

Onderzoek rapport Voorlanden - KvK2022



Onderzoek rapport Voorlanden - KvK2022

Onderzoek rapport Voorlanden - KvK2022

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat WVL, Kennis voor Keringen
Contactpersoon	Henk van Hemert
Referenties	-
Trefwoorden	Voorland, terugschrijdende erosie, veiligheidsbenadering, pipelengte

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	23-02-2023
Projectnummer	11208057-046
Document ID	11208057-046-GEO-0002
Pagina's	164
Classificatie	
Status	definitief

Samenvatting

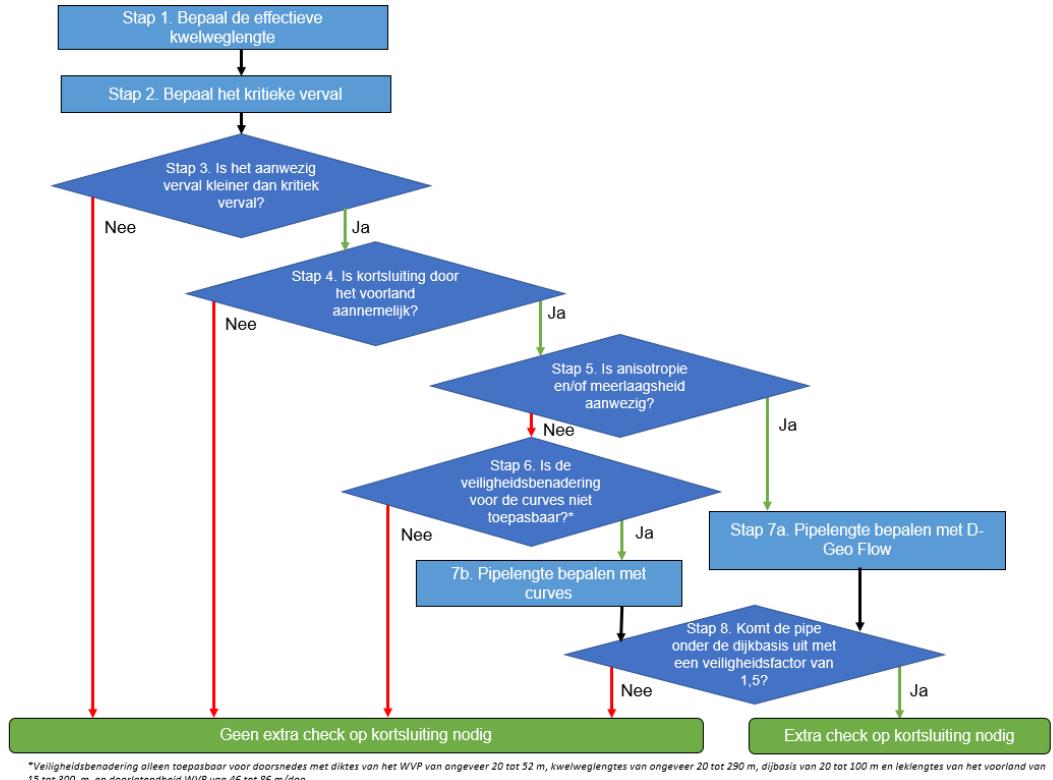
Piping is een faalmechanisme dat voor veel dijktrajecten een grote bijdrage levert aan de berekende overstromingskans. Een mogelijke reden hiervoor is het beperkt meenemen van de intredeweerstand van het voorland. Deze wordt niet meegenomen vanwege onzekerheid over de mate van pipegroei. De zorg is dat de pipe mogelijk onder de dijkbasis uitgroeit en zo kortsluiting kan veroorzaken door een gat in het voorland.

Het doel van dit onderzoek is om een stappenplan uit te werken om de intredeweerstand van het voorland altijd mee te nemen in een pipinganalyse. Om het stappenplan uit te kunnen werken zijn de volgende vier onderwerpen onderzocht:

1. Het meenemen van anisotropie en meerlaagsheid in de bepaling van kritiek verval en kritieke pipelengte.
Anisotropie en meerlaagsheid leiden tot langere kritieke pipelengtes en hogere kritieke vervallen. Het effect hiervan is in de huidige rekenregel niet meegenomen. In dit onderzoek wordt een algemene factor voor de pipelengte gezocht om het effect van anisotropie en meerlaagsheid op een eenvoudige manier mee te nemen. Dit is gedaan op basis van D-Geo Flow analyses.
2. Het valideren van pipelengtes bij waterstanden lager dan kritiek verval.
De pipelengte berekend met D-Geo Flow bevat onzekerheid. De onzekerheid van de kritieke pipelengte is redelijk bekend. De onzekerheid in pipelengte bij vervallen lager dan kritieke verval niet. Dit is onderzocht door 2D en 3D proeven te analyseren en te vergelijken met D-Geo Flow voorspellingen.
3. De veiligheidsbenadering, welke semi-probabilistische controle is nodig om voorlanden mee te nemen?
Pipelengtes kunnen eenvoudig op basis van curves afgeleid worden dankzij het KvK2021 Voorlanden onderzoek. Er was echter nog geen veiligheidsbenadering ontwikkeld voor het toepassen van deze curves. Hiertoe zijn probabilistische analyses uitgevoerd voor 1888 dijkdoorsneden van het project Neder Betuwe (NeBe). Met deze doorsneden werd onderzocht of de kans op het doorgroeien van de pipe tot onder het voorland leidt tot een toename van de totale pipingkans.
4. Bepaling van de karakteristieke waarden voor het transmissiviteit (kD , in plaats van k en D als aparte stochasten) van het watervoerende pakket voor de berekening van terugschrijdende erosie, wanneer geohydrologische modellen worden gebruikt.
Een hoge kD -waarde heeft een negatief effect op het kritieke verval maar een positief effect op de effectieve kwelweglengte welke ook positief werkt op het kritieke verval. Het is onbekende welk effect van kD dominant is en daaruit volgend wat een goede keuze als karakteristieke waarde is. Dezelfde 1888 schematisaties van NeBe zijn gebruikt om aan de hand van semi-probabilistische en probabilistische berekeningen de beste karakteristieke waarde voor kD te bepalen.

De resultaten van deze onderzoeken zijn verwerkt bij het opstellen van het stappenplan voor het meenemen van voorland. Het stappenplan is samengevat in een *decision flowchart*, zie hieronder. Met het stappenplan kan worden afgeleid of het hele voorland eenvoudig meegenomen kan worden in een pipinganalyse (uitkomst: "Geen extra check op kortsluiting nodig") of er kan worden vastgesteld dat er extra stappen nodig zijn (uitkomst: "Extra check op kortsluiting nodig"). Benodigde extra stappen kunnen zijn:

- Het kwantificeren van het risico op kortsluiting om een betere beslissing te maken.
- Het aanscherpen van het stappenplan voor het specifieke dijktraject, met experts.
- Een versterking. Dit moet verder worden meegenomen binnen een ontwerpproject. Hoe hier verder mee om te gaan ligt buiten de scope van dit stappenplan.



Het stappenplan is onderbouwd op basis van de vier deelonderzoeks vragen. Zo is stap 5 opgesteld na aanleiding van deelonderzoek (1). Uit het onderzoek bleek het niet mogelijk te zijn om een algemene factor af te leiden om het effect van anisotropie en meerlaagsheid mee te nemen. Hierdoor moeten voor deze gevallen D-Geo Flow sommen gemaakt worden.

Het deelonderzoek (2) had als doel om de onzekerheid in pipelengte uit D-Geo Flow beter te onderbouwen. Uit het deelonderzoek blijkt het niet eenvoudig te zijn om de pipelengtes van D-Geo Flow te valideren. Hierdoor is in stap 8 een veiligheidsfactor aangenomen op basis van *expert judgement*. Verder laat het deelonderzoek zien dat pipelengtes bij vervallen lager dan kritiek verval meer onzekerheid bevatten. Dit resultaat heeft geleid tot een aanscherping van de veiligheidsbenadering van stap 6.

De resultaten van deelonderzoek (3) laten zien dat geen aanvullende check nodig is om de intredeweerstand van het voorland mee te nemen in de pipinganalyse. Dit geldt voor schematisaties vergelijkbaar met de 1888 beschouwde schematisaties van NeBe. Op basis hiervan is stap 6 opgesteld.

