leklengte van het voorland

$$\lambda_{VL} = \sqrt{\frac{K_{WVP} d_{deklaag} VL^D}{K_{deklaag} VL}}$$

Ook de totale lengte van het voorland is van belang om de fictieve

kwelweglengte te bepalen. Voorlanden kunnen zeer heterogeen zijn, waardoor bepaling van de effectieve leklengte niet altijd eenvoudig is. Op basis van waterspanningsmetingen, al dan niet in combinatie met regionale geohydrologische modellen kan ook een inschatting gemaakt worden van de leklengte. Het is van belang om breder te kijken dan de specifieke doorsnede, aangezien de geohydrologie door een groter gebied wordt beïnvloed.

Een eerste indicatie van methodieken die gebruikt zouden kunnen worden om van grof naar fijn de leklengte in te schatten is:

- Inschattingen van c en K_{WVP} en D : in het BOI veiligheidsformat worden bovengrenswaarden van K_{WVP} en D gehanteerd, voor c ligt het voor de hand om een ondergrenswaarde te nemen aangezien de λ anders overschat wordt. Wel wordt aanbevolen een gevoeligheidsanalyse te doen met verwachtingswaarden en met ondergrenswaarden van K_{WVP} en D om de gevoeligheden te onderzoeken.

Een hoge K_{WVP} en D leiden tot een laag H_c maar een hoge λ_{VL} : bovengrenswaarden zijn dus 'veilig' voor H_c maar niet voor λ_{VL} . Daarom is een gevoeligheidsanalyse aanbevolen.

- Probabilistische trekkingen van c en van K_{WVP} en D en een ondergrenswaarde van de resulterende leklengte. *Met gevoeligheidsanalyse voor effect bij een verwachtingswaarde.*
- Indien data beschikbaar is (peilbuismetingen) kunnen deze worden gebruikt (TAW, 2004).
- Een geohydrologisch model waarin de λ_{VL} bepaald word aan de hand van het stijghoogte verloop. In een stochastisch model kan een verdeling van de λ bepaald worden om een ondergrens en verwachtingswaarde te bepalen.

De verschillende methodieken kunnen verschillende resultaten voor de leklengte geven en daarom is een gevoeligheidsanalyse relevant om in te schatten of de onzekerheid significant is voor de opgave. Parameterbepaling voor voorlanden is een onderwerp in verschillende lopende onderzoeken (KvK Datagedreven schematiseren, De Innovatieversneller GAP).

Achterland: Een doorlatend achterland leidt tot kortere pipes bij kritiek verval. Indien de leklengte van

het achterland ($\lambda_{AL} = \sqrt{\frac{K_{WVP} d_{deklaag} AL^D}{K_{deklaag} AL}}$) niet bekend is kan een eerste inschatting gemaakt worden

uitgaand van een dicht achterland. Wanneer het achterland een relatief doorlatende deklaag heeft (een kleine λ_{AL}) is optimalisering mogelijk, aangezien de pipelengte korter is bij meer doorlatende achterlanden. Ook hier gelden de bovengenoemde stappen als mogelijke werkwijze.

Concept Stappenplan:

1. **Afweging bezwaar bij pipegroei onder voorland:** pipegroei onder het voorland hoeft geen bezwaar te zijn in situaties met een dikke deklaag in het voorland waar zowel:
 - a. Het risico op kortsluiting verwaarloosbaar is.
 - b. Stroming door de deklaag naar de pipe geen significant effect heeft.

Kwantificering van benodigde dikte en leklengte om te voldoen aan a en b is situatie afhankelijk. Bij leklengten in het voorland > ca. 1000 m is de verwachting dat pipegroei onder het voorland geen bezwaar is in relatie tot stroming door de deklaag naar de pipe (b). Dan kan het gehele fysieke voorland meegenomen worden in de kwelweglengte, mits er geen gaten in de deklaag zijn waar de pipe kortsluiting kan maken (a). Voor nadere afweging van het risico op kortsluiting zie Hoofdstuk 10.

Bij geen risico bij pipegroei onder voorland (punten a en b) ga door naar stap 7 Sanity Check. Anders stap 2.

2. **Bepalen effectieve kwelweglengte L_s** inclusief de geohydrologische weerstand van het voorland (zoals ook beschreven voor bepaling van H_c zie Bijl. E (Rijkswaterstaat, 2021).

$$L_s = \lambda_{VL} \tanh(L_{VL}/\lambda_{VL}) + Dijkzate$$

Waar L_{VL} de afstand van de buitenteen naar het einde van het voorland is en *dijkzate* de afstand van uittredepunt tot buitenteen is, en λ_{VL} de leklengte (ook wel spreidingslengte) van het voorland is.

Voor parameterwaarden kunnen boven/ondergrenswaarden gehanteerd worden conform het veiligheidsformat in BOI (zie ook Hoofdstuk 8.2 en kader hierboven met betrekking op λ_{VL}).

Gevoeligheidsanalyse met verwachtingswaarden en bandbreedte van parameters is aanbevolen voor bandbreedte L_s .

3. **Bepaling kritiek verval H_c met rekenregel van Sellmeijer en L_s**
Conform de standaard werkwijze en veiligheidsformat, voor een beoordeling of ontwerp op terugschrijdende erosie, alleen wordt nu de gehele fictieve kwelweglengte L_s meegenomen.

De faalkans wordt vervolgens vergeleken met de faalkanseis voor de doorsnede. Indien het kritieke verval voldoet is het van belang te kijken naar de pipelengte bij kritiek verval in stap 4.

Wanneer niet wordt voldaan wordt nagegaan of dit resultaat logisch en stabiel is. Er kan worden overwogen of aanscherping van de schematisatie, aanvullende gegevens, of het meenemen van nieuwe kennis zou leiden tot een ander handelingsperspectief (sanity check).

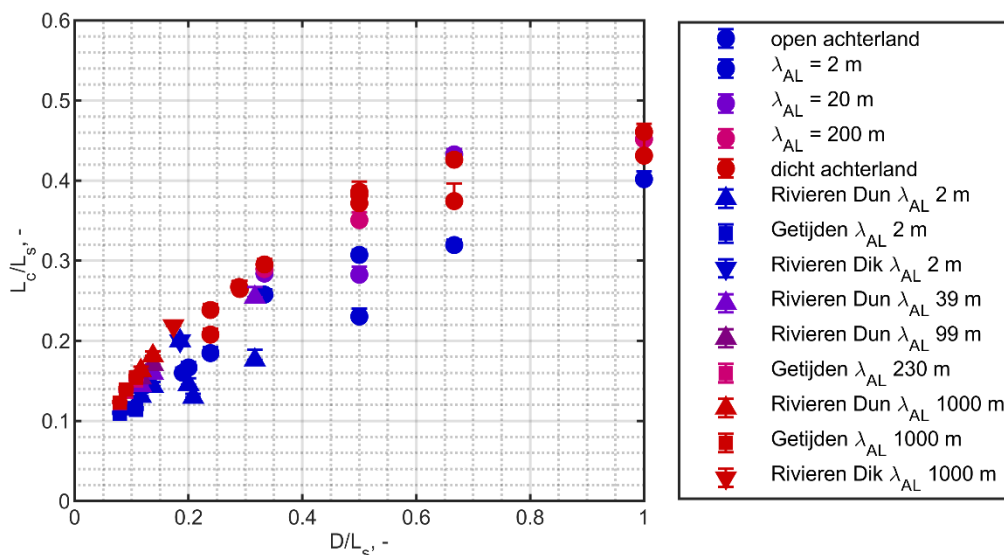
4. **Inschatting** pipelengte bij kritiek verval L_c

Een snelle inschatting van de pipelengte bij kritiek verval L_c is mogelijk voor situatie met een ondoorlatend achterland (rode symbolen) met behulp van onderstaande figuur, waarin D de dikte van het watervoerend pakket is en

$L_c = \frac{L_c}{L_s} \times L_s$. Dit leidt tot een langere L_c dan bij een doorlatend achterland (zie ook Hoofdstuk 3 en 5).

Aanscherping is mogelijk bij doorlatende achterlanden, zoals aangegeven in de volgende stappen (de grafiek hieronder is niet geschikt voor die aanscherping).

Voor gevoeligheidsanalyse van L_c , bepalen bandbreedte van verwachte D/L_s als gevolg van onzekerheid L_s in stap 2 en onzekerheid D .



Figuur 12.1 Berekende L_c/L_s als functie van D/L_s voor verschillende cases. Bollen zijn modellen uit hoofdstuk 4 en 5, de overige cases zijn de representatieve schematisaties uit hoofdstuk 6 en hoofdstuk 9. Alleen situaties waar de pipe onder de dijkbasis blijft zijn getoond. Rode symbolen hebben een ondoorlatend achterland en geven een indicatie van de verwachte pipelengte voor de analyse. Indien het achterland doorlatend is leidt dat tot kortere pipes.

5. **Check** pipelengte onder dijkbasis bij H_c

Bepaal of $\gamma_{Lc} L_c < \text{Dijkbasis}$ voor de in stap 4 bepaalde bandbreedte van L_c .

De factor γ_{Lc} houdt rekening met de onzekerheden in de pipelengte berekening. De modelonzekerheid van de berekende pipelengte is groter dan voor H_c als gevolg van:

- Grotere variabiliteit van L_c dan van H_c in proeven.
- Beperkte set aan experimenten ter validatie van het model

Op basis van verkennende probabilistische analyses en variatie in de pipelengte in proeven is voor γ_{Lc} in eerste instantie een factor 1,5 voorgesteld (zie Bijlage C). Nadere onderbouwing hiervan is voorzien in vervolgonderzoek.

Indien $\gamma_{Lc} L_c \ll \text{Dijkbasis}$ is de kans voldoende klein dat de pipe onder de dijkbasis uitkomt bij kritiek verval voor situaties die overeenkomen met het model (2D homogeen isotroop). Ga naar stap 7 Sanity check voor de overwegingen voor omgang met de pipelengte in het licht van overige onzekerheden.

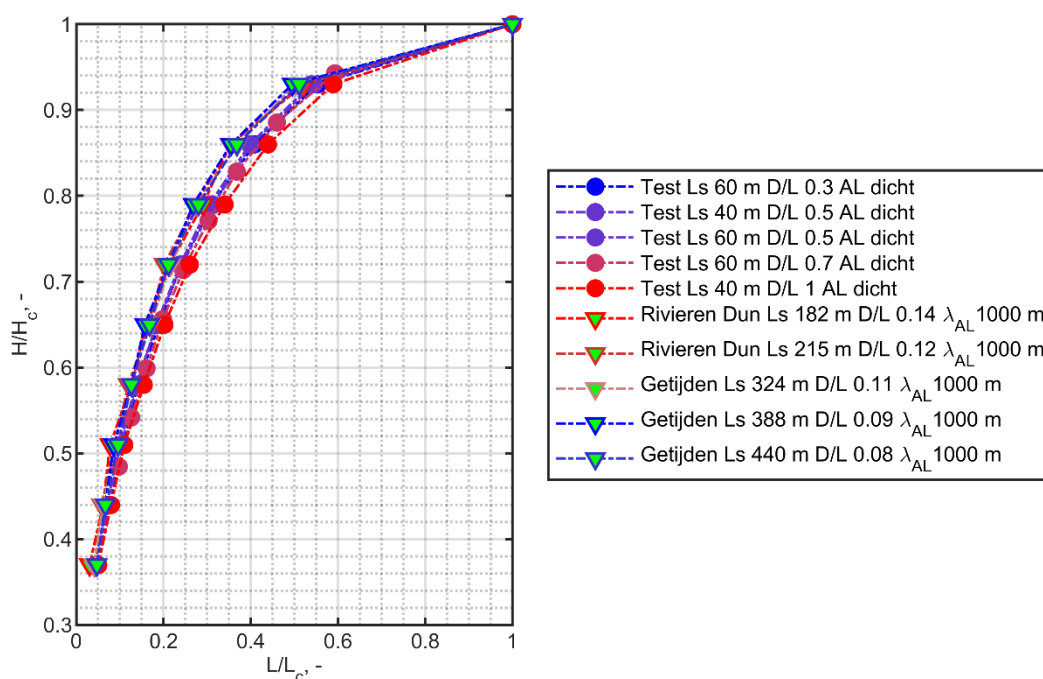
Gezien de beperkte onderbouwing van γ_{Lc} , en de overige factoren die invloed hebben op de pipelengte maar niet in het model zijn opgenomen (zoals toegelicht in stap 7), wordt bij gevallen waar $\gamma_{Lc}L_c \approx Dijkbasis$ aanbevolen eerst naar stap 6 te gaan.

Indien $\gamma_{Lc}L_c > Dijkbasis$ zijn één of een combinatie van onderstaande mogelijkheden aanbevolen waarbij stap 6a het minste aanvullende inspanning vergt, en stappen 6b of 6c bewerkelijker zijn, en stap 6d met name relevant zal zijn bij relatief dikke, minder doorlatende, deklagen.

6a. Inschatting pipelengte bij verval lager dan H_c

Indien het verval waarbij aan de faalkanseis wordt voldaan beduidend kleiner is dan de berekende H_c ligt het voor de hand om een inschatting te maken van de pipelengte bij dit lagere verval waarbij nog wordt voldaan aan de gewenste veiligheid voor terugschrijdende erosie, zoals het verval bij de eis inclusief de schadefactor voor piping (zie ook Bijlage C). De pipelengte neemt sterk af bij vervallen onder H_c zoals in onderstaande figuur getoond. Deze curve kan gebruikt worden om een inschatting te maken van de pipelengte $L_{gereduceerd}$ bij een lagere waterstand $H_{gereduceerd}$ ⁵.

Deze curve is gebaseerd op een dicht achterland, optimalisatie is mogelijk met een open achterland dan neemt de pipelengte sterker af met afname van H .



Figuur 12.2 Berekende H/H_c versus L/L_c curves voor modellen uit hoofdstuk 5, en voor de representatieve schematisaties uit hoofdstuk 6. Alleen situaties waar de pipe onder de dijkbasis blijft zijn getoond. De curve met D/L 1 (rode bollen) ligt het laagste en kan gebruikt worden voor een eerste inschatting van de afname van L met een afname van H .

Hier geldt ook de controle of $\gamma_{L_{gereduceerd}}L_{gereduceerd} < Dijkbasis$

Voor de factor $\gamma_{L_{gereduceerd}}$ zou in eerste instantie 1,5 ook aangehouden kunnen worden. Hier is naar verwachting nog optimalisatie mogelijk.

⁵ Ook bij deze stap wordt nog steeds de weerstand van het gehele voorland meegenomen,

Wanneer $\gamma_{L_{gereduceerd}} L_{gereduceerd} \approx \text{Dijkbasis}$ wordt aanbevolen stappen 6b of 6c te overwegen.

6b. Berekening met D-Geo Flow

Met name wanneer het achterland een hoge doorlatendheid, korte leklengte of afwezige deklaag, heeft is de verwachting dat de pipelengte beduidend korter is dan bij een dicht achterland (zie ook Hoofdstuk 3 en 5). Het effect van doorlatendheid van het achterland op L_c/L_s is afhankelijk van locatie specifieke kenmerken en de pipelengte kan dan met D-Geo Flow berekend worden. In D-Geo Flow kunnen ook overige karakteristieken zoals meerlaagsheid en anisotropie meegenomen worden in de analyse.

Ook voor de op die manier berekende pipelengte geldt vervolgens de analyse van $\gamma_{L_c} L_c < \text{Dijkbasis}$ om de onzekerheid in de modelberekening mee te nemen.

Indien nodig kan ook in D-Geo Flow de pipelengte bij een gereduceerd verval bepaald worden zoals beschreven in stap 5a.

Opgemerkt wordt dat bij dunne pakketten, lage D/L , D-Geo Flow al snel leidt tot een hoger kritiek verval dan de rekenregel van Sellmeijer. Wanneer voorland meegenomen wordt leidt dit al snel tot lagere D/L en daarmee hogere H_c in D-Geo Flow ten opzichte van de rekenregel. Ook in dit opzicht kan D-Geo Flow optimalisatie bieden.

Voor toepassing van D-Geo Flow zie ook de manual en de Factsheet (Knoeff et al. 2021). Aanvullend is het bij het berekenen van de pipelengte bij kritiek verval van belang om rekening te houden met de invloed van de stapgrootte van het verval in de D-Geo Flow berekening op de berekende pipelengte. De pipe groeit het meest in de laatste centimeters verval rondom het kritieke verval, daarom zal een fijne stapgrootte (orde 0.1 – 0.01% van H_c) nodig zijn om L_c nauwkeurig te bepalen.

6c. Probabilistische analyse van de pipelengte en H_c , zoals beschreven in Bijlage C.

6d. Maatwerk risico op kortsluiting: Dit is met name kansrijk bij relatief dikkere deklagen in het voorland.

Dan kan een inschatting gemaakt worden van het risico dat een pipe die onder de dijkbasis uit komt daadwerkelijk leidt tot kortsluiting bij vervallen onder het kritieke verval. En of het aannemelijk is dat de aanvullende stroming door de deklaag naar de pipe een significant effect heeft op het kritieke verval.

Het is relevant om na te gaan hoe ver de pipe dan onder de dijkbasis uit komt (met bovenstaande stappen). Voor die zone is het risico op stroming door de deklaag naar de pipe, en kortsluiting relevant.

Bij dikkere deklagen is de kans op zwakke plekken kleiner, en dus is het risico op kortsluiting kleiner (zie ook Bijlage C). In combinatie met langere leklengtes (meer intredeweerstand en/of hoge $K_{WVP} D$) zouden gevolgen van mogelijke pipegroei onder het voorland voor de overstromingskans klein zijn. Op basis daarvan kan worden onderbouwd dat pipegroei onder (deel van) het voorland geen invloed heeft op de overstromingskans.

7. Sanity check voorland

In een Sanity Check wordt de stabiliteit van het resultaat beschouwd waarbij rekening gehouden wordt met nieuwe, in ontwikkeling zijnde kennis en aspecten die mogelijk niet in het model zijn meegenomen.

Specifiek voor het meenemen van voorland zijn hieronder effecten en onzekerheden benoemd die niet in het model zijn meegenomen maar die wel invloed hebben op de pipelengte. Voor deze effecten is de afweging hoe ermee om te gaan gebaseerd op de relevantie die ze hebben voor de opgave. Leiden ze tot een ander handelingsperspectief? Bij de omgang met de resultaten is het van belang om het bereiken van de kritieke pipelengte te zien als een stap in het hele faalpad. Er zijn nog meer stappen die van belang zijn voordat een overstroming optreedt en die dus invloed hebben op de overstromingskans. Een afweging van de onzekerheden in het totaalplaatje wordt daarom altijd aanbevolen.

Indien effecten die niet meegenomen zijn significant blijken voor het handelingsperspectief wordt aanbevolen om met experts in overleg te gaan over de specifieke situatie.

- *3D stroming*: het model houdt geen rekening met 3D concentratie van stroming naar de pipe. De verwachting is dat 3D stroming leidt tot een langere kritieke pipelengte en een lager kritiek verval.
3D effecten zijn naar verwachting sterk in situaties met een enkele wel en een ondoorlatende deklaag in het achterland (in tegenstelling tot uitstroom in een sloot of een deklaag zonder achterland).
In dergelijke situaties is het mogelijk dat de onzekerheid door 3D effecten op het kritieke verval groter is dan de onzekerheden die meegenomen worden in de piping analyse. De grootte van het effect op pipelengte is onzeker, maar de verwachting is dat pipes langer zullen zijn in 3D situaties.
- *0,3d regel*: de drukval in het opbarstkanaal heeft effect op de pipelengte en op het kritieke verval. Deze drukval is echter onzeker, daarom wordt voor situaties met een dikke deklaag, waar $0,3d$ een relatief belangrijk deel van het totale verval bedraagt een gevoeligheidsanalyse aanbevolen voor het effect op H_c zie ook (Rosenbrand and Knoeff, 2019; Van Beek et al., 2019).
Voor de pipelengte geldt dat een hogere drukval zou leiden tot meer stroming naar het achterland en een kortere pipelengte bij kritiek verval. De grootte van dit effect is echter kleiner bij minder doorlatende (dikke) deklagen.
- *Anisotropie*: anisotropie van de doorlatendheid van het WVP leidt tot langere L_c/L_s . Tevens leidt anisotropie tot een hoger kritiek verval, en dus tot een kortere pipe bij een gegeven verval. Anisotropie kan netto gunstig of ongunstig werken voor de pipelengte, afhankelijk van lokale kenmerken zoals de anisotropiefactor, of de rivier insnijdt in het WVP, hoe lang het voorland is, de dikte van het WVP, of er meerlaagsheid speelt, etc.
Om het effect van anisotropie te analyseren kan een gevoeligheidsanalyse gedaan worden met D-Geo Flow (zie (Hijma, 2020) voor een indicatie van anisotropie factoren in andere afzettingen en de Factsheet D-Geo Flow).
- *Meerlaagsheid*: voor een twee lagen situatie kan in de rekenregel een gewogen gemiddelde doorlatendheid toegepast worden (conform SH Piping (Rijkswaterstaat, 2021) (deze aanpak is alleen geldig voor een minder doorlatende laag boven een doorlatendere laag). Het is bekend dat het kritieke verval hoger kan zijn wanneer 2 lagen worden gemodelleerd in D-Geo Flow dan wanneer 1 laag wordt gemodelleerd met een equivalente doorlatendheid. De grootte van het effect hangt af van het doorlatendheidscontrast tussen de lagen, en van andere locatie specifieke

kenmerken (of de rivier insnijdt in het WVP, hoe lang het voorland is, of anisotropie ook speelt,...).

Een verkennende analyse van een case (Bijlage D) laat zien dat de pipelengte bij het kritiek verval beduidend langer wordt in een meerlaagse situatie, en dat het effect al optreedt bij lagere doorlatendheidscontrasten ($K_{onder}/K_{boven} = 2.7$) waar het effect op H_c nog verwaarloosbaar is. Het netto effect kan dus, net als bij anisotropie, gunstig of ongunstig werken.

Om het effect van meerlaagsheid op de pipelengte te analyseren kan D-Geo Flow gebruikt worden.

- *Fictieve voorlandlengte bepaling*: In situaties waar D/L_s richting 1 gaat, veelal bij relatief doorlatende voorlanden met een korte leklengte, wordt de invloed van radiale intredeweerstand belangrijker. Doordat dit niet mee wordt genomen bij de analytische bepaling van de fictieve voorlandlengte, maar wel een rol speelt in de rekenregel van Sellmeijer, kan dit leiden tot een overschatting van het kritieke verval (zoals onderzocht in bijlage B, en hoofdstuk 8).
De grootte van dit effect op het kritieke verval kan door middel van een D-Geo Flow berekening.
- *Heterogeniteit in de baan* van de pipe heeft naar verwachting veel effect op de pipelengte voor waterstanden nabij het kritieke verval. Hierbij kan het gaan om variaties van parameters zoals de korrelgrootte of doorlatendheid in het watervoerend pakket, maar ook variatie in de diepte van de deklaag. Het is nog niet duidelijk hoe de invloed hiervan op pipelengte, of op kritiek verval meegenomen kan worden.

Aangezien de hierboven beschreven stappen een concept uitwerking zijn van het conceptuele model en een modelanalyses voor een selectie van cases, wordt aanbevolen om in aanvulling op stappen 1 tot en met 6 een of meerdere D-Geo Flow analyses te doen op de meest kritieke locaties in het traject om de pipelengte te verifiëren. Naar aanleiding van aanvullend inzicht en toepassing in een pilot kan dit stappenplan worden aangepast en uitgewerkt naar een handvat.

13 Aanbevelingen

In het voorliggende rapport zijn verschillende aspecten met betrekking op pipegroei en het meenemen van voorlanden onderzocht. Op basis hiervan zijn de aanbevelingen onderverdeeld per onderdeel.

13.1 Handvat ontwikkelen

Een stappenplan is opgesteld dat de werkwijze van voorlanden meenemen schetst. Om dit stappenplan uit te werken tot een concreet handvat wordt aanbevolen om het toe te passen in pilot case(s) met potentiële gebruiker(s) om zo inzicht te krijgen in de toepasbaarheid voor praktijksituaties. Aanbevolen wordt om een pilot toepassing te gebruiken om:

- Aanvullende D-Geo Flow berekeningen voor enkele situaties te doen om de huidige inzichten en grafieken in het stappenplan te testen/aan te vullen en uit te breiden, bijvoorbeeld voor meerlaagsheid en anisotropie. Zowel meerlaagsheid als anisotropie leiden tot langere pipes dan een homogeen pakket, en het effect daarvan is relevant voor de toepassing van de resultaten van pipelengte schattingen. Dit onderdeel kan in eerste instantie conceptueel en deterministisch, maar mogelijk vervolgens ook met probabilistische DgFlow analyses en in relatie tot de veiligheidsbenadering uitgewerkt worden.
- Een eerste validatie van de curve van pipelengte onder kritiek verval aan de hand van de beschikbare (3) proeven met 2D configuratie uitvoeren. Nadere validatie aan de hand van proeven wordt aanbevolen voor het 3D onderzoek.
- Middels probabilistische berekeningen de analyse van de voorgestelde semi-probabilistische veiligheidsfactor op de pipelengte nader te onderbouwen en mogelijk aan te scherpen.
- Nader in te gaan op het lengte-effect in het veiligheidsformat wanneer gewerkt wordt met lokale uittredepunten, en de consequentie van op grotere schaal voorland meenemen.
- Indien het een pilot betreft waar een regionaal geohydrologisch model beschikbaar is, de verschillende in het stappenplan geschetste mogelijkheden voor het bepalen van de leklengte van het voorland te onderzoeken en aanbevelingen te doen voor de toepassing. Hier is ook de relatie met het lopende onderzoek binnen Kennis voor Keringen Datagedreven Schematiseren en De Innovatieversneller geohydrologische aanpak piping relevant.
- Met beheerders in gesprek te gaan over de bruikbaarheid van het stappenplan, en de omgang met de sanity check. De aanpak vraagt een beheerder afwegingen te maken en te onderbouwen waarom bepaalde keuzes gemaakt zijn, in plaats van voor te schrijven dat bepaalde modellen en effecten meegenomen moeten worden. De vraag is of zij hiermee voldoende ondersteund zijn en hoe deze ondersteuning eventueel geoptimaliseerd kan worden.
- Nadere onderbouwing van risico op kortsluiting bij pipegroei onder het voorland uitwerken.

Het handvat kan in eerste instantie als prototype gedeeld worden, vergelijkbaar met de 'bijsluiter' ((Rosenbrand and Knoeff, 2019)), daarnaast kan het aan ENW voorgelegd worden voordat het in het BOI instrumentarium wordt opgenomen.

Aansluitend op de totstandkoming van het voorliggende rapport en het handvat zijn aanvullende analyses in relatie tot de veiligheidsbenadering uitgevoerd (Bijlage E). Deze analyses vormen de basis voor het hierboven aanbevolen vervolgonderzoek met betrekking tot het veiligheidsformat.

13.2 D-Geo Flow doorontwikkeling en update van Factsheet D-Geo Flow

In de huidige Factsheet (door BOI en HWBP) geeft bijlage D aanwijzingen in relatie tot het meenemen voorland in D-Geo Flow. Deze kunnen worden aangepast naar aanleiding van de nieuwe inzichten met betrekking op relevante parameters, resterende onzekerheden, en de onderbouwing van de veiligheidsfactor op pipelengte. Hierbij wordt met name gedacht aan het belang van parameters D/L en λ_{AL} voor de pipelengte; onzekerheden rondom 3D stroming voor pipelengte en H_c en de resultaten van de probabilistische analyse voor de veiligheidsfactor.

Daarnaast is het relevant om in de Factsheet specifiek onderscheid te maken tussen rekeninstellingen die relevant zijn voor de pipelengte en voor kritiek verval. In het huidige onderzoek blijkt met name de rol van de stapgrootte waarmee verval wordt aangebracht van groot belang. De onderschatting voor L_c is in de meeste gevallen beduidend groter dan de onderschatting voor H_c . De keuze van de meshgrootte van de pipe elementen bepaalt ook de nauwkeurigheid van de pipelengte berekening.

Tot slot is het relevant om in de Factsheet nader in te gaan op verschillen tussen de rekenregel en D-Geo Flow, die te maken kunnen hebben met:

- De aannames in de fictieve voorlandlengte en schematisatie van randvoorwaarden in D-Geo Flow (bij relatief doorlatende voorlanden).
- De verschillen die optreden bij kleinere D/L van het WVP.

Omdat het berekenen van de kritieke pipelengte in de huidige implementatie extreem fijne rekenstappen vraagt, die leiden tot excessieve rekentijden, is het aanbevolen om algoritmes te ontwikkelen om efficiënt naar de kritieke pipelengte te itereren, en om efficiënter de pipehoogte te berekenen, in D-Geo Flow of opvolgers daarvan. Dit is ook voor onderzoek naar 3D piping van belang, aangezien modellen nog groter zullen zijn.

Het wordt ook aanbevolen D-Geo Flow door te ontwikkelen voor probabilistische analyses, wat zowel voor omgang met onzekerheden van de pipelengte als voor kritiek verval.

13.3 Nader onderzoek

In het voorliggende onderzoek is het conceptueel model voor de pipelengte onderzocht met een selectie van de beschikbare proeven. Deze zijn ook gebruikt om de modellering van de pipelengte bij kritiek verval in DgFlow te valideren. Er waren echter te weinig proeven beschikbaar met een 2D situatie, slechts 3 met een brede spreiding op de pipelengte. Dit is onvoldoende voor een validatie. Modelresultaten uit het 2D model lijken logisch en plausibel ook op basis van het conceptuele model, echter aanvullende validatie is wenselijk. Laboratorium proeven met een 2D uitstroom leiden veelal tot pipegroei die initiatie gedreven is, en zijn dus ongeschikt voor validatie van de kritieke pipelengte.

Er zijn wel veel laboratoriumproeven met een 3D uitstroom beschikbaar, pipegroei in 3D situaties staat hoog op de onderzoeksagenda. Wanneer dit onderwerp wordt onderzocht wordt sterk aanbevolen daarbij gelijktijdig pipelengte en kritiek verval te analyseren. Het conceptuele model voor pipelengte uit het voorliggende onderzoek kan een basis vormen voor 3D conceptuele modellen voor pipelengte.

De vergelijking van proeven met modellen voor de validatie van het rekenmodel DgFlow is alleen uitgevoerd voor het kritieke verval. De pipegroei onder het kritieke verval kan, voor de 3 geanalyseerde proeven, ook nog onderzocht worden. Aanbevolen wordt dit ook in het kader van het 3D onderzoek en de vergelijking van 3D en 2D pipegroei op te nemen. Het toepassingsgebied van de rekenregel van Sellmeijer en D-Geo flow is beperkt. Het gaat om 2D situaties met een homogeen watervoerend pakket in de baan van de pipe. Bij toepassing buiten die situaties is het van belang om af te wegen welke factoren een rol spelen en hoe deze invloed hebben op het pipingproces. Het conceptuele model in voorliggend onderzoek biedt hier al inzicht in met de hypothesen met betrekking op 3D effecten, doorlatend achterland en anisotropie. Aanbevolen wordt in het 3D onderzoek expliciet in te gaan op wanneer 3D stroming een relevante rol speelt, en wanneer een 2D benadering voldoende is.

Er zijn geen laboratorium experimenten met een semi-doorlatend voor en/of achterland. De invloed van een semi-doorlatend achterland op de pipelengte is relevant maar niet gevalideerd. Het effect van pipegroei onder een semi-doorlatend voorland is ook niet onderzocht. Modelmatig kan dit effect wel in D-Geo Flow meegenomen worden. De experimentele onderbouwing van deze situaties heeft echter een lagere prioriteit dan onderzoek naar het 3D effect. Deze effecten kunnen eventueel na afronding van de eerste fase van het 3D effect onderzocht worden, zodat resultaten voor 2D en 3D verkregen worden.

13.4 Overige aanbevelingen

Uit de analyses in Hoofdstuk 8 en bijlage B blijkt dat het kritieke verval lager is wanneer de rivier direct insnijdt in het watervoerend pakket, dan aangenomen wordt in de rekenregel. De rekenregel gaat uit van instroming in een horizontaal vlak. Bij schaar dijken kan dit een relevant effect zijn om mee te nemen. Aanbevolen wordt dit inzicht in een BOI handreiking of sanity check te vermelden.

Referenties

- Allan, R., 2018. Backward Erosion Piping (Doctoral Dissertation). University of New South Wales.
- Alterra. 2013 Gedrag van verdroogde kades, Ontstaan van krimpscheuren in klei en veenkades.
- Berbee, B.M., Stoop, N., Forster, U., 2020. ' Sterkere ' dijk door benutten voorland. L. Water 34–35.
- Berbee, B.M., Stoop, N.M., 2020. Korter handreiking meenemen voorland > 1x dijkzate.
- Dolphen, L., 2014. Experimental research on different aspects of backward erosion piping in water retaining structures. MSc Thesis Universiteit Gent.
- Hijma, M.P., 2020. Anisotropieonderzoek in gebieden met andere afzettingen. Deltares Report 11202960-002-BGS-0020
- Hoffmans, G.J.C.M., 2021. Shields-Darcy Model: Grondwaterstromingsmodel berekent kritisch verval bij piping voor praktijkcondities. Geotechniek 8.
- Knoeff, H., Kanning, W., Rosenbrand, E., van Beek, V.M., 2020. Factsheet D-Geo Flow.HWBP, Rijkswaterstaat (WVL), Deltares report nr 11205758-037-GEO-0001
- Lam, K.S., 2019. KvK Piping deelproject 015: Oprekken van het mee te nemen voorland voor de kwelweglengte. Deltares Report 11203719-015-GEO-0005
- Pol, J.C., Kanning, W., van Beek, V.M., Robbins, B.A., Jonkman, S.N., under review Temporal evolution of backward erosion piping in small-scale experiments. Acta Geotech.
- Rijkswaterstaat, 2021. Schematiseringshandleiding piping.
- Robbins, B.A., Montalvo-Bartolomei, A.M., Van Beek, V.M., Murphy, J., López-Soto, J.F., 2018. A novel laboratory test for backward erosion piping. Int. J. Phys. Model. Geotech. 18, 266–279. <https://doi.org/10.1680/jphmg.17.00016>
- Roode, N., Maaskant, B., Boon, M., 2019. Handreiking Voorland. Projectoverstijgende Verkenning Voorlanden
- Rosenbrand, E., Knoeff, H., 2019. KvK Piping 2018-2019 : toepassing ontwikkelde kennis. Deltares Rapport 11205262-022-GEO-0001
- Rosenbrand, E., Knoeff, J., Hardeman, B., van Hemert, H., 2021. Rode draad overstrooming door piping.
- Rosenbrand, E., Knoeff, J.G., 2020. KvK 2019 onderzoek faalpaden en piping. Deltares Rapport 11203719-028-GEO-0009.
- Rosenbrand, E., Wiersma, A., 2019. KvK Piping 018: Optimalisaties gecombineerd beschouwen. Deltares Rapport 11203719-018-GEO-0001
- Rosenbrand, E., Wittekoek, B., 2021. Achtergrondrapport : Analyse van stroming naar achterland in DgFlow. Deltares Rapport 11206817-011-GEO-0001

- Sellmeijer, H., de la Cruz, J.L., Van Beek, V.M., Knoeff, H., 2011. Fine-tuning of the backward erosion piping model through small-scale, medium-scale and ijklijk experiments. Eur. J. Environ. Civ. Eng. 15. <https://doi.org/10.1080/19648189.2011.9714845>
- Sellmeijer, J., 1988. On the mechanism of piping under impervious structures. TU Delft.
- Silvis, F., 1991. Verificatie Piping Model Proeven in de Deltagoot evaluatierapport.
- TAW, 2004. Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken.
- Texeira, A.M., Wojciechoska, K., ter Horst, W., 2017. Derivation of the semi-probabilistic safety assessment for piping. Deltares Report 1220080-002-ZWS-0006
- V. van Beek, V. M., 2015. Backward Erosion Piping Initiation and Progression. TU Delft, Delft.
- Van Beek, V.M., Hoogendoorn, R., Rosenbrand, E., Hijma, M.P., 2019. KvK Piping deelproject 019 - Syntheserapport. Deltares Raport 11203719-019-GEO-0003
- Van Beek, V.M., Robbins, B.A., Rosenbrand, E., under review 3D modelling of backward erosion piping experiments.
- Van Beek, V.M., Vandenboer, K., 2013. Safety Assessment for Piping in WTI 2017. Deltares Rapport 1207809-004-GEO-0003
- van Esch, J.M., 2017. Concept D-Geo Flow kernel update. Deltares Memo 1230162-00-GEO-011
- Van Meerten, H., 2020. Doorlatendheidsbepaling in gelaagde gronden Onderzoek naar een protocol voor RWS-projecten. Deltares Rapport 11203697-029-BGS-0002
- van Rinsum, G., 2020. Terugschrijdende erosie en voorland. Illustratie aanpak innovatietraject met enkele D-Geo Flow analyses. Meanderende Maas Referentie 113164/20-017.472
- Vandenboer, K., 2019. A Study on the Mechanisms of Backward Erosion Piping. Doctoral dissertation Ghent University.

A Kalibraties en gehanteerde bandbreedte D/L

Wanneer voorland mee wordt genomen in de analyse leidt dit tot een andere vorm, (D/L) van het WVP. De rekenregel van Sellmeijer is afgeleid voor een beperkte bandbreedte van geometrieën (D/L en schaal). Naast de bandbreedte die gebruikt is voor het afleiden van de rekenregel, zijn ook het de omstandigheden gehanteerd in de kalibratie voor de schadefactor en de omstandigheden voor de modelkalibratie factor die in DgFlow zit van belang.

De bandbreedte van D/L is naar verwachting een dominante parameter voor de kritieke pipelengte ten opzichte van de kwelweglengte L_c/L_s . Door meer voorland mee te nemen in de analyse wordt de D/L korter. Onderstaande paragrafen gaan in op de D/L gehanteerd voor de afleiding van de rekenregel, de modelkalibratie van DgFlow, en de schadefactor.

A.1 Afleiding van de rekenregel

De rekenregel is afgeleid aan de hand van een groot aantal berekeningen met MSEEP⁶. Bij het oprekken van de kwelweglengte kan dit ertoe leiden dat de verhouding van D/L lager wordt dan de gehanteerde verhoudingen voor het afleiden van de rekenregel. De minimale D/L verhouding daarbij was 0.015, dit minimum zal zelden een issue zijn. Een voorbeeld zou zijn een WVP van 15 m en een kwelweg langer dan 1000 m. In dit geval is het onwaarschijnlijk dat piping tot een overstroming zal leiden. Ter illustratie zijn de verhoudingen getoond die in de cases die in dit rapport bestudeerd zijn getoond in onderstaande tabel.

Tabel .A.1 Overzicht van verhouding D/L .

	Getijdengebied	Rivieren dik	Rivieren Dun
Dijkbasis, m	70	40	40
Dikte WVP, m	35	50	25
D/L basis bij $N \times$ dijkbasis			
2	0.25	0.63	0.31
3	0.17	0.42	0.21
4	0.13	0.31	0.16
5	0.10	0.25	0.13

Wel wordt geconstateerd dat de afwijking tussen de resultaten met de rekenregel en D-Geo Flow groter wordt met kleinere D/L waarbij D-Geo Flow hogere kritieke vervallen geeft. Er zijn geen proeven uitgevoerd met voor de kleine D/L waar dit een issue is, dus kan niet geverifieerd worden welke aanpak beter is.

Aangezien de verwachting is dat D-Geo Flow de grondwaterstroming goed berekend, en waarschijnlijk voor dergelijke lange modellen ook beter berekend dan MSeep, er is geen reden aan te nemen dat D-Geo Flow het kritieke verval overschat. Bij MSeep was bekend dat dunne pakketten leidden tot problemen met de mesh waardoor resultaten naar verwachting minder betrouwbaar zijn.

De multi-variate analyse om te komen tot de huidige rekenregel heeft gebruik gemaakt van kleine schaal proeven en gevalideerd met de proeven van Silvis en de IJkdijk.

⁶ Notitie ANN Piping, Project GeoBrain, Projectleider Dr. Ir. J.B. Sellmeijer

In die proeven varieerde de D/L verhouding tussen de 1 en 0.2.

A.2 Modelkalibratie DgFlow met Sellmeijer rekenregel.

De modelkalibratie factor die toegepast wordt in DgFlow om de resultaten te kalibreren aan resultaten van de Sellmeijer rekenregel, is afgeleid door te kijken naar het kritiek verval berekend met DgFlow ($H_{c,DgFlow}$) en met de rekenregel van Sellmeijer ($H_{c,rekenregel}$) in (van Esch, 2017). De factor compenseert voor de andere rekenwijze van DgFlow dan MSeep, het programma dat gebruikt is om de rekenregel af te leiden.

De factor is afgeleid in (van Esch, 2017) door voor verschillende geometrieën de verhouding tussen $H_{c,rekenregel}/H_{c,DgFlow}$ te bepalen. Een verhouding kleiner dan 1 houdt dus in dat het kritieke verval met DgFlow hoger is dan in de rekenregel. In van Esch (2017) is bepaald dat een factor 0.89 representatief is voor het merendeel van de gevallen daarom is deze factor standaard in D-Geo Flow geprogrammeerd, en gehanteerd in voorliggende studie.

De waarde van de model factor hangt af van de geometrie (L en D_{WVP}), en de parameters van het WVP (d_{70} en k_{WVP}). Voor het bepalen van deze factor zijn verschillende parameter combinaties beschouwd:

- d_{70} : 2×10^{-4} m en 4×10^{-4} m.
- k_{WVP} : $3.47 \cdot 10^{-11}$ m² en $6.94 \cdot 10^{-11}$ m².
- D_{WVP} : 20 m, 40 m en 60 m.
- L : 30 m, 60 m en 90 m.

Hiermee valt op dat:

1. De modelkalibratiefactor hangt sterk af van de geometrie. Bij kleine D_{WVP}/L waarden (<0.22) wijkt de model factor sterker af, zie onderstaande tabel.
2. Doorlatendheid en d_{70} van het WVP hebben relatief weinig invloed op de modelkalibratiefactor. De grootste afwijking (van 0.02) is te zien bij een hoge D_{WVP}/L waarden van 2. Bij lage D_{WVP}/L waarden hebben deze parameters heel weinig of geen invloed op de modelkalibratiefactor.

Tabel A.2: Invloed van D_{WVP}/L op de model factor volgens (van Esch, 2017).

D_{WVP}/L [-]	Model factor [-]
0.33-2	0.87 – 0.9
<0.22	0.83

De varianten in het voorliggende rapport hebben bij het oprekken van het voorland voor het getijdengebied en het benedenrivierengebied al snel D_{WVP}/L waarden die kleiner zijn dan 0.22. Hier is dus te verwachten dat er een verschil tussen DgFlow en de rekenregel ontstaat, waarbij DgFlow een hoger kritiek verval uitrekent dan de rekenregel.

A.3 Kalibratie van de schadefactor

De kalibratie van de schadefactoren is voor de mechanismen opbarsten, heave en terugschrijdende erosie apart gedaan, zoals beschreven in (Texeira et al., 2017).

Voor de piping relatie is gebruik gemaakt van de ondergrondscenario's (3321 scenario's) uit VNK2. Hiervan waren 63% met een deklaag en 37% zonder deklaag. De kalibratie is gedaan door de benodigde kwelweglengte bij verschillende schadefactoren te bepalen. De bandbreedte van de berekende D/L verhoudingen is zeer groot, waardoor het onwaarschijnlijk is dat het oprekken van voorlanden leidt tot verhoudingen die buiten dit gebied vallen.

B Fictieve voorlandberekening voor piping

Fictieve-voorlandberekening voor piping



Fictieve-voorlandberekening voor piping

Auteur(s)

Adam Bezuijen

Ligaya Wopereis

Fictieve-voorlandberekening voor piping

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat
Contactpersoon	
Referenties	
Trefwoorden	Piping, Sellmeijer, voorland

Documentgegevens

Versie	0.1
Datum	15-11-2021
Projectnummer	11206817-010
Document ID	11206817-010-GEO-0002
Pagina's	29
Classificatie	
Status	concept Dit document is een concept en uitsluitend bedoeld voor discussiedoeleinden. Aan de inhoud van dit rapport kunnen noch door de opdrachtgever, noch door derden rechten worden ontleend.

Auteur(s)

	Adam Bezuijen	
	Ligaya Wopereis	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
0.1	Adam Bezuijen <i>AB</i>	Vera van Beek <i>B</i>	Goaitske de Vries <i>gdv</i>	
	Ligaya Wopereis <i>lw</i>			

Samenvatting

Het risico op piping voor een dijk met een doorlatend voorland wordt het rekenmodel van Sellmeijer berekend met een zogenaamde fictieve-voorlandberekening. Het rekenmodel van Sellmeijer staat alleen in ondoorlatend voorland toe. Bij een lang doorlatend voorland kan een ondoorlatend voorland in rekening worden gebracht dat dezelfde lengte heeft als de leklengte van het doorlatende voorland en de watervoerende laag.

Recent bleek dat deze methode wat vragen oproept vooral bij een voorland met korte leklengte. Daarom zijn een aantal numerieke en analytische berekeningen gemaakt. Met behulp van de resultaten van die berekeningen wordt beschreven hoe, voor verschillende situaties gerekend kan worden met het model van Sellmeijer in aanwezigheid van een kort voorland.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	6
1.1	Probleemstelling	6
1.2	Doel	6
1.3	Aanpak	7
2	Opzet numerieke berekeningen	8
2.1	Inleiding	8
2.2	Referentie model	8
2.3	Kort ondoorlatend voorland	9
2.4	Dikker WVP	10
2.5	Doorlatend achterland	13
3	Resultaten DgFlow sommen	14
3.1	Uitgevoerde berekeningen	14
3.2	Weergave resultaten	14
3.3	Analyse resultaten numerieke berekeningen	20
4	Analytische berekeningen	22
5	Consequenties voor het rekenen met een fictieve lek lengte	26
6	Conclusies	27

1 Inleiding

1.1 Probleemstelling

Piping is een belangrijk faalmechanisme voor de Nederlandse (rivier)dijken. Hoewel er nog steeds onderzoek wordt uitgevoerd om het pipingmechanisme beter te begrijpen, zijn er wel toetsmethoden die worden toegepast om te zien of een dijk voldoende stabiel is tegen piping. De standaardmethode is om gebruik te maken van het rekenmodel van Sellmeijer. Dit rekenmodel rekent uit hoeveel water er door watervoerende lagen onder een dijk doorsijpelt en of er dan piping kan ontstaan.

Het rekenmodel van Sellmeijer is een analytisch rekenmodel. Mede als gevolg hiervan is het strikt genomen alleen geldig voor sterk geschematiseerde (2-dimensionale) situaties: Een constante doorlatendheid van het watervoerend pakket, ondoorlatende deklaag, duidelijk in- en uittreepunt, voorgeschreven geometrie. Omdat de gemiddelde dijk niet aan dit ideaalbeeld voldoet zijn er aanvullende regels hoe er dan mee om te gaan.

Een van die regels is: hoe om te gaan bij een doorlatend voorland. Bij een ondoorlatend voorland is de kwelweglengte gelijk aan het voorland plus de basis van de dijk en afstand van de basis tot uittredepunt. Bij een doorlatend voorland is de kwelweglengte korter. Er wordt dan gerekend met een fictieve lengte van het voorland, zie ook Hoofdstuk 2. De totale kwelweglengte is dan gelijk aan de fictieve lengte van het voorland en de basis van de dijk en afstand van de basis tot uittredepunt.

De leklengte is gedefinieerd als:

$$\lambda = \sqrt{\frac{kdD}{k_v}} \quad (1.1)$$

Met k de doorlatendheid van het watervoerend pakket, d de dikte van het voorland, D de dikte van het watervoerend pakket en k_v de verticale doorlatendheid van het voorland en/of achterland.

Met het beschikbaar komen van DgFlow is er ook de mogelijkheid om bovenstaande werkwijze te toetsen. DgFlow is een numeriek rekenprogramma en heeft daarom de mogelijkheid om een berekening uit te voeren met een doorlatend voorland en met een ondoorlatend voorland met een lengte gelijk aan de fictieve lengte van het doorlatende voorland. Deze berekeningen zouden dezelfde uitkomst moeten geven wat betreft pipinggevoeligheid. Dit blijkt echter niet het geval. Bij een korte leklengte van het voorland is de berekening met een doorlatend voorland gevoeliger voor piping dan die met een kort ondoorlatend voorland. Waarom dit zo is, wordt in dit rapport beschreven.

1.2 Doel

Doelstelling van de studie is:

1. Onderzoeken waarom sommen met een lang doorlatend voorland niet dezelfde uitkomst hebben dan die met een equivalent kort doorlatend voorland.
2. Beschrijven wat het te verwachten verschil is tussen beide benaderingen en waarom.

1.3 Aanpak

In eerste instantie zijn 2-D berekeningen uitgevoerd met DgFlow en verschillende lek lengtes van het voor en achterland. Deze berekeningen zijn uitgevoerd met een 'vaste' pipe die niet kon groeien tijdens de berekening, maar een vooraf opgegeven lengte had. Er is een situatie doorgerekend zonder pipe en met een pipe van 20 m en met verschillende geometrieën, zie Hoofdstuk 2.

Daarna is met behulp van analytische oplossingen van de stroming vergelijking onderzocht wat het verschil is tussen de grondwaterstroming onder een dijk met een lang doorlatend voorland en een kort ondoorlatend voorland.

2 Opzet numerieke berekeningen

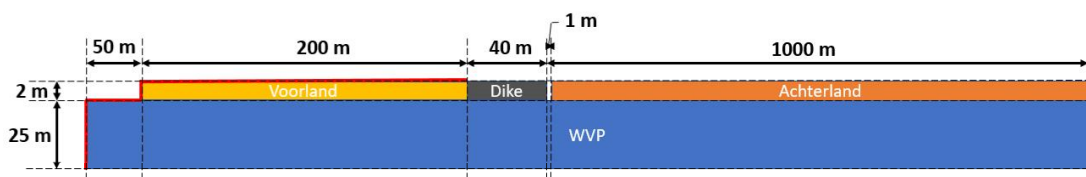
2.1 Inleiding

In de numerieke berekeningen is gevarieerd op een zogenaamd referentiemodel dat de grondopbouw naast en onder een dijk beschrijft. Het referentiemodel beschrijft de doorlatende zandondergrond onder een dijk en het voor- en achterland. De dijk zelf wordt als ondoorlatend beschouwd. Het waterstandsverschil over de dijk bedraagt in alle varianten met pipe 4,5 m en 0,45 m in de varianten zonder pipe. Omdat het hier gaat om een lineair stromingsmodel met een constante geometrie, is het absolute waterstandsverschil niet van groot belang, maar gaat het om de verhouding tussen de verschillende waterstanden.

2.2 Referentie model

Deze analyse is gebaseerd op een referentiemodel met een lang doorlatend voorland (VL) (lengte 200 m, leklengte van 39 m), met een dijkbasis van 40 m en een ondoorlatend achterland (AL) (leklengte 1000 m), zie Figuur 2-1. De rivierrandvoorwaarden van dit referentiemodel (rode lijn in Figuur 2-1) zijn horizontaal en verticaal geplaatst op het watervoerend pakket (WVP) en horizontaal op de deklaag. Hierdoor is er een verticale en horizontale instroom in het WVP en een verticale instroom in de deklaag. Deze randvoorwaarde wordt later aangeduid als *HxwV* – horizontaal met extra weerstand en verticaal.

De geometrische en bodemeigenschappen van het referentiemodel zijn terug te vinden in Tabel 1. De modeleigenschappen zijn weergegeven in Tabel 2, deze zijn gehanteerd voor alle modellen.



Figuur 2-1 Schematisatie van het referentiemodel. De rode lijnen geven de locatie van de rivierrandvoorwaarden aan.

Tabel 1 Geometrische en bodemeigenschappen van het referentie model en randvoorwaarden.

	Referentie model
Lengte voorland (m)	200
Dijkbasis (m)	40
Breedte sloot (m)	1
Lengte achterland (m)	1000
Dikte deklaag (m)	2
Dikte WVP (m)	25
Randvoorwaarden rivierkant	HxwV
Stijghoogte rivierkant (alle varianten) (m)	4,5 (met pipe) of 0,45 (zonder pipe)
Stijghoogte polderkant (alle varianten) (m)	0,0
Doorlatendheid VL (m/d)	0,9862

Leklengte VL (m)	39
Doorlatendheid AL (m/d)	0,0015
Leklengte AL (m)	1000
Doorlatendheid WVP (m/d)	30

Tabel 2 Modelparameters. Deze zijn gebruikt voor alle modellen.

Parameter	Waarden
MPicard* getal (-)	500
Mesh lengte WVP (m)	4,0
Mesh lengte pipe (m)	1,0
Mesh lengte VL en AL (m)	1,0
Mesh lengte sloot (m)	0,5

* Het MPicard getal heeft betrekking op de nauwkeurigheid waarmee het pipe evenwicht wordt berekend. Is hier niet van belang omdat de pipe wordt bepaald door de overgang fijn naar grofkorrelig materiaal.

Om het toepassingsgebied van de fictieve voorlandlengte te bepalen, zijn verschillende modellen gebouwd die lichtelijk afwijken van het referentiemodel. De volgende eigenschappen zijn aangepast:

- Modellen 1 en 2: Lengte van het voorland (zie Sectie 2.3).
- Modellen 3 tot en met 8: Dikte van het WVP (zie Sectie 2.4).
- Modellen 9 tot en met 11: Doorlatendheid van het achterland (zie Sectie 2.5).

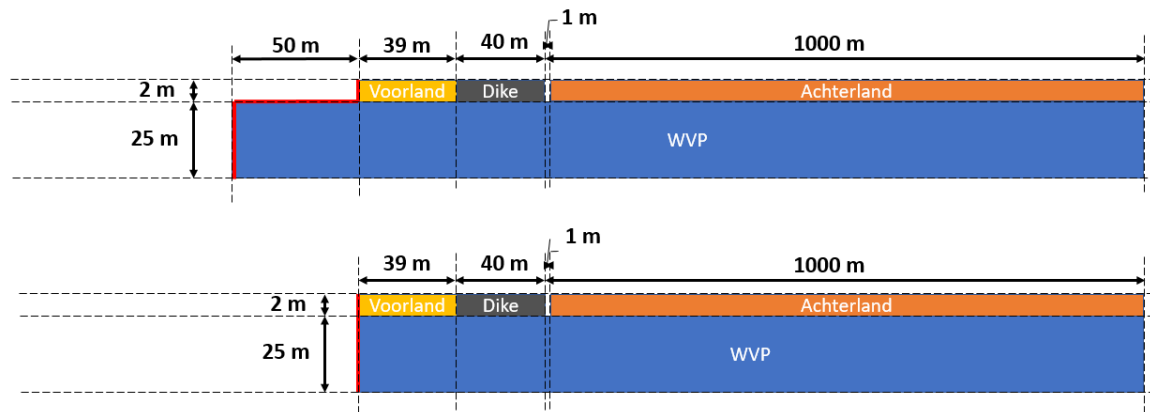
2.3 Kort ondoorlatend voorland

In berekeningen met een fictief voorland ter grootte van de leklengte wordt vaak een voorland aangebracht over een afstand van de leklengte bovenstrooms van de dijk, maar worden de oorspronkelijke afmetingen van het watervoerend pakket aangenomen. Er is dan dus ook een verticale instroming in het watervoerend pakket. Echter, de leklengte is afgeleid voor een stromingssituatie waarin de stroming in het watervoerend pakket horizontaal wordt verondersteld. Om de invloed hiervan te onderzoeken zijn berekeningen uitgevoerd met de onderstaand beschreven modellen.

Bij modellen 1 en 2 is de lengte van het voorland gelijk gesteld aan de leklengte van het referentiemodel. De doorlatendheid van het voorland is verlaagd. Twee verschillende rivier randvoorwaarden zijn toegepast, zie Figuur 2-2:

- Model 1: horizontale en verticale instroom in het WVP, geen instroom in de deklaag (deze randvoorwaarde wordt later aangeduid als H_{xw} – horizontaal met extra weerstand).
- Model 2: horizontale instroom in het WVP, geen instroom in de deklaag (deze randvoorwaarde wordt later aangeduid als H – horizontaal).

De geometrische en bodemeigenschappen van het referentiemodel zijn terug te vinden in Tabel 3.



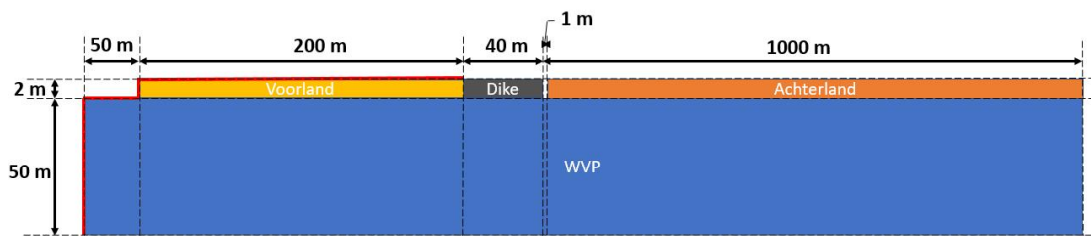
Figuur 2-2 Schematisatie van Model 1 (boven) en Model 2 (beneden). Niet op schaal. De rode lijnen geven de locatie van de rivier randvoorwaarden aan.

Tabel 3 Geometrische en bodemeigenschappen van modellen 1 en 2.

	Model 1	Model 2
Lengte voorland (m)	39	39
Dijkbasis (m)	40	40
Breedte sloot (m)	1	1
Lengte achterland (m)	1000	1000
Dikte deklaag (m)	2	2
Dikte WVP (m)	25	25
Randvoorwaarden rivierkant	Hxw	H
Doorlatendheid VL (m/d)	0,0013	0,0013
Leklengte VL (m)	-	-
Doorlatendheid AL (m/d)	0,0015	0,0015
Leklengte AL (m)	1000	1000
Doorlatendheid WVP (m/d)	30	30

2.4 Dikker WVP

De dikte van het WVP is aangepast in modellen 3 tot en met 8. Modellen 3 en 4 zijn geometrische kopieën van het referentiemodel maar met een dikker WVP (zie Figuur 2-3). Model 3 heeft dezelfde doorlatendheid in het voorland als het referentiemodel en heeft daardoor een andere leklengte (55 m). In Model 4 heeft het voorland een twee keer zo hoge doorlatendheid dan Model 3 en heeft daardoor dezelfde leklengte als het referentiemodel. De geometrische en bodemeigenschappen van modellen 3 en 4 zijn terug te vinden in Tabel 4.

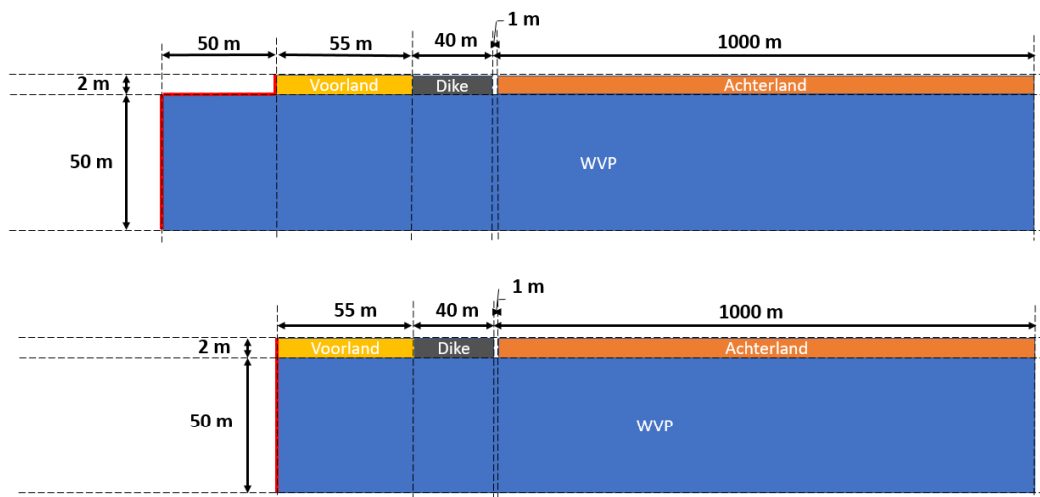


Figuur 2-3 Schematisatie van model 3 en 4. Niet op schaal. De rode lijnen geven de locatie van de rivier randvoorwaarden aan.

Tabel 4 Geometrische en bodemeigenschappen van modellen 3 en 4.

	Model 3	Model 4
Lengte voorland (m)	200	200
Dijkbasis (m)	40	40
Breedte sloot (m)	1	1
Lengte achterland (m)	1000	1000
Dikte deklaag (m)	2	2
Dikte WVP (m)	50	50
Randvoorwaarden rivierkant	HxwV	HxwV
Doorlatendheid VL (m/d)	0,9862	1,9724
Leklengte VL (m)	55	39
Doorlatendheid AL (m/d)	0,0015	0,0015
Leklengte AL (m)	1000	1000
Doorlatendheid WVP (m/d)	30	30

Bij modellen 5 tot en met 8 is de dikte van het WVP en lengte van het voorland veranderd. Modellen 5 en 6 hebben een voorlandlengte van 55 m met een lagere doorlatendheid dan het referentiemodel, zie Figuur 2-4. Hun randvoorwaarde is respectievelijk H_{xw} en H . De geometrische en bodemeigenschappen van beide modellen zijn terug te vinden in Tabel 5.



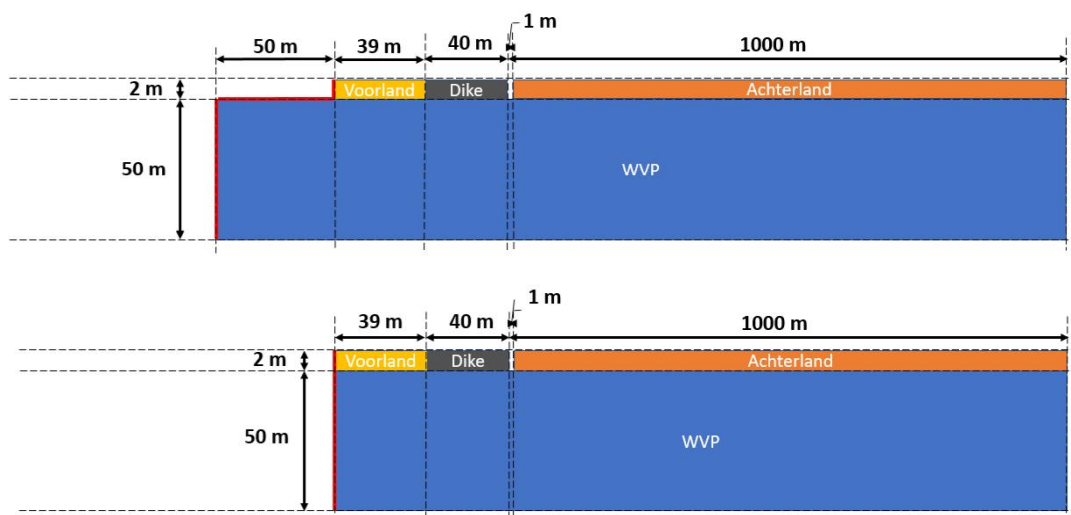
Figuur 2-4 Schematisatie van model 5 (boven) en 6 (beneden). Niet op schaal. De rode lijnen geven de locatie van de rivier randvoorwaarden aan.

Tabel 5 Geometrische en bodemeigenschappen van modellen 5 en 6.

	Model 5	Model 6
Lengte voorland (m)	55	55
Dijkbasis (m)	40	40
Breedte sloot (m)	1	1
Lengte achterland (m)	1000	1000
Dikte deklaag (m)	2	2

Dikte WVP (m)	50	50
Randvoorwaarden rivierkant	Hxw	H
Doorlatendheid VL (m/d)	0,0013	0,0013
Leklengte VL (m)	-	-
Doorlatendheid AL (m/d)	0,0015	0,0015
Leklengte AL (m)	1000	1000
Doorlatendheid WVP (m/d)	30	30

Modellen 7 en 8 hebben een voorlandlengte van 39 m met een lagere doorlatendheid, zie Figuur 2-5. Hun randvoorwaarden zijn respectievelijk Hxw en H . De geometrische en bodemeigenschappen van beide modellen zijn terug te vinden in Tabel 6.



Figuur 2-5 Schematisatie van model 7 (boven) en 8 (beneden). Niet op schaal. De rode lijnen geven de locatie van de rivier randvoorwaarden aan.

Tabel 6 Geometrische en bodemeigenschappen van modellen 7 en 8.

	Model 7	Model 8
Lengte voorland (m)	39	39
Dijkbasis (m)	40	40
Breedte sloot (m)	1	1
Lengte achterland (m)	1000	1000
Dikte deklaag (m)	2	2
Dikte WVP (m)	50	50
Randvoorwaarden rivierkant	Hxw	H
Doorlatendheid VL (m/d)	0,0013	0,0013
Leklengte VL (m)	-	-
Doorlatendheid AL (m/d)	0,0015	0,0015
Leklengte AL (m)	1000	1000
Doorlatendheid WVP (m/d)	30	30

2.5 Doorlatend achterland

Modellen 9 tot en met 11 geven het effect weer van een meer doorlatend achterland. Model 9 heeft dezelfde geometrische eigenschappen als het referentiemodel. Modellen 10 en 11 hebben dezelfde geometrische eigenschappen als respectievelijk modellen 1 en 2. De geometrische en bodemeigenschappen van modellen 9 tot en met 11 zijn terug te vinden in Tabel 7.

Tabel 7 Geometrische en bodemeigenschappen van modellen 9, 10 en 11.

	Model 9	Model 10	Model 11
Lengte voorland (m)	200	39	39
Dijkbasis (m)	40	40	40
Breedte sloot (m)	1	1	1
Lengte achterland (m)	1000	1000	1000
Dikte deklaag (m)	2	2	2
Dikte WVP (m)	25	25	25
Randvoorwaarden rivierkant	HxwV	Hxw	H
Doorlatendheid VL (m/d)	0,9862	0,9862	0,9862
Leklengte VL (m)	55	39	39
Doorlatendheid AL (m/d)	375	375	375
Leklengte AL (m)	2	2	2
Doorlatendheid WVP (m/d)	30	30	30

3 Resultaten DgFlow sommen

3.1 Uitgevoerde berekeningen

Er zijn twee typen DgFlow sommen gemaakt:

- Met een pipe van 20 m lang (de helft van de dijkbasis) en een verval van 4,5 m. Om de pipe niet langer te maken dan 20 m is de korrelgrootte in de pipe na 20 m verhoogd bij een factor 10.
- Zonder pipe met een verval van 0,45 m. Om geen pipe te krijgen is de korrelgrootte over de hele pipe lengte met een factor 10 verhoogd.

Door het vergroten van de korrelgrootte zijn de sommen 'traditionele' grondwaterstromingssommen geworden met een vaste geometrie. Hierdoor wordt de stroming alleen beïnvloed door de randvoorwaarde bij het voorland (H, H_{xw} of H_{xwV}) en niet door verschillende pipelengtes in de verschillende modellen.