Bij deelonderzoek (4) is gevonden dat een hoge karakteristieke waarde van kD het best aansluit bij de veiligheidsbenadering voor piping. Het wordt aanbevolen om dit voor een bredere set van gevallen verder uit te werken. Resultaten hiervan zijn voor schematisaties die geohydrologische modellen gebruiken. Het stappenplan bevat nog geen geohydrologisch model; hierdoor zijn deze resultaten nog niet direct te verwerken in het stappenplan.

Het is belangrijk om bij het toepassen van het stappenplan altijd af te wegen in hoeverre nieuwe kennis invloed heeft op de resultaten. Dit kan aan de hand van een *Decision Support Framework* aanpak. Daarmee kan een overzicht worden verkregen van de lokale omstandigheden die afwijken van het Sellmeijer model, bijvoorbeeld 3D grondwaterstroming, anisotropie, etc. Met dit overzicht kan een onderbouwde afweging gemaakt worden op basis

van alle processen/onzekerheden die nog een rol spelen. Hiermee kan, bij het meenemen van het voorland goed het overzicht en de relevantie van alle processen in het oog wordt gehouden.

Inhoud

Samenvatting	4
Symbolenlijst	11
1 Inleiding	12
1.1 Achtergrondinformatie	12
1.2 Doel	13
1.3 Leeswijzer	14
2 Stappenplan meenemen van het hele voorland in piping analyse	15
3 Invloed anisotropie en meerlaagsheid	20
3.1 Doel van het deelonderzoek en aanpak	20
3.2 Invloed van anisotropie en meerlaagsheid op de curve voor de kritieke pipelengte	20
3.3 Conceptueel model voor invloed van anisotropie en meerlaagsheid	25
3.3.1 Anisotropie	27
3.3.2 Meerlaagsheid	30
3.3.3 Verschil tussen BC1 en BC2	33
3.4 Hoofdbevindingen	33
4 Verificatie pipelengte bij waterstand lager dan kritiek verval	34
4.1 Doel van het deelonderzoek en aanpak	34
4.2 Validatie pipelengte onder kritiek verval bij 2D proeven	34
4.2.1 Eigenschappen van de 2D proeven	34
4.2.2 Resultaten van de vergelijking tussen experimentele en numerieke pipelengtes	34
4.3 Validatie pipelengte onder kritiek verval bij 3D proeven	36
4.3.1 Eigenschappen van de 3D proeven	36
4.3.2 Resultaten van de vergelijking tussen experimentele en numerieke pipelengtes	36
4.4 Hoofdbevinding	39
5 Aanscherping veiligheidsbenadering pipelengte	40
5.1 Aanleiding, doel en aanpak	40
5.1.1 Aanleiding	40
5.1.2 Doel	40
5.1.3 Aanpak	40
5.2 Methode: Grenstoestanden en semi-probabilistische verificaties	41
5.2.1 Grenstoestandsfuncties	41
5.2.2 Semi-probabilistische verificaties	42
5.3 Resultaten van beide stappen	43
5.3.1 Stap 1: Probabilistische sommen	43
5.3.2 Stap 2: Benodigde semi-probabilistische verificaties	45

5.3.3	Analyse: Verklaring dat de kans op kortsuiting door pipegroei onder het voorland geen significante bijdrage heeft aan te totale faalkans	45
5.4	Aanbeveling veiligheidsbenadering pipelengte	46
5.5	Impact voorlanden op lengte-effect	47
6	Karakteristieke waarde kD in geohydrologische modellen	48
6.1	Aanleiding doel en aanpak	48
6.1.1	Aanleiding	48
6.1.2	Doel	48
6.1.3	Aanpak	48
6.2	Analyses	49
6.2.1	Stap 1: Identificatie semi-probabilistische verificaties	49
6.2.2	Stap 2: Probabilistische analyses	50
6.3	Stap 3: resultaten	50
6.4	Stap 4: Analyse	51
6.5	Conclusies en aanbevelingen	51
7	Conclusies	53
7.1	Invloed anisotropie en meerlaagsheid	53
7.2	Verificatie voorspelling pipelengte bij waterstanden lager dan kritiek verval	53
7.3	Aanscherping veiligheidsbenadering pipelengte	54
7.4	Karakteristieke waarde kD in geohydrologische modellen	54
8	Aanbevelingen	55
9	Referenties	57
A	Conceptueel model voor het effect van anisotropie en meerlaagsheid	58
A.1	Introductie	58
A.1.1	Doel van het onderzoek	58
A.1.2	Leeswijzer	59
A.2	Methode	60
A.2.1	Conceptueel model	60
A.2.2	Numerieke analyse	80
A.3	Resultaten – validatie van hypotheses	84
A.3.1	Anisotropie	84
A.3.2	Meerlaagsheid	87
A.4	Analyse	91
A.4.1	Belang van parameters	91
A.4.2	Invloed anisotropie en meerlaagsheid op stappenplan curve	96
A.4.3	Toepassing	98
A.5	Conclusie	99
	Referenties Bijlage A	100
	Bijlage AA Validatie new D-Geo Flow 2022.01	100

B	Validatie van de pipelengte onder kritiek verval bij 2D en 3D situaties	102
B.1	Introductie	102
B.1.1	Doel van het onderzoek	102
B.1.2	Leeswijzer	104
B.2	Experimenten	105
B.2.1	Silvis	105
B.2.2	Hanses	105
B.2.3	Pol	105
B.2.4	Geometrieën	105
B.2.5	Zandeigenschappen	107
B.3	Numerieke modellen en resultaten	109
B.3.1	Randvoorwaarden	109
B.3.2	Mesh	110
B.4	Vergelijking Experimenten en Numerieke modellen	113
B.4.1	Silvis	113
B.4.2	Hanses	117
B.4.3	Pol	122
B.5	Conclusies	128
Referenties Bijlage B		130
Bijlagen BA	130	
Bijlage BA1 Pipes		130
Bijlage BA2 Geometrieën		132
C	Aanscherping van de veiligheidsbenadering en keuze in karakteristieke <i>k</i>-waarden	134
C.1	Introductie	134
C.1.1	Doel van het onderzoek	134
C.2	Achtergrond	135
C.2.1	Veiligheidsfilosofie om voorlanden mee te nemen	135
C.2.2	Keuze van karakteristieke <i>k</i> -waarden	138
C.3	Case studie: Neder Betuwe	141
C.4	Keuze van <i>kD</i> -waarden voor semi-probabilistische pipinganalyse	145
C.4.1	Aanpak	145
C.4.2	Analyses	145
C.4.3	Stap 3: Resultaten	147
C.4.4	Stap 4: Analyse	152
C.4.5	Conclusies en aanbevelingen	153
C.5	Veiligheidsfilosofie pipelengte	154
C.5.1	Aanpak	154
C.5.2	Resultaten: Probabilistische sommen	154
C.5.3	Analyse: Is de kans op kortsluiting dominant met meer onzekerheid in pipelengte en dikkere WVP?	157
C.6	Conclusie	158
Referenties Bijlage C		159
Bijlage CA Script gebruikt in de Probabilistische ToolKit		160

Symbolenlijst

Afstand uittredepunt tot buitenteen (m)	L_{BUT}
Betrouwbaarheidsindex van de eis op doorsnede niveau (-)	β_{eis}
Betrouwbaarheidsindex voor de pipelengte (-)	β_{pl}
Betrouwbaarheidsindex voor het kritieke verval (-)	β_p
Bodemhoogte (m)	h_{bodem}
Coëfficiënt geometrische term (-)	ζ
Coëfficiënt van White (sleepkrachtfactor) (in deze studie wordt een waarden van 0,25 gebruikt) (-)	η
Darcy doorlatendheid van de deklaag (m/dag)	$k_{deklaag}$
Darcy doorlatendheid van het WVP (m/dag)	k
Dijkbasis (m)	DB
Dikte deklaag (m)	$d_{deklaag}$
Dikte van het WVP (m)	D
Doorlatendheid van het WVP (m/dag)	k
Effectieve voorlandlengte (m)	L_v
Faalkansruimtefactor (-)	ω
Geometrische term (-)	F_g
Geometrische voorlandlengte (m)	L_1
Grenstoestand functie voor de pipelengte (m)	Z_{pl}
Grenstoestand functie voor het kritieke verval (m)	Z_p
Intredeweerstand ($=k_{deklaag}/d_{deklaag}$) (dag)	c_1
Kinetische viscositeit van water (voor grondwater van 10° Celsius: $1,33 \cdot 10^{-6}$ m/s) (m/s)	ν_{water}
Kritiek verval (Sellmeijer formule) (m)	H_c
Kwelweglengte (m)	L_s
Leklengte (m)	λ
Lengte-effectfactor berekend met Vgl. 7.13 uit WBI 2017 Bijlage III Sterkte en veiligheid (-)	N_{dsn}
Lengte van het traject (m)	L
Mechanismegevoelige fractie van de dijktrajectlengte. Voor deze pipinggevoelige fractie van het dijktraject wordt een waarden van 0,9 gebruikt. (-)	a
Modelfactor (-)	m_p
Modelonzekerheid pipelengte (voor nu: gemiddelde 1, variatiecoëfficiënt = 0.3; op basis van enkele proeven) (-)	m_{pl}
Pipelengte bij gegeven verval (m)	L_{pipe}
Polderwaterstand (m)	h_{exit}
Reductiefactor voor de weerstand in de deklaag bij de uitbredepunt (op dit moment gebruikelijk $r_c = 0,3$) (-)	r_c
Referentie d70-waarde (in deze studie wordt een waarden van $2,08 \cdot 10^{-4}$ m gebruikt) (m)	$d_{70,m}$
Referentie-lengte voor het lengte-effect. Hier wordt 300 m gebruikt. (m)	b
Rivierwaterstand bij norm (m)	h_w, H of WBN
Rolweerstandshoek van zandkorrels van de aangepaste Sellmeijer-regel (in deze studie wordt een waarden van 37° gebruikt) (°)	θ
Safety factor voor de pipelengte (-)	F_{pl}
Safety factor voor het kritieke verval (-)	F_p
Schaal term (-)	F_s
Volumegewicht van water (kN/m³)	γ_w
Volumegewicht van zandkorrels onder water (kN/m³)	$\gamma_{sub,particles}$
Weerstands term (-)	F_r
Zwaartekrachtversnelling ($= 9,81$ m/s²) (m/s²)	g
70-percentielwaarde van de korrelverdeling van het watervoerende pakket (m)	d_{70}

1 Inleiding

Dit rapport is een onderdeel van het Kennis van Keringen programma van Rijkswaterstaat, waarin Deltares onderzoekt naar een scherpere analyse van het faalmechanisme piping.

Piping is een faalmechanisme dat voor veel dijktrajecten een grote bijdrage levert aan de berekende overstromingskans. Piping is een complex mechanisme, voordat piping tot een overstroming leidt, moeten er een aantal gebeurtenissen achter elkaar optreden. In de huidige beoordeling wordt aan de hand van de initiële mechanismen (opbarsten, heave en terugschrijdende erosie) de faalkans voor piping bepaald.

De hoge faalkansen die worden berekend sluiten in de praktijk echter vaak niet aan bij het gevoel van de beheerder. Dit komt voornamelijk omdat het optreden van piping sterk wordt bepaald door de lokale omstandigheden die moeilijk te bepalen of te schematiseren zijn. Hierdoor 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.

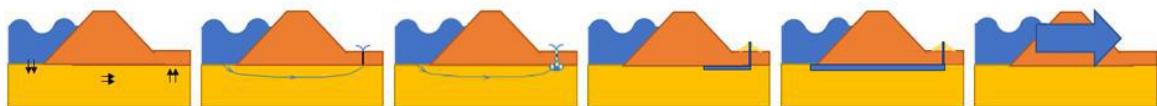
Gangbaar is het om een fictieve voorlandlengte te berekenen en vervolgens maximaal twee keer de dijkbasis aan kwelweglengte mee te nemen in de analyse. De reden voor deze limiet is dat het niet wenselijk is dat de pipe onder de dijkbasis uitkomt, vanwege risico op kortsluiting of stroming door het voorland naar de pipe. De aanname hierachter is dat, door gebrek aan kennis, de kritieke pipelengte gelijk is aan de helft van de kwelweglengte.

In gevallen met lange voorlanden kan het meenemen van meer dan twee keer de dijkbasis tot een significante, orde 100-1000-voudige, afname van de faalkans leiden. Dit heeft grote invloed op de dijkversterkingen in Nederland. Voorlanden moeten hierdoor waar mogelijk meegenomen worden in de piping analyse.

1.1 Achtergrondinformatie

Voordat piping tot een overstroming leidt, moeten een aantal gebeurtenissen achter elkaar optreden. Het faalpad bestaat uit (Figuur 1):

1. Toename van waterspanningen en opbarsten.
2. Heave: bij voldoende verticale stroming kunnen zandkorreltjes getransporteerd worden.
3. **Horizontale pipegroei tot aan kritiek verval (terugschrijdende erosie).**
4. Doorlopende pipe en hydraulische kortsluiting, verbreden en verdiepen pipe.
5. Kruinverlaging, overloop en bresgroei.



Figuur 1.1 Keten van gebeurtenissen piping (rode draad (Rosenbrand et al., 2022)).

Dit rapport is gericht op het deelmechanisme terugschrijdende erosie, stap 3. De rekenregel van Sellmeijer wordt gebruikt om de faalkans van dit deelmechanisme 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). Echter is een toepassingsvoorwaarde voor het meenemen van voorland dat de pipe nooit onder de dijkbasis uit mag komen.

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.

Hierdoor wordt in de praktijk veelal conservatieve aannames gedaan, zoals dat de kritieke pipelengte gelijk is aan de helft van de kwelweglengte. Daardoor is een maximale kwelweglente opgelegd van twee maal de dijkbasis (de afstand tussen uitstroompunt en buiteneinde). Recente ontwikkelingen laat zien dat de kritieke pipelengte vaak veel korter is.

Een geavanceerdere manier om voorland mee te nemen is door de pipelengte te berekenen met D-Geo Flow om te zien of de pipe onder het voorland komt. D-Geo Flow is een grondwaterstromingsmodel waarin het Sellmeijer model geïmplementeerd is om analyses uit te kunnen voeren. Dit is echter tijdsintensief, het model is niet gevalideerd met betrekking op pipelengte onder kritiek verval (en beperkt voor de pipelengte bij kritiek verval) en is er geen generiek veiligheidsformat voor omgang met de resultaten.

In Rosenbrand et al. (2022) 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 beheerde een onderbouwde eerste afweging kan maken om het voorland mee te nemen. De uitkomsten van deze studie zijn:

- Een conceptueel model dat inzicht geeft in welke factoren de pipelengte bij kritiek verval beïnvloeden.
- Een concept stappenplan voor het onderbouwd meenemen van voorland op basis van curves waarmee een eerste inschatting van de pipelengte wordt gemaakt zonder D-Geo Flow.
- Een eerste verkenning van de veiligheidsbenadering en omgang met de modelonzekerheid van de berekende pipelengte is uitgevoerd. Hieruit volgde dat een modelfactor voor de pipelengte van 1,5 voldoende veiligheid biedt om hiermee voorlanden mee te nemen in de berekeningen.

1.2 Doel

Dit rapport heeft als doel om stappenplan op te stellen om beheerders te helpen hun voorland mee te nemen in hun piping analyse, op basis van pipelengte berekeningen. Wanneer de pipelengte niet langer wordt dan de afstand tussen uitstroompunt en buiteneinde wordt, kan het voorland meegenomen worden.

Het stappenplan is gebaseerd op het concept stappenplan en de aanbevelingen van het KvK2021 Voorlanden onderzoek (Rosenbrand et al., 2022). De aanbevelingen van Rosenbrand et al. (2022) bevat vier onderdelen:

1. Het opstellen van een conceptueel model om het effect van een watervoerend pakket (WVP) met meerdere lagen (meerlaagsheid genoemd) en anisotropie beter te begrijpen. Dit conceptueel model is gemaakt op basis van numerieke modellen.

De ontwikkelde methode voor het meenemen van voorland in de berekening is gebaseerd op de rekenregel van Sellmeijer. Echter, bij piping spelen ook factoren zoals anisotropie en meerlaagsheid een rol, die niet in de rekenregel zijn opgenomen. Dit kan leiden tot een langere pipelengte bij kritiek verval, daarom is het nodig om inzicht te krijgen in de effecten van anisotropie en meerlaagsheid op de pipelengte.

2. Het valideren van pipelengte berekend met D-Geo Flow bij waterstanden lager dan kritiek verval aan de hand van proeven.

Op basis van D-Geo Flow is voor het stappenplan een curve afgeleid om pipelengte bij vervallen lager dan kritiek verval in te schatten. De pipelengtes berekend met D-Geo Flow onder kritiek verval zijn echter nooit gevalideerd, ook de berekende pipelengte bij kritiek verval is slechts beperkt gevalideerd.