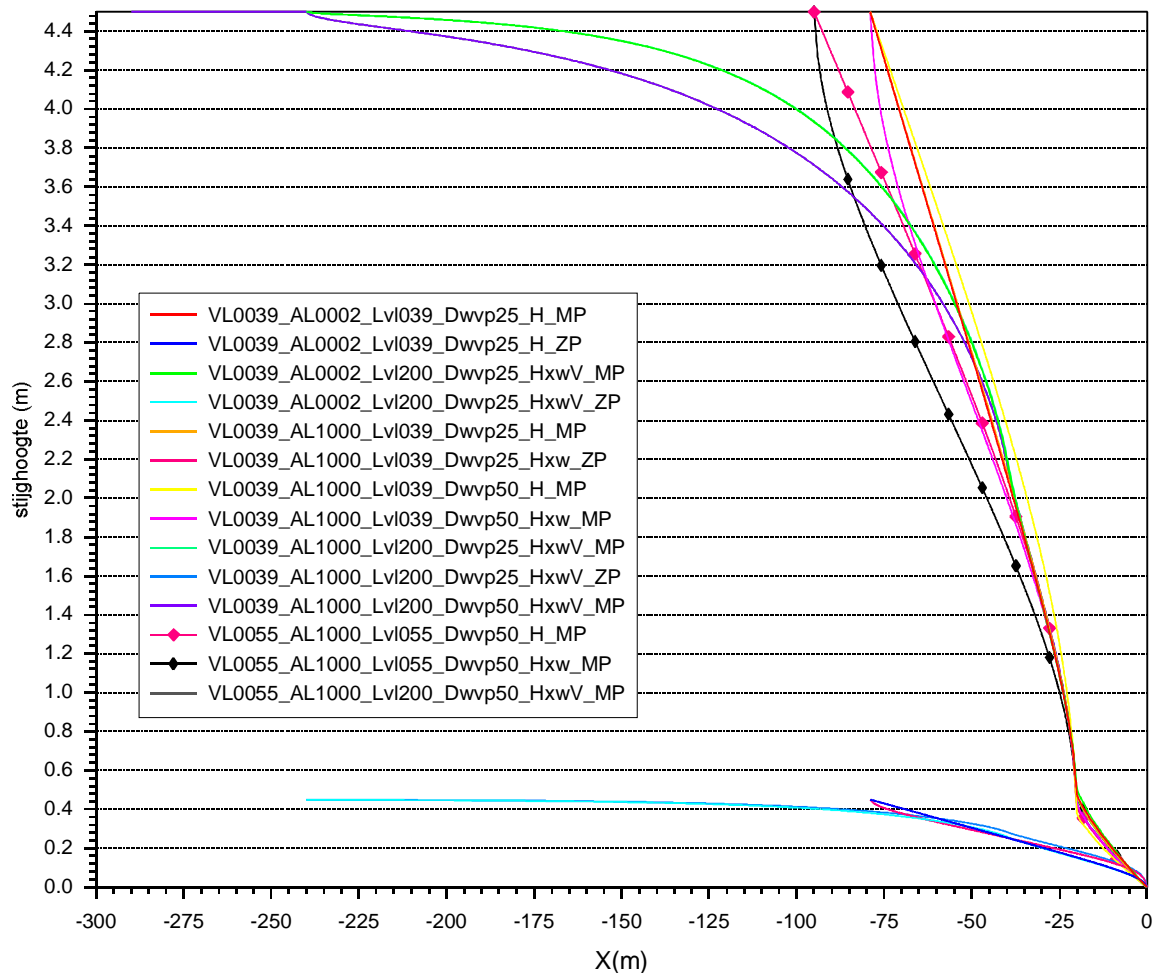
Tabel 8 geeft de lijst met alle uitgevoerde DgFlow sommen en hun bijbehorende berekeningsnaam weer.

Tabel 8 Overzicht van alle DgFlow sommen.

Naam van berekening	Model	Pipe van 20 m
VL0039_AL1000_Lvl200_Dwvp25_HxwV_ZP	Referentie	Nee
VL0039_AL1000_Lvl200_Dwvp25_HxwV_MP	Referentie	Ja
VL0039_AL1000_Lvl039_Dwvp25_Hxw_ZP	1	Nee
VL0039_AL1000_Lvl039_Dwvp25_H_MP	2	Ja
VL0055_AL1000_Lvl200_Dwvp50_HxwV_MP	3	Ja
VL0039_AL1000_Lvl200_Dwvp50_HxwV_MP	4	Ja
VL0055_AL1000_Lvl055_Dwvp50_Hxw_MP	5	Ja
VL0055_AL1000_Lvl055_Dwvp50_H_MP	6	Ja
VL0039_AL1000_Lvl039_Dwvp50_Hxw_MP	7	Ja
VL0039_AL1000_Lvl039_Dwvp50_H_MP	8	Ja
VL0039_AL0002_Lvl200_Dwvp25_HxwV_ZP	9	Nee
VL0039_AL0002_Lvl200_Dwvp25_HxwV_MP	9	Ja
VL0039_AL0002_Lvl039_Dwvp25_Hxw_ZP	10	Nee
VL0039_AL0002_Lvl039_Dwvp25_Hxw_MP	10	Ja
VL0039_AL0002_Lvl039_Dwvp25_H_ZP	11	Nee
VL0039_AL0002_Lvl039_Dwvp25_H_MP	11	Ja

3.2 Weergave resultaten

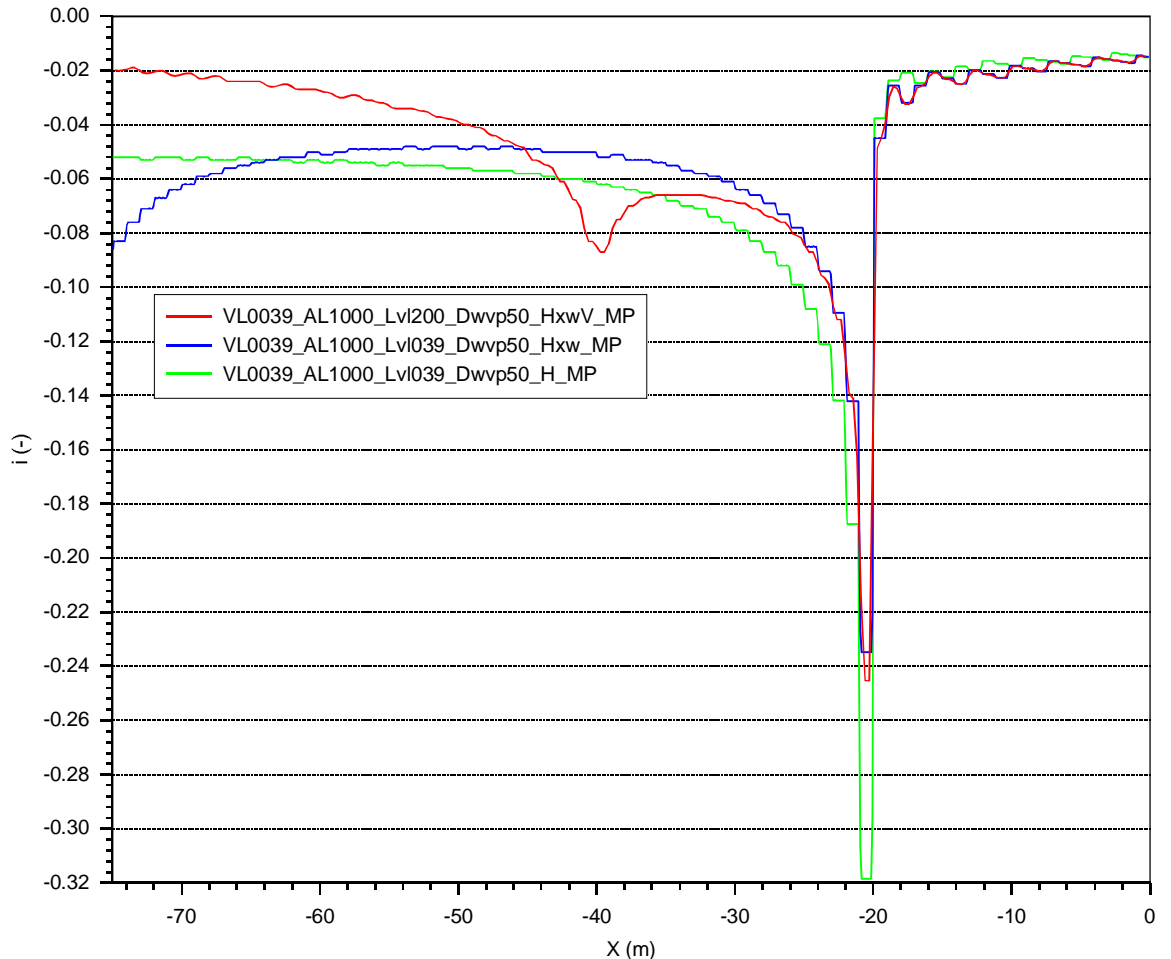
Om de resultaten van de berekeningen te kunnen vergelijken is de berekende stijghoogte aan de bovenkant van het doorlatende zandpakket uitgezet als een functie van de plaats. In de volgende figuren is x=0 de positie van de binnenwaartse teen van de dijk.



Figuur 3-1. Berekende stijghoogte als functie van de plaats van de rivierandvoorwaarde tot het uitstroompunt (de binnenwaartse teen van de dijk).

Figuur 3-1 laat duidelijk het verschil zien tussen de berekeningen met het lange doorlatende voorland en de berekeningen met het korte ondoorlatende voorland. Verder is duidelijk het verschil te zien tussen de berekeningen zonder pipe, met een maximale stijghoogte van 0,45 m, en die met pipe, met een maximale stijghoogte van 4,5 m. Het verschil tussen randvoorwaarde Hxw en H, zie Figuur 2-4 en Figuur 2-5 is in de rekenresultaten te zien uit een snellere daling van de stijghoogte bij randvoorwaarde Hxw. Voor de berekening met de voorlandlengte van 55 m is dit nog wat verduidelijkt door voor genoemde situaties markers toe te voegen.

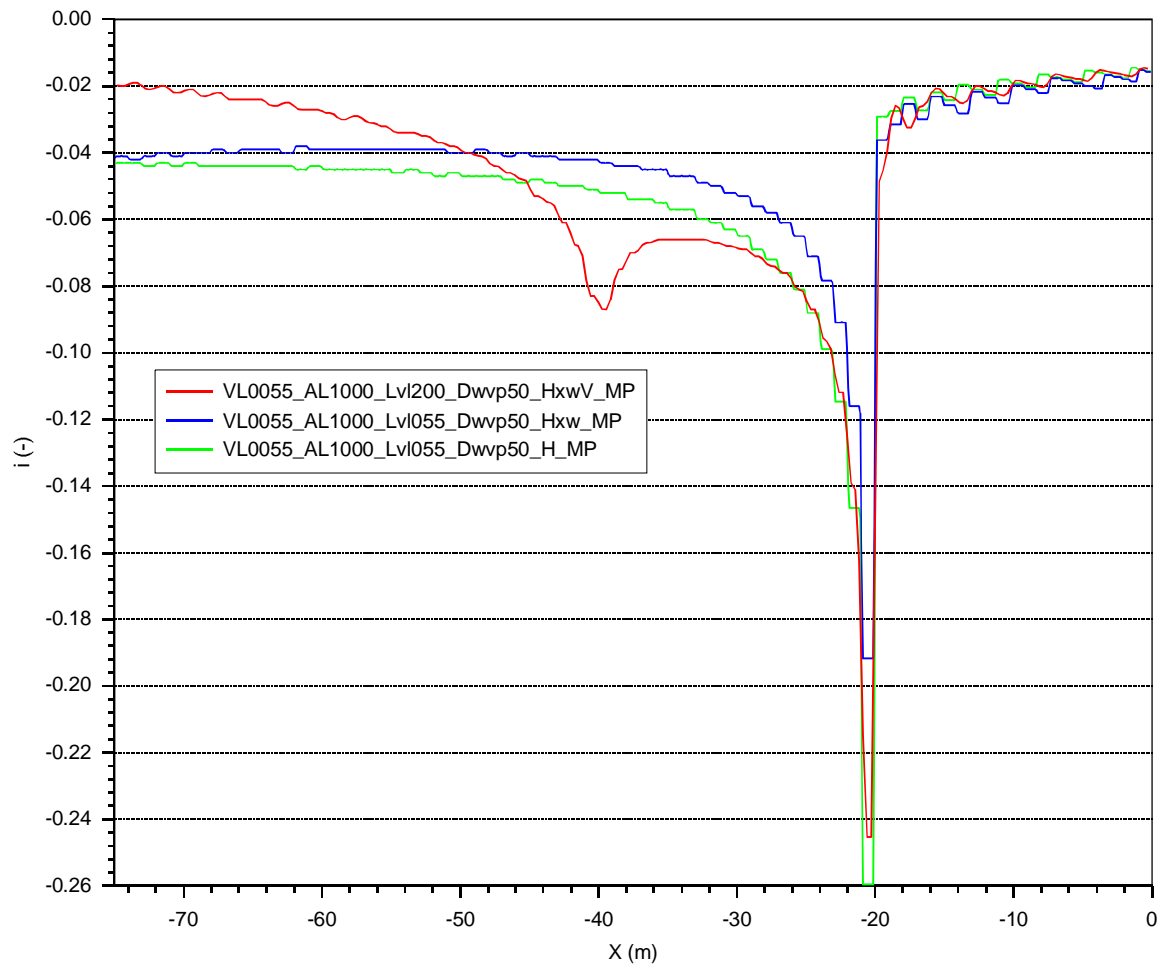
Om het verschil tussen de verschillende berekeningen nog duidelijker te maken, is de afgeleide van de stijghoogte in de x richting bepaald. Die waarde is het verhang in de X-richting aan de bovenkant van de watervoerende laag. Voor de voorlandlengte van 39 m en een watervoerende laag van 50 m dikte is het resultaat weergegeven in Figuur 3-2.



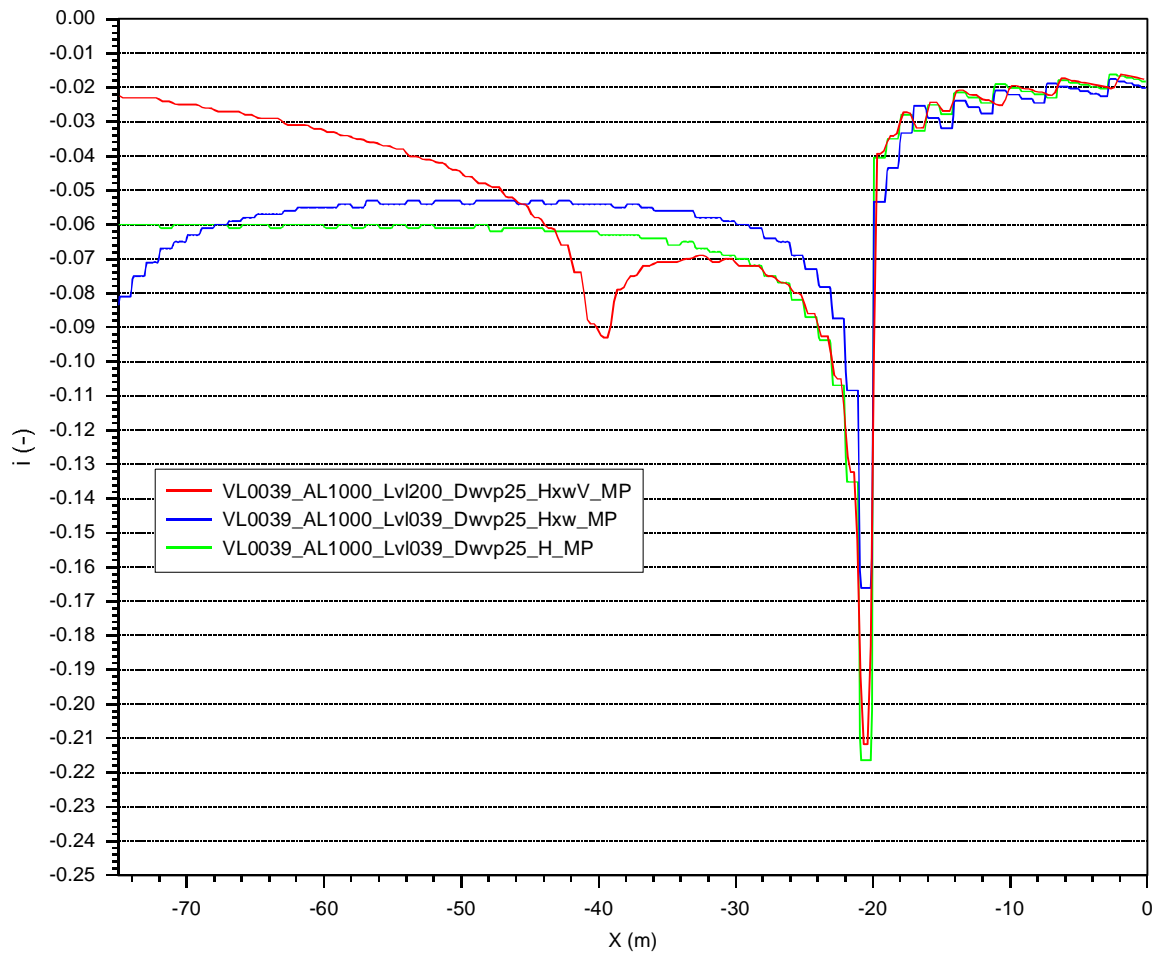
Figuur 3-2. Verhang als functie van de randvoorwaarde bij een ondoorlatend voorland met een lengte van 39 m en doorlatend voorland met een leklengte van 39 m en een dikte van de zandlaag van 50 m. Leklengte achterland 1000 m. Pipe 20 m.

Om de details onder de dijk beter te kunnen zien is alleen het gedeelte 75 m bovenstrooms van de sloot ($x=-75$ m) tot de sloot ($x=0$) weergegeven. In de som met het lange doorlatende voorland (de rode lijn) is duidelijk te zien wanneer de dijk wordt bereikt, het verhang neemt dan even af (in de som is $d\phi/dx$, met ϕ de stijghoogte, negatief een hogere stroomsnelheid komt dus overeen met een meer negatieve waarde van het verhang), wat dus overeenkomt met een hogere stroomsnelheid. Bij het begin van de pipe is het verhang ook sterk negatief, dus ook daar is sprake van een hoge stroomsnelheid. Het blijkt dat in dit geval de berekening met het korte voorland met randvoorwaarde Hxw, Model 7 in Figuur 2-5, het beste overeenkomt met de berekening met het lange doorlatende voorland. Voor die situatie is het verhang een paar meter voor het begin van de pipe (op $x=-20$ m) gelijk aan de situatie met het lange doorlatende voorland. Randvoorwaarde H, Model 8 in Figuur 2-5, geeft een meer negatief verhang en overschat dus de stroomsnelheid als dit model wordt gebruikt om de situatie met een doorlatend voorland (met een leklengte van 39 m) te berekenen.

Voor een langere leklengte voor het doorlatende voorland en een dunnere watervoerende laag is de situatie juist omgedraaid. Nu is bij een kort ondoorlatend voorland het Model met randvoorwaarde H de beste presentatie van de situatie met een lang doorlatend voorland met een leklengte van 55 m, zie Figuur 3-3 en Figuur 3-4.

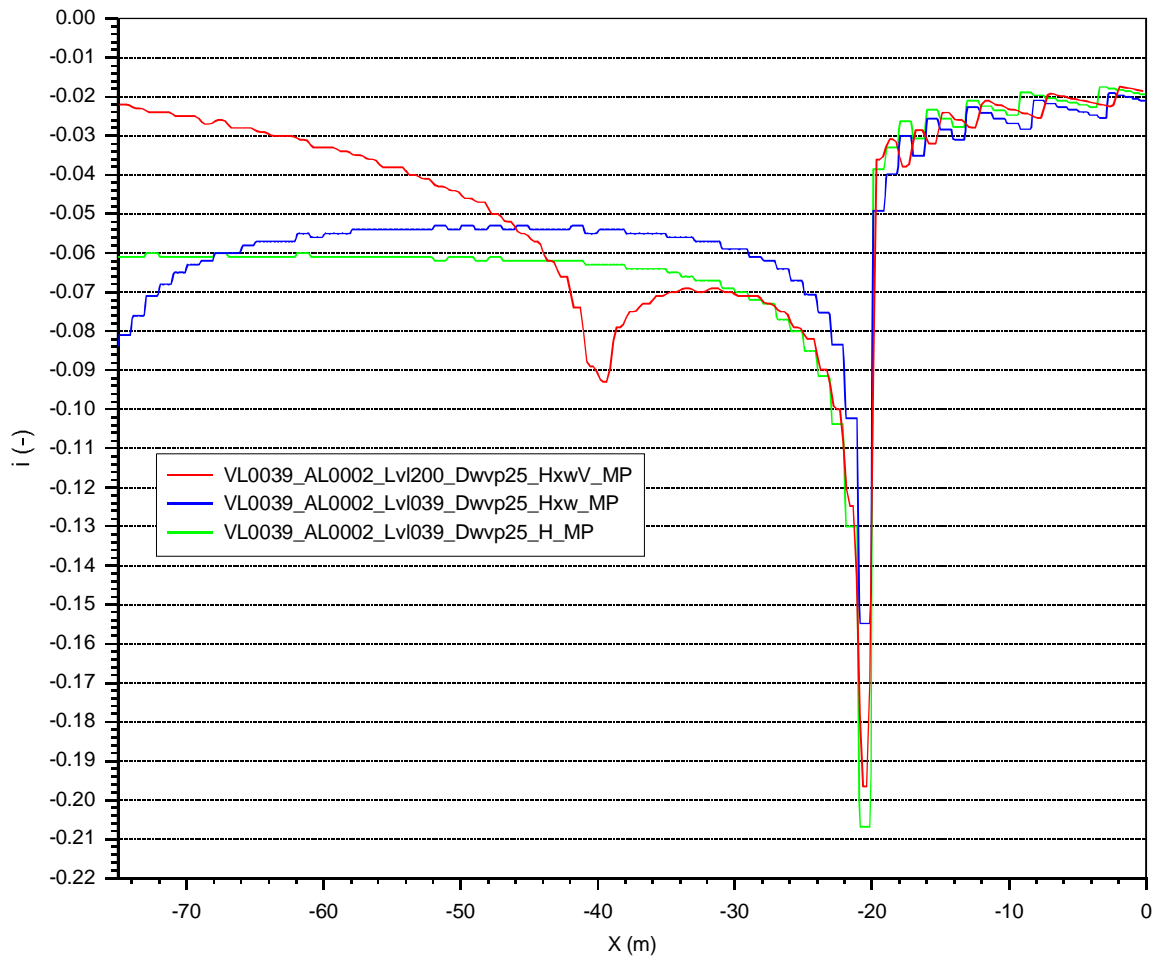


Figuur 3-3. Verhang als functie van de randvoorwaarde bij een ondoorlatend voorland met een lengte van 55 m en doorlatend voorland met een leklengte van 55 m en een dikte van de zandlaag van 50 m. Leklengte achterland 1000 m. Pipe 20 m.



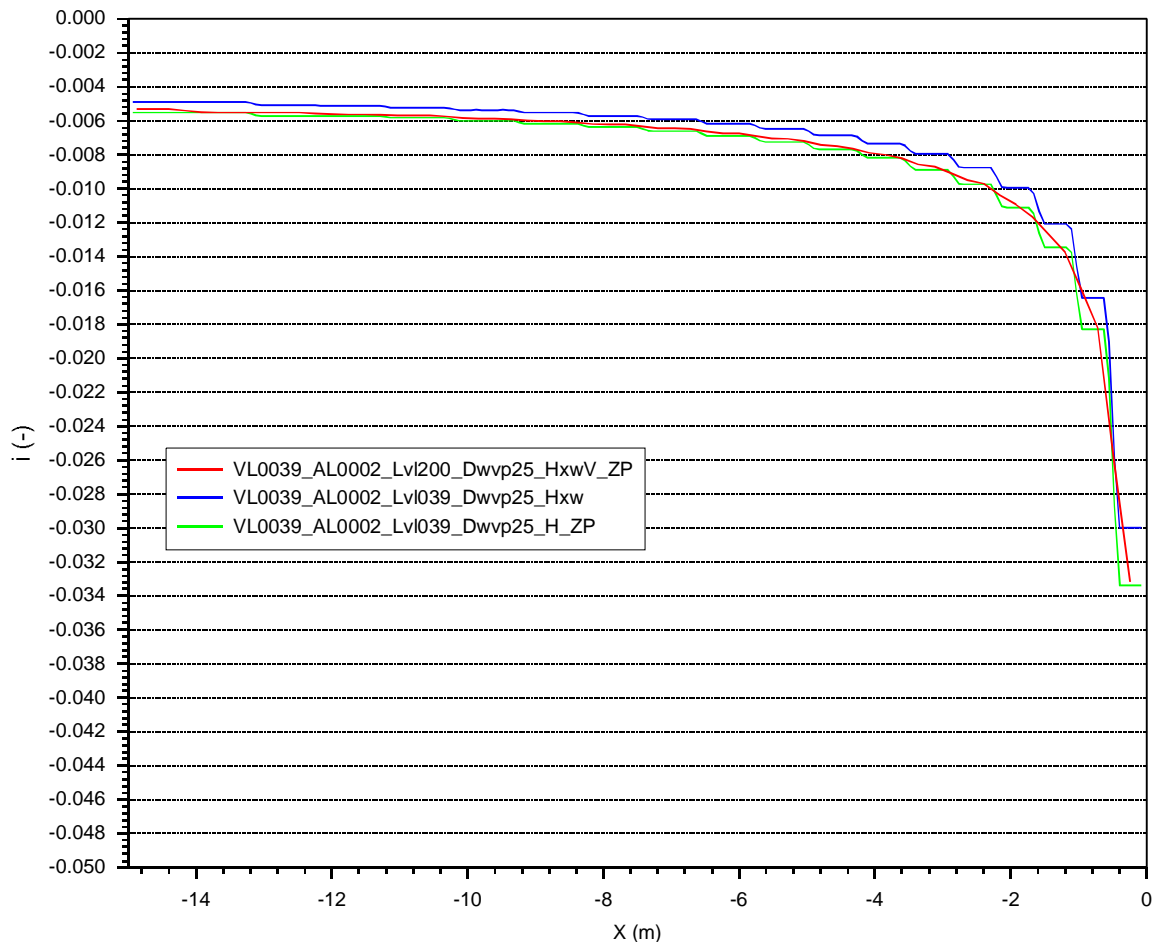
Figuur 3-4. Verhang als functie van de randvoorwaarde bij een ondoorlatend voorland met een lengte van 39 m en doorlatend voorland met een leklengte van 39 m en een dikte van de zandlaag van 25 m. Leklengte achterland 1000 m. Pipe 20 m.

Een kortere leklengte van het achterland blijkt slechts een zeer geringe invloed te hebben op de berekende verhangen, zie Figuur 3-5. Net als in Figuur 3-4, geeft ook in deze situatie randvoorwaarde H de beste fit.



Figuur 3-5. Verhang als functie van de randvoorwaarde bij een ondoorlatend voorland met een lengte van 39 m en doorlatend voorland met een leklengte van 39 m en een dikte van de zandlaag van 25 m. Leklengte achterland 2 m. Pipe 20 m.

Zonder pipe is de absolute waarde van het verhang kleiner, door het geringer aangebrachte stijghoogteverschil, maar het beeld hetzelfde, zie Figuur 3-6In deze figuur is een kleiner stukje van de x-as afgebeeld omdat er maar over een kleiner gebied significante verhangen zijn. De rode lijn in deze figuur is gladder door een grotere stap grootte in x-richting.



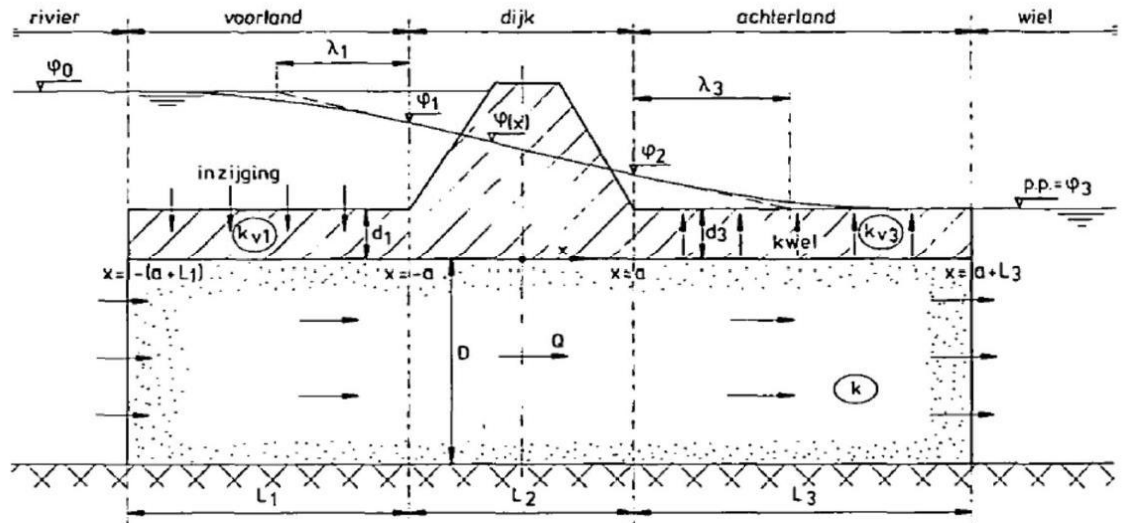
Figuur 3-6. Verhang als functie van de randvoorwaarde, zonder pipe onder de dijk, bij een ondoorlatend voorland met een lengte van 39 m en doorlatend voorland met een leklengte van 39 m en een dikte van de zandlaag van 25 m. Leklengte achterland 2 m.

3.3 Analyse resultaten numerieke berekeningen

Het blijkt dat in alle gevallen, op één na, de resultaten van de berekening met het doorlatende voorland het beste benaderd worden door de randvoorwaarde H (de modellen 2 en 6), waarin aan de rivierzijde het water horizontaal in het watervoerend pakket stroomt. Echter, model 7 komt beter overeen met de berekening van het doorlatend voorland dan model 8. Hier is de leklengte van het voorland kort (39 m) ten opzichte van de dikte van het watervoerend pakket (50 m), zie ook Tabel 6

De vertaling van een matig doorlatend voorland gelegen op een watervoerend pakket met een fictieve lengte (Figuur 3-7) berust op de aanname dat de stroming in dat voorland verticaal is, loodrecht op het matig doorlatende voorland en vooral horizontaal in het watervoerend pakket. In het geval dat het watervoerend pakket dikker is dan de leklengte van het voorland, is deze aanname niet erg realistisch meer en zal de stromingscomponent loodrecht op het watervoerend pakket (verticaal) niet verwaarloosbaar meer zijn. Wanneer dan door de randvoorwaarde H (model 8) wel een horizontale stroming wordt opgelegd, wordt de invloed van de verticale stroming, die een extra stromingsweerstand geeft, verwaarloosd en dus is het verhang groter voor het ondoorlatende voorland met randvoorwaarde H dan voor het doorlatende voorland.

Wanneer de leklengte wel groter is dan de dikte van het watervoerend pakket, kan de benadering van de horizontale stroming wel worden toegepast, zoals getoond in de Schematiseringshandleiding Piping [1], zie Figuur 3-7.



Figuur 3-7. Schematisering grondwaterstroming. Uit [1].

Uit deze figuur blijkt ook duidelijk dat de stroming in het watervoerende pakket horizontaal wordt verondersteld. In de modellen 2, 5 en 7, met randvoorwaarde H_{xw} is dat niet het geval omdat voor het ondoorlatend voorland het water nog verticaal in het watervoerende pakket moet stromen. Dit resulteert in een extra stromingsweerstand en dus een geringer verhang voor randvoorwaarde H_{xw} in vergelijking met randvoorwaarde H en een ondoorlatend voorland. Het resultaat met randvoorwaarde H komt dan het best overeen met de berekening met het doorlatende voorland. In de berekening met het doorlatende voorland is het voorland langer en is de stroming in het watervoerende pakket ook vooral horizontaal.

Welke fout wordt gemaakt door de randvoorwaarde H_{xw} (verticale instroming voor het ondoorlatende korte voorland) te gebruiken in plaats van de randvoorwaarde H (horizontale instroming in het watervoerende pakket) hangt af van de totale stromingsweerstand tussen de rivier en het uitstroompunt bij de sloot en de dikte van het watervoerende pakket. Een hoge stromingsweerstand, door een brede dijk en een smalle sloot, maakt dat een kleine toename in de stromingsweerstand doordat met H_{xw} in plaats van met randvoorwaarde H wordt gerekend, slechts een geringe invloed heeft. Bij een korte leklengte, een kleine dijk en een brede sloot, is die invloed van instromingsrandvoorwaarde H of H_{xw} juist groot. Dit zal in het volgende hoofdstuk worden gekwantificeerd.

4 Analytische berekeningen

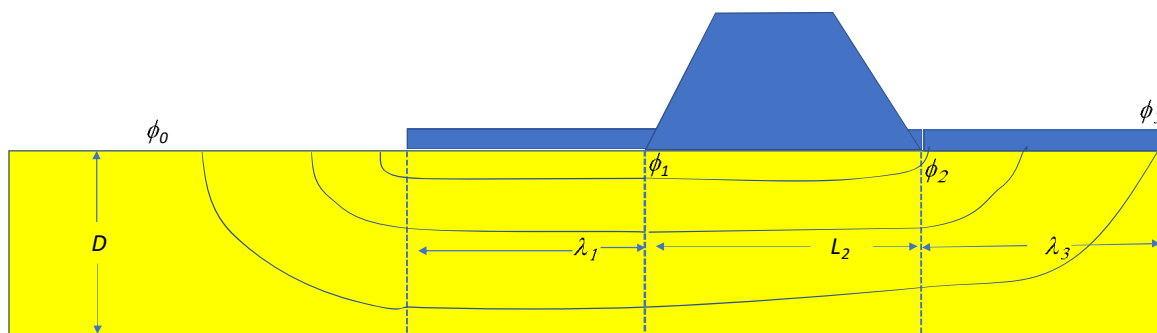
Beschouw een ondoorlatende dijk met een ‘halfdoorlatend’ voorland en achterland, zoals weergegeven in Figuur 3-7. Het gemiddeld verhang in het watervoerend pakket onder de dijk is eenvoudig te berekenen en is in de notatie van de genoemde figuur:

$$i = \frac{\phi_0 - \phi_3}{\lambda_1 + L_2 + \lambda_3} \quad (4.1)$$

Daarbij is voor de eenvoud aangenomen dat zowel het voorland als het achterland veel langer zijn dan de leklengte van voor- respectievelijk achterland en dus de leklengte maatgevend is voor het verhang. De situatie dat het achterland niet veel langer is dan de leklengte wordt beschreven in [1].

Wanneer nu voor het voorland de randvoorwaarde H_{xv} wordt gebruikt in plaats van H , zal dit resulteren in een extra stromingsweerstand, in vergelijking (4.1) krijgt dus λ_1 een andere waarde en zal niet meer de leklengte zijn, maar een groter getal. De invloed daarvan op het totale verhang zal afhangen van de grootte van λ_1 ten opzichte van de andere getallen in de noemer (L_2 en λ_3).

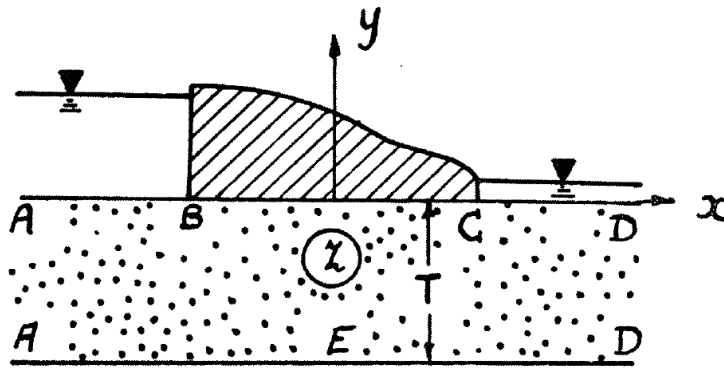
Voor de situatie met een ondoorlatend voorland met lengte λ_1 , en een watervoerend pakket dat zich uitstrekt tot voorbij het voorland met een dikte D , zie Figuur 4-1, is deze toename te berekenen.



Figuur 4-1. Schets stroming in watervoerend pakket met kort ondoorlatend voorland.

Uit de literatuur is de volgende oplossing bekend:

Een dijk op een eindig dikke doorlatende laag met permeabiliteit k en dikte T , zie onderstaande Figuur 4-2.



Figuur 4-2. stroming onder een ondoorlatende dam op een laag met dikte T met stijghoogte verschil H , uit Polybarinova-Kochina [2].

De analytische oplossing voor de verticale stroomsnelheid aan het maaiveld aan de rechterzijde is:

$$v = \frac{kH\pi}{4KT} \frac{\cosh\left(\frac{\pi b}{2T}\right)}{\sqrt{\sinh\left(\frac{\pi(b+x)}{2T}\right)\sinh\left(\frac{\pi(x-b)}{2T}\right)}}$$

K is hierin:

$$K = \int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{\sqrt{1-m\sin^2\varphi}}, \quad \text{met } m = \tanh^2\left(\frac{\pi b}{2T}\right)$$

Deze integraal is de complete elliptische integraal van de eerste soort over m . Dit is een bekende functie, die met verschillende programma's (Matlab, Python) te berekenen is en ook met een zogenaamde add-in in Excel. In deze oplossing is de originele notatie uit de literatuur aangehouden. H is het waterstandsverschil, aan beide zijden van de dijk, k de doorlatendheid van het watervoerend pakket, T de dikte van het watervoerend pakket en b de halve breedte van de dijk. De verticale stroming door het watervoerend pakket en de vooral horizontale stroming in het watervoerend pakket onder het ondoorlatende voorland, zijn te zien als het linker gedeelte van het in Figuur 4-2 geschetste probleem.

Aangezien het probleem in deze figuur symmetrisch is, kunnen we voor de oplossing van de verticale aanstroming van het watervoerend pakket schrijven (omdat het maar om de helft gaat van de stroming van de ondoorlatende dam in Figuur 4-2, is de factor 4 in de noemer rechts van het 'is gelijk' teken vervangen door een factor 2 – er wordt slechts de helft van het verval beschouwd) :

$$v = \frac{k(\phi_0 - \phi_1)\pi}{2KD} \frac{\cosh\left(\frac{\pi\lambda_1}{2D}\right)}{\sqrt{\sinh\left(\frac{\pi(\lambda_1+x)}{2D}\right)\sinh\left(\frac{\pi(x-\lambda_1)}{2D}\right)}} \quad (4.2)$$

K is hierin:

$$K = \int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{\sqrt{1-m \sin^2 \varphi}}, \quad \text{met } m = \tanh^2 \left(\frac{\pi \lambda_1}{2D} \right)$$

In deze oplossing is teruggaan naar de notatie van de verschillende parameters zoals gedefinieerd in Figuur 3-7 en Figuur 4-1.

Vergelijking (4.2) geeft de verticale stroomsnelheid op een punt stroomopwaarts van het voorland. Om echter vergelijking (4.1) aan te passen, zodat rekening gehouden kan worden met de instroomweerstand in het watervoerend pakket voor het voorland, is het totale debiet nodig dat onder de dijk door stroomt. Nu vereist continuïteit dat al het water dat voor het ondoorlatende voorland in het watervoerend pakket stroomt, ook onder de dijk door stroomt. Het totale debiet is de integraal van Vergelijking (4.2) over x van $x = -\lambda_1$ tot min oneindig. Of in formule:

$$Q_{ver} = \int_{-\infty}^{-\lambda_1} v dx \quad (4.3)$$

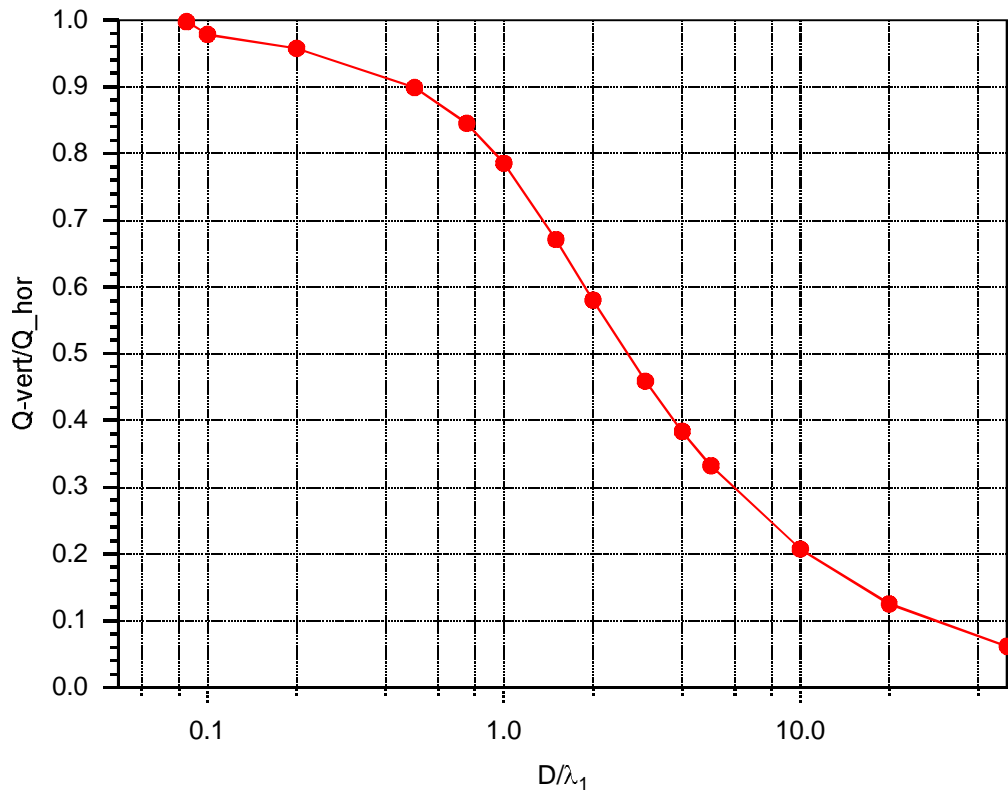
Waarin Q gelijk is aan het debiet door de watervoerende laag onder de dijk (m^2/s). Gegeven een stijghoogteverschil $\phi_0 - \phi_1$ en een lengte van het ondoorlatend voorland van λ_1 is het debiet bij horizontale instroming, dus wanneer er geen watervoerend pakket aanwezig is voor het voorland, gelijk aan:

$$Q_{hor} = \frac{k(\phi_0 - \phi_1)D}{\lambda_1} \quad (4.4)$$

Wanneer het watervoerend pakket doorloopt tot voor het voorland zoals getekend in Figuur 4-1, geldt dus Vergelijking (4.3). De verhouding tussen Vergelijking (4.3) en Vergelijking (4.4) geeft de invloed van de instroomrandvoorwaarde. Hiervoor wordt gedefinieerd:

$$\alpha = \frac{Q_{ver}}{Q_{hor}} \quad (4.5)$$

Nu is vooral Vergelijking (4.3) niet heel 'inzichtelijk'. Wel blijkt uit vergelijking van de Vergelijkingen (4.3), (4.4) en Vergelijking (4.2) dat de verhouding onafhankelijk is van het stijghoogteverschil en de doorlatendheid van het watervoerend pakket, maar wel sterk afhankelijk is van de verhouding tussen dikte van het watervoerend pakket en de lengte λ_1 , zie Figuur 4-3, waarin deze verhouding numeriek is berekend. Het blijkt dus dat het debiet bij horizontale instroming in het watervoerend pakket meer dan 20% hoger is dan het debiet bij verticale instroming, als de dikte van het watervoerend pakket groter is dan de fictieve lengte van het voorland.



Figuur 4-3. Numerieke berekening van de verhouding tussen het debiet bij verticale instroming (randvoorwaarde H_{xw}) en horizontale instroming (H) volgens Vergelijking (4.3) en (4.4).

De invloed op het totale verhang voordat er een pipe is gevormd is nu eenvoudig te berekenen. Vergelijking (4.1) wordt met verticale instroming door het watervoerend pakket:

$$i = \frac{\phi_0 - \phi_3}{\lambda_1 / \alpha + L_2 + \lambda_3} \quad (4.6)$$

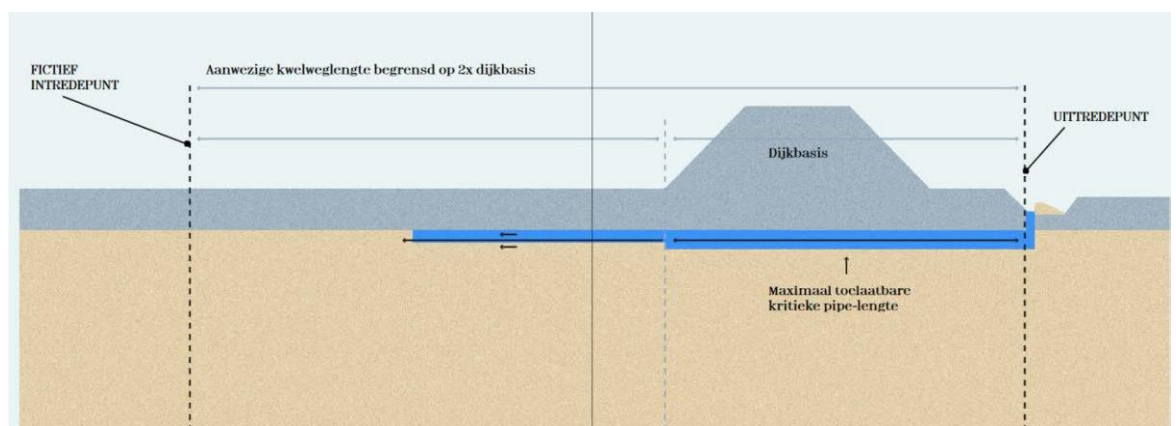
Zoals reeds genoemd hangt de invloed van de factor α op het totale verhang dus sterk af van de verhouding tussen λ_1 , L_2 en λ_3 ,

Wanneer er een pipe ontstaat zal de stromingsweerstand onder de dijk en in het achterland afnemen, met als gevolg dat de invloed van α toeneemt. Dit is ook gevonden in de numerieke berekeningen, waar bleek dat zonder pipe de invloed van het type instroming, horizontaal of verticaal niet zo groot was.

5 Consequenties voor het rekenen met een fictieve leklengte

Een berekening met DgFlow waarin de watervoerende laag dikker is dan de fictieve voorland lengte zal, in elk geval theoretisch een hoger kritiek verval opleveren dan een berekening met het model van Sellmeijer waarin impliciet horizontale instroming wordt verondersteld. Dit verschil wordt belangrijker wanneer de verhouding tussen de fictieve voorlandlengte en de dikte van het watervoerend pakket kleiner is dan 1. Het verschil wordt veroorzaakt door de stromingsweerstand van de verticale instroming in het zandpakket. De invloed op de totale stromingsweerstand hangt af van de door te rekenen situatie. Zonder pipe is de minimale invloed te berekenen. Deze wordt gegeven door Vergelijking (4.6).

Vanuit de Schematiseringshandleiding Piping [1] is het andere extreem te bepalen, zie Figuur 5-1. In een 2-D berekening is de extreme situatie dat zich een pipe bevindt onder het gehele dijklichaam en dat deze pipe geen weerstand heeft. Alleen het (fictieve) voorland heeft volgens de Schematiseringshandleiding geen pipe, omdat die volgens de handleiding niet inrekening mag worden gebracht. Bij een dergelijk grote pipe, die in 2D dus in feite een spleet is, kan de stromingssituatie vergeleken worden met Figuur 4-2, waarbij dan het dijklichaam in die figuur niet het dijklichaam in Figuur 5-1 representeert, maar het (fictieve) voorland.



Figuur 5-1. Begrenzing in rekening te brengen voorlandlengte, uit [3].

In dat geval moet α berekend worden, niet voor de fictieve voorlandlengte, maar de helft daarvan (omdat het symmetrievlak nu midden onder het voorland zit). Het gemiddeld verhang onder de dijk is dan te schrijven als:

$$i = 0.5 \frac{\phi_0 - \phi_3}{\lambda_1 \alpha} (1 + \alpha) \quad (5.1)$$

6 Conclusies

In de fictieve-voorlandberekening voor piping wordt een doorlatend voorland, gelegen op een watervoerend pakket, vervangen door een ondoorlatend voorland dat dezelfde lengte heeft als het leklengte van het doorlatende voorland in combinatie met het watervoerend pakket. Wanneer dit nagerekend wordt met DgFlow hangt in geval van een korte leklengte en een relatief dik watervoerend pakket het resultaat af van hoe het watervoerend pakket wordt beschreven. Als in het model, het watervoerend pakket ook aanwezig is bovenstrooms van het fictieve voorland, zal dit een extra stromingsweerstand veroorzaken. In dit rapport is dat aangetoond met numerieke en analytische berekeningen en is deze extra weerstand gekwantificeerd, zie Figuur 4-3.

De invloed van deze extra weerstand op het verhang onder de dijk hangt af van de totale stromingsweerstand onder de dijk. In dit rapport wordt dit voor 2 grenswaarden gekwantificeerd:

- Voor de situatie dat zich nog geen pipe heeft gevormd.
- Voor de situatie met de maximaal toelaatbare pipe volgens de schematiseringshandleiding [1].

De invloed van het voorland hangt sterk af van de verhouding tussen fictieve voorlandlengte en de dikte van het watervoerend pakket. Wanneer deze verhouding groter is dan 1, is de fout in de berekening van het verhang onder de dijk volgens Figuur 4-3 en Vergelijking (5.1) minder dan 14% (bij puur horizontale stroming is $a=1$, met nog een watervoerend pakket bovenstrooms van het voorland, volgens Figuur 4-3, 0,786) en zal dan waarschijnlijk klein zijn ten opzichte van de andere onzekerheden in de berekening van het kritieke verhang.

REFERENTIES

[1]Schematiseringshandleiding piping, RWS, WBI 2017, 28 mei 2021.

[2]Polubarinova-Kochina, P.Y.A., 1962. Theory of groundwater movement, translated from the Russian by J.M. Roger de Weist, Princeton University Press.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl

C Veiligheidsbenadering voorlanden

Verkenning veiligheidsbenadering piping met voorlanden



Verkenning veiligheidsbenadering piping met voorlanden

Verkenning veiligheidsbenadering piping met voorlanden

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat
Contactpersoon	Henk van Hemert
Referenties	Kennis voor Keringen, piping
Trefwoorden	Piping, voorland, probabilistische analyse, betrouwbaarheid, schematiseren

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	08-12-2021
Projectnummer	11206817-010
Document ID	11206817-010-GEO-0004
Pagina's	31
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	Wim Kanning	Kin Sun Lam	Remon Pot	
				

Dit rapport is een bijlage bij het Deltares rapport "Kennis voor Keringen 2021: Achtergrondrapport Voorlanden", door E. Rosenbrand en anderen, met nummer 11206817-010-GEO-0001.

Samenvatting

Bij het uitvoeren van een piping analyse van een waterkering kan het betrekken van het voorland een gunstige rol spelen omdat in de schematisering dan gerekend kan worden met een grotere kwelweglengte. Het is aannemelijk dat daarmee de landelijke pipingopgave van waterkeringen kleiner kan worden.

Doordat een grotere kwelweglengte wordt gebruikt, is het wel noodzakelijk te verifiëren of er dan geen sprake is van het doorgroeien van de pipe onder het voorland en er vervolgens kortsluiting tussen het buitenwater en het voorland ontstaat. Het doel van dit onderzoek is om te verkennen hoe de veiligheid tegen kortsluiting van de pipe met het buitenwater door het voorland gewaarborgd kan worden. Het onderzoek is onderdeel van het KVK-pipingonderzoek dat Deltares uitvoert voor Rijkswaterstaat, zie Rosenbrand e.a. (2021).

Om een indruk te krijgen welke semi-probabilistische verificaties nodig zijn is gerekend aan zeven eenvoudige synthetische cases die gezamenlijk een representatie vormen van de werkpraktijk. Daarbij is op basis van een partiële factor op de pipinglengte en een berekende faalkans, gekeken wat er nodig is om aan de veiligheidseisen voor piping te voldoen. Naast de partiële factoren zijn ook andere verificaties, waaronder de vaak toegepaste (maar slechts beperkt gevalideerde) vuistregel van twee keer de dijkbasis als maximale kwelweglengte, kort beschouwd.

De verkennende analyses bestaan uit (semi)probabilistische analyses waarbij de kans op doorgroeien van de pipe onder de dijkbasis wordt bepaald. Hierbij wordt gebruikt gemaakt van curves (op basis van DgFlow analyses, zie Rosenbrand e.a., 2021) om op een eenvoudige wijze de pipelengte bij verschillende waterstanden te kunnen bepalen. Ook wordt de onzekerheid in de berekende pipelengte meegenomen door middel van een variatiecoëfficiënt in de probabilistische analyses.

De verkennende analyses laten zien dat in de meeste beschouwde gevallen de kans op doorgroeien van de pipe onder de dijkbasis door erg klein is; behalve in het geval dat bij maatgevende omstandigheden al wordt berekend dat de pipe ver onder de dijkbasis doorgroeit (en dus berekende partiële factor veel lager is dan de benodigde factor van 1.5).

De oorzaak van de meestal kleine berekende faalkansen is tweeledig:

1. De pipelengte neemt sterk af bij waterstanden lager dan het kritieke piping verval.
2. De pipelengte bij waterstanden boven kritiek verval is waarschijnlijk niet van belang omdat dan al falen door het overschrijden van het kritieke piping verval optreedt.

Dit laatste dient nader uitgezocht te worden in volledige probabilistische analyses. De analyses laten zien dat er geen redenen zijn om te veronderstellen dat de huidige aanpak op basis van een berekende pipelengte welke wordt vergeleken met de dijkbasis tot onveilige situaties leidt.

De aanpak biedt ook ruimte voor verdere aanscherping. Daarom wordt aanbevolen om probabilistische analyses toe te passen op een groter aantal echte cases met een groot bereik aan geometrieën en piping veiligheden om zo een beter beeld te krijgen van de veiligheid van kortsluiting bij een voorland. Daarmee kan vervolgens een volwaardige, generiek toepasbare, veiligheidsbenadering worden onderbouwd.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
1.1	Aanleiding en doel	7
1.2	Afbakening	7
1.3	Invulling	7
1.4	Aanpak	7
1.5	Impact	7
2	Verkenning verificaties piping veiligheid voorlanden	9
2.1	Piping berekeningen met voorland	9
2.1.1	Schematisering voorland	9
2.1.2	Berekening optredende pipelengte	10
2.1.3	Effecten meenemen voorland bij piping analyses	11
2.2	Faalpaden piping inclusief voorland	11
2.3	Verificaties om veiligheid piping met voorlanden aan te tonen	12
2.4	Grenstoestanden voor piping met voorland	13
2.5	Faalkans-eisen	14
2.6	Semi-probabilistische verificaties op kritiek verval en pipelengte	14
2.6.1	Voor kritiek verval Hc	14
2.6.2	Voor pipelengte L	15
2.6.3	Veiligheid in pipelengte verificatie	16
3	Verkenkende probabilistische analyses piping met voorlanden	17
3.1	Foutenboom	17
3.2	Opzet probabilistische analyses piping met voorlanden	17
3.2.1	Aanpak	17
3.2.2	Fragility curve en kansdichtheidsfunctie	18
3.2.3	Extrapoleren en afkappen fragility curve	19
3.3	Modelonzekerheid	20
3.3.1	Bepaling modelonzekerheid	20
3.3.2	Modelonzekerheid bij lagere belastingen	20
3.3.3	Modelfactor	20
4	Cases	21
4.1	Aanpak	21
4.2	Representatieve cases voor verificatie met partiële factor	21
4.2.1	Uitgangspunten	21
4.2.2	Samenvatting cases	22
4.2.3	Uitkomsten	22
4.2.4	Observaties bij de analyses	24

4.2.5	Voorbeeld berekende fragility curve	24
4.3	Gevoeligheidsberekeningen	25
4.3.1	Hogere standaardafwijking voor lagere L	25
4.3.2	Afkappen fragility curve	25
4.3.3	Pipelengte berekenen bij Hc in plaats van Hc_eis	25
4.4	Duiding resultaten	25
4.5	Overige gevallen	25
4.5.1	Onderbouwen geval B: 2 keer de dijkbasis	25
4.5.2	Onderbouwen geval E en F: maatwerk	26
4.5.3	Onderbouwen geval 6: Hc > Hc_eis	26
4.5.4	Kans op kortsluiting 0	26
5	Conclusies en aanbevelingen	27
5.1	Aantonen veiligheid op basis van berekende pipelengte	27
5.2	Conclusies	27
5.3	Aanbevelingen	28
	Bronnen	29
	Bijlage A. Alternatieve verificaties pipelengte	30

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en doel

Voor piping analyses wordt steeds meer met voorlanden en daarmee met extra kwelweglengte gerekend. Daarbij is de berekende pipelengte erg onzeker. Daarom is er de wens om een veiligheidsformat te ontwikkelen waarin voorlanden veilig meegenomen kunnen worden in piping analyses. In dit verkennend onderzoek is uitgewerkt welke semi-probabilistische verificaties en eventuele veiligheidsfactoren nodig zijn om te zorgen dat er veilig met de voorlandlengte kan worden gerekend.

Het doel van dit rapport is om te verkennen welke verificaties er nodig zijn om veilig voorlanden mee te kunnen nemen in piping analyses en om op basis van probabilistische analyses een indruk te krijgen van benodigde veiligheidsfactoren. Het betreft hier nadrukkelijk een eerste verkennende analyse die met een beperkte inspanning tot stand is gekomen. Het doel is om inzicht te krijgen in de belangrijkste factoren die bijdragen aan piping veiligheid met voorland, de mogelijkheden te verkennen van verificaties en te bepalen wat er nog nodig is om uiteindelijk verificaties en veiligheidsfactoren af te leiden. Dit is gedaan aan de hand van 7 synthetische cases. Tot slot is gekeken in welke mate de huidige verificaties op basis van een partiële factor van 1.5 veilig zijn.

1.2 Afbakening

Het gaat in dit rapport om verkennende analyses waarbij niet wordt gekeken naar opbarsten en heave. Ook wordt de invloed van de deklaag om de uitstroomweerstand (0.3d regel) niet meegenomen. Voor overige uitgangspunten wordt verwezen naar hoofdstukken 2, 3 en 4, waarbij wordt opgemerkt dat in deze verkenning beperkte, synthetische situaties zijn bekeken. Voor algemene overwegingen voor het meenemen van voorlanden bij piping analyses en het modelleren hiervan wordt verwezen naar Rosenbrand e.a. (2021).

1.3 Invulling

Dit rapport is onderdeel van het KVK piping programma welke voor Deltares wordt uitgevoerd voor Rijkswaterstaat. Het project is uitgevoerd door Wim Kanning, met bijdrages door Ligaya Wopereis en Esther Rosenbrand, allen van Deltares. Dit rapport is alleen in samenhang met onderzoek Rosenbrand e.a. (2021) te lezen.

1.4 Aanpak

In Hoofdstuk 2 wordt een verkenning uitgevoerd naar de mogelijke verificaties van piping veiligheid, rekening houdend met het voorland. Er wordt verkend welke aanvullende verificaties er nodig zijn om veilig met voorlanden te kunnen rekenen. Voor het de verdere beschouwing van de verificatie op basis van een partiële factor wordt in hoofdstuk 3 een sterk vereenvoudigd probabilistisch model geschetst. Dit wordt in hoofdstuk 4 gebruikt om op basis van enkele cases te verkennen of een partiële factor van 1.5 op de berekende pipelengte tot voldoende veiligheid leidt.

1.5 Impact

Het veilig mee kunnen nemen van voorlanden in piping analyses zorgt voor een zeer sterke reductie van het benodigd aantal kilometers dijk dat voor piping versterkt dient te worden. Daarmee kan niet alleen grondverzet worden bespaard maar mogelijk ook materiaal (bijv. stalen damwanden en/of andere kwelweg verlengende maatregelen). Een goed

veiligheidsformat is hier essentieel in, dit rapport geeft de eerste opzet en onderbouwing hiervoor.

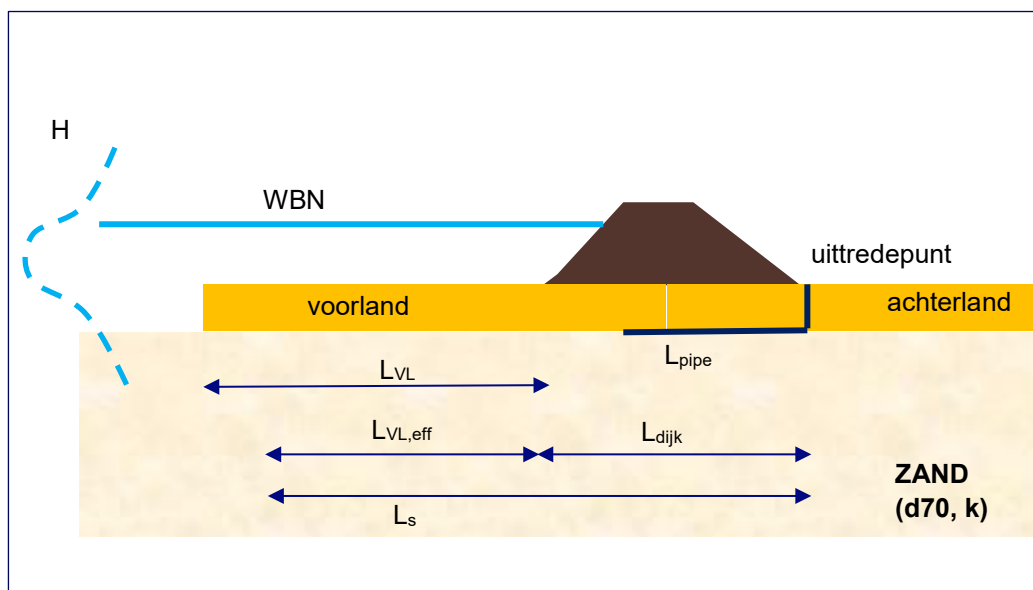
2 Verkenning verificaties piping veiligheid voorlanden

In deze verkenning van verificaties piping veiligheid voorlanden wordt bekeken op basis van welke semi-probabilistische verificaties kan worden aangetoond dat de kans op falen door piping, inclusief de kans op doorgroeien van de pipe onder de dijkbasis en kortsluiting door het voorland, klein genoeg is. Een belangrijk onderdeel hiervan is om te kijken of de toepassing van een partiële factor van 1,5 op de berekende pipelengte leidt tot voldoende veiligheid.

2.1 Piping berekeningen met voorland

2.1.1 Schematisering voorland

In onderstaande figuur staat kort weergegeven welke begrippen er van belang zijn voor het maken van een piping analyse met voorland. De lengte van het voorland (L_{VL}) mag niet in zijn geheel worden meegenomen als deze doorlatend is; in dat geval mag de effectieve voorland lengte ($L_{VL,eff}$) worden meegenomen (zie Rosenbrand e.a., 2021 voor de bepaling hiervan op basis van de dikte/doorlatendheid van het voorland). Samen met de dijkbasis (L_{dijk} , uittredepunt tot buitenteen) levert dit de effectieve kwelweglengte (L_s) welke kan worden gebruikt om het kritiek verval (H_c) te bepalen en om de optredende pipelengte te bepalen. H is de buitenwaterstand met een bepaalde verdeling, WBN is de waterstand bij norm, namelijk de waterstand die een overschrijdingskans gelijk aan de norm van het traject heeft.

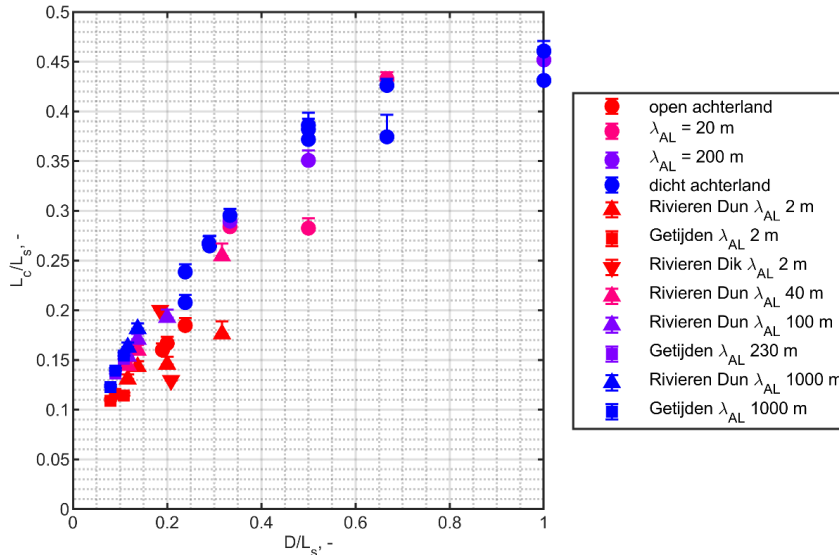


Figuur 1: Schematische weergave piping met voorland

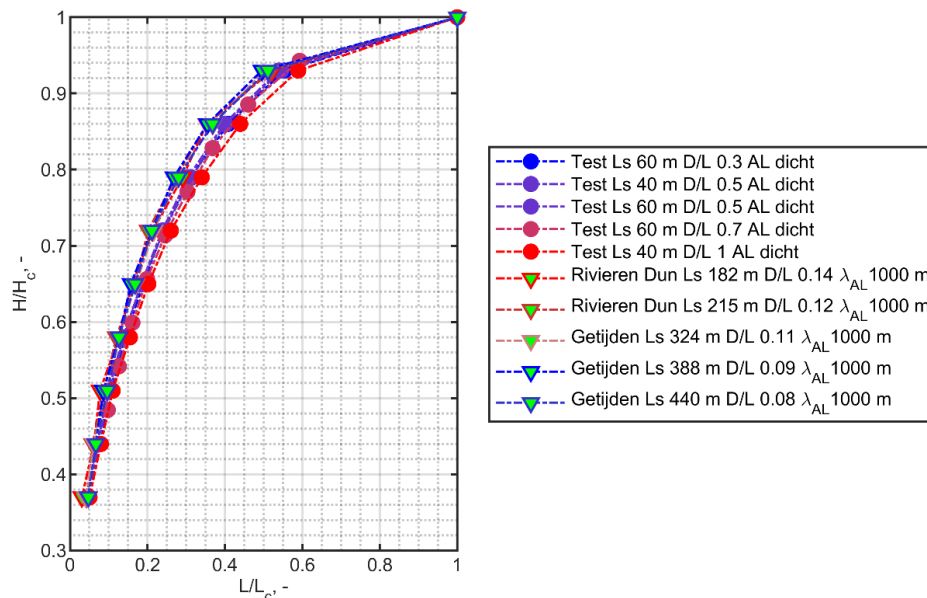
Benoemd moet worden dat betreffende figuur 1 en de afgeleide termen, slechts een theoretische, versimpelde schematisering is van de werkelijkheid. In de praktijk is het niet altijd eenvoudig om de lengte, bodemopbouw en het zelfs mogelijk tijdsafhankelijke gedrag van de intredeweerstand te bepalen. Dat geldt ook voor het bepalen van de dijkbasis. Dat vergt de nodige zorgvuldigheid. Voor verdere overweging omtrent het meenemen van het voorland in piping berekeningen wordt verwezen naar Rosenbrand e.a. (2021).

2.1.2 Berekening optredende pipelengte

In dit rapport maken we gebruik van onderstaande curves (uitgewerkt aan de hand van DgFlow sommen) om de optredende pipelengte (L_{pipe}) te bepalen als functie van de optredende waterstand (H). Voor een onderbouwing hiervan wordt verwezen naar Rosenbrand (2021). De belangrijkste aanname is dat we de conservatieve omhullende gebruiken (daar waar de hoogste L_c/L_s wordt gevonden als functie van D/L_s , en dus de hoogst berekende L_c ; dit geldt bij hoge leklengtes λ_{AL} of dicht achterland, de blauwe punten), waardoor impliciet wordt uitgegaan van een dicht achterland. Dit is een conservatieve aanname. De dikte van het watervoerende zandpakket (D) en de effectieve kwelweglengte (L_s) worden bekend verondersteld, dit levert een inschatting op van de kritieke pipelengte L_c volgens onderstaande Figuur 2.



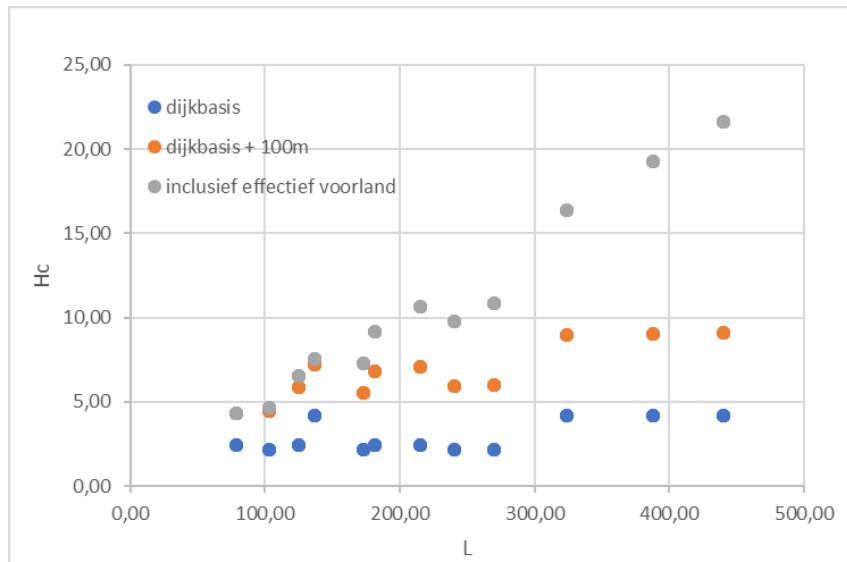
Figuur 2: Bepaling kritieke pipelengte L_c



Figuur 3: Bepaling optredende pipelengte L op basis van L_c en de verhouding H/H_c . H_c is berekend op basis van rekenregel Sellmeijer met L_s als invoer. Op basis van optredende waterstand H kan L worden berekenen.