3. Het aanscherpen van de veiligheidsbenadering bij het meenemen van voorlanden.

De ontwikkelde methode in Rosenbrand et al. (2022) bevat een eerste verkenning van de veiligheidsbenadering waaruit volgt dat een modelfactor van 1,5 op de berekende pipelengte voor voldoende veiligheid zorgt. Deze modelfactor is mogelijk conservatief en bij een aanscherping zou ook een lagere waarden genoeg veiligheid kunnen bieden.

4. Het bepaling van de karakteristieke waarden van de doorlatendheid van het water voeren pakket.

Het gebruik van geohydrologische modellen kan leiden tot een nauwkeurigere bepaling van de doorlatendheid van het WVP (Brinkhuis et al., 2021). Deze wordt dan vaak uitgedrukt in een transmissiviteit (ook kD -waarden genoemd voor doorlatendheid keer dikte) van het WVP in plaats van de gebruikelijk k -waarden. Deze modellen worden ook gebruikt om leklengtes van het voorland te bepalen. De keuze van hoe te komen tot rekenwaarden van k en D en de spreidingslengte voor de berekening van terugschrijdende erosie is niet vanzelfsprekend en moet onderzocht worden.

In dit rapport worden deze onderdelen per hoofdstuk behandeld dit zelfstandig te lezen zijn.

1.3 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 bevat het stappenplan. Het stappenplan maakt gebruik van bevindingen uit de navolgende hoofdstukken. Hoofdstuk 3 bevat de bevindingen van onderdeel 1, een uitgebreider uitleg van dit onderdeel is terug te vinden in Bijlage A. Hoofdstuk 4 bevat de bevindingen van onderdeel 2, met Bijlage B als onderbouwing. Hoofdstuk 5 en 6 bevatten de bevindingen van respectievelijk onderdelen 3 en 4, Bijlage C bevat achtergrondinformatie hierover. Hoofdstuk 7 bevat de conclusies, en Hoofdstuk 8 de aanbevelingen.

Stappenplan meenemen van het hele voorland in piping analyse

Aanleiding en doel

In de rekenregel van Sellmeijer die wordt gebruikt om de faalkans op piping te berekenen, wordt het voorland beperkt meegenomen. Een reden hiervoor is dat een overstroming kan ontstaan wanneer een pipe onder de dijkbasis doorgroeit en bij een zwakke plek in het voorland kortsluiting maakt met het buitenwater. Een tweede reden is dat het model van Sellmeijer, waarop de rekenregel is gebaseerd, niet gekalibreerd is voor stroming door de deklaag naar de pipe wanneer deze onder het voorland groeit. Hierdoor leidt pipegroei onder het voorland mogelijk tot onveilige situaties en is een extra check op pipelengte nodig bij het meenemen van het voorland. Deze check is vooral belangrijk wanneer kortsluiting aannemelijk is, bij dunne deklagen (bijv. bij dunne deklagen en teensloten die in de watervoerende zandlaag insteken) en wanneer de pipelengte relatief lang is (bijv. dikke zandlaag, klein verschil tussen aanwezig en kritiek verval, anisotropie etc.).

Het in dit hoofdstuk uitgewerkte stappenplan geeft een handvat om het voorland veilig mee te nemen in een pipinganalyse aan de hand van een check op pipelengte. Het stappenplan volgt uit nieuwe kennisontwikkelingen (voornamelijk binnen het Kennis voor Keringen programma) van de afgelopen jaren met betrekking pipegroei. Vóór deze kennisontwikkeling was er niet veel bekend over pipegroei en werden er conservatieve aannames gemaakt voor de lengte van de pipe. Uit de nieuwe kennisontwikkeling, gebaseerd op proeven en vooral D-Geo Flow berekeningen, blijkt de pipelengte in veel gevallen minder lang te zijn dan gedacht en ook dat pipegroei niet onder het voorland komt bij standaard rivierdijk schematisaties (zie Hoofdstuk 4), waarvoor de regel van Sellmeijer ontwikkeld is. Daarom wordt er nu aanbevolen om aan de hand van dit stappenplan het hele voorland mee te nemen in een pipinganalyse, met een paar kanttekeningen.

Het meenemen van voorlanden met het stappenplan moet altijd worden beschouwd binnen het kader van alle kennisonzekerheden, bijvoorbeeld effecten die niet in de modellen zitten (zoals 3D effecten). Dit kan worden gedaan met behulp van het zogenaamde '*Decision support framework*' (DSF). Met het DSF worden op basis van locatie specifieke kenmerken de belangrijkste onzekerheden in kaart gebracht op basis van het relatieve effect op de overstromingskans van de onzekerheid en de beschikbare kennis hiervan. Voor de exacte stappen in het DSF wordt verwezen naar Kanning en Rosenbrand (2023).

Afbakening

Het onderstaande stappenplan is alleen bedoeld voor het beoordelen van het mechanisme terugschrijdende erosie van het faalmechanisme piping op basis van het model van Sellmeijer. Dit mechanisme wordt in dit rapport verder piping genoemd tenzij anders is vermeld. *Uplift* en *heave* zijn ook mechanismes van het piping mechanisme maar zijn geen onderdelen van het stappenplan.

Het stappenplan bevat nog ruimte voor verbeteringen. Hierdoor is het belangrijk om dit stappenplan in zo veel mogelijk praktijk cases toe te passen en op basis van voortschrijdend inzicht deze aan te passen. Aanbevelingen hiervoor zijn hieronder genoemd in Hoofdstuk 8.

Toepassingsgebied

Het stappenplan is gebaseerd op berekeningen van pipelengte in D-Geo Flow. Wanneer er geen sprake is van meerlaagsheid of anisotropie, kan de pipelengte bij een specifieke situatie worden berekend aan de hand van empirische formules, afgeleid met pipegroei curves (zie Figuur C 2 en Figuur C 3). Hiervoor geldt als eis dat het beschouwde geval binnen het toepassingsgebied moet liggen van de curves. Het toepassingsgebied van de curves is een

2D situatie, een homogeen 1-laags watervoerend pakket met een isotrope doorlatendheid, en geen 3D stroming, geen anisotropie of meerlaagsheid. Dit is vrijwel gelijk aan het toepassingsgebied van de regel van Sellmeijer, met als uitzondering dat het achterland wel (semi-)doorlatend mag zijn.

Wanneer een traject buiten het toepassingsgebied van de curves valt, moet de pipelengte met D-Geo Flow bepaald worden. D-Geo Flow is gevalideerd voor het berekenen van het kritieke verval bij 2D stroming. Voor anisotropie en meerlaagsheid zijn geen proeven gebruikt om het kritieke verval te valideren maar de verwachting is dat dit redelijk goed wordt voorspeld. D-Geo Flow is niet gevalideerd voor 3D grondwaterstroming. De berekende pipelengtes zijn slechts met drie 2D medium-schaalproeven vergeleken wat onvoldoende is voor een validatie, hiervoor is nog geen veiligheidsbenadering gemaakt en wordt de onzekerheid in dit stappenplan meegenomen met *expert judgment*.

Bij het gebruik van de empirische formules voor pipelengteberekeningen is een veiligheidsbenadering opgesteld. Deze is gevalideerd met data van het dijkversterkingsproject Neder Betuwe. De bevindingen hiervan kunnen daardoor alleen worden gebruikt bij vergelijkbare doorsnede als bij Neder Betuwe (NeBe), zie Tabel 2-1. Hierboven geldt ook de toepassingsgebieden van de curves van het concept stappenplan (zie voorgaande paragraaf) en de standaard schematiseringsuitgangspunten (Rijkswaterstaat, 2016) (Rijkswaterstaat, 2021).

Tabel 2-1 Toepassingsgebied van de veiligheidsbenadering van de curves.

Parameter	NeBe range
Diktes van het WVP	20 tot 52 m ¹
Fictieve kwelweglengtes	44,5 tot 290 m
Dijkbasis	20 tot 100 m
Leklengtes van het voorland	15 tot 300 m
Doorlatendheden van het WVP	45 tot 86 m/dag

Wanneer een dijktraject buiten dit toepassingsgebied valt of wanneer gebruikt wordt gemaakt van D-Geo Flow om de pipelengte af te leiden is de veiligheidsbenadering niet gevalideerd. Dan moet er worden uitgegaan van een veiligheidsfactor voor pipelengte op basis van *expert judgement*.