2.1.3 Effecten meenemen voorland bij piping analyses

Om een indruk te krijgen van het effect van voorlanden zijn dezelfde representatieve cases gebruikt als die voor het afleiden van de curves in het begin van dit hoofdstuk. Het resultaat staat in onderstaande figuur. Het is duidelijk te zien dat in de meeste gevallen het kritiek verval meer dan verdubbelt door het gebruik van voorlanden. Dit zegt niks over lokale situaties, maar geeft wel aan dat er veel potentiële winst in voorlanden zit. In deze figuur gaan 14 van de 52 cases wel met partiële factor van 1.5 en niet zonder partiële factor onder dijkbasis door, wat het belang van de partiële factor onderstreept.

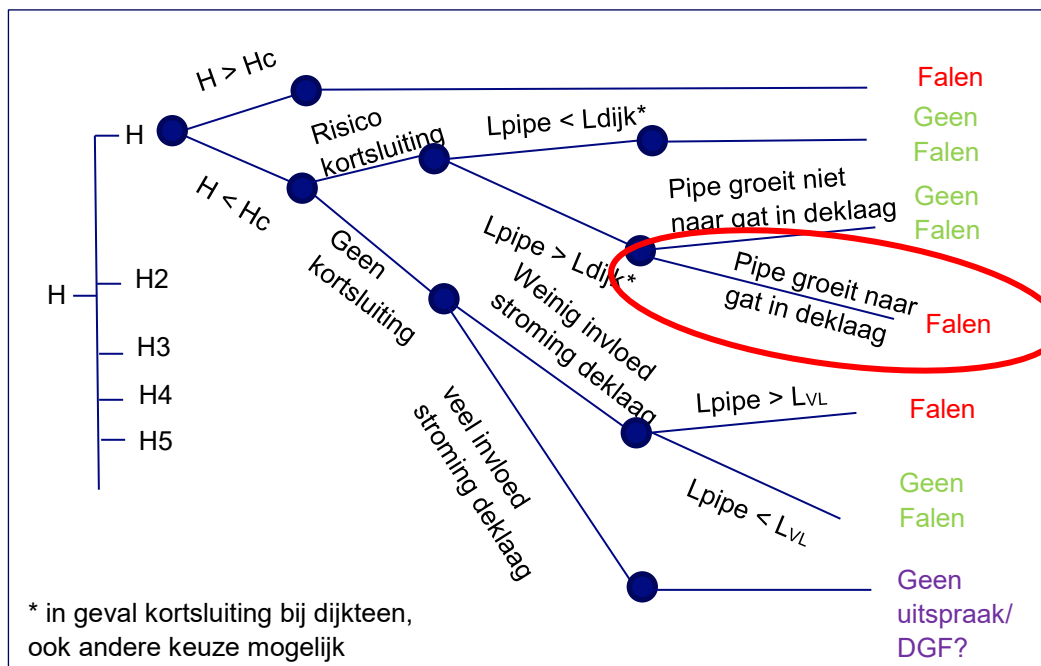


Figuur 4: De cases die zijn gebruikt voor de curves, met Hc als functie van dijkbasis en effectief voorland.

2.2 Faalpaden piping inclusief voorland

De volgende faalpaden in figuur 4 zijn te onderscheiden voor een waterkering met een voorland, waar piping mogelijk een faalmechanisme is. In figuur 4 is te lezen dat, naast falen doordat het kritiek verval is overschreden, ook falen kan optreden doordat de pipe onder de dijk doorgroeit. Dit kan alleen gebeuren als er risico is op kortsluiting door de deklaag. In dit geval kan falen optreden als de pipe onder de dijkbasis doorgroeit ($L_{\text{pipe}} > L_{\text{dijk}}$) en als de pipe naar een gat in de deklaag groeit. De rood omcirkelde gebeurtenis is het geval waar we naar kijken in deze verkenning. Overige situaties die tot falen kunnen leiden worden niet beschouwd. Falen kan ook optreden als er geen kortsluiting is door de deklaag ("geen kortsluiting" tak), maar de pipe helemaal onder het voorland doorgroeit. In dit geval is het kritieke verval Hc maatgevend. Welke eisen aan het voorland (bijvoorbeeld minimale dikte) horen bij een situatie om aan te tonen dat er geen kortsluiting kan optreden is onderdeel van ander onderzoek (Rosenbrand, 2021). In geval het voorland erg doorlatend is (zie Rosenbrand e.a., 2021 Hoofdstuk 8, voor wanneer dit geldt) en er veel stroming door de deklaag is, kan er op dit moment nog geen betrouwbare uitspraak worden gedaan.

In het vervolg van dit rapport gaan we ervan uit dat de kans op kortsluiting 1 is en dat de pipe naar een gat in het voorland toegroeit en dat falen optreedt als $L_{\text{pipe}} > L_{\text{dijk}}$ is. We kijken dus alleen naar de kans op het doorgroeien van de pipe onder de dijkbasis ($L_{\text{pipe}} > L_{\text{dijk}}$).



Figuur 5: Faalpaden piping met voorland

2.3 Verificaties om veiligheid piping met voorlanden aan te tonen

Er zijn verschillende verificaties mogelijk om aan de veiligheidseis te voldoen in geval er voorlanden aanwezig zijn. Deze mogelijke verificaties van de veiligheid staan hieronder beschreven in tabel 1.

In alle gevallen is het uitgangspunt dat aan de verificatie voor het kritieke verval H_c voldaan moet zijn conform het WBI, met waar toepasbaar een extra verificatie voor pipelengte. Hierbij worden de faalpaden uit sectie 2.2 beschouwd, waarbij gevallen met (grote) instroming door voorland alleen met maatwerk kunnen worden goedgekeurd. De eerste keuze betreft welke kwelweglengte $L_{aanw,d}$ in de bepaling van H_c wordt meegenomen; zie gevallen A tot en met C in onderstaande tabel. In geval A wordt alleen de dijkbasis beschouwd en is er geen aanvullende verificatie op L nodig. In geval B wordt maximaal 2 keer de dijkbasis meegenomen als kwelweglengte, het dient nader uitgezocht te worden of dit in alle gevallen voldoende veilig is. In Geval C wordt de volledige effectieve kwelweglengte meegenomen, dit wordt in de rest van het rapport verder uitgewerkt.

Tabel 1: Verificaties veiligheid pipelengte met verschillende kwelweglengtes en het kritieke verval (H_c)

geval	$L_{aanw,d} \leq L_{dijk}$	$L_{aanw,d} \leq 2 * L_{dijk}$	$L_{aanw,d} \leq L_s$	Verificatie L
A	HC voldoet			Geen aanvullende verificaties.
B	Hc voldoet niet	Hc voldoet		Nader uit te zoeken of dit altijd veilig is, maar in deze verkenning niet verder behandeld.
C	Hc voldoet niet	Hc voldoet niet	Hc voldoet	Verificatie of berekende pipelengte keer partiële factor van 1.5 kleiner dan dijkbasis is.

AD A:

In dit geval is er geen voorland meegenomen bij de bepaling van H_c en hoeft er niet naar doorgroeien pipe gekeken te worden.

AD B:

Dit is een reeds gebruikte check zonder partiële factor. De vraag is of dit voldoende veilig is, dit wordt echter niet verder beschouwd in deze verkenning maar vraagt wel om aanvullend onderzoek.

In dit rapport wordt enkel gekeken naar geval C waar alleen aan de veiligheid wordt voldaan als de effectieve voorlandlengte meegenomen wordt. Hier hoort een verificatie op de berekende pipelengte bij op basis van een partiële factor van 1.5, zie sectie 2.6.2.

Er zijn verschillende andere verificaties mogelijk, deze worden in Bijlage A verder beschouwd.

2.4 Grenstoestanden voor piping met voorland

De volgende grenstoestanden gelden voor piping (Z_{PH}) en kortsluiting door pipegroei onder de dijkbasis (Z_{PL}); zie Rosenbrand e.a. (2021) en Rijkswaterstaat (2021) voor meer informatie.

Grenstoestand kritiek verval piping (H_c):

$$Z_{PH} = m_{pip} \cdot H_c - (H - H_{polder} - r_c \cdot D_{deklaag}) \quad (2.1)$$

Met hierin:

- H_c = op basis van Sellmeijer, als functie van $d70$, k , L_s .
- m_{pip} = de modelonzekerheid in Sellmeijer.
- H = de buitenwaterstand.
- H_{polder} = polder waterstand, in deze verkenning verder als 0 verondersteld.
- $r_d \cdot D_{deklaag}$ = de correctie voor uitstroomweerstand deklaag. Deze wordt verder niet beschouwd in deze verkenning.

Merk op dat de effectieve kwelweglengte L_s zoals in 2.1 besproken, in de bepaling van $H_{c,piping}$ wordt meegenomen.

Grenstoestand pipelengte (L):

$$Z_{PL} = L_{aanw} - m_{PL} \cdot L_{pipe} \quad (2.2)$$

Met hierin:

- L_{aanw} = de aanwezige kwelweglengte:
 - In geval van kortsluiting is deze L_{dijk} (als de kortsluiting direct aan de dijkteen zit, een conservatieve keuze waar we in het vervolg van uitgaan).
 - In geval van geen kortsluiting is deze L_s .
 - de kans op kortsluiting kan met een discrete verdeling worden gemodelleerd. Meest conservatief is een kans op kortsluiting van 1, waarbij $L_{aanw} = L_{dijk}$, dit wordt in deze verkenning aangehouden.
- L_{pipe} = de berekende pipe-lengte. Deze kan worden bepaald met de bovenstaande curves (aanpak deze studie) of met DgFlow analyses. L_{pipe} is een functie van onder meer H , L_s , D en lek lengte van het voor- en achterland.
- m_{PL} = modelonzekerheid pipelengte (gemiddelde 1, variatiecoëfficiënt = 0.3 op basis van enkele proeven, zie 3.4.2).

2.5 Faalkans-eisen

De doorsnede eis voor piping wordt conform het WBI (Rijkswaterstaat, 2021) gegeven door:

$$P_{eis,dsn} = \frac{P_{max} \cdot \omega}{N} \quad (2.3)$$

Met hierin:

P_{max} = faalkanseis traject.

ω = faalkansruimte piping.

N = lengte-effect factor.

Dit is de maximaal toelaatbare kans voor piping, zowel voor het overschrijden van H_c als L , het doorgroeien van L onder dijkbasis. Idealiter toon je in één keer aan of je hieraan voldoet via probabilistische analyse (met DgFlow of de curves uit sectie 2.1), maar je zou ook (strengere) eisen aan zowel H_c als L kunnen stellen, bijvoorbeeld met een 50%/50% faalkansverdeling (zodat als beide deeleisen van 50% van de doorsnede-eis wordt voldaan, ook aan totale doorsnede-eis uit vergelijking 2.3 wordt voldaan) of door te eisen dat de kans op kortsluiting in combinatie met de kans op doorgroeien pipe een verwaarloosbare bijdrage mag hebben aan de eis. Een opdeling naar strengere deeleisen is niet wenselijk omdat in dat geval de schadefactoren voor de verificatie op H_c ook strenger worden. In het vervolg van dit rapport wordt ernaar gestreefd om geen strengere eis aan H_c te stellen maar te zorgen dat de extra bijdrage van L op de faalkans verwaarloosbaar klein is.

2.6 Semi-probabilistische verificaties op kritiek verval en pipelengte

De volgende semi-probabilistische verificaties worden voorgesteld voor H_c en L . De veronderstelling is dat als hieraan voldaan wordt dat de dijk aan de vigerende eisen voldoet. Dit wordt in H4 en H5 nader verkend. Dit gaat uit van 5% (conservatieve) karakteristieke waarden (hoog/laag, afhankelijk van invloed op grenstoestand) voor de bepaling van alle parameters. Aandachtspunt is dat wat conservatief voor H_c is, niet per se conservatief voor L hoeft te zijn.

Bij onderstaande verificaties om de veiligheid aan te tonen wordt ervan uitgegaan dat sowieso aan de verificatie voor H_c voldaan dient te worden (conform het huidige WBI en OI). De verificatie op L is hier een *aanvulling* op.

2.6.1 Voor kritiek verval H_c

De semi-probabilistische veiligheidsverificatie voor H_c staat beschreven in het WBI en OI. Hierbij moet een optredend verval ΔH kleiner zijn dan een kritiek verval H_c inclusief veiligheidsfactoren:

$$\Delta H \leq \frac{H_c}{\gamma_{pip} \cdot \gamma_{b,p}} \quad (2.4)$$

Met:

$$\Delta H = h - h_{exit} - r_c \cdot D_{deklaag} \quad (2.5)$$

Hierin is:

- H_c conform Sellmeijer op basis van karakteristieke waardes grondeigenschappen, **effectieve kwelweglengte**, geometrie, etc.
 - ΔH = WBN – polderpeil (de correctie voor deklaag wordt niet beschouwd in dit rapport).
 - γ_{pip} = schadefactor piping
- $$\gamma_{pip} = 1.04e^{(0.37\beta_{eis,dsn} - 0.43\beta_{max})} \quad (2.6)$$
- Waarbij $\beta_{eis,dsn}$ de doorsnede-eis is en β_{max} de traject-eis (zie sectie 2.5).

- $\gamma_{b,p}$ = schematiseringsfactor, deze wordt in dit rapport op 1 gesteld.

Op basis van vergelijking 2.4 kan je ook de waterstand waarbij precies aan de eis wordt voldaan definiëren (H_{c_eis}), namelijk $H_{c_eis} = \Delta H \cdot \gamma_{pip} \cdot \gamma_{b,p}$. H_c moet dus groter zijn dan H_{c_eis} om aan de veiligheids-eisen te voldoen voor kritiek verval.

2.6.2 Voor pipelengte L

De volgende aanvullende veiligheidsverificatie wordt voorgesteld in dit rapport voor de pipelengte L, deze wordt ook al in bestaande projecten gebruikt. Deze verificatie is een aanvulling op de verificatie aan H_c in geval je voorlanden meeneemt bij de bepaling van H_c .

$$L_{aanw,d} > L_{pipe,rep} \cdot \gamma_{PL} \quad (2.7)$$

Met hierin:

- $L_{aanw,d}$ = De rekenwaarde van de aanwezige kwelweglengte:
 - Kortsluiting: $L_{aanw,d} = L_{dijk}$.
 - Geen kortsluiting: $L_{aanw,d} = L_{VL}$, dit wordt verder niet beschouwd.
- γ_{PL} = partiële factor pipelengte. $L_{pipe,rep}$ = berekende pipe lengte:
 - $L_{pipe,rep}$ wordt berekend als functie van H en H_c op basis van de curves (L in Figuur 3).
 - Er zijn nog twee mogelijkheden om $L_{pipe,rep}$ te bepalen, namelijk bij de kritieke waterstand (H_c) of bij H_{c_eis} ; waarbij H_{c_eis} voorlopig de voorkeur heeft.

De partiële factor op de pipelengte wordt nu (in projecten, ook in deze verkenning) gelijk aan 1,5 gekozen. Een hoofddoel van dit project is om te verkennen of dit resulteert in voldoende veiligheid.

Alternatief kan ook de aanwezig veiligheidsfactor op de pipelengte (SF_{pipe}) worden berekend met de onderstaande formule, zodat kan worden bepaald of deze aan de benodigde waarde van 1.5 voldoet.

$$SF_{pipe}(H_{c_eis}) = L_{aanw,d} / L_{pipe,rep}(H_{c_eis}) \quad (2.8)$$

Of in geval de berekende pipelengte bij H_c bepaald wordt:

$$SF_{pipe}(H_c) = L_{aanw,d} / L_{pipe,rep}(H_c) \quad (2.9)$$

Vergelijking 2.8 heeft de voorkeur en wordt in het vervolg als uitgangspunt gebruikt, vergelijking 2.9 wordt gebruikt voor gevoeligheidsanalyses.

Een andere gebruikte semi-probabilistische verificatie is om maximaal met 2 keer de dijkbasis te rekenen als kwelweglengte. Aangezien de curves laten zien dat de maximale pipelengte onder 0.5 keer de kwelweglengte blijft, kan zo de pipe niet onder de dijkbasis doorgroeien. Dit gaat wel voorbij aan de onzekerheid in berekende pipelengte. Deze verificatie wordt verder niet in detail beschouwd in dit rapport. Maar is wel relevant om te komen tot een volledige veiligheidsbenadering als deze in de praktijk wordt toegepast. Een aandachtspunt is dat de conservatieve omhullende van de curves wordt gebruikt, waarvoor een ondoorlatend achterland geldt. Een alternatief op de curves is een verificatie op basis van DgFlow voor gevallen waarin er geen sprake is van ondoorlatend achterland. Ook hier zijn partiële factoren nodig.

2.6.3 Veiligheid in pipelengte verificatie

De veiligheid in de verificatie van de pipelengte, uitgaande van de bovenstaande aanpak op basis van een partiële factor zit verwerkt in:

- Karakteristieke waarden sterkteparameters voor bepaling H_c .
- Bepaling fictieve kwelweglengte (dit zou moeten gebeuren op basis van karakteristieke waarden).
- WBN en γ_{pip} want check op L alleen relevant als H_c voldoet aan vergelijking in 2.5.1, waardoor er door de overlap tussen L en H_c mogelijk extra conservatisme ontstaat. Hoeveel valt nog nader uit te zoeken.
- De bepaling van de pipelengte bij H_{c_eis} , op basis van conservatieve curves (figuur 2 en 3) op basis van een dicht achterland.
- Een partiële factor γ_L op de berekende pipelengte, waarvan in deze studie een eerste inschatting wordt gegeven of deze voldoende veiligheid geeft bij een waarde van 1,5.

De conditionele kans op falen gegeven dat precies aan de partiële factor van 1.5 wordt voldaan is 0.05. Dit volgt op basis van een variatiecoëfficiënt op de pipelengte van 0.3. De betrouwbaarheidsindex (een andere maat voor de faalkans, zie bijvoorbeeld Kanning en Schweckendiek, 2017) is:

$$\beta_{SF=1.5} = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{1.5 \cdot L_{dijk} - L_{dijk}}{VC \cdot L_{dijk}} = \frac{1.5-1}{0.3} = 1.67.$$

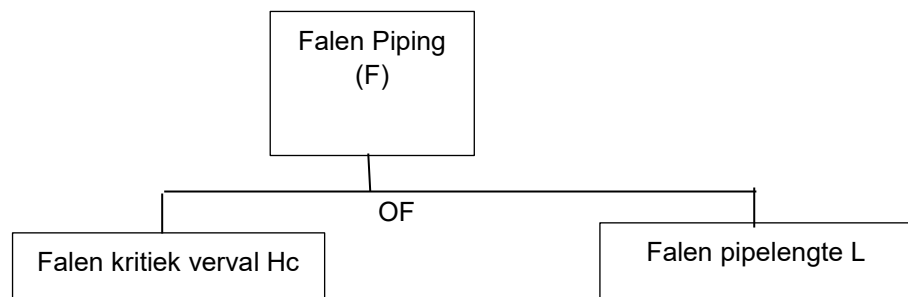
Hier hoort een kans van 0.05 bij.

3 Verkennende probabilistische analyses piping met voorlanden

In dit hoofdstuk wordt een aanpak beschreven om verkennende probabilistische analyses uit te voeren om zo de veiligheidsverificatie voor pipelengte L op basis van een partiële factor te verkennen.

3.1 Foutenboom

We gaan bij de invulling van het veiligheidsformat en het maken van de verkennende probabilistische analyses uit van onderstaande foutenboom, waarbij falen kan optreden door overschrijding van Hc of door kortsluiting en doorgroeien van de pipe onder de dijkbasis.



Figuur 6: Foutenboom falen piping door overschrijden Hc en door doorgroeien pipe.

De kans op falen wordt berekend volgens:

$$P(F) = P(Hc) + P(L) - P(Hc \cap L) \tag{3.1}$$

En om aan de eisen te voldoen geldt dus:

$$P(Hc) + P(L) - P(Hc \cap L) < P_{eis,dsn} \tag{3.2}$$

Wat hierbij vooral van belang is, is de overkoepelen term $P(Hc \cap L)$, welke aangeeft wat de kans is dat Hc en L beide optreden. Aangezien L voornamelijk door de waterstand H wordt bepaald, is deze correlatieterm waarschijnlijk groot. In het meest extreme geval, een volledige overlap (volledige correlatie), geldt $P(L) = P(Hc \cap L)$. In dit geval geldt $P(F) = P(Hc)$ en heeft L dus geen invloed op de faalkans. Dit dient nader uitgezocht te worden om te komen tot een volledige veiligheidsbenadering, een eerste verkenning wordt gedaan in sectie 3.2.3.

3.2 Opzet probabilistische analyses piping met voorlanden

3.2.1 Aanpak

In dit rapport wordt een vereenvoudigde faalkansanalyse gemaakt ter bepaling van de kans op falen door pipegroei onder de dijkbasis. Dit is op basis van een kans van kortsluiting van 1 en de aanname dat falen optreedt als de pipe onder de dijkbasis doorgroeit, beide conservatieve aannames. Ook is aangenomen dat er niet veel instroom in het voorland is, zodat DgFlow geldig is en dus de curves uit H2 gebruikt kunnen worden. Ook wordt alleen gekeken naar L en niet naar de kans op falen door Hc.

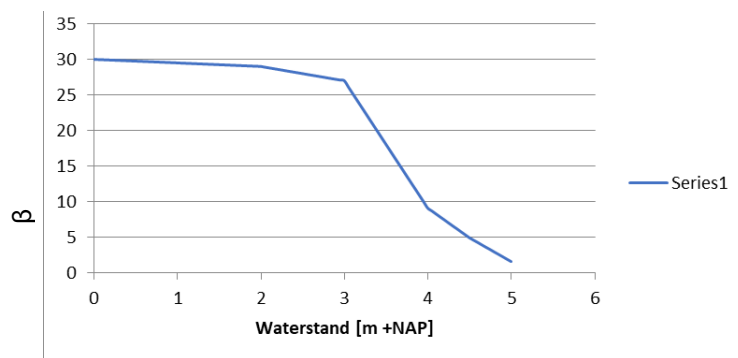
Onderstaand staat een stappenplan met als doel om te bepalen wat de kans is dat de pipe onder de dijkbasis doorgroeit, met kortsluiting tot gevolg. Alsmede om te bepalen wat de semi-probabilistische veiligheidsfactor is, zodat de faalkans en de veiligheidsfactor met elkaar kunnen worden vergeleken. De volgende stappen worden doorlopen:

1. Bepaling kritieke waterstand (H_c) op basis van de formule van Sellmeijer (met effectieve kwelweglengte en overige parameters als invoer) en of deze aan de eis (H_{c_eis}) voldoet. Als niet aan H_{c_eis} wordt voldaan hoeft ook niet naar L gekeken te worden. Vervolgens wordt H_c gebruikt om in stap 2 en stap 3 de pipelengte te berekenen bij verschillende waterstanden.
2. Bepalen optredende pipelengte bij H_{c_eis} , $L_{pipe,rep}(H_{c_eis})$, op basis van de curves uit Hoofdstuk 2. En vervolgens bepaling $SF_{pipe}(H_{c_eis})$ conform formule 2.8, zie sectie 2.6.2. Deze kan worden vergeleken met de benodigde partiële factor van 1.5 op de pipelengte.
3. Bepaling optredende pipelengtes bij verschillende waterstanden (H) op basis van Figuur 3 en vervolgens de bepaling van de kans op doorgroeien van deze pipelengtes onder de dijkbasis door gebruikt te maken van de grenstoestandsfunctie van sectie 2.4. Dit levert een relatie op tussen faalkans en waterstand, een zogenaamde fragility curve.
4. Bepaling totale faalkans van doorgroeien pipe onder dijkbasis door uitintegreren van de fragility curve met de kansdichtheidsverdeling van de waterstand (zie bijv. Kanning en Schweckendiek, 2017). Deze kansdichtheidsverdeling wordt gemodelleerd met een Gumbel verdeling, welke kan worden afgeleid op basis van WBN, decimeringshoogte en norm. Aandachtspunt is hierbij hoe om te gaan met de kans op falen door L in geval H_c wordt overschreden. Hierbij worden 3 opties beschouwd (1: afkappen bij H_{c_eis} , 2: afkappen bij H_c en 3: extrapoleren boven H_{c_eis}), zie sectie 3.2.3.
5. Analyse uitkomsten: Wordt voldaan aan de semi-probabilistische verificatie (is $SF_{pipe}(H_{c_eis}) > 1.5$) en is de faalkansbijdrage van het doorgroeien van de pipe verwaarloosbaar klein? Wat is de gecombineerde kans op falen door H_c en L als deze onafhankelijk worden verondersteld (bovengrensbepaling).

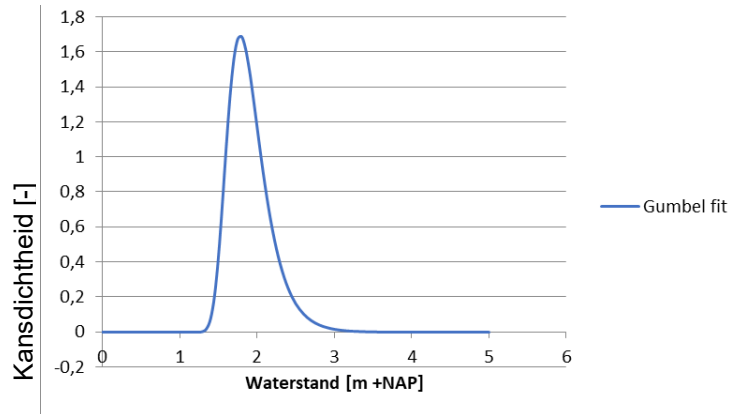
Deze aanpak wordt vervolgens toegepast op verschillende cases, zie hoofdstuk 4.

3.2.2 Fragility curve en kansdichtheidsfunctie

In onderstaande figuur staat een voorbeeld van een fragility curve waarin de betrouwbaarheidsindex β staat uitgezet tegen de buitenwaterstand. Wat opvalt is de snelle toename van β met de afnemende waterstand, wat komt door de snel afnemende pipelengte met de buitenwaterstand, zie Figuur 3. Door deze fragility curve te combineren met de kansdichtheidsfunctie van de waterstand, zie Figuur 8, kan de faalkans worden bepaald.



Figuur 7: Fragility curve voor Lc



Figuur 8: kansdichtheidsfunctie van de waterstand

3.2.3 Extrapoleren en afkappen fragility curve

Zoals gezegd is er een grote correlatie tussen de kritieke waterstand H_c en L , dit komt tot uiting in de term $P(H_c \cap L)$ in vergelijking (3.1). Dit komt omdat L een functie is van H en H_c , en L pas bij grote H en H_c onder de dijk door kan groeien.

Bij waterstanden hoger dan H_c (5m in bovenstaande figuur) is het dus de vraag wat er precies gebeuren met de faalkans door L , aangezien hier ook falen door H_c ontstaat en dit al afgedekt is in het veiligheidsformat met de schadefactor voor piping (zie sectie 2.6.1). Zelfs bij waterstanden hoger dan H_{c_eis} zou je misschien kunnen stellen dat de bijdrage aan de faalkans door L niet relevant is omdat de faalkansbijdrage al wordt afgedekt door de schadefactor.

Er worden 3 situaties onderscheiden om zo een eerste inschatting te kunnen geven van het effect van de overlap tussen H_c en L . Dit effect wordt als eerste schatting bepaald door de fragility curve af te kappen boven een bepaalde waterstand, zodat de faalkansbijdrage van L boven deze waterstand niet meer meetelt.

De volgende situaties worden onderscheiden:

1. De fragility curve wordt afgekapt boven H_c , zoals in Figuur 7.
2. De fragility curve wordt afgekapt boven H_{c_eis} .
3. De fragility curve wordt niet afgekapt. De kans op falen door L wordt bij hogere waterstanden dan H_c gelijk gehouden aan de kans op falen door L bij H_c , dus de β loopt horizontaal bij $H > H_c$.

Welke optie het beste de faalkans weergeeft, dient in volledige probabilistische analyses verder onderzocht te worden, waarbij expliciet H_c en L beide worden beschouwd. Optie 3 is de meest conservatieve van de 3 beschouwde opties en optie 2 het minst conservatief.

3.3 Modelonzekerheid

3.3.1 Bepaling modelonzekerheid

De modelonzekerheid geeft de onzekerheid aan in de geschatte pipelengte op basis van DgFlow. Deze is bepaald in het hoofdrapport (Rosenbrand e.a., 2021) voor 2 proevenseries door de berekende en gemodelleerde pipelengte bij het kritiek verval te bepalen en deze met elkaar te vergelijken. Hier komt een variatiecoëfficiënt uit van $VC = 0.3$. Dit lijkt een redelijke eerste schatting, maar meer analyse is wenselijk gezien het grote belang van deze onzekerheid op de resultaten.

3.3.2 Modelonzekerheid bij lagere belastingen

De modelonzekerheid bij lagere belastingen dan het kritiek verval is nog onbekend en dient verder uitgezocht te worden. De vraag is dan of een variatiecoëfficiënt een goede maat is, of beter een standaardafwijking, aangezien een variatiecoëfficiënt leidt tot erg lage standaard afwijkingen bij kleinere pipelengtes. Dit wordt ondervangen in dit rapport door altijd uit te gaan van een minimale standaardafwijking van 1 meter op de bepaalde pipelengte. Ook wordt er gekeken naar hoe gevoelig het eindresultaat is voor deze keuze, wat ook het belang van verder onderzoek bepaald.

3.3.3 Modelfactor

Naast het kalibreren van partiële factoren zoals in het WBI, kunnen deze ook bepaald worden op basis van standaardformules. De waarde van deze standaardformules is in dit geval zeer beperkt aangezien ook naar de combinatie met de verificatie op H_c moet worden gekeken, en naar alle overige rekenwaarden (zoals WBN, doorlatendheid) en partiële factoren (schadefactor piping) in het veiligheidsformat. Voor een modelfactor ziet deze er als volgt uit:

$$\gamma_m = \frac{1-\alpha \cdot \beta \cdot VC}{1-k \cdot VC} \quad (3.3)$$

Waarin α in de invloedscoefficiënt in een probabilistische analyse en k het kwantiel waarop de karakteristieke waarde wordt gebaseerd. Voor de modelonzekerheid wordt meestal niet met een karakteristieke waarde gerekend, maar direct met een partiële factor. Dit houdt in een k van 0. Stel nu dat de $\beta_{eis,dsn}$ op ongeveer 5 ligt en de $VC = 0.3$, dan zou de invloedsfactor maximaal een α van ongeveer 0.33 mogen hebben om een partiële factor van 1.5 te legitimeren. Dit lijkt in eerste instantie veel, aangezien het om een gecombineerde evaluatie van L en H_c gaat. Dit onderstreept vooral het belang van het nader uitzoeken van het veiligheidsformat in geval van voorlanden. In absolute zin zegt dit echter niks, aangezien alle partiële factoren in samenhang dienen te worden beschouwd.

4 Cases

4.1 Aanpak

We kijken in dit rapport voornamelijk naar het geval C ($L \times 1,5 < \text{dijkbasis}$) uit hoofdstuk 2 waarbij de veiligheid tegen doorgroeien onder de dijkbasis en kortsluiting wordt aangetoond op basis van een partiële factor en een kans van kortsluiting van 1.

Bij de berekeningen wordt aan de hand van 7 cases steeds beschouwd of aan de semi-probabilistische verificatie op basis van een partiële factor van 1.5 wordt voldaan en wat de bijbehorende faalkans door doorgroeien onder dijkbasis is. Dit geeft enerzijds inzicht in de veiligheid dit hoort bij deze semi-probabilistische verificatie en anderzijds wordt inzicht verkregen in de belangrijkste factoren die deze veiligheid bepalen.

De cases zijn fictief en samengesteld om de invloed van het semi-probabilistisch rekenen uiteen te zetten. De cases zijn geen representatie van de werkelijke piping opgave en reflecteren ook geen echte locaties, maar zijn daarop rondom de parameters wel geïnspireerd. Naast het geval C, kijken we in sectie 4.3 naar enkele overige gevallen, bijvoorbeeld geval B uit sectie 2.2 (2 keer de dijkbasis criterium) en uit Bijlage A gevallen F (kans op kortsluiting meenemen) en G (veiligheidsmarge op H_{c_eis}) en het geval dat de kans op kortsluiting 0 is.

4.2 Representatieve cases voor verificatie met partiële factor

In deze sectie worden berekeningen van representatieve cases beschouwd, voor het geval waarbij de veiligheid wordt verkregen via een partiële factor van 1.5 op de pipelengte die wordt bepaald bij een waterstand die precies aan de eis voldoet, $L_{pipe}(H_{c_eis})$, zie sectie 2.6.2.

4.2.1 Uitgangspunten

De volgende uitgangspunten zijn gebruikt bij de berekeningen en het opstellen van de eisen.

Bij de cases:

- Zonder voorland voldoet de dijk niet op H_c .
- Met effectief voorland L_v (en dus effectieve kwelweglengte L_s) voldoet de dijk nipt of ruim aan H_c .
- Er is voldoende spreiding in de verhouding tussen L_s en de dijkbasis.
- Er is spreiding in veel of weinig pipegroei, beïnvloedt door de dikte van het watervoerend pakket D.

Bij de berekening:

- Figuur 2 en 3 worden gebruikt voor de bepaling van de pipelengte.
- De aanwezige veiligheidsfactor tegen doorgroeien $SF_{pipe}(H_{c_eis})$ en $SF_{pipe}(H_c)$ worden bepaald, zie vergelijkingen 2.8 en 2.9.
- De kans op falen van doorgroeien van de pipe wordt bepaald op basis van de grenstoestandsfunctie uit sectie 2.4.
- Er worden verschillende manieren voor de bepalen van β gepresenteerd, zie sectie 3.2.3:
 - a) Afknoten bij H_c , aangezien de kans op hogere waterstanden mogelijk al wordt afgedekt door de schadefactor bij de verificatie op H_c .
 - b) Afknoten bij H_{c_eis} , iets minder conservatief dan a).
 - c) Niet afknoten, de kans bij H_c wordt ook gebruikt bij hogere waterstanden.

Bij de uitkomsten:

- $\beta(H>H_c)$: de kans van overschrijd van H_c wordt berekend als inschatting van de pipingfaalkans.
- De gecombineerde betrouwbaarheid $\beta_{combined}$ wordt berekend door de kansen voor piping (H_c) en pipelengte (L) als onafhankelijk bij elkaar op te tellen.

De overschrijdingskans van H_c (uitgedrukt in betrouwbaarheid, $\beta(H>H_c)$) wordt gegeven, een grove maat voor de kans op piping. Dit dient in een vervolg netter uitgewerkt te worden in een volledig probabilistische analyse. Verder is het de vraag wat een verwaarloosbare bijdrage van de pipelengte aan de totale faalkans van piping is. Als bovengrens wordt daarom de gecombineerde β beschouwd ($\beta_{combined}$), welke wordt bepaald door de kansen voor piping (H_c) en pipelengte (L) als onafhankelijk bij elkaar op te tellen. Dit is een conservatieve schatting.

Bij de eis:

- De $\beta_{(eis,dsn)}$ is 4,8.

We gaan uit van een dijk met voorland in een traject met een norm van 1/3000 per jaar. De lengte-effect factor is 100 en de faalkansruimte voor piping is 0.24. Dit levert een $\beta_{(eis,dsn)}$ van 4,8.

4.2.2 Samenvatting cases

In onderstaande tabel staat een overzicht van de relevante eigenschappen de beschouwde 7 hypothetische situaties. D/Ls en Lc/Ls zijn nodig om de pipelengte te bepalen met figuur 2 en 3.

Tabel 2: Overzicht beschouwde cases.

	Ldijk	D	Ls	D/Ls	Lc/Ls	Hc	Hc_eis
situatie 1	30	20	100	0,2	0,2	5	5
situatie 2	30	20	100	0,2	0,2	5,5	5
situatie 3	30	40	100	0,4	0,3	5,5	5
situatie 4	30	40	100	0,4	0,3	6	5
situatie 5	30	75	100	0,75	0,45	6	5
situatie 6	20	75	150	0,5	0,4	10	5
situatie 7	20	75	150	0,5	0,4	5,2	5

4.2.3 Uitkomsten

In onderstaande tabel staan de resultaten van de analyses. De uitkomsten worden verder besproken in secties 4.2.4 en 4.2.5.

De 2 belangrijkste uitkomsten zijn de 2 grijze kolommen, namelijk de aanwezige veiligheidsfactor tegen doorgroeien onder de dijkbasis bij H_{c_eis} , $SF_{pipe}(H_{c_eis})$, en de berekende betrouwbaarheidsindex zonder afknoten $\beta(L<L_{dijk})$ (geval c, de meest conservatieve keuze in dit geval). Naast de Ls/D verhouding staan verder gegeven de H_{c_eis} (zie sectie 2.6.1), $SF_{pipe}(H_c)$, zie sectie 2.6.2, de kans op overschrijden van H_c , $\beta(H>H_c)$ zie sectie 4.2.1), 3 mogelijke manieren om de betrouwbaarheidsindex $\beta(L<L_{dijk})$ te bepalen (zie sectie 3.2.3) en een conservatieve inschatting van de gecombineerde betrouwbaarheidsindex van

Hc en L, β_{combined} . In het algemeen wordt opgemerkt dat als geldt als aan de partiële factor van 1.5 wordt voldaan ($SF_{\text{pipe}}(Hc_{\text{eis}}) \geq 1.5$), dat dan ook geldt dat de bijdrage aan de faalkans door doorgroeiën van de pipe verwaarsloosbaar is ($\beta(L < L_{\text{dijk}}) \gg \beta_{\text{eis,dsn}}$). In sectie 4.2.4 staan nog enkele observaties.

Tabel 3: Uitkomsten analyses, waarbij $\beta_{\text{eis,dsn}} = 4,8$.

Situatie	Ls / D	Hc_eis [m]	Hc [m]	$SF_{\text{pipe}}(Hc_{\text{eis}})$ [-]	$SF_{\text{pipe}}(Hc)$ [-]	$\beta(H > Hc)$ [-]	$\beta(L < L_{\text{dijk}})$ Afgeknot bij Hc_eis [-] a)	$\beta(L < L_{\text{dijk}})$ Afgeknot bij Hc [-] b)	$\beta(L < L_{\text{dijk}})$ [-]* c)	β_{combined} ; obv c [-]
1. Hc en L voldoen precies	100 / 20	5	5	1.5	1.5	4,8	5,6	5,6	5,5	4,8
2. Hc voldoet ruim, L voldoet precies bij Hc(Ls)	100 / 20	5	5.5	2	1.5	5,2	8,5	6,1	5,9	5,2
3. Hc voldoet ruim, L niet bij Hc(Ls), wel bij Hc_eis	100 / 40	5	5.5	2	1	5,2	6,4	5,5	5,4	5,2
4. Hc voldoet ruim, L niet bij Hc(Ls), wel bij Hc_eis	100 / 40	5	6	3	1	5,7	9,3	5,8	5,8	5,6
5. Hc voldoet ruim, L niet bij Hc(Ls), wel bij Hc_eis	100 / 75	5	6	2	0.67	5,7	6,6	5,5	5,5	5,4
6. Hc voldoet ruim, L ook	150 / 75	5	10	3	0.3	8,2	12,1**	6,8	6,8	6,8
7. Hc voldoet, L niet	150 / 75	5	5.2	0.44	0.33	5,0	4,1	4,1	4,1	4,1

* in dit geval wordt bij hogere waterstanden dan Hc de kans op falen bij Hc aangenomen.

** sterk beïnvloed door minimale waarde STD.

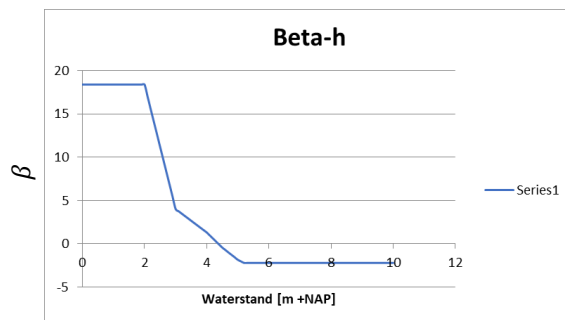
4.2.4 Observaties bij de analyses

De volgende observaties worden gedaan.

- Situatie 1: De aanwezige veiligheidsfactor voldoet precies aan de eis van 1.5. De hieruit volgende faalkans ($\beta(L < L_{dijk}) = 5.5$) is een orde lager dan die behorende bij $\beta_{eis,dsn} = 4,8$. Een situatie die precies aan een partiële factor van 1.5 voldoet, resulteert dus in een veilige situatie.
- Situatie 2: Dezelfde situatie als 1, maar dan met een iets hogere Hc. De pipelengte is dus iets lager bij Hc_eis (die 0.5m onder Hc ligt), waardoor $SF_{pipe}(Hc_eis)$ veel groter is (2 i.p.v. 1.5) en de kans op de doorgroeien onder het voorland ook verder afneemt (van $\beta = 5.4$ naar 5.9). Een beetje oversterkte in Hc resulteert dus meteen in een situatie die veel veiliger wordt.
- Situatie 3: Idem aan 2, maar door een groter D groeit de pipe verder door, terwijl nog steeds aan zowel de partiële factor van 1.5 (bij Hc_eis) als aan de betrouwbaarheid wordt voldaan. Er wordt hier niet aan de partiële factor van 1.5 voldaan bij $SF_{pipe}(Hc)$, maar dat hoeft ook niet in de voorgestelde aanpak.
- Situatie 4: Idem aan 3, maar met meer oversterkte in Hc, waardoor nog ruimer aan de partiële factor van 1.5 wordt voldaan.
- Situatie 5: Idem aan 3 en 4, maar nog grotere D, dus langere pipe. Er wordt aan zowel de partiële factor van 1.5 (bij Hc_eis) als aan de betrouwbaarheid ruim voldaan. Er wordt hier niet aan de partiële factor van 1.5 voldaan bij $SF_{pipe}(Hc)$, maar dat hoeft ook niet.
- Situatie 6: Nog meer voorland (te zien in Ls). Bij Hc voldoet de situatie niet voor L, $SF_{pipe}(Hc) < 1.5$, maar dit hoeft ook niet.
- Situatie 7: Er wordt ruim niet voldaan aan de SF. En ook niet aan de β , zelfs niet voor het geval zonder afknoten (c), de meest conservatieve situatie (hoewel de β 's gelijk zijn voor de 3 gevallen). Dit is consistent met elkaar, echter is het verschil tussen de eis (4.8) en berekende β beperkt, wat mogelijkheden voor optimalisatie geeft aangezien een geval van zo ruim niet aan $SF_{pipe}(Hc_eis)$ voldoet wel bijna voldoende veiligheid heeft.

4.2.5 Voorbeeld berekende fragility curve

In onderstaande figuur staat een voorbeeld van fragility curve voor geval 7c, waarbij de (lage) β wordt geëxtrapoleerd boven de kritieke waterstand Hc (=5m). Wat opvalt zijn de lage β (hoge kans) op doorgroeien bij waterstanden rond en boven Hc, 5,2 m + NAP, en de snel oplopende β als de waterstanden lager worden.



Figuur 9: Voorbeeld fragility curve voor situatie 7c.

4.3 Gevoeligheidsberekeningen

4.3.1 Hogere standaardafwijking voor lagere L

In alle gevallen is gerekend met een minimale standaardafwijking (std) van 1m op de berekende kwelweglengte. Verder is een variatiecoëfficiënt VC van 0.3 toegepast. Aangezien de berekende pipe snel afneemt wordt de minimale standaardafwijking belangrijk. Deze is voor situatie 3b gevarieerd naar een minimum std van 5m. De kans gaat dan van $2.4 \cdot 10^{-8}$ naar $2.9 \cdot 10^{-8}$, wat een erg klein verschil is. Dit komt waarschijnlijk omdat de kans voornamelijk wordt bepaald door waterstanden dichtbij Hc, en hier is VC een prima benadering.

4.3.2 Afkappen fragility curve

Het afkappen (zie sectie 3.2.3) heeft een grote invloed op de berekende kans, zoals te zien is in de verschillen tussen gevallen a, b en c in bovenstaande tabel. We zijn tot nu toe uitgegaan van het meest conservatieve geval c. Het is echter waarschijnlijk dat eerder afkappen gerechtvaardigd is, in welk geval een veel lagere benodigde partiële factor mogelijk zou kunnen zijn. Dit dient nog onderbouwd te worden met probabilistische analyses.

4.3.3 Pipelengte berekenen bij Hc in plaats van Hc_eis

Zoals Tabel 2 laat zien maakt het erg uit veel uit of de veiligheidsfactor bij Hc_eis wordt bepaald, $SF_{pipe}(Hc_eis)$, of bij Hc, namelijk $SF_{pipe}(Hc)$. Het lijkt gerechtvaardigd dit bij Hc_eis te doen, omdat alle hogere waterstanden al worden ondervangen met de schadefactor in de piping analyse. Dit dient wel nader uitgezocht te worden.

4.4 Duiding resultaten

Er zijn twee effecten die ervoor zorgen dat de kans op falen door het groeien van de pipe onder de dijkbasis relatief klein is:

1. De pipelengte neemt zeer sterk af met waterstanden onder Hc. De kans op falen neemt dus ook sterk af bij lagere waterstanden dan Hc, waardoor deze weinig bijdrage hebben aan de totale faalkans. Ook zorgt dit ervoor dat als er oversterkte is (Hc groter dan Hc_eis), de kans op falen bij Hc_eis sterk afneemt.
2. De kansbijdrage van doorgroeien boven Hc is waarschijnlijk beperkt, omdat hier al falen door Hc optreedt en er sterke correlatie is tussen Hc en L, zie sectie 3.2.3. Hierdoor mag je de fragility curve waarschijnlijk afknotten boven Hc of zelfs Hc_eis. Dit dient verder onderzocht te worden.

Samen kunnen deze twee effecten ervoor zorgen dat de eisen aan de pipelengte minder streng kunnen worden dan de huidige partiële factor van 1.5.

4.5 Overige gevallen

Naast de verificatie op basis van een partiële factor wordt in deze sectie ook kort ingegaan op andere verificatie mogelijkheden, zie 2.6 en bijlage A.

4.5.1 Onderbouwen geval B: 2 keer de dijkbasis

Er wordt nu vaak gerekend met een eis aan 2 keer de dijkbasis als maximale kwelweglengte. De reden is dat dit de pipelengte niet verder kan groeien dan 0.5 de aanwezige kwelweglengte (zie Figuur 3). Dit gaat echter voorbij aan de onzekerheid in de bepaling van de pipelengte. Het lijkt nu efficiënter om deze methode niet toe te passen en volgens de voorgestelde aanpak op basis van de curves de pipelengte te bepalen. Dit is echter geen onderdeel van deze studie en wordt verder niet beschouwd.

4.5.2 **Onderbouwen geval E en F: maatwerk**

Mochten er situaties zijn waar je niet voldoet aan de partiële factor van 1.5, dan kun je nog maatwerk toepassen. Ofwel volledige probabilistische analyses (geval E) uitgaande van een kans op kortsluiting van 1, omdat er veel veiligheid aanwezig lijkt in het systeem conform redeneringen uit sectie 4.4. Ofwel door de kans op de aanwezigheid van kortsluiting (geval F) expliciet in deze analyse te betrekken. Hier horen dan wel beheersmaatregelen bij zodat deze kans niet sterk vergroot binnen de beschouwde periode van ontwerp/beoordeling.

4.5.3 **Onderbouwen geval 6: $H_c > H_{c_eis}$**

In geval H_c veel groter is dan H_{c_eis} wordt relatief snel aan de pipegroei eis voldaan omdat deze bij H_{c_eis} wordt bepaald en sterk afneemt tussen H_c en H_{c_eis} . Wellicht dat werken met een minimaal oversterte (verschil tussen H_c en H_{c_eis}) in combinatie met een check op de pipelengte zonder partiële factor een praktisch werkbaar recept op kan leveren. Dit dient verder uitgezocht te worden.

4.5.4 **Kans op kortsluiting 0**

In geval kortsluiting uitgesloten (kans 0) kan worden, hoeft er niet meer naar de pipelengte gekeken te worden. Dan is alleen H_c nog van belang. De voorwaarden hiervoor worden in een separaat onderzoek beschouwd.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Aantonen veiligheid op basis van berekende pipelengte

Er is in deze studie gekeken naar mogelijke verificaties om te zorgen voor voldoende veiligheid in geval voorland wordt meegenomen bij piping analyses. Vervolgens is op basis van 7 cases gekeken of de toepassing van een partiële factor op de berekende pipelengte tot voldoende veiligheid leidt. Hierbij geldt de verificatie dat de kritieke waterstand voor piping (H_c) groter moet zijn dan de eis (H_{c_eis}) en dat de berekende pipelengte $L_{pipe}(H_{c_eis})$ maal een partiële factor van 1.5 kleiner moet zijn dan de dijkbasis. Hierbij wordt de pipelengte berekend met de DgFlow curves uit Hoofdstuk 2. Voor 7 cases is de faalkans berekend dat de pipe onder het voorland doorgroeit, en of aan de verificatie op basis van de partiële factor wordt voldaan.

Er is geen aanwijzing gevonden dat deze aanpak tot onveilige situaties zou leiden, in alle gevallen dat aan de partiële factor van 1.5 wordt voldaan, is ook de faalkans voldoende klein. In tegenstelling, er lijkt veel aanscherping mogelijk gezien de hoge gevonden betrouwbaarheden, ook als niet/nauwelijks aan de partiële factor van 1.5 wordt voldaan. Dit is voornamelijk door 1) de sterkte afname van de pipelengte met afnemend verval en 2) de overlap met H_c waardoor pipelengtes boven H_{c_eis} waarschijnlijk niet hoeven te worden beschouwd voor de optredende pipelengte.

5.2 Conclusies

Allereerst dient te worden opgemerkt dat het de schematisering en het daarbij afleiden van de kwelweglengte, intredelocaties en dijkbasisbreedte zorgvuldig dient te worden uitgevoerd. Wanneer dat het geval is, zijn op basis van de verkennende analyses in dit rapport, de volgende conclusies te trekken:

- Verificatie van de pipelengte en controle van het kritieke verval zijn noodzakelijk;
- De kans op doorgroeien van de pipe onder het voorland is in de beschouwde gevallen erg klein. Dit komt enerzijds door de snelle afname van de pipelengte onder het kritiek verval en anderzijds doordat de pipelengte boven het kritiek verval waarschijnlijk geen bijdrage heeft omdat dat al falen door het overschrijden van het kritiek verval optreedt (wat al is afgedekt met een schadefactor).
- Wanneer op basis van de DgFlow curves (Rosenbrand e.a., 2021) de pipelengte wordt berekend welke, in combinatie met een aangenomen partiële factor van 1,5, niet onder de dijkbasis doorgroeit, dan zijn er geen gevallen gevonden waarbij er een significante bijdrage is van het doorgroeien van de pipe onder de dijkbasis aan de faalkans. Er is omwille van de veiligheid dus geen reden om af te wijken van de huidige praktijk met een partiële factor 1.5. Dit lijkt een betrouwbare methode, welke wel gevalideerd dient te worden in een pilot omdat in deze studie maar een beperkt aantal gevallen zijn beschouwd.
- Er is omwille van doelmatigheid van inzet van middelen en duurzaamheid meer dan voldoende aanleiding om de methode aan te scherpen. Dit kan leiden tot een verdere reductie van de landelijke piping opgave. Aanvullend onderzoek kan mogelijk resulteren in een lagere partiële factor.
- De faalkans op doorgroeien van de pipe onder de dijkbasis wordt voor een groot deel bepaald door het afkappen van de kans op doorgroei boven H_c (de kans op pipingfalen bij waterstanden boven H_c is immers al afgedekt door de schadefactor piping). *Of dit altijd gerechtvaardigd is en bij welke waterstand (H_c of H_{c_eis}) moet nader worden onderzocht met Monte Carlo simulaties. Zie aanbevelingen.*

- Ook voor situaties dat wel aan Hc maar niet aan L wordt voldaan is er in veel gevallen toch voldoende veiligheid. In dit geval kan maatwerk een oplossing bieden, zie sectie 5.1.

5.3 Aanbevelingen

Kansen voor optimalisatie en noodzakelijk verder onderzoek

Er is nu naar een beperkt aantal situaties gekeken om het te kijken of de semi-probabilistische verificatie leidt tot voldoende veiligheid. Het wordt aanbevolen om dit voor meer, en meer realistische cases te bekijken. En hierin ook goed te kijken naar de onzekerheden in de bepaling van de effectieve kwelweglengte op basis van lek lengtes. Dit zou moeten aansluiten bij de aanpak op basis van hoge/lage karakteristieke waarden conform het WBI (RWS, 2021). Dit is in deze studie nog niet expliciet beschouwd maar is wel van belang.

Er is een grote overlap tussen kritiek verval en pipelengte. Hoe dit precies doorwerkt in de faalkans is nog onbekend. Het wordt aanbevolen dit met een Monte Carlo Analyse uit te zoeken. Er hieruit volgend om uit te zoeken bij welke waarde de fragility curve eventueel afgeknot kan worden, bijvoorbeeld bij Hc of bij Hc_eis. Wat hier ook bij speelt is de doorlatendheid van het zand. Deze werkt twee kanten op, bij Sellmeijer en de lek lengte van het voorland maar werkt waarschijnlijk harder door in Sellmeijer. Dit dient verder uitgezocht te worden in de voorgestelde cases.

Dit onderzoek is een eerste stap om te komen tot een veiligheidsbenadering voor het meenemen van voorlanden bij piping analyses. Door voorlanden veilig mee te kunnen nemen is er een grote reductie van de piping opgave in Nederland mogelijk. Vandaar het belang om onder- en bovenstaande kennisvragen op te lossen.

Invullen veiligheidsformat

Als bovenstaande kennisleemtes zijn ingevuld wordt aanbevolen om de effecten hiervan op het veiligheidsformat te verkennen, bijvoorbeeld:

- Kan de gebruikte partiële factor van 1.5 verder onderbouwd of aangescherpt worden?
- Is het bepalen van de pipelengte bij Hc_eis optimaal, of kan dit beter bij een andere waterstand?
- Een integrale beschouwing van welke semi-probabilistische keuzes dienen er te worden gemaakt voor zowel de bepaling van Hc als L, met speciale aandacht voor de hoge/lage karakteristieke waarden van parameters die op meerder plekken terugkomen in de grenstoestandsfuncties (zoals doorlatendheid zand).
- Kan het maatwerk (probabilistische pipelengte analyses) verder uitgewerkt worden? Welke mogelijkheden zijn er voor maatwerk?

Veiligheidsfilosofie piping

Als er op grote schaal voorlanden aanwezig zijn die ervoor zorgen dat de faalkans voor piping verwaarloosbaar klein is (geen bijdrage heeft aan de piping kans van het traject), dan zal het lengte-effect ook veel kleiner worden. Dit is een interessante ontwikkeling om eens verder te verkennen. De uitredepuntenmethode van Waterschap Rivierenland (zie bijvoorbeeld Kanning, 2020) laat ook al zien dat door goed lokaal naar dijk en voorland te kijken, de lengte-effecten sterk afnemen.

Bepalen pipelengte

Nu wordt de pipelengte bepaald op basis van DGF. De validatie hiervan is nog beperkt. Deze dient dus nog beter valideren met experimenten op verschillende schaal, ook in relatie tot 3D effecten. Hierbij is het vooral ook van belang goed te kijken naar berekende versus gemodelleerde pipelengte bij verschillende waterstanden en de onzekerheden hierin.

Bronnen

Kanning, W. en T. Schweckendiek (2017). Handreiking Faalkansanalyse en Faalkans Updating. Groene Versie - Macrostabieliteit Binnenwaarts. Deltares rapport 11200575-014.

Kanning, W. (2020). Probabilistische analyses en combinatie piping analyses uittredepuntenmethode. Deltares rapport 11205809-000-GEO-0004. In samenwerking met Waterschap Rivierenland (S. Kapinga, A. Methorst, W. Leeuwdront).

Rijkswaterstaat (2021). Schematiseringshandleiding Piping – WBI2017. SH Piping versie 4. 28 mei 2021.

Rosenbrand, E., L. Wopereis, A. Wiersma, W. Kanning, A. Bezuijen, J. Blinde (2021). Kennis voor Keringen 2021: Achtergrondrapport Voorlanden. 6 december 2021. Deltares rapport 11206817-010-GEO-0001.

Teixeira, A., K. Wojciechowska en W. ter Horst. (2017). Derivation of the semi-probabilistic safety assessment for piping. Deltares rapport 1220080-002.

Bijlage A. Alternatieve verificaties pipelengte

Uitgaande van geval C in sectie 2.3 om de veiligheid van pipelengte te verifiëren op basis van een partiële factor, zijn er nog verschillende verificaties mogelijk. Dit wordt in deze bijlage beschouwd. Er zijn nog verschillende variabelen welke in een verificatie een rol spelen, namelijk de mate dat aan H_c _eis wordt voldaan (veel oversterkte maakt de noodzaak tot een partiële factor wellicht minder, geval G), de kans op kortsluiting (door niet een kans van 1 aan te nemen wordt conservatisme weggenomen, geval F), of door een volledige probabilistische analyse te doen als verificatie (geval E en H?). Het hoofdgeval (D) is echter een verificatie op de pipelengte op basis van een partiële factor van 1.5, waarbij de kans op kortsluiting 1 is en wordt voldaan aan H_c _eis. Onder de tabel staan de mogelijke verificaties verder uitgewerkt.

geval	Lengte pipe	Hc	Kans kortsluiten	Partiële modelfactor	Mogelijke uitkomst	Benodigde verificatie
D	$L_{pipe} < L_{dijk}$	$H_c > H_{c_eis}$	1	1.5	voldoet	Pipelengte met partiële factor, 1.5 nog te onderbouwen
E	$L_{pipe} < L_{dijk}$	$H_c > H_{c_eis}$	1	nvt	maatwerk	Probabilistische analyse
F	$L_{pipe} > L_{dijk}$	$H_c > H_{c_eis}$	<1	nvt	maatwerk	Beheersmaatregelen om de kans op kortsluiten aan te tonen.
G	$L_{pipe} > L_{dijk}$	$H_c \gg H_{c_eis}$	1	nvt	voldoet	Minimale marge als percentage van Hc conform Figuur 3. Dit moet nog nader ingevuld worden.
H	$L_{pipe} > L_{dijk}$	$H_c > H_{c_eis}$	1	1.5	maatwerk	probabilistische DgFlow analyse.

AD D:

Dit is het geval van dit rapport, waarin de veiligheid met een partiële factor van 1.5 wordt aangetoond. Deze wordt verder onderbouwd in H4.

AD E:

In dit geval wordt probabilistisch aangetoond dat de kans op doorgroeien onder de dijkbasis voldoende klein is, onder de voorwaarde dat de kans op kortsluiten 1 is.

AD F:

Dit betreft maatwerk waar de kans op kortsluiting expliciet wordt meegenomen in een probabilistische analyse. Hier horen beheersmaatregelen bij om dit aan te tonen.

AD G:

In dit geval wordt de veiligheid niet meegenomen via een partiële factor maar via een minimaal marge tussen H_c en H_{c_eis} , waarbij falen door doorgroeien pipe niet meer relevant is. Dit kan praktische voordelen hebben ten opzicht van een partiële factor.

AD H:

In A t.m. G wordt uitgegaan van het gebruik van de curves uit H2, welke gelden voor een gesloten achterland. Dit is conservatief in geval van een sterk doorlatend achterland. Dit kan worden ondervangen met een DgFlow analyse.

Geval D wordt in H4 verder onderbouwd, waarbij ook kort wordt gekeken naar gevallen B (2 keer dijkbasis), E (probabilistische analyse), F (maatwerk) en G (minimale marge in H_c t.o.v. eis).

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl

D Ondersteunende berekeningen

In deze bijlage zijn ondersteunende berekeningen gerapporteerd waarin is gekeken naar het effect van meerlaagsheid op de pipelengte. Het effect van meerlaagsheid op H_c hangt mede af van de schematisatie en de randvoorwaarden en van eventuele stroming door de deklaag, daar verwachting beïnvloedt dit ook het effect op L_c . Doel van deze ondersteunende berekening is een eerste indicatie geven van het effect van meerlaagsheid op de pipelengte. Het gaat dus om de vraag of meerlaagsheid leidt tot langere of kortere pipes dan in een 1 laags pakket met een equivalente doorlatendheid. Dit inzicht is van belang voor het toepassingsgebied van het handvat. En kan indien nodig in pilots nader worden uitgewerkt.

Voor deze analyse is de schematisatie van case Rivieren Dun, uit hoofdstuk 6 gebruikt. Het watervoerend pakket is gesplitst in twee lagen zodat de totale dikte gelijk blijft aan de basis case (25 m):

- Bovenste laag 10 m dik.
- Onderste laag 15 m dik.

De doorlatendheden zijn gekozen zodat het gewogen gemiddelde van de doorlatendheid gelijk bleef aan de basis case (conform de methode in de Schematiseringshandleiding Piping (Rijkswaterstaat, 2021)). Er zijn 3 varianten:

- Basis case $K_{WVP} = 30$ m/dag.
- Meerlaags 1 $K_1 = 15$ m/dag ; $K_2 = 40$ m/dag: contrast 2.7.
- Meerlaags 2 $K_1 = 5$ m/dag ; $K_2 = 46.5$ m/dag: contrast 9.3.

Waar K_1 de bovenste laag is.

In alle gevallen is de doorlatendheid van het achterland hoog, leklengte van het achterland 2 m voor de basis case en dezelfde doorlatendheid van de deklaag voor de andere 2 cases. Er is in deze modellen geen instroom door het voorland omdat de pipe bij langere pipelengtes onder de dijkbasis uit komt.

Onderstaande tabel toont pipelengtes en kritieke vervallen. De analyses zijn gedaan met een stapgrootte van het verval van 0.01 m (ca 0.1% van H_c), en zijn daardoor naar verwachting redelijk nauwkeurig.

Tabel D.1 Resultaten meerlaagsheid berekening

Case	H_c m	L_c , m
Basis case (1 laag)	13.73	30
Meerlaags 1 contrast 2.7	13.74	40
Meerlaags 2 contrast 9.3	14.13	54

Uit de resultaten blijkt dat H_c hoger is bij een hoger contrast, en het verschil is met name groter bij contrasten > ca. 5 zoals ook in Van Beek et al (2019) gevonden is. De pipelengte neemt ook toe met toenemend doorlatendheidscontrast en hier is het effect ook bij een kleiner contrast al significant.

Op basis hiervan is een nadere uitwerking van het effect van meerlaagsheid aanbevolen.

E Aanvullende analyses veiligheidsbenadering voorlanden

Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
T.a.v. de heer H. van Hemert
Postbus 2232
3500 GE UTRECHT

Datum	Ons kenmerk	Aantal pagina's
19 januari 2022	11206817-010-GEO-0005	1 van 23
Contactpersoon	Doorkiesnummer	E-mail
Wim Kanning Ligaya Wopereis Esther Rosenbrand	+31(0)88 335 7852	Esther.Rosenbrand@deltares.nl

Onderwerp
Veiligheidsbenadering Voorlanden: aanvullende analyses

Samenvatting

Binnen het Kennis voor Keringen (KvK) programma van Rijkswaterstaat voert Deltares onderzoek uit naar het meenemen van voorland bij pipinganalyses. Het KvK onderzoek van 2021 (Rosenbrand e.a., 2021) heeft geleid tot de basis voor een werkwijze waarmee eenvoudig de weerstand van het voorland geheel meegenomen kan worden in de pipinganalyse. Voor de toepassing in het licht van de overstromingskansbenadering is tevens een veiligheidsbenadering nodig. Daarvoor zijn in 2021 verkennende stappen gezet, waarbij verschillende kennisleemtes zijn geïdentificeerd. Begin 2022 zijn er drie van deze kennisleemtes in aanvullende onderzoeken uitgezocht, deze staan in voorliggende oplegnotitie gerapporteerd.

Het doel en aanpak van deze aanvullende onderzoeken zijn:

- Probabilistische analyses pipelengte.** Een aanpak ontwikkelen om probabilistisch zowel de kans op pipegroei onder het voorland als de kans op overschrijden van het kritiek verval te bepalen en deze toe te passen op fictieve maar realistische cases. Dit is gedaan door de uitredepuntenmethode van Waterschap Rivierenland uit te breiden met een grenstoestandsfunctie voor de pipelengte. Voordat deze op de fictieve cases is toegepast, moeten enkele knelpunten (verbeterde polynoom, FORM-algoritme) worden opgelost.
- Keuze karakteristieke waarden.** Het effect van doorlatendheid en dikte van het watervoerend pakket op de effectieve voorlandlengte is tegengesteld aan het effect daarvan op het kritiek verval. Het doel van dit onderzoek is om een eerste analyse te doen naar het netto-effect van deze parameters, en aanbevelingen te formuleren voor nadere uitwerking. Dit is gedaan door met Monte Carlo analyses, voor één

representatieve case, te bepalen wat het effect is van verschillende keuzes in karakteristieke waarden in doorlatendheid en dikte watervoerend pakket op het kritiek verval en de pipelengte.

3. **Verkenning wanneer pipe-lengte dominant is.** Verkennen in welke situaties de kans op pipegroei onder het voorland een significante bijdrage aan de overstromingskans levert. Dit is gedaan door probabilistische analyses te doen (met de aanpak uit onderzoek 1) van gevallen waar op basis van de fysica mag worden verwacht dat er relatief lange pipes zullen ontwikkelen.

De voornaamste bevindingen en aanbevelingen van de drie onderzoeken zijn respectievelijk:

1. Een aanpak is ontwikkeld om probabilistische analyses op basis van pipelengte te kunnen doen. Hierbij zijn knelpunten rondom gebuikte polynoom en het FORM-algoritme weggenomen. De aanpak is toegepast op een groot aantal fictieve maar realistische cases waarbij geen gevallen zijn gevonden waarbij pipegroei een significante bijdrage levert aan de totale faalkans. Aanbevolen wordt om de aanpak op praktijkgevallen toe te passen om te zien of deze dan ook werkt.
2. Voor de onderzochte case blijkt dat, hoewel een grotere dikte en hogere doorlatendheid van het watervoerend pakket leiden tot een langere effectieve voorlandlengte, het netto-effect van deze parameters (door de grote invloed van deze parameters op het kritiek verval) toch leidt tot een lager kritiek verval. Hieruit volgt dat het rekenen met hoge karakteristieke waarden voor doorlatendheid en dikte van het watervoerend pakket consistent zou zijn in een veiligheidsraamwerk. Aanbevolen wordt om dit met praktijksituaties nader te onderbouwen om te zien of dit voor andere configuraties ook geldt.
3. In onderzochte cases is de kans op pipegroei onder het voorland voor realistische gevallen nergens groter dan de kans op overschrijden van het kritische verval. Dat zou in kunnen houden dat de semi-probabilistische verificaties voor pipelengte aangescherpt kunnen worden. Er waren echter wel situaties waar de pipelengte een niet te verwaarlozen bijdrage aan de overstromingskans leverde. Op basis van de theorie kan verklaard worden in welke situaties dit risico met name speelt. Aanbevolen wordt om voor praktijkcases te onderzoeken of en wanneer de pipelengte een significante bijdrage aan de overstromingskans heeft, voornamelijk omdat bij praktijkcases de onzekerheden anders kunnen zijn dan in de reeds beschouwde cases.

In het algemeen is er met de probabilistische analyses inclusief pipelengte een grote stap gemaakt richting een generiek veiligheidsformat voor voorlanden. Het is vooral nog de vraag of, en onder welke omstandigheden, de pipelengte een significante bijdrage levert aan de overstromingskans. Daarom wordt aanbevolen de aanpak uit deze notitie verder toe te passen op praktijksituaties om dit nader te onderzoeken en om te beschouwen of de probabilistische analyses ook werken voor praktijksituaties. Op basis van deze praktijkresultaten kan vervolgens een generiek veiligheidsformat op basis van semi-probabilistische verificaties voor voorlanden worden bepaald. Waardoor het volledige voorland kan worden meegenomen bij pipinganalyses, met als gevolg een grote reductie van dijkenareaal wat voor piping moet worden versterkt.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en doel

Binnen het Kennis voor Keringen (KvK) programma van Rijkswaterstaat voert Deltares onderzoek uit naar het meenemen van voorland bij pipinganalyses. In de huidige werkwijze wordt slechts een deel van het voorland meegenomen, om te voorkomen dat de pipe onder het voorland kan groeien. Die aanpak was gebaseerd op conservatieve inschattingen van de pipelengte. Het KvK onderzoek in 2021 (zie Rosenbrand e.a., 2021) heeft eenvoudige grafieken ontwikkeld om de optredende pipelengte in te schatten als functie van optredend verval, voorlandeigenschappen en eigenschappen van het watervoerende pakket. Dit vormt de basis voor een werkwijze waarbij het hele voorland wordt meegenomen, en een aanvullende verificatie wordt gedaan van het risico van pipegroei onder het voorland op basis van de optredende pipelengte.