Onderbouwing

Het stappenplan is opgebouwd aan de hand van pipegroeicurves (Figuur C 2 en Figuur C 3) en de bevindingen van Hoofdstuk 3, Hoofdstuk 4 en Hoofdstuk 5. De pipegroeicurves zijn gemaakt op basis van D-Geo Flow sommen en een beperkt aantal proeven. De bevindingen van Hoofdstuk 3 zijn gebaseerd op D-Geo Flow. De bevindingen van Hoofdstuk 4 zijn gebaseerd op proeven en D-Geo Flow. De veiligheidsbenadering voor de curves in Hoofdstuk 5 is getoetst aan de hand van data van een case studie (dijkversterkingsproject Neder Betuwe, NeBe).

Het stappenplan

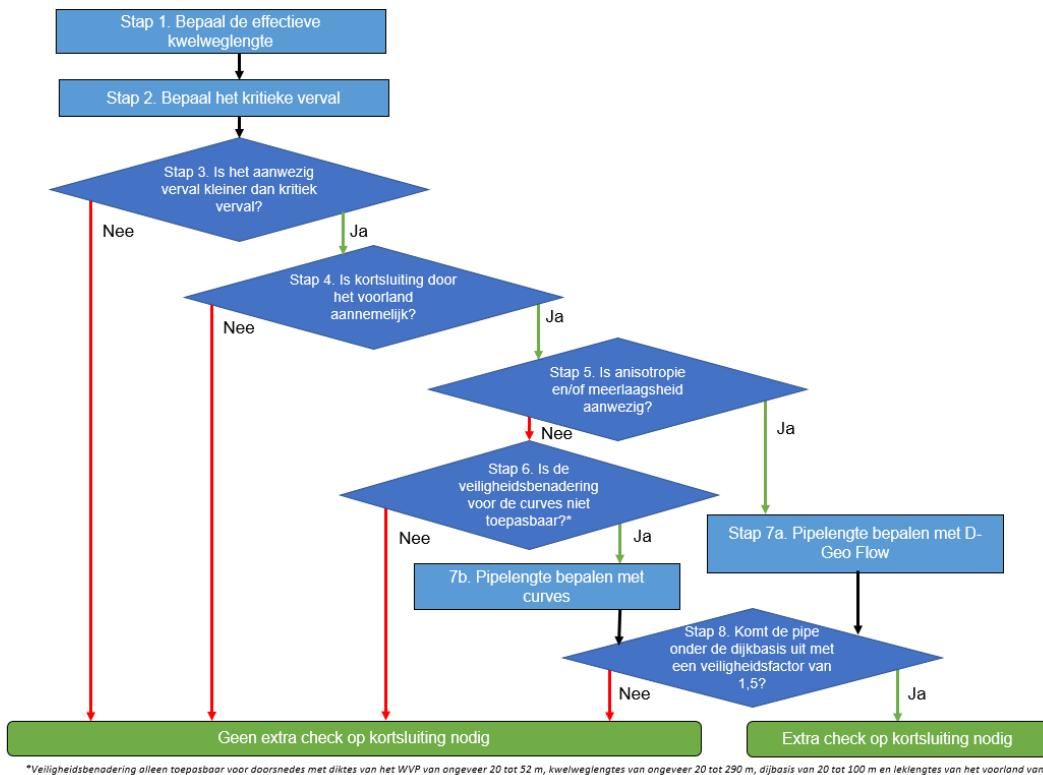
Het stappenplan is in Figuur 2-1 weergegeven, een uitgebreide uitleg van alle stappen staat onder de figuur. Na het doorlopen van het stappenplan zijn twee mogelijke uitkomsten.

- Geen extra check op kortsluiting nodig. Het voorland kan volledig meegenomen worden in de pipinganalyse door verschillende redenen:

¹ maximale WVP dikte van NeBe was 42 m, door een gevoelighetsanalyse is de toepassingsgebied van D vergroot met 10 m

- Na stap 3, omdat over het beschouwde traject het verval groter is dan het kritiek verval, waardoor er ook geen pipelengte berekening nodig is.
- Na stap 4, omdat er geen risico is op kortsleuteling.
- Na stap 6, omdat de pipe geen dominant effect heeft op de totale overstromingskans.
- Na stap 8, omdat de pipe niet onder het voorland komt.
- Extra check op kortsleuteling nodig. Er is een risico op kortsleuteling. Afhankelijk van de situatie kan worden gekozen uit een aantal vervolgstappen:
 - Kwantificeren van het risico op kortsleuteling om een betere beslissing te maken
 - Aanscherpen van het stappenplan voor het specifieke dijktraject, met experts
 - Versterking. Dit moet verder worden meegenomen binnen een ontwerpproject. Hoe hier verder mee om te gaan ligt buiten de scope van dit stappenplan.

Na het doorlopen van het stappenplan en na de analyse van de uitkomst is nog geen definitieve conclusie te trekken over of het dijktraject wel of niet veilig is met betrekking tot piping. Hiervoor moeten alle andere onzekerheden en de invloed van nieuwe kennisaspecten nog meegenomen worden aan de hand van de DSF aanpak.



Figuur 2-1 Flowchart van het stappenplan.

Stap 1: Bepaal de effectieve kwelweglengte (L_s)

De effectieve kwelweglengte (L_s) is afhankelijk van de geohydrologische weerstand van het voorland en kan worden bepaald aan de hand van de voorland leklengte (λ_{VL} , ook wel spreidingslengte genoemd uitleg en formule in Bijlage D), de geometrische voorlandlengte (L_{VL} , afstand van de buiteneinde naar het einde van het voorland) en de dijkzakte (DB , afstand van uittredepunt tot buiteneinde), zie onderstaande vergelijking. De bepaling van de effectieve voorlandlengte is ook beschreven in Bijlage E van het Schematiseringshandleiding piping (Rijkswaterstaat, 2021).

$$L_s = \lambda_{VL} \tanh\left(\frac{L_{VL}}{\lambda_{VL}}\right) + DB$$

Voor de 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 zoals intredeweerstand wordt aanbevolen om de bandbreedte van L_s te bepalen.

➤ Ga naar stap 2

Stap 2: Bepaal het kritieke verval (H_c)

Bepaal het kritieke verval H_c met de rekenregel van Sellmeijer conform de standaard werkwijze en veiligheidsformat in BOI (Rijkswaterstaat, 2016) (Rijkswaterstaat, 2021), voor een beoordeling of ontwerp op terugschrijdende erosie, waarbij wordt nu wel de gehele fictieve kwelweglengte L_s meegenomen.

➤ Ga naar stap 3

Stap 3: Is het aanwezig verval kleiner dan kritiek verval?

Het aanwezige verval bevat schadefactor en schematiseringsfactor en is uitgevoerd bij WBN conform (Rijkswaterstaat, 2016) (Rijkswaterstaat, 2021). Wanneer niet voldaan aan deze stap is geen check op pipelengte nodig. De doorsnede voldoet toch niet aan de piping eis.

➤ Ja, ga naar stap 4

➤ Nee, geen extra check op kortsluiting nodig

Stap 4: Is kortsluiting door het voorland aannemelijk?

Pipegroei onder het voorland hoeft geen bezwaar te zijn in situaties waar kortsluiting niet aannemelijk is. Deze situaties komen bijvoorbeeld voor wanneer de deklaag van het voorland veel intredeweerstand bevat. Een voorland heeft een hoge intredeweerstand wanneer de deklaag heel dik is, ca. dikker dan 4 m, of/in combinatie met een lage doorlatendheid mits er geen gaten zijn. Voor nadere afweging van het risico op korsluiting wordt verwezen naar Hoofdstuk 10 van het Kennis voor Keringen 2022 Achtergrondrapport Voorlanden. Een pipelengte check is niet nodig wanneer kortsleutuing niet aannemelijk is.

➤ Ja, ga naar stap 5

➤ Nee, geen extra check op kortsluiting nodig

Stap 5: Is anisotropie en/of meerlaagsheid aanwezig?

Anisotropie en meerlaagsheid leiden tot een hoger kritiek verval, maar ook tot een langere pipelengte; de mate waarin ze een significant effect hebben is anders voor pipelengte en kritiek verval. De curves van het stappenplan zijn afgeleid voor situaties zonder meerlaagsheid en anisotropie. Hierdoor kunnen, in geval van meerlaagsheid en anisotropie, langere pipelengtes voorkomen dan met de curves worden voorgesteld. In deze situaties kunnen de curves niet gebruikt worden en moet een D-Geo Flow som worden gemaakt.

De grens van wanneer een dijktraject wel of niet anisotropie bevat is moeilijk te definiëren, voor nu lijkt het redelijk om bij een gemiddelde anisotropiefactor groter dan 2 uit te gaan van significante (dus: significant effect op H_c en L_c) anisotropie. Voor meerlaagsheid bevat een doorsnede meerlaagsheid wanneer er in het WVP een scherpe overgang in doorlatendheid is. Welk minimaal contrast hierbij hoort is locatie afhankelijk. Op basis van generieke analyses is een minimaal doorlatendheidscontrast van 1,5 een goede eerste inschatting. Dit kan worden aangescherpt met bijvoorbeeld D-Geo Flow sommen."

➤ Ja, ga naar stap 7a

➤ Nee, ga naar stap 6

Stap 6: Is de veiligheidsbenadering voor de curves niet toepasbaar?

Binnen het toepassingsgebied van de veiligheidsbenadering (zie Tabel 2-1) heeft het doorgroeien van de pipe tot onder het voorland geen significante bijdrage aan de totale faalkans van piping, zie Hoofdstuk 4. In dit geval is dus geen check op pipelengte nodig. Wanneer je buiten het toepassingsgebied valt, is het niet evident of de pipe dan wel of niet bijdraagt aan de totale faalkans en is een pipelengte check nodig. De pipelengte (L_{pipe}) kan dan nog wel worden bepaald aan de hand van de curves (stap 7b).

➤ Ja, ga naar stap 7b

➤ Nee, geen extra check op kortsluiting nodig

Stap 7a: Pipelengte bepalen met D-Geo Flow

Bepaal de pipelengte, bij WBN zonder schadefactor en veilige karakteristieke waarden voor alle invoer conform OI/WBI, met D-Geo Flow. Bij aanwezigheid van anisotropie wordt aanbevolen om twee D-Geo Flow berekeningen te maken, één met de ondergrens en één met de bovengrens anisotropiefactor omdat het netto effect van anisotropie op pipelengte bij WBN niet makkelijk af te leiden is. De langste pipelengte kan dan worden gebruikt bij

stap 8. Wanneer veel onzekerheid is over de meerlaagsheid wordt ook aanbevolen om meerdere schematisaties uit te werken.

➤ **Ga naar stap 8**

Stap 7b: Pipelengte bepalen met curves

Bepaal de pipelengte bij WBN (H in onderstaande formule) zonder schadefactor en veilige karakteristieke waarden voor alle invoer conform OI/WBI met de curves. Hiervoor zijn empirische formules afgeleid op basis van de curves voorland uit eerder onderzoek, zie hieronder.

$$L_c = L_s \left[-0,3984 \left(\frac{D}{L_s} \right)^2 + 0,7979 \frac{D}{L_s} + 0,0707 \right]$$

$$L_{\text{pipe}} = L_c \left[164,5 \left(\frac{H}{H_c} \right)^8 - 570,1 \left(\frac{H}{H_c} \right)^7 + 797,6 \left(\frac{H}{H_c} \right)^6 - 575,5 \left(\frac{H}{H_c} \right)^5 + 227,7 \left(\frac{H}{H_c} \right)^4 - 48,99 \left(\frac{H}{H_c} \right)^3 + 5,966 \left(\frac{H}{H_c} \right)^2 - 0,367 \left(\frac{H}{H_c} \right)^1 + 0,00757 \right]$$

➤ **Ga naar stap 8**

Stap 8: Komt de pipe onder de dijkbasis uit met een veiligheidsfactor van 1,5?

In deze stap wordt gecontroleerd of de pipe mogelijk onder de dijkbasis groeit tot onder het voorland. De pipelengte is bepaald op basis van D-Geo Flow sommen (stap 7a) of op basis van de curves (stap 7b). Met beide aanpakken moeten nog onzekerheden meegenomen worden. Voor de curves: de case ligt buiten het toepassingsgebied van de veiligheidsbenadering voor de curves; er is niet geverifieerd hoeveel invloed de pipelengte heeft op de totale faalkans voor deze case. Voor D-Geo Flow: de berekende pipelengte is onvoldoende gevalideerd door een gebrek aan experimenten.

In beide gevallen wordt voorgesteld op een veiligheidsfactor van 1,5 toe te passen op de berekende pipelengte bij WBN (inclusief veilige karakteristieke waarden van alle invoer) om zo de resterende onzekerheden af te dekken. Dit is gebaseerd op expert judgement omdat er onvoldoende kennis is om de bovengenoemde onzekerheden naar veiligheidsfactoren te vertalen.

➤ **Ja, pipe komt onder het voorland**

➤ **Nee, geen extra check op kortsluiting nodig**

3 Invloed anisotropie en meerlaagsheid

3.1 Doel van het deelonderzoek en aanpak

Dit deelonderzoek richt zich op het beter begrijpen van het effect van anisotropie en meerlaagsheid op de pipelengte en het kritieke verval, aangezien deze effecten leiden tot een grotere kritieke pipelengte dan in een standaard homogene isotrope situatie.

Dit wordt gedaan door hypotheses op te stellen van het verwachte effect van anisotropie en meerlaagsheid op basis van de fysica. Deze worden dan gevalideerd en gekwantificeerd met numerieke modellen (D-Geo Flow). Door de effecten te kwantificeren kunnen de parameters die de meeste invloed hebben gevonden worden.

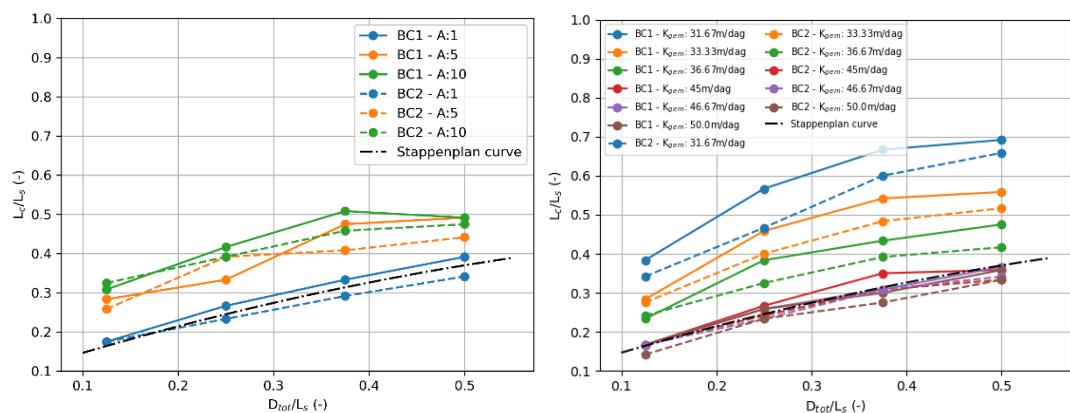
Een meer gedetailleerde toelichting op het onderzoek wordt gegeven in Bijlage A.

3.2 Invloed van anisotropie en meerlaagsheid op de curve voor de kritieke pipelengte

In Rosenbrand et al. (2022) is een curve afgeleid voor het bepalen van de kritieke pipelengte op basis van de geometrie van het watervoerend pakket (WVP) (dikte en kwelweglengte verhouding, D_{tot}/L_s) voor een situatie met een homogeen WVP, een dicht achterland en zonder 3D grondwaterstroming. In dit onderzoek wordt gekeken naar hoe goed deze grafiek nog de kritieke pipelengte kan voorspellen voor dijkvakken met anisotropie of meerlaagsheid. Deze twee processen treden vaak op in de praktijk maar worden niet meegenomen in de rekenregel.

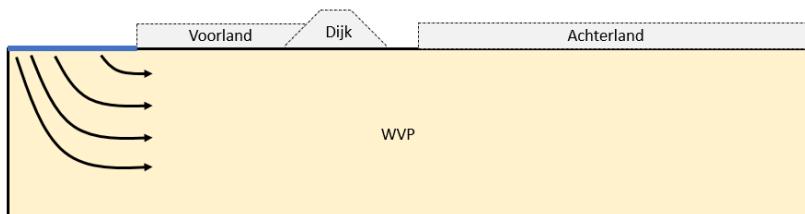
Anisotropie van het WVP houdt in dat de doorlatendheid in de horizontale richting anders (meestal hoger) is dan in de verticale richting. De anisotropiefactor is de verhouding tussen deze twee ($A = \frac{K_h}{K_v}$). Meerlaagsheid van het WVP houdt in dat het WVP uit meerdere lagen met verschillende doorlatendheden bestaat. Hier wordt voor meerlaagsheid alleen gekeken naar een tweelaags WVP.

De resultaten van dit onderzoek zijn in Figuur 3-1 weergegeven. Figuur 3-1 geeft de kritieke pipelengtes gedeeld door de kwelweglengte, links met anisotropie en rechts met meerlaagsheid voor verschillende geometrieën van het WVP. Deze figuur is gebaseerd op kritieke pipelengtes berekend met D-Geo Flow. De gestippeld zwarte lijn in deze figuur is de curve afgeleid in Rosenbrand et al. (2022). Deze figuur laat zien dat de oude aannname, dat de kritieke pipelengte maximaal de helft van de kwelweglengte is, overschreden wordt met meerlaagsheid.

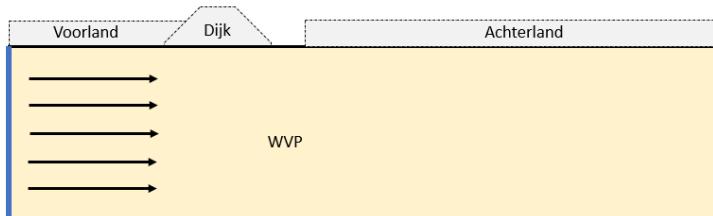
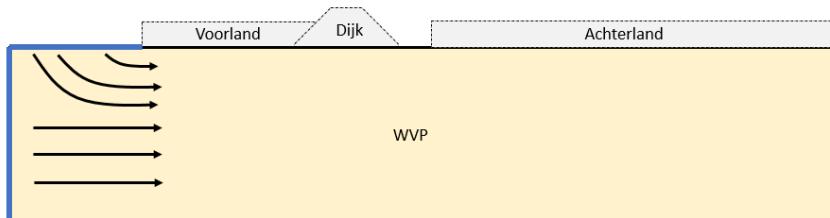


Figuur 3-1 Kritieke pipelengte gedeeld door de kwelweglengte voor verschillende geometrieën van het WVP en met anisotropie (links) en meerlaagsheid (rechts).

Uit Figuur 3-1 is geen algemene factor af te leiden voor het effect van anisotropie of meerlaagsheid op de kritieke pipelengte. Een WVP met een D_{tot}/L_s van 0,1 en een anisotropiefactor van 10 geeft een ongeveer twee keer langere kritieke pipelengte dan de curve. Terwijl, een WVP met een D_{tot}/L_s van 0,5 een kritieke pipelengte heeft die een factor ongeveer 1,3 hoger is. Uit deze figuur is ook duidelijk dat de curve een goede inschatting geeft voor gevallen zonder anisotropie, echter wordt deze inschatting wat onnauwkeuriger bij hogere D_{tot}/L_s verhoudingen. Dit komt waarschijnlijk omdat de curve bij hogere D_{tot}/L_s afgeleid is op basis van proeven met alleen een verticale instroom (Figuur 3-2) terwijl de gebruikte schematisatie in deze studie een horizontale of horizontale en verticale instroom hebben (zie Figuur 3-3).



Figuur 3-2 Illustratie verticaal instroom randvoorwaarde.

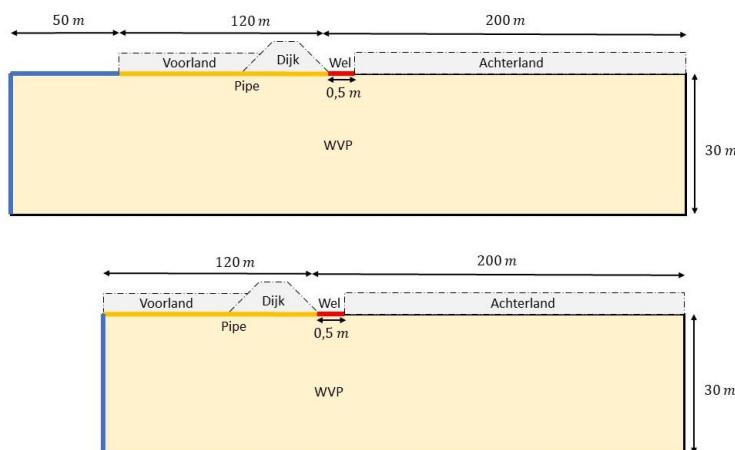


Figuur 3-3 Illustratie type instroomrandvoorwaarde, boven verticaal en horizontaal (BC1 genoemd) en beneden alleen horizontaal instroom (BC2 genoemd).

Het verschil in kritieke pipelengte afgeleid met de curve en met meerlaagsheid is ook afhankelijk van D_{tot}/L_s . Met $K_{gem} = 31,67 \text{ m/dag}$ ($K_2/K_1=9,0$) geeft een D_{tot}/L_s van 0,1 kritieke pipelengtes die ongeveer een factor 2,3 langer zijn dan de curve en met een D_{tot}/L_s van 0,5 een factor van ongeveer 1,8. Uit deze figuur is ook te zien dat de curve, voor het geval zonder meerlaagsheid ($K_{gem} = 45 \text{ m/dag}$, $K_2/K_1=1,0$) of met een meer doorlatend laag boven ($K_{gem} = 47 \text{ m/dag}$, $K_2/K_1=0,9$ en $K_{gem} = 50 \text{ m/dag}$, $K_2/K_1=0,8$), een relatieve goede inschatting geeft van de kritieke pipelengte.

De linker figuur in Figuur 3-1 is gemaakt op basis van een schematisatie met verschillende diktes van het WVP (15, 30, 45, en 60 m), met een 30 m/dag doorlatendheid en een d_{70} van 0,2 mm. Het voorland en achterland zijn ondoorlatend. De kwelweglengte is 120 m lang en het achterland is 200 m lang. De linker figuur bevat curves met een anisotropiefactor van 1, 5 en 10 en twee typen instroomrandvoorwaarden (zie Figuur 3-4):

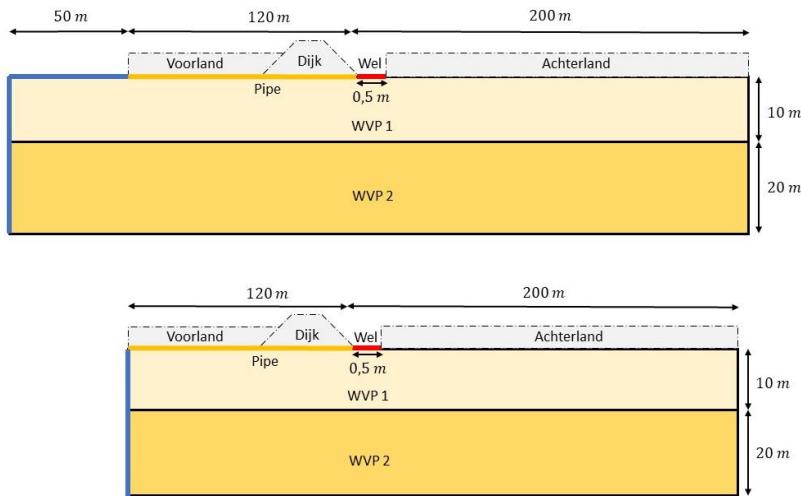
- BC1: Een rivierwaterstand met verticaal en horizontaal instroom.
- BC2: Een rivierwaterstand met alleen horizontaal instroom.



Figuur 3-4 Basisschematisatie Anisotropie met BC1 boven en BC2 onder. Beide hebben een ondoorlatend achterland.

Het rechter figuur van Figuur 3-1 bevat een schematisatie met meerlaagsheid ($D_1/D_2 = 0,5$ en met $K_2 = 45 \text{ m/dag}$), een d_{70} van 0,2 mm, een ondoorlatend voorland en achterland met een kwelweglengte van 120 m en een achterland van 200 m lang. De curves geven verschillende gemiddelde doorlatendheden aan en instroomrandvoorwaarden, zie Figuur 3-5. De gemiddelde doorlatendheid is aangepast door K_1 te variëren:

- $K_1 = 5 \text{ m/dag}$, $K_1/K_2 = 9,0$ en $K_{gem} = 31,67 \text{ m/dag}$.
- $K_1 = 10 \text{ m/dag}$, $K_1/K_2 = 4,5$ en $K_{gem} = 33,33 \text{ m/dag}$.
- $K_1 = 20 \text{ m/dag}$, $K_1/K_2 = 2,3$ en $K_{gem} = 36,67 \text{ m/dag}$.
- $K_1 = 45 \text{ m/dag}$, $K_1/K_2 = 1,0$ en $K_{gem} = 45,00 \text{ m/dag}$.
- $K_1 = 50 \text{ m/dag}$, $K_1/K_2 = 0,9$ en $K_{gem} = 46,67 \text{ m/dag}$.
- $K_1 = 60 \text{ m/dag}$, $K_1/K_2 = 0,8$ en $K_{gem} = 50,00 \text{ m/dag}$.



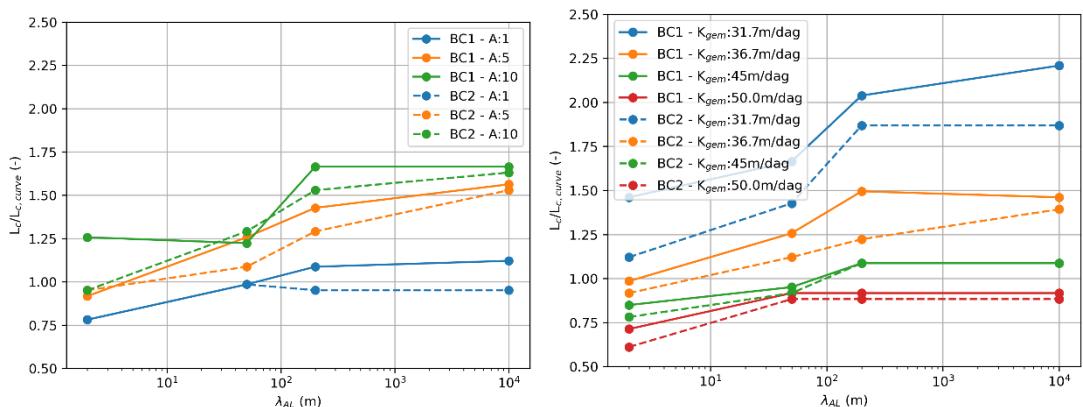
Figuur 3-5 Basisschematisatie meerlaagsheid met BC1 boven en BC2 onder. Beide hebben een ondoorlatend achterland.

Een andere parameter die het effect van meerlaagsheid en anisotropie op de kritieke pipelengte beïnvloedt is de doorlatendheid van het achterland. De mate van doorlatendheid van het achterland wordt gerepresenteerd door de leklengte² (ook wel spreidingslengte genoemd zie Bijlage D). Deze is bepaalt met een analytische formule (zie Vergelijking 1) afgeleid voor een één-laags WVP met horizontale stijghoogtecontourlijnen en daardoor eigenlijk niet toepasbaar met de aanwezigheid van meerlaagsheid of anisotropie. De formule voor leklengte kan wel gebruikt worden voor een eerste indicatie. De leklengte hangt af van de doorlatendheid en dikte van zowel het achterland en het WVP. Hoe langer de leklengte, hoe meer ondoorlatend de deklaag is.

$$\lambda = \sqrt{\frac{K_{WVP} D d}{K_{AL}}} \quad \text{Vergelijking 1}$$

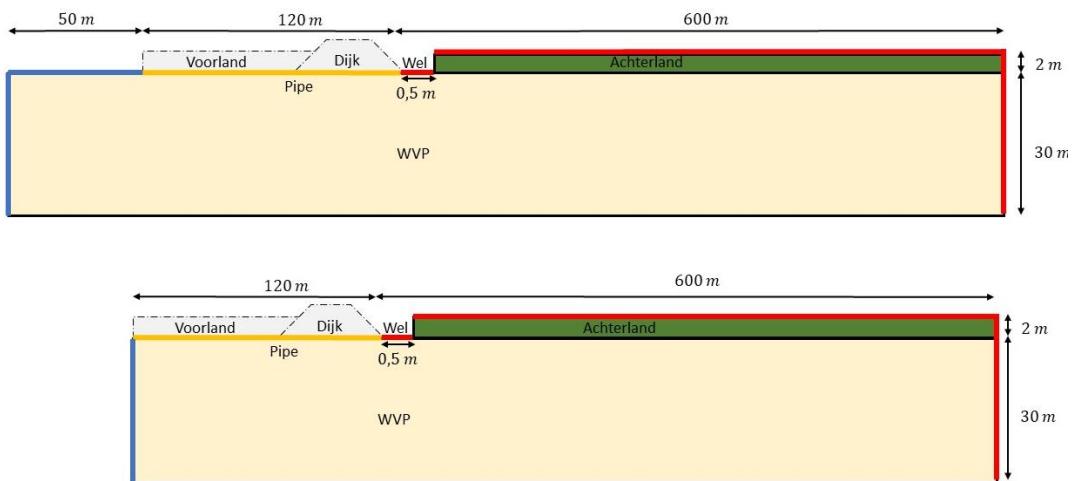
Figuur 3-6 geeft de factor tussen kritieke pipelengtes berekend met D-Geo Flow en de curves voor verschillende achterland doorlatenheden, links voor gevallen met anisotropie en rechts met meerlaagsheid. Deze figuur laat zien dat het verschil in kritieke pipelengte bepaald wordt door de curve en D-Geo Flow afhankelijk is van de doorlatendheid van het achterland. Het verschil is groter voor een ondoorlatend achterland.

² Disclaimer: de formule voor de leklengte kan geen rekening houden met anisotropie. Door anisotropie verwacht je nog langere leklengtes dan berekend met de formule. Dit is voor deze studie niet heel belangrijk omdat er niet specifiek naar een waarde van leklengte gekeken wordt.



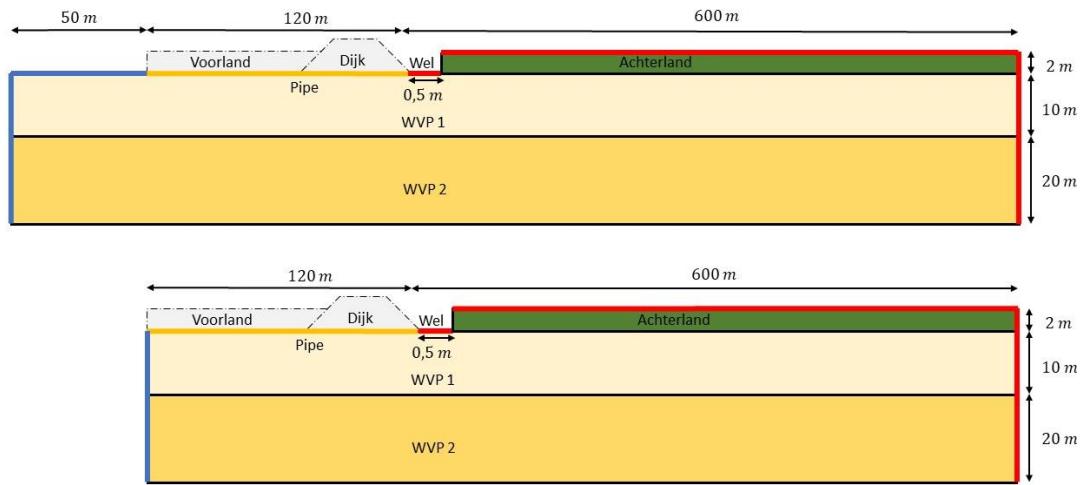
Figuur 3-6 Kritieke pipelengte berekend met D-Geo Flow gedeeld door die berekend met de curve voor verschillende achterland leklengtes met anisotropie (links) en meerlaagsheid (rechts).

Het linker Figuur 3-6 is gebaseerd op een 30 m dik WVP, met een 30 m/dag doorlatendheid en een d_{70} van 0,2 mm. Het voorland is ondoorlatend en de kwelweglengte is 120 m lang. Het achterland is doorlatend en 600 m lang. De curves geven gevallen aan met een anisotropiefactor van 1, 5 en 10 en twee typen instroomrandvoorwaarden, zie Figuur 3-7.



Figuur 3-7 Basisschematisatie Anisotropie met BC1 boven en BC2 onder. Beide hebben een doorlatend achterland.

Het rechter Figuur 3-6 is gebaseerd op een meerlaags watervoerend pakket met een totale dikte van 30 m ($D_1/D_2 = 0,5$ en $K_2 = 45 \text{ m/dag}$). Het voorland is ondoorlatend en de kwelweglengte is 120 m lang. Het achterland is doorlatend en 600 m lang, zie Figuur 3-8. De curves zijn berekend met dezelfde K_{gem} als de linker figuur in Figuur 3-6.



Figuur 3-8 Basischematisatie Meerlaagsheid met BC1 boven en BC2 onder. Beide hebben een doorlatend achterland.

3.3

Conceptueel model voor invloed van anisotropie en meerlaagsheid

Het conceptuele model geeft aan hoe de kritieke pipelengte en