Voor deze aanpak is een verkenning naar de veiligheidsbenadering van piping met voorlanden uitgevoerd in 2021, zie Kanning (2021). In die verkenning zijn verschillende kennisleemtes geïdentificeerd om tot een goed onderbouwde veiligheidsbenadering voor het meenemen van voorlanden te komen. Drie van deze kennisleemtes zijn in de eerste twee maanden van 2022 verder onderzocht, de uitkomsten staan in deze oplegnotitie beschreven. De drie aanvullende onderzoeken zijn:

1. Probabilistische analyses pipelengte

Een belangrijke kennisleemte betreft de verificatie die nodig is om in een semi-probabilistisch format met de pipelengte om te gaan in de overstromingskansbenadering. Doordat de kans op pipegroei onder het voorland aanvullend op de kans op overschrijden van het kritiek verval is bepaald, is een methodiek nodig om probabilistische analyses te doen waarin naast het kritiek verval ook de pipelengte wordt meegenomen. Hiermee kan worden onderzocht onder welke omstandigheden de kans op pipegroei onder het voorland groot is in relatie tot de faalkans op basis van het kritiek verval en welke semi-probabilistische verificaties mogelijk nodig zijn om tot een voldoende veilige beoordeling/ontwerp te komen. In dit deelonderzoek worden:

- A) een *aanpak* voor probabilistische analyses inclusief het doorgroeien van de pipe onder het voorland opgezet.
- B) *analyses* uitgevoerd voor een groot aantal fictieve cases op basis van realistische parameters, wat inzicht geeft in de omvang van het effect van de pipelengte op de faalkans.

Op basis van deze methode en resultaten blijkt dat de rol van pipelengte bij de gekozen cases beperkt. In deelonderzoek 3 zijn daarom aanvullende schematisaties onderzocht waarin de rol van pipelengte mogelijk groter is.

2. Keuze karakteristieke waarden

Een andere kennisleemte betreft de omgang met karakteristieke waarden in relatie tot voorlanden. De keuze van hoog/laag karakteristieke waarden (met een 5% respectievelijk 95% onderschrijdingskans) is niet eenduidig als het gaat om het meenemen van voorlanden. Bijvoorbeeld een hoge doorlatendheid en dikte (kD) van het zandpakket leidt tot een *lager* kritiek piping verval. Echter een hoge kD leidt wel tot een langere effectieve voorlandlengte (bepaald volgens de Schematiseringshandleiding Piping, Rijkswaterstaat, 2021) en een langere effectieve kwelweg. Bij gelijke kD leidt een langere kwelweg daarmee tot een *hoger* kritiek verval. Vanwege dit tegengestelde effect is de vraag wat het netto effect is van kD op H_c . Daarnaast is het in relatie tot voorlanden ook van belang dat een langere effectieve kwelweglengte ook leidt tot een langere kritieke pipelengte. Maar doordat het kritieke verval ook hoger wordt bij een langere kwelweglengte, is het ook de vraag wat het netto-effect van

de kwelweglengte is bij een gegeven verval. Daarom is in dit deelonderzoek verkend hoe kan worden omgegaan met de keuze van karakteristieke waarden in relatie tot voorlanden.

3. Verkenning wanneer pipelengte dominant is

Uit de probabilistische analyses in deelonderzoek 1 bleek dat de faalkans door pipegroei onder het voorland, in die gevallen, verwaarloosbaar was ten opzichte van de faalkans op basis van kritiek verval, daarom is dit deelonderzoek voor aangepaste schematisaties gekeken wanneer de pipe-lengte mogelijk wel dominant is.

Deze drie onderzoeken staan in respectievelijk hoofdstukken 2, 3 en 4 verder uitgewerkt. De onderzoeken in deze oplegnotitie vormen de basis voor een nadere uitwerking van de veiligheidsbenadering rondom het meenemen van voorlanden in de overstromingskansanalyse voor piping.

1.2 Afbakening

In het onderzoek dat in deze oplegnotitie staat beschreven is alleen gekeken naar het faalmechanisme piping en specifiek naar het meenemen van voorlanden in pipinganalyses. Hierbij wordt de aanpak gevolgd uit Rosenbrand e.a. (2021) waarbij de pipelengte wordt bepaald aan de hand van 2 figuren (met als invoer de verschillende voorlandkarakteristieken). Verder is aangenomen dat falen optreedt als de pipe onder het voorland komt of wanneer het optredend verval hoger is dan het kritieke verval.

1.3 Invulling project

Het project is uitgevoerd door Wim Kanning (projectleiding, inhoudelijke uitwerking hoofdstuk 2, supervisie hoofdstuk 3 en 4), Ligaya Wopereis (analyses hoofdstuk 3 en 4, polynoom hoofdstuk 2) en Esther Rosenbrand (supervisie). Sander Kapinga van Waterschap Rivierenland (WSRL) heeft de pipingtool geschikt gemaakt voor voorland analyses zodat Deltares deze verder kon gebruiken, en heeft samen met Henk van Hemert (Rijkswaterstaat) en Laura Taal (WSRL) gereflecteerd op tussenresultaten. De probabilistische analyses zijn uitgevoerd in de Probabilistic Toolkit (PTK), versie 2.2.0.2072, van Deltares. De invoer en uitvoer zijn uitgevoerd met behulp van Jupyter Notebook files welke door WSRL zijn aangeleverd.

1.4 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 wordt onderzoek 1 uitgewerkt waarin eerst een aanpak voor probabilistische analyses op basis van pipelengte wordt ontwikkeld en vervolgens toegepast op een groot aantal cases. In Hoofdstuk 3 wordt onderzoek 2 beschreven, waarin wordt gekeken welke karakteristieke waarden van doorlatendheid en dikte van het watervoerend pakket het best passen bij voorlandanalyses. In Hoofdstuk 4 wordt in onderzoek 3 verkend onder welke condities pipelengte mogelijk dominant zijn. Hoofdstuk 5 bevat de conclusies en aanbevelingen.

2 Probabilistische analyses pipelengte

In dit hoofdstuk wordt gekeken naar A) het ontwikkelen van een **aanpak** om probabilistische analyses op basis van pipelengte te doen in paragrafen 2.1 tot en met 2.4, en B) het **toepassen** van deze aanpak op een set van fictieve maar realistische cases in paragrafen 2.5 tot en met 2.7.

2.1 Uittredepuntenmethode WSRL

Voor het doen van probabilistische piping analyses is de uittredepuntenmethode van WSRL gehanteerd (zie Kanning, 2020 voor een beschrijving van hoe de uittredepunten gecombineerd kunnen worden). In deze methode van WSRL worden op basis van verschillende combinaties van uittredepunt en intredepunt mogelijke pipingdoorsnedes bepaald. De mogelijke pipingdoorsnedes worden vervolgens automatisch doorgerekend. Hierbij wordt gebruik gemaakt van dezelfde aanpak voor het meenemen van voorland als in het KvK-onderzoek (Rosenbrand e.a., 2021), namelijk op basis van een effectieve voorlandlengte conform de Schematiseringshandleiding Piping. Daarnaast is de WSRL-methode geschikt voor probabilistische batch berekeningen, hiermee kunnen voor veel verschillende invoerparametercombinatie probabilistische analyses worden gemaakt. De sommen worden gemaakt met de Probabilistic Toolkit van Deltares (PTK). De uittredepuntenmethode is aangepast door WSRL voor voorlanden door, naast het kritiek verval (H_c) volgens Sellmeijer, een grenstoestandsfunctie voor de pipelengte toe te voegen (zie sectie 2.2) waarbij de eerdergenoemde curves uit Rosenbrand (2021) worden gebruikt om de pipelengte te bepalen. Falen treedt op als het kritiek verval is overschreden OF als de pipe langer wordt dan de dijkbasis. Dit maakt het dus mogelijk om een groot aantal fictieve, maar realistische, cases probabilistisch door te rekenen voor deze twee grenstoestanden. Zie bijlage A voor het gebruikte script en Kanning (2021) voor verder beschrijving van de grenstoestandsfunctie voor het kritiek verval.

2.2 Grenstoestandsfunctie pipelengte

Naast de bestaande grenstoestandsfunctie voor piping, op basis van het kritische verval volgens de rekenregel van Sellmeijer (welke al in het model van WSRL zit), is een aanvullende grenstoestandsfunctie voor falen doordat de pipelengte onder de dijkbasis uitkomt nodig. Falen is het gevolg van het overschrijden van een van beide functies.

De grenstoestand voor het doorgroeien van de pipe onder de dijkbasis waardoor er kortsluiting door het voorland met het buitenwater op kan treden is:

$$Z_{PL} = L_{aanw} - m_{PL} \cdot L_{pipe} \quad (1)$$

Met hierin:

- L_{aanw} = de dijkbasis, de afstand tussen uittredepunt en buitenteen, aangezien falen is gedefinieerd als het groeien van de dijk onder het voorland.
- L_{pipe} = de berekende pipe-lengte, zie de 2 stappen hieronder.
- m_{PL} = modelonzekerheid pipelengte (voor nu: gemiddelde 1, variatiecoëfficiënt = 0.3; op basis van enkele proeven)

A. Bepaling kritieke pipelengte L_c op basis van Figuur 1. Bepaal eerst D/L_s (dikte zandpakket / effectieve kwelweglengte, zie Rosenbrand e.a., 2021) om met Figuur 1 de ratio L_c/L_s te bepalen. Dit gebeurt door onderstaande polynoom (geparametriseerd op basis van Figuur 1) te gebruiken om de kritieke pipelengte L_c te bepalen:

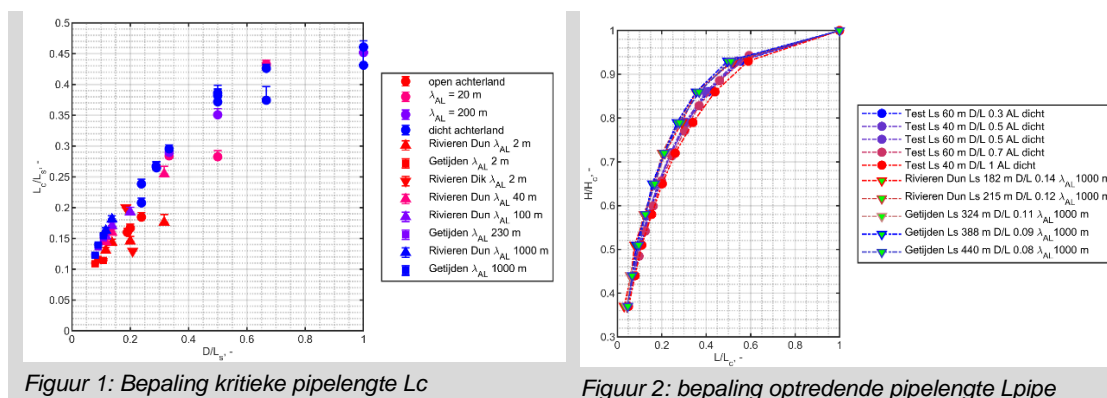
$$L_c = L_s * (-0,3984*(D/L_s)^2+0,7979*(D/L_s)+0,0707) \quad (2)$$

B. Bepaling optredende pipelengte L_{pipe} op basis van optredende waterstand, kritieke waterstand en L_c , op basis van Figuur 2. Als invoer zijn de optredende waterstand H en de kritieke waterstand H_c berekend met de rekenregel van Sellmeijer nodig. Vervolgens wordt de volgende polynoom (geparametriseerd op basis van Figuur 2) gebruikt om de optredende pipelengte L_{pipe} (L in Figuur 2 en 3) te bepalen:

$$L_{pipe} = L_c * (22,435 * (H/H_c)^4 - 49,649 * (H/H_c)^3 + 39,808 * (H/H_c)^2 - 13,114 * (H/H_c) + 1,5157) \quad (3)$$

Dit geldt alleen voor H/H_c tussen 0 en 1. Onder de $H/H_c = 0$ geldt $L_c = 0$. Boven $H/H_c = 1$ geldt dat de grenstoestand van H_c is overschreden en de pipe volledig doorgroeit.

Zie Rosenbrand e.a. (2021) voor een verdere onderbouwing van Figuur 1 en 2.



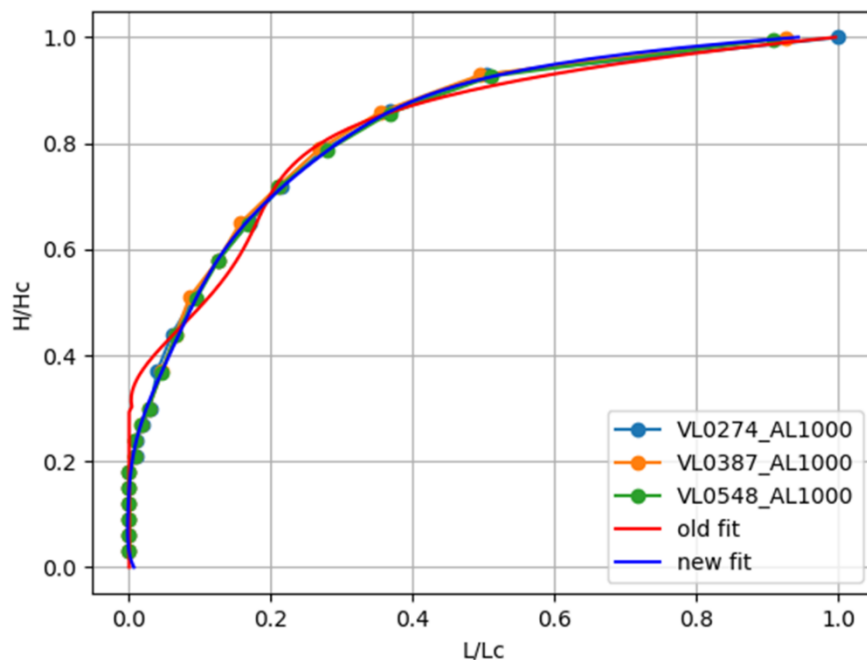
De FORM-analyses convergerden in eerste instantie niet goed, daarom is er in meer detail gekeken naar:

1. Een verbeterde polynoom om de pipelengte te bepalen (paragraaf 2.3)
2. De stabiliteit van de FORM-analyses (paragraaf 2.4)

2.3 Verbeterde polynomen om pipelengte te bepalen

De polynoom om de relatie te leggen tussen de optredende waterstand en de optredende pipelengte uit vergelijking 3 was in eerste instantie te grof uitgevoerd. Om een betere polynoom te fitten zijn er bij lage waterstanden aanvullende DgFlow sommen gemaakt, zie de groene punten in onderstaande figuur. Vervolgens is er een nieuwe fit gemaakt welke beter aansluit op de data dan de oude fit, zie onderstaande figuur. De nieuwe polynoom staat in onderstaande vergelijking en is geïmplementeerd in het PTK script (bijlage A).

$$L_{pipe} = L_c * (164.53 * (H/H_c)^8 - 570.09 * (H/H_c)^7 + 797.64 * (H/H_c)^6 - 575.47 * (H/H_c)^5 + 227.71 * (H/H_c)^4 - 48.99 * (H/H_c)^3 + 5.97 * (H/H_c)^2 - 3.67e-01 * (H/H_c) + 0.00757329545) \quad (4)$$



Figuur 3: Verbeterde polynoom om de pipelengte te bepalen

2.4 Stabiliteit FORM-analyses

De probabilistische analyses zijn in dit project uitgevoerd met FORM (First Order Reliability Method), voornamelijk vanwege de snelheid van rekenen. Echter, aangezien er pas bij hoge waterstanden een begin van pipevorming is, voldoet een standaard FORM-algoritme niet omdat variaties rondom de verwachtingswaarde (wat het FORM-algoritme in de PTK standaard doet) geen verandering van de grenstoestandsfunctie oplevert. Dit kan worden ondervangen door het startpunt van het FORM-algoritme (de zogenaamde start point method) aan te passen. Standaard staat deze op "none", maar door deze op bijvoorbeeld "direction" te zetten wordt eerst op basis van een grove gevoeligheidsanalyse verkend waar het beste startpunt is voor het FORM-algoritme. In de analyses van deze notitie is gebruik gemaakt van de optie "direction" waarbij in alle richtingen wordt gezocht (hier kan ook nog in gevarieerd worden); wat leidt tot goede convergentie. Dit hoeft echter voor andere piping-analyses niet het geval te zijn. Het wordt dan ook aanbevolen om bij toekomstige analyses zorgvuldig naar de FORM-convergentie en een goed werkende start point methode te kijken. Aanbevolen wordt om eerst de start point methode "sensitivity" te gebruiken mits een PTK-versie van na Februari 2022 wordt gebruikt. Alternatief kan "direction" worden gebruikt (iets gevoeliger voor precieze instellingen, in de analyses van deze notitie werkte dit wel goed) of "sphere" (nauwkeurig, maar traag).

2.5 Invoer voor probabilistische analyses

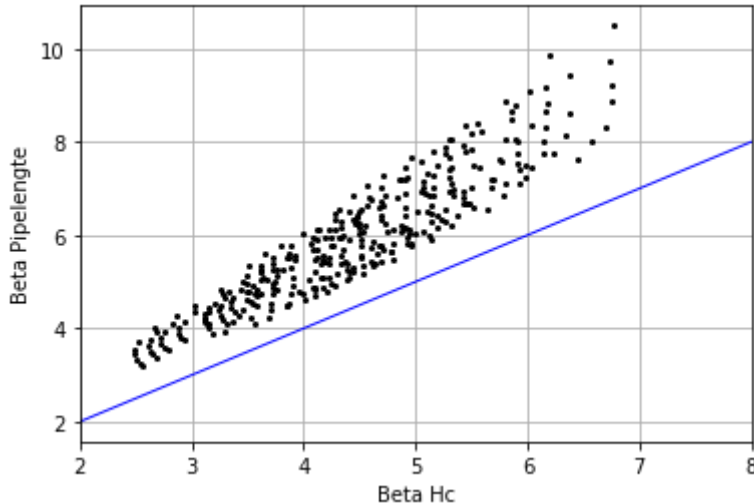
De probabilistische analyses worden vervolgens toegepast op een set fictieve maar realistische cases. Er zijn 4 parameters gevarieerd in de probabilistische analyses, namelijk de deklaag dikte ($d_{\text{deklaag_mean}}$ in [m]), weerstand van het voorland (c_1 in [1/dag]), doorlatendheid van het zandpakket (k_{mean} in [m/dag]) en dikte van het zandpakket (D_{mean} in [m]). Merk op dat $d_{\text{deklaag_mean}}$ alleen invloed heeft op de pipelengte en het kritieke verval via de correctie op het optredende verval via de zogenaamde 0.3d regel (zie RWS, 2021), aangezien de gebruikte curves voor de bepaling van de pipelengte uitgaan van een ondoorlatend achterland. Daarnaast heeft deze parameter ook invloed op de weerstand van het achterland en daarmee op de mechanismes opbarsten en heave, deze zijn echter niet beschouwd in deze notitie. Onderstaand staan de waarden waarvoor deze gevarieerd zijn:

d_deklaag_mean = [2.0, 4.0]
c1_mean = [2.0, 5.0, 10.0, 20.0]
k_mean = [10.0, 20.0, 30.0, 40.0, 50.0, 65.0]
D_mean = [5.0, 10.0, 15.0, 20.0, 30.0, 40.0, 50.0]

In totaal zijn dit $2 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 7 = 336$ variaties waarvoor de probabilistische analyses zijn uitgevoerd. Voor de rest van de invoer van de deterministische en stochastische variabelen, zie bijlage A.

2.6 Uitkomsten

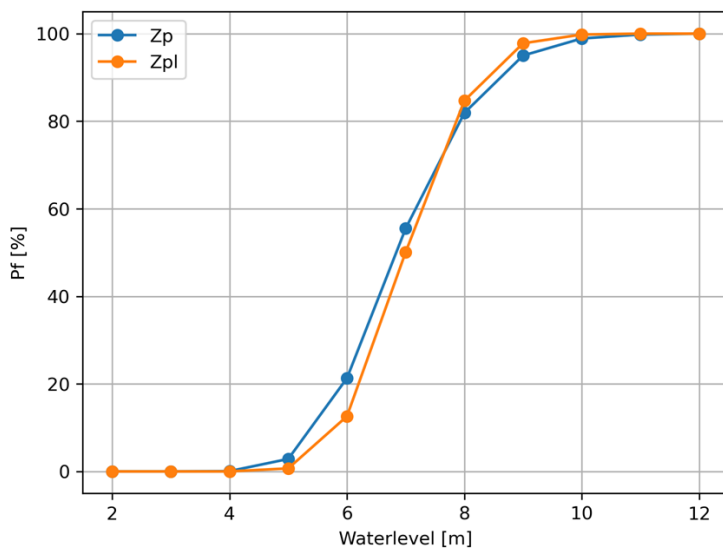
In onderstaande Figuur 4 staan de uitkomsten van de probabilistische analyses weergegeven. Voor elke van de 336 doorgekende gevallen staat de betrouwbaarheidsindex (een maat voor de faalkans) voor falen door overschrijden van het kritiek verval uitgezet tegen de betrouwbaarheidsindex die hoort bij falen doordat de pipe onder de dijkbasis doorgroeit. De blauwe lijn geeft aan wanneer deze gelijk aan elkaar zijn. In alle gevallen is de betrouwbaarheid door het overschrijden van het kritiek verval lager dan die door de pipelengte en dus is de faalkans door kritiek verval groter dan de faalkans door de pipelengte. In geen van de gevallen levert het doorgroeien van de pipe onder de dijkbasis een significante bijdrage aan de totale betrouwbaarheid (falen kan optreden door ofwel overschrijden kritiek verval ofwel door doorgroeien pipe onder dijkbasis). Het kritiek verval is in alle gevallen bepalend voor de totale faalkans. Dit impliceert ook dat als je semi-probabilistisch voldoet aan de pipingeisen voor kritiek verval, je ook voldoet aan de het doorgroeien van de pipe voor deze cases. In Hoofdstuk 4 wordt verder gekeken naar of er gevallen zijn wanneer pipegroei mogelijk wel een significante bijdrage heeft aan de totale betrouwbaarheid. In de volgende paragraaf wordt gekeken naar een mogelijke verklaring waarom kritiek verval dominant is.



Figuur 4: Relatie tussen betrouwbaarheidsindex van de pipelengte ("Beta Pipelengte") en die van het kritiek verval ("Beta Hc")

2.7 Fragility curves

Op basis van dezelfde probabilistische analyses als hierboven kan een zogenaamde fragility curve worden opgesteld waarbij de faalkans wordt uitgezet tegen de waterstand. Een voorbeeld hiervan staat in onderstaande figuur waar zowel de faalkans voor overschrijden kritiek verval (Z_p) als doorgroeien van de pipe onder de dijkbasis (Z_{pl}) staat uitgezet. Hieruit blijkt dat bij hoge waterstanden het doorgroeien onder de dijkbasis een hogere kans heeft, terwijl bij lagere waterstanden het kritiek verval een grotere kans heeft. En aangezien de lagere waterstanden meer bijdragen aan de totale faalkans (deze hebben een grotere kans van falen) dan de hogere waterstanden, is dit een verklaring dat het kritiek verval dominant is Figuur 4.



Figuur 5: Fragility curve voor zowel het kritiek verval (Z_p) als de pipelengte (Z_{pl})

Voor waterstanden onder H_c neemt de berekende pipelengte L_{pipe} snel af (zie Figuur 2). Dit kan verklaren dat de berekende Z_p voor lagere waterstanden dominant is. Maar de geometrie speelt ook een rol voor de pipelengte, omdat een situatie met een langer voorland L_s en/of een dikker WVP ook leidt tot langere L_c . Zeker wanneer de kwelweglengte in relatie tot de dijkbasis veel groter wordt dan in deze situatie (met een dijkbasis van 45 meter, 100 m fysiek voorland, dikte zandpakket van 50 m en effectieve kwelweglengte L_s van 134 m (verwachtingswaarde op basis van voorbeeld uit hoofdstuk 3) kan de pipe dus ook al bij vervallen verder onder H_c onder de dijkbasis uit komen en daarmee leiden tot dominantie van de pipelengte. In Hoofdstuk 4 worden degelijke situaties nader onderzocht.

3 Analyse keuze karakteristieke waarden

3.1 Aanpak

De keuze voor de karakteristieke waarden van de doorlatendheid (k) en dikte (D) van het Watervoerend Pakket (WVP) is niet vanzelfsprekend. Een hoge k en D leidt wel tot een langere effectieve voorlandlengte (bepaald volgens in de Schematiseringshandleiding Piping, Rijkswaterstaat 2021); en een langere effectieve kwelweg. Bij gelijke k en D leidt dit tot een langere kwelweg tot een hoger kritiek verval, maar bij gelijke kwelweglengte leidt een hogere kD tot een lager kritiek verval. Hierdoor is de vraag wat het netto effect is op H_c . Daarnaast is in relatie tot voorlanden ook van belang dat een langere effectieve kwelweglengte ook leidt tot een langere kritieke pipelengte. Maar doordat het kritieke verval ook hoger wordt is de vraag ook wat het netto-effect op de pipelengte is bij een gegeven verval. In dit deelonderzoek is door middel van Monte Carlo (MC) simulaties onderzocht wat de invloed van keuzes in karakteristieke waarden in k en D is op kritiek verval en kritieke pipelengte aan de hand van een voorbeeldsituatie. De parameters gebruikt voor deze studie zijn terug te vinden in Tabel 1. Deze zijn gebaseerd op een fictieve case welke binnen de bandbreedte van de cases van paragraaf 2.5 past.

Tabel 1 Parameters van de Monte Carlo analyse voor de keuze van de karakteristieke waarden van kD .

Variabel	Symbool	Kansverdeling	Parameters
Doorlatendheid watervoerende pakket (m/dag)	k	Lognormaal	$\mu = 55; \sigma = 27,5$
Dikte watervoerende pakket(m)	D	Lognormaal	$\mu = 50; \sigma = 0,5$
Hydraulische weerstand voorland (dag)	c_1	Lognormaal	$\mu = 10; \sigma = 1,5$
Lengte voorland (m)	L_1	Deterministisch	100
Dijkbasis (m)	DB	Deterministisch	45
Dikte deklaag (m)	$d_{deklaag}$	Lognormaal	$\mu = 2; \sigma = 0,5$
Model factor (-)	m_p	Lognormaal	$\mu = 1; \sigma = 0,12$
Volumegewicht water (kN/m ³)	γ_w	Deterministisch	9,81
Volumegewicht van zandkorrels onder water (kN/m ³)	$\gamma_{sub,particles}$	Deterministisch	16
Coëfficiënt van White (sleepkrachtfactor) (-)	η	Deterministisch	0,25
70-percentielwaarde van de korrelverdeling van watervoerende pakket(μ m)	d_{70}	Lognormaal	$\mu = 450; \sigma = 54$
Referentie d70-waarde (m)	d_{70m}	Deterministisch	208
Rolweerstandshoek van zandkorrels van de aangepaste Sellmeijer-regel (°)	θ	Deterministisch	37
River waterstand (m)	MHW	Weibull	$\mu = 3,2007; \sigma = 0,8648$
Polder waterstand (m)	ϕ_{polder}	Deterministisch	-0,5

Voor de karakteristieke waarden van k en D zijn twee mogelijkheden onderzocht:

- Optie 1: bovengrenswaarde kiezen voor k en D (95% percentile).
- Optie 2: ondergrenswaarde kiezen voor k en D (5% percentile).

Het is ook mogelijk om naar de karakteristieke waarde van de gecombineerde parameter kD te kijken, dit is echter niet gedaan omdat dit niet aansluit bij de gangbare praktijk.

Voor beide opties is een lage waarde van de intredeweerstand (5% onderschrijdingskans van c_1) gekozen omdat deze altijd tot kortere kwelweglengte leidt en dus tot een lager kritiek verval. Ook voor d_{70} is een lage waarde gekozen omdat dit leidt tot een lager kritiek verval.

Via MC analyses zijn kansverdelingen verkregen van de effectieve kwelweglengte (L_S , zie **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**, het kritiek verval (H_c) en de pipelengte (L_c) gebruikmakend van de stochastische variabelen k en D . Het kritiek verval is berekend met de formule van Sellmeijer conform de Schematiseringshandleiding Piping (Rijkswaterstaat, 2021) en de kritieke pipelengte is berekend aan de hand van de KvK methode beschreven in Rosenbrand e.a. (2021).

$$\lambda_1 = \sqrt{kDc_1} \quad (1)$$

$$L_{fictief} = \lambda_1 \tanh\left(\frac{L_1}{\lambda_1}\right) \quad (2)$$

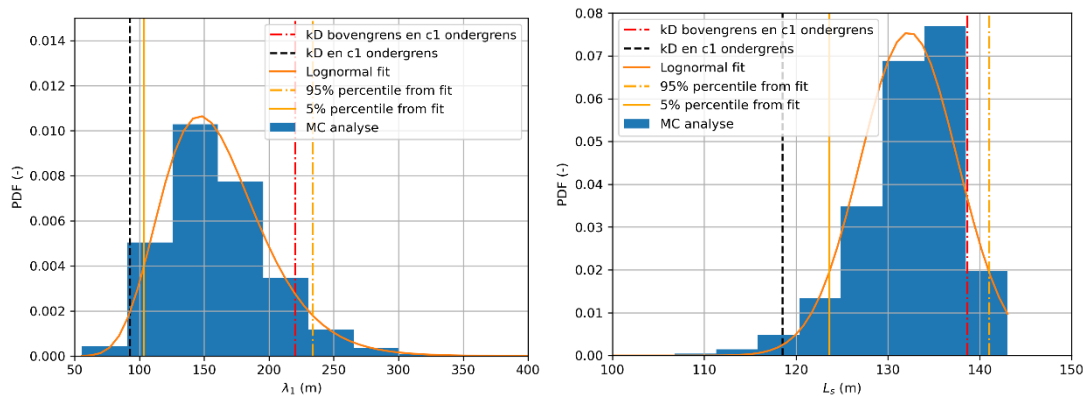
$$L_S = L_{fictief} + DB \quad (3)$$

Waarin:

- λ_1 (m): leklengte voorland
- $L_{fictief}$ (m): fictieve voorland lengte
- DB (m): dijkbasis
- L_1 (m): voorland lengte
- L_S (m): effectieve kwelweglengte

3.2 Resultaten

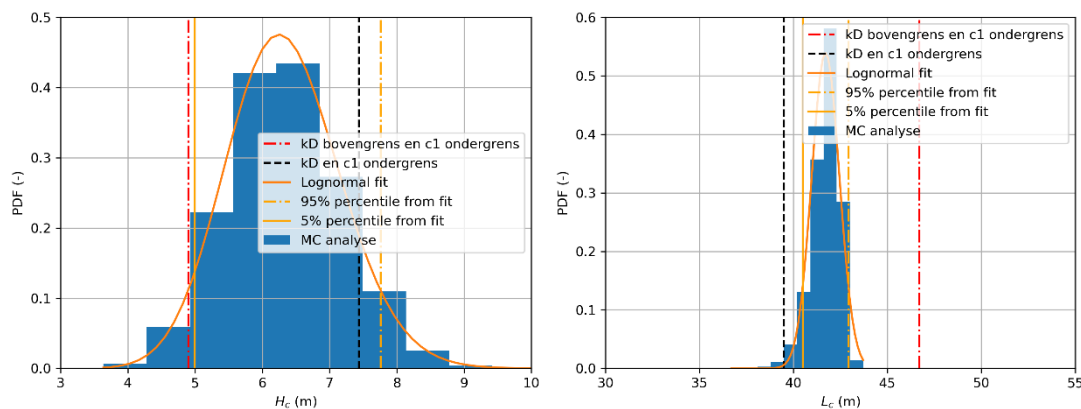
Met de MC analyse is voor deze case een betrouwbaarheidsindex van 2,90 gevonden voor de grenstoestandsfunctie voor kritiek verval, en 3,32 voor falen door overschrijden van de grenstoestandsfunctie voor pipelengte, en van 2,85 voor het hele systeem. **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** Figuur 6 geeft het histogram van de leklengte en kwelweglengte bepaald met de MC analyse. In deze figuur zijn de deterministische waarden van beide parameters geplot die uitgerekend zijn met een boven- of ondergrenswaarde van k en D . Zoals verwacht is de leklengte berekend met een bovengrenswaarde hoger dan de leklengte gevonden met een ondergrens waarde van k en D . De leklengte en kwelweglengte met een boven- en ondergrens van k en D waarden geven een lagere waarde dan de respectievelijk 95% en 5% onderschrijdingskansen gevonden met de MC analyse.



Figuur 6 Histogram van de MC resultaten van de leklengte (links) en van de effectieve kwelweglengte (rechts). De resultaten van de semi-probabilistische analyse zijn ook weergegeven samen met de lognormale fit van de histogrammen en 5% en 95% onderschrijdingskansen.

Figuur 7 geeft de MC resultaten van H_c en L_c , met ter illustratie in geel en oranje de verdeling van deze parameters en karakteristieke punten. Vooral van belang zijn de rode en zwarte lijn, namelijk de waarden van H_c en L_c op basis van de karakteristieke boven- en ondergrens van de k en D waarden. Het is duidelijk te zien dat de directe invloed van k en D op het kritiek verval groter is dan de indirecte invloed via effectieve kwelweglengte, immers de bovengrens (hoge karakteristieke waarde; rode stippellijn) van k en D leidt tot conservatieve (lage) uitkomst van H_c .

Voor de pipe lengte geeft een bovengrens van k en D waarden ook een conservatieve uitkomst (hoge L_c) die vergelijkbaar is met de 95%-onderschrijdingskans van de kritieke pipelengte gevonden met MC.



Figuur 7 Histogram van de MC resultaten van het kritiek verval (links) en van de kritieke pipelengte (rechts). De resultaten van de semi-probabilistische analyse zijn ook weergegeven samen met de lognormale fit van de histogrammen en hun 5% en 95% onderschrijdingskansen.

In Bijlage B is een gevoeligheidsanalyse op de variatiecoëfficiënt van de dikte van het WVP uitgevoerd. Uit deze gevoeligheidsanalyse zijn dezelfde conclusies gevonden.

4 Verkenning opties met dominante invloed pipelengte

4.1 Aanpak

In dit hoofdstuk worden scenario's gezocht waarbij de faalkansbijdrage van de pipelengte dominant is over de faalkansbijdrage van het kritiek verval of naar scenario's waar de pipelengte een significante bijdrage heeft aan de totale faalkans. Met andere woorden scenario's waar de betrouwbaarheidsindex van de kritieke pipelengte groter is dan de betrouwbaarheidsindex van het kritiek verval of hier dichtbij in de buurt ligt. In Hoofdstuk 0 waren alle scenario's gedomineerd door kritiek verval. Voor de veiligheidsbenadering is het echter belangrijk om te onderzoeken of er scenario's zijn waarin de pipelengte dominant is.

Op basis van het conceptuele model voor pipelengte, en de fragility curves van paragraaf 2.77 is de verwachting dat de invloed van pipelengte op de overstromingskans relatief groter wordt in:

- Situaties waar het optredende verval hoog is in relatie tot het kritische verval (zie Figuur 4)
- Situaties met een relatief dik watervoerend pakket, deze leiden tot een relatief lange pipelengte L_c/L_s .
- Situaties met een relatief lang voorland in relatie tot de dijkbasis, een relatief grote absolute L_c
- Situaties waar de onzekerheid in pipelengte relatief hoog is ten opzichte van onzekerheid in kritiek verval. Op basis van standaard, relatief grote, onzekerheden in k en D conform het WBI is dit minder vaak het geval. Voor gevallen met kleinere onzekerheden in deze parameters kan de onzekerheid in pipelengte dominant worden.

Hierbij wordt opgemerkt dat juist situaties met een lang voorland het kritische verval ook hoog zal zijn. Zoals ook in Rosenbrand (2021) bleek kan een lang voorland leiden tot kritische vervallen die veel hoger zijn dan de optredende vervallen.

In deze studie zijn drie variabelen gevarieerd:

- De kwelweglengte (L_s) verlengen door de introdeweerstand (c_1) en de voorlandlengte te verhogen;

- De D/L_s verhouding verhogen door de dikte van de WVP (D) te verhogen en de voorlandlengte te verlagen;
- De Waterstand bij Norm, WBN, te verhogen (deze heeft het label MHW in de berekeningen).

In deze analyse zijn drie stochastische variabelen aangepast conform Tabel 2. Daarnaast zijn voor 18 scenario's twee deterministische parameters aangepast:

- De voorlandlengte is 250 m en daarna 50 m;
- Het WBN is 6 m en daarna 10 m.

Tabel 2 Parameters van de drie aangepaste stochastische parameters.

Scenario's	c_1	D	$d_{deklaag}$
0	$\mu = 20; \sigma = 3$	$\mu = 40; \sigma = 4$	$\mu = 2; \sigma = 0,2$
1	$\mu = 20; \sigma = 3$	$\mu = 40; \sigma = 4$	$\mu = 4; \sigma = 0,4$
2	$\mu = 20; \sigma = 3$	$\mu = 60; \sigma = 6$	$\mu = 2; \sigma = 0,2$
3	$\mu = 20; \sigma = 3$	$\mu = 60; \sigma = 6$	$\mu = 4; \sigma = 0,4$
4	$\mu = 20; \sigma = 3$	$\mu = 80; \sigma = 8$	$\mu = 2; \sigma = 0,2$
5	$\mu = 20; \sigma = 3$	$\mu = 80; \sigma = 8$	$\mu = 4; \sigma = 0,4$
6	$\mu = 40; \sigma = 6$	$\mu = 40; \sigma = 4$	$\mu = 2; \sigma = 0,2$
7	$\mu = 40; \sigma = 6$	$\mu = 40; \sigma = 4$	$\mu = 4; \sigma = 0,4$
8	$\mu = 40; \sigma = 6$	$\mu = 60; \sigma = 6$	$\mu = 2; \sigma = 0,2$
9	$\mu = 40; \sigma = 6$	$\mu = 60; \sigma = 6$	$\mu = 4; \sigma = 0,4$
10	$\mu = 40; \sigma = 6$	$\mu = 80; \sigma = 8$	$\mu = 2; \sigma = 0,2$
11	$\mu = 40; \sigma = 6$	$\mu = 80; \sigma = 8$	$\mu = 4; \sigma = 0,4$
12	$\mu = 50; \sigma = 7,5$	$\mu = 40; \sigma = 4$	$\mu = 2; \sigma = 0,2$
13	$\mu = 50; \sigma = 7,5$	$\mu = 40; \sigma = 4$	$\mu = 4; \sigma = 0,4$
14	$\mu = 50; \sigma = 7,5$	$\mu = 60; \sigma = 6$	$\mu = 2; \sigma = 0,2$
15	$\mu = 50; \sigma = 7,5$	$\mu = 60; \sigma = 6$	$\mu = 4; \sigma = 0,4$
16	$\mu = 50; \sigma = 7,5$	$\mu = 80; \sigma = 8$	$\mu = 2; \sigma = 0,2$
17	$\mu = 50; \sigma = 7,5$	$\mu = 80; \sigma = 8$	$\mu = 4; \sigma = 0,4$

Alle andere parameters zijn conform Tabel 1, met uitzondering van de doorlatendheid van het WVP die lognormaal is verdeeld met een gemiddelde waarde van 40 m/dag en een standaardafwijking van 20 m/dag. Probabilistische berekeningen zijn uitgevoerd conform de aanpak uit Hoofdstuk 2 om de betrouwbaarheidsindex van het kritiek verval en van de kritieke pipelengte te vinden voor elke scenario.

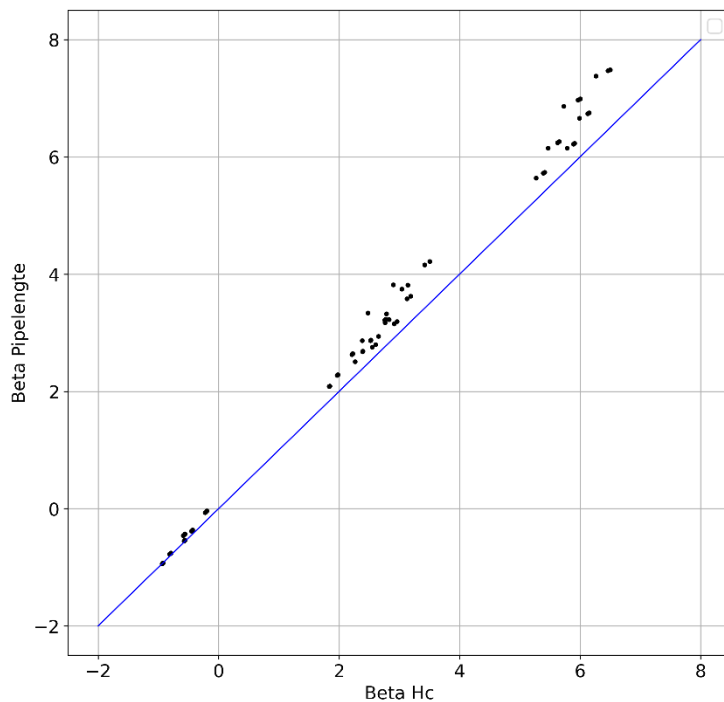
4.2 Resultaten

De resultaten zijn samengevat in Tabel tot en met Tabel C-4 in Bijlage C. Hieruit blijkt dat drie scenario's maatgevend zijn (scenario's 4, 10 en 16) met een voorland lengte van 50 m en een WBN van 10 m. Dit WBN ligt erg ver boven het kritiek verval (ongeveer 3,5 m). Verder hebben deze drie scenario's allemaal een WVP van 80 m dikte, de intredeweerstand lijkt geen rol te spelen. Dat laatste is mogelijk doordat de intredeweerstand de effectieve kwelweglengte beïnvloed; een hogere intredeweerstand geeft een langere kwelweg wat zowel leidt tot een hoger kritiek verval als tot een langere absolute pipelengte.

De betrouwbaarheidsindex van deze gevallen zijn negatief; daardoor is de faalkans van deze scenario's zo hoog dat ze in de praktijk niet meer relevant zijn en buiten het bereik van de kalibratierelaties liggen.

Figuur 8 geeft een samenvatting van de resultaten met op de x-as de betrouwbaarheidsindex van het kritiek verval en op de y-as de betrouwbaarheidsindex van de pipelengte. Hieruit blijkt dat hoe kleiner de betrouwbaarheidsindices van het kritiek verval en de pipelengte zijn, hoe dichter ze bij elkaar liggen.

Ondanks dat er geen gevallen gevonden zijn waar de betrouwbaarheid van de pipelengte dominant is, zijn er wel gevallen gevonden waarbij de betrouwbaarheid van de pipelengte een bijdrage levert aan de totale faalkans. Dit zijn de punten die dicht bij de blauwe lijn liggen, kwantitatief is dit ook te zien in de bijlage. Of het nodig is deze gevallen af te dekken met een semi-probabilistische verificatie is nog niet onderzocht.



Figuur 8 Resultaten van de probabilistische analyse om scenario's te vinden met een dominante pipelengte. Op de x-as is de betrouwbaarheidsindex van het kritiek verval (Beta Hc in de figuur) weergegeven en op de y-as de betrouwbaarheidsindex van de pipelengte (Beta Pipelengte in de figuur).

5 Conclusies en aanbevelingen

In deze oplegnotitie zijn drie kennisleemtes voor het meenemen van voorlanden bij pipinganalyses nader onderzocht.

1. Probabilistisch analyses pipelengte

Voor het probabilistisch meenemen van de optredende pipelengte en het falen door het onder de dijkbasis doorgroeien van de pipe is het volgende gevonden.

A) Voor de aanpak:

- De uittredepuntenmethode van WSRL, welke de aanpak van omgang met het voorland volgt conform het KvK voorlandenonderzoek, is uitgebreid met een grenstoestandsfunctie voor de pipelengte. Dit geeft de mogelijkheid om probabilistische analyses voor piping te doen, waar zowel wordt gekeken naar kritiek verval als pipelengte. Er zijn twee kwelpunten opgelost, namelijk de onnauwkeurige polynoom om de optredende pipelengte te berekenen en de slecht convergerende FORM-analyses.
- De polynoom is verbeterd door aanvullende D-Geo Flow analyses uit te voeren en is nu nauwkeurig genoeg.
- De FORM-instellingen zijn aangepast naar een andere startpunt methode ("sensitivity" of "direction") waardoor de FORM-analyses nu goed convergeren.
- Beide bovenstaande punten zijn opgelost. Dit heeft geleid tot een goed werkende aanpak.

B) Voor de toepassing op fictieve maar realistische cases:

- Door het doorrekenen van een groot aantal fictieve gevallen is inzicht gekregen in de relatieve bijdrage van pipelengte op de faalkans.
- Voor de beschouwde fictieve gevallen is het kritiek verval altijd dominant ten opzichte van de pipelengte, er is geen fictief geval gevonden waarbij de pipelengte dominant is.
- Dit komt waarschijnlijk door de zeer snel afnemende pipelengte bij lagere waterstanden dan het kritiek verval, waardoor de bijdrage aan de faalkans door de pipelengte beperkt is.

Aanbevolen wordt om de aanpak toe te passen op praktijkcases zodat kan worden nagegaan of de aanpak hier werkt, of de FORM analyses hier ook goed convergeren en of er (door andere invoer en onzekerheden) gevallen zijn waarbij de pipelengte dominant is (zie ook onderzoek 3).

2. Keuze karakteristieke waarden

Er is gekeken naar het effect van de keuze voor de karakteristieke waarden van de doorlatendheid (k) en dikte (D) van het watervoerend pakket (WVP) op de pipelengte en kritiek verval. Dit is gedaan door Monte Carlo analyses uit te voeren op basis van een representatieve case. Hierbij is het volgende gevonden:

- Hoewel hogere waarden voor k en D leiden tot een hogere lek lengte en een langere effectieve kwelweglengte, leidt een hogere waarde van k en D netto toch tot een lager kritiek verval voor de beschouwde case doordat het directe effect van k en D op het kritieke verval groter is dan het effect van k en D op de kwelweglengte en daarmee het kritiek verval.
- Hieruit blijkt dat voor deze case een conservatieve parameterkeuze zou leiden tot ondergrenswaarde voor intredeweerstand en bovengrenswaarden voor k en voor D ; dit geldt zowel voor pipelengte als voor kritiek verval.

Aanbevolen wordt om nader te onderzoeken of deze bevindingen ook in andere (praktijk) configuraties gelden, aangezien hier maar naar één geval is gekeken. Met andere woorden of conservatieve keuzes voor kritiek verval altijd ook conservatief zijn voor kritieke pipelengte.

3. Verkenning wanneer pipelengte dominant is

Hiervoor zijn situaties onderzocht met de aanpak uit bovenstaand onderzoek 1, waarin de bijdrage van de kans op pipegroei onder het voorland aan de overstromingskans naar verwachting relatief groot. Dit zijn situaties waar:

- Het optredende verval hoog is in relatie tot het kritische verval.
- Situaties met een relatief dik watervoerend pakket, en een relatief lang voorland in relatie tot de dijkbasis.

Doordat een lang voorland vaak leidt tot hoog kritisch verval zijn er in de verkennende analyses met optredende vervallen van 6 en 10 m weinig gevallen gevonden waar de kans op pipegroei onder het voorland groter is dan de kans op falen door overschrijden van kritiek verval. Wel zijn er situaties gevonden waarbij pipegroei een beperkte bijdrage heeft aan de totale pipingfaalkans.

Aanbevolen wordt om na te gaan of er praktijksituaties zijn waar een grote kans op pipegroei onder het voorland kan worden verwacht en waar deze mogelijk een relevante bijdrage aan de overstromingskans levert. Praktijksituaties kunnen namelijk afwijken van de beschouwde cases in dit rapport (vooral wat betreft de onzekerheden in de relevante parameters) waardoor pipelengte een grotere impact op de overstromingskans kan krijgen.

Algemeen

In het algemeen is er met de probabilistische analyses inclusief pipelengte een grote stap gemaakt richting een generiek veiligheidsformat voor voorlanden. Het is vooral nog de vraag of, en onder welke omstandigheden, de pipelengte een significante bijdrage levert aan de overstromingskans. Daarom wordt aanbevolen de aanpak uit deze notitie verder toe te passen op praktijksituaties om dit nader te onderzoeken en om te beschouwen of de probabilistische analyses ook werken voor praktijksituaties. Op basis van deze praktijkresultaten kan vervolgens een generiek veiligheidsformat op basis van semi-probabilistische verificaties voor voorlanden worden bepaald. Waardoor het volledige voorland kan worden meegenomen bij pipinganalyses, met als gevolg een grote reductie van dijkenareaal wat voor piping moet worden versterkt. Hiervoor wordt ook verder verwezen naar de aanbevelingen in Kanning (2021).

Bronnen

Kanning, W. (2020). Probabilistische analyses en combinatie pipinganalyses uittredepuntenmethode. 11205809-000-GEO-0004

Kanning, W. (2021). Verkenning veiligheidsbenadering piping met voorlanden. Deltares rapport 11206817-010. Bijlage bij het rapport "Kennis voor Keringen 2021: Achtergrondrapport Voorlanden", met nummer 11206817-010-GEO-0001

Rosenbrand, E. e.a. (2021). Kennis voor Keringen 2021: Achtergrondrapport Voorlanden. Deltares rapport 11206817-010-GEO-0001.

Rijkwaterstaat (2021). Schematiseringshandleiding Piping. Versie 4. 28 mei 2021.
<https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/primaire/beoordelen/@205752/schematiseringshandleiding-piping/>

Paraaf

DELTARES -> de heer ir. K.S. Lam
DELTARES -> mevrouw G. de Vries




A Script probabilistische methode invloed voorland

Onderstaand staat het gebruikte script wat in de Probabilistic Toolkit in batch (voor een grote variatie aan invoergegevens) kan worden aangeroepen. Onder het script staat een overzicht van de stochastische en deterministische invoerparameters.

Enkele van de belangrijkste variabelen voor het kritiek verval (H_c) zijn doorlatendheid (k), dikte zandlaag (D), weerstand van voor- en achterland (c_1 en c_3), L_{BUT} is de dijkbasis, leklengte voor en achterland, (λ_1 en λ_3), H_c het kritiek verval volgens Sellmeijer en Z_p de grenstoestandsfunctie voor het kritiek verval. Uplift en Heave worden niet meegenomen in de berekening.

Voor de pipelengte zijn van belang de eerste polynoom om de ratio L_c/L te berekening, dat is de ratio tussen de kritieke pipelengte (L_c) en de kwelweglengte (L) om zo L_c te kunnen berekenen. Vervolgens wordt de optredende pipelengte (L_{pipe}) berekend met de tweede polynoom met de ratio optredende waterstand (H), kritieke waterstand (H_c) en L_c als invoer. De grenstoestandsfunctie (Z_{pl}) om de pipelengte wordt vervolgens gebruikt in de probabilistische analyse met de modelonzekerheid (m_{pl}) als aanvullende parameters.

Piping_Uplift_Heave_Prob_v5.7.tcx

/// Versie 5.5: FORM start waarde u aangepast naar 2, combinatie op basis van hohenchler (door Wim Kanning)

/// Versie 5.7: nieuwe polynoom voor pipelengte ingevoegd (door Ligaya Wopereis)

///Stijghoogteverloop model 4A;

$kD = k * D$;

$L2 = L_{BUT} - L_{BIT}$;

$\lambda1 = \text{Math.Pow}(kD * c1, 0.5)$;

$\lambda3 = \text{Math.Pow}(kD * c3, 0.5)$;

$\Phi1 = \Phi_{polder} + (MHW - \Phi_{polder}) * (L2 + \lambda3 * \text{Math.Tanh}(L3 / \lambda3)) / (\lambda1 * \text{Math.Tanh}(L1 / \lambda1) + L2 + \lambda3 * \text{Math.Tanh}(L3 / \lambda3))$;

$\Phi2 = \Phi_{polder} + (MHW - \Phi_{polder}) * \lambda3 * \text{Math.Tanh}(L3 / \lambda3) / (\lambda1 * \text{Math.Tanh}(L1 / \lambda1) + L2 + \lambda3 * \text{Math.Tanh}(L3 / \lambda3))$;

$\Phi_{uittrede} = \Phi_{polder} + (\Phi2 - \Phi_{polder}) * (\text{Math.Sinh}((L3 - L_{BIT}) / \lambda3)) / \text{Math.Sinh}(L3 / \lambda3)$;

///UPLIFT;

$\Delta\Phi_c = d_{deklaag} * ((y_{satdek} - y_{water}) / y_{water})$;

$h_{uittrede} = \text{Math.Max}(maaiveld, \Phi_{polder})$;

$\Delta\Phi = \Phi_{uittrede} - h_{uittrede}$;

$Z_u = \mu * \Delta\Phi_c - \Delta\Phi$;

///HEAVE;

$i = (\Phi_{uittrede} - h_{uittrede}) / d_{deklaag}$;

$Z_h = i_c - i$;

///PIPING;

$L_{effvoorland} = \lambda1 * \text{Math.Tanh}(L1 / \lambda1)$;

$L = m_{kwl} * (L_{effvoorland} + L_{BUT})$;

///Sellmeijer;

$Fr = ((26.0 - y_{water}) / y_{water}) * 0.25 * \text{Math.Tan}(37 * \text{Math.PI} / 180)$;

```

Fs = 2.08E-4 * Math.Pow((d70/1.0E6) / 2.08E-4 , 0.4) / Math.Pow(L * ((kD / D) / (3600 * 24)) *
1.33 / (9.81 * 1E6) , 1.0 / 3.0);
Fg = 0.91 * Math.Pow(D / L , 0.04 + (0.28 / (Math.Pow(D / L , 2.8) - 1)));
Hc = Fr * Fs * Fg * L;
H = MHW - h_uittrede - 0.3 * d_deklaag;
Zp = mp * Hc - H;

```

```

///PipeLengte;
///berekening geparametriseerde kritieke pipelengte;
///Met zelfde voorwaarden in script;

```

```

if (D > L)
    {ratioLc_L = (-0.3984 * Math.Pow(1.0, 2.0) + 0.7979*(1.0) + 0.0707);}
else
    {ratioLc_L = (-0.3984 * Math.Pow(D / L, 2.0) + 0.7979*(D / L) + 0.0707);}

```

```

Lc = L * ratioLc_L;
///berekening Lpipe;

```

```

if (H / Hc > 0)
    {Lpipe = Lc *(164.535456 * Math.Pow(H / Hc, 8.0) - 570.088738 * Math.Pow( H / Hc, 7.0) +
797.636538 * Math.Pow(H / Hc, 6.0) - 575.466330 * Math.Pow( H / Hc, 5.0) + 227.705051 *
Math.Pow(H / Hc, 4.0) - 48.9853799 * Math.Pow( H / Hc, 3.0) + 5.96645859 * Math.Pow(H /
Hc, 2.0) -3.67385412e-01 * (H / Hc) + 0.00757329545) ;}
else
    {Lpipe = Lc * 0.001;}

```

```

Zpl = L_BUT - mpl * Lpipe;

```

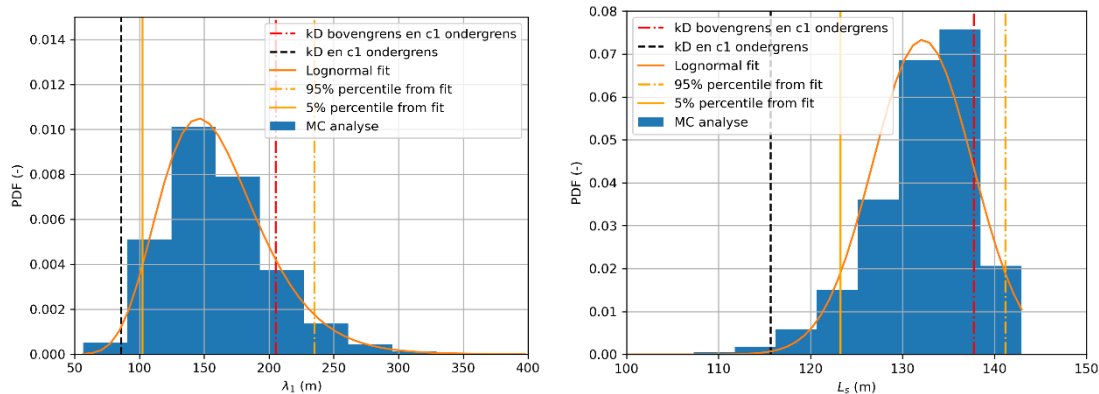
Variable	Distribution	Inverted	Truncated	Mean [x]	Std. Dev. [x, %]	Std. Dev. Unit	Shift [x]	Location [x]	Scale [-]	Shape [-]
Model: Internal										
y_sa...	Log normal	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	17	0,85 [x]		10	1,9386	0,12098	
y_w...	Deterministic			9,81						
d70	Log normal	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	450	54 [x]		0	6,1021	0,11957	
MHW	Weibull	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3,2007	0,8648 [x]				3,5229	4,1697
mp	Log normal	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1	0,12 [x]		0	-0,0071487	0,11957	
Φ_p...	Deterministic			-0,5						
mu	Log normal	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1	0,1 [x]		0	-0,0049752	0,099751	
ic	Log normal	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0,5	0,1 [x]		0	-0,71276	0,19804	
L1	Deterministic			100						
L3	Deterministic			2500						
D	Log normal	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	50	0,5 [x]		0	3,912	0,0099998	
maai...	Deterministic			0						
m_kwl	Deterministic			1						
L_BUT	Deterministic			45						
c1	Log normal	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	10	1,5 [x]		0	2,2915	0,14917	
c3	Log normal	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	65	9,75 [x]		0	4,1633	0,14917	
L_BIT	Deterministic			0,1						
pgc	Deterministic			0,5						
d_d...	Log normal	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	2	0,5 [x]		0	0,66283	0,24622	
k	Log normal	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	55	27,5 [x]		0	3,8958	0,47238	
mpl	Log normal	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1	0,3 [x]		0	-0,043089	0,29356	

B Gevoeligheidsanalyse variatiecoëfficiënt dikte WVP voor karakteristieke waarde analyses

In Hoofdstuk 3 is de variatiecoëfficiënt van D gesteld op 0,01 wat relatief laag is. In de praktijk zijn waarschijnlijk hogere waarden te verwachten. Daarom is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd op de variatiecoëfficiënt voor D . De analyse is uitgevoerd voor een waarde van 0,1.

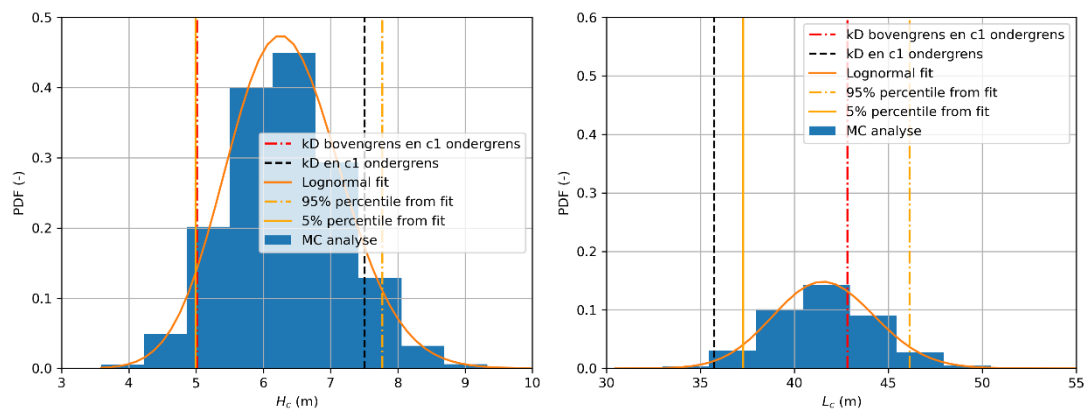
De probabilistische som werd niet beïnvloed door een hogere variatiecoëfficiënt van D . De betrouwbaarheidsindex op basis van H_c is 2,88, en op basis van L_c 3,34 en voor het systeem 2,84. Een hogere variatiecoëfficiënt van D leidt echter tot andere boven- en ondergrens kD -waarden, waardoor de semi-probabilistische som wel beïnvloed wordt.

Fout! Verwijzingsbron niet gevonden. geeft de resultaten voor de leklengte en kwelweglengte, deze zijn vergelijkbaar met de resultaten van Figuur 6. De variatie in dikte van de WVP heeft dus weinig invloed op de leklengte en dus ook weinig invloed op de kwelweglengte.



Figuur B-1 Histogram van de MC resultaten van de leklengte (links) en van de kwelweglengte (rechts) met een variatiecoëfficiënt van 0,1 voor D . De resultaten van de semi-probabilistische analyse zijn ook weergegeven samen met de lognormale fit van de histogrammen en hun 5% en 95% onderschrijdingskansen.

Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.B-2 geeft de resultaten weer voor het kritiek verval en de kritieke pipelengte. Het kritiek verval geeft vergelijkbare resultaten als **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** De variatie in dikte van de WVP heeft dus weinig invloed op het kritiek verval. Echter, de kritieke pipelengte heeft een veel grotere standaard afwijking dan bij **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**B-2. De variatie in dikte van de WVP heeft dus wel een relatief grotere invloed op de variatie in kritieke pipelengte. De belangrijke invloed van dikte van het WVP op pipelengte komt ook tot uiting in de curve voor L_c (Figuur 1).



Figuur B-2 Histogram van de MC resultaten van de kritiek verval (links) en van de kritiek pipe lengte (rechts) met een variatiecoëfficiënt van 0,1 voor D . De resultaten van de semi-probabilistische analyse zijn ook weergegeven samen met de lognormale fit van de histogrammen en hun 5% en 95% onderschrijdingskansen.

In het algemeen wordt met deze gevoeligheidsanalyse dezelfde resultaten gevonden als in Paragraaf 3.2; het effect van kD op H_c is dominant. Hierdoor is, voor deze specifieke case, een hoger kD waarde een conservatieve keuze die leidt tot een lage H_c en hoge L_c .

C Uitkomsten dominantie pipelengte

Tabel C-1: Resultaten scenario's met voorland lengte van 250 m en een MHW van 6 m.

Scenario's	H_c	β_p	β_{pl}	$\beta_{combined}$	Maatgevend mechanisme
0	6.934	5.727	6.864	5.727	Kritiek verval bepalend
1	6.934	6.264	7.379	6.264	Kritiek verval bepalend
2	6.972	5.468	6.151	5.465	Kritiek verval bepalend
3	6.972	5.990	6.658	5.988	Kritiek verval bepalend
4	6.955	5.268	5.642	5.249	Kritiek verval bepalend
5	6.955	5.785	6.152	5.769	Kritiek verval bepalend
6	8.071	5.963	6.972	5.962	Kritiek verval bepalend
7	8.071	6.463	7.471	6.463	Kritiek verval bepalend
8	7.882	5.624	6.242	5.621	Kritiek verval bepalend
9	7.882	6.123	6.736	6.121	Kritiek verval bepalend
10	7.699	5.388	5.721	5.365	Kritiek verval bepalend
11	7.699	5.888	6.220	5.869	Kritiek verval bepalend
12	8.391	6.002	6.992	6.002	Kritiek verval bepalend
13	8.391	6.497	7.488	6.497	Kritiek verval bepalend
14	8.119	5.652	6.260	5.649	Kritiek verval bepalend
15	8.119	6.148	6.751	6.145	Kritiek verval bepalend
16	7.884	5.410	5.737	5.387	Kritiek verval bepalend
17	7.884	5.907	6.233	5.888	Kritiek verval bepalend

Tabel C-2 Resultaten met voorland lengte van 250 m en een MHW van 10 m.

Scenario's	H_c	β_p	β_{pl}	$\beta_{combined}$	Maatgevend mechanisme
0	6.934	2.478	3.338	2.468	Kritiek verval bepalend
1	6.934	2.900	3.821	2.894	Kritiek verval bepalend
2	6.972	2.382	2.869	2.339	Kritiek verval bepalend
3	6.972	2.783	3.322	2.755	Kritiek verval bepalend
4	6.955	2.264	2.507	2.165	Kritiek verval bepalend
5	6.955	2.653	2.941	2.577	Kritiek verval bepalend
6	8.071	3.041	3.746	3.031	Kritiek verval bepalend
7	8.071	3.417	4.161	3.411	Kritiek verval bepalend
8	7.882	2.760	3.174	2.718	Kritiek verval bepalend
9	7.882	3.125	3.580	3.096	Kritiek verval bepalend
10	7.699	2.550	2.755	2.453	Kritiek verval bepalend
11	7.699	2.911	3.154	2.833	Kritiek verval bepalend
12	8.391	3.140	3.814	3.130	Kritiek verval bepalend
13	8.391	3.506	4.219	3.499	Kritiek verval bepalend
14	8.119	2.828	3.228	2.787	Kritiek verval bepalend
15	8.119	3.187	3.627	3.157	Kritiek verval bepalend
16	7.884	2.604	2.801	2.506	Kritiek verval bepalend
17	7.884	2.959	3.193	2.880	Kritiek verval bepalend

Tabel C-3: Resultaten met voorland lengte van 50 m en een MHW van 6 m.

Scenario's	H_c	β_p	β_{pl}	$\beta_{combined}$	Maatgevend mechanisme
0	3.739	2.210	2.631	2.187	Kritiek verval bepalend
1	3.739	2.756	3.219	2.741	Kritiek verval bepalend
2	3.521	1.969	2.275	1.926	Kritiek verval bepalend
3	3.521	2.518	2.867	2.489	Kritiek verval bepalend
4	3.410	1.835	2.085	1.780	Kritiek verval bepalend
5	3.410	2.387	2.679	2.348	Kritiek verval bepalend
6	3.766	2.223	2.642	2.200	Kritiek verval bepalend
7	3.766	2.767	3.228	2.752	Kritiek verval bepalend
8	3.537	1.977	2.283	1.935	Kritiek verval bepalend
9	3.537	2.526	2.874	2.497	Kritiek verval bepalend
10	3.421	1.841	2.091	1.786	Kritiek verval bepalend
11	3.421	2.392	2.684	2.354	Kritiek verval bepalend
12	3.771	2.226	2.645	2.202	Kritiek verval bepalend
13	3.771	2.769	3.230	2.754	Kritiek verval bepalend
14	3.540	1.979	2.285	1.937	Kritiek verval bepalend
15	3.540	2.527	2.875	2.498	Kritiek verval bepalend
16	3.423	1.843	2.092	1.788	Kritiek verval bepalend
17	3.423	2.393	2.685	2.355	Kritiek verval bepalend

Tabel C-4: Resultaten met voorland lengte van 50 m en een MHW van 10 m.

Scenario's	H_c	β_p	β_{pl}	$\beta_{combined}$	Maatgevend mechanisme
0	3.739	-0.589	-0.461	-0.715	Kritiek verval bepalend
1	3.739	-0.226	-0.065	-0.333	Kritiek verval bepalend
2	3.521	-0.814	-0.775	-0.975	Kritiek verval bepalend
3	3.521	-0.452	-0.383	-0.593	Kritiek verval bepalend
4	3.410	-0.938	-0.939	-1.116	Pipelengte bepalend
5	3.410	-0.576	-0.550	-0.734	Kritiek verval bepalend
6	3.766	-0.563	-0.435	-0.689	Kritiek verval bepalend
7	3.766	-0.202	-0.041	-0.309	Kritiek verval bepalend
8	3.537	-0.797	-0.758	-0.958	Kritiek verval bepalend
9	3.537	-0.437	-0.368	-0.577	Kritiek verval bepalend
10	3.421	-0.926	-0.928	-1.104	Pipelengte bepalend
11	3.421	-0.564	-0.539	-0.723	Kritiek verval bepalend
12	3.771	-0.558	-0.429	-0.683	Kritiek verval bepalend
13	3.771	-0.198	-0.036	-0.304	Kritiek verval bepalend
14	3.540	-0.794	-0.755	-0.954	Kritiek verval bepalend
15	3.540	-0.433	-0.364	-0.574	Kritiek verval bepalend
16	3.423	-0.923	-0.925	-1.101	Pipelengte bepalend
17	3.423	-0.562	-0.536	-0.721	Kritiek verval bepalend

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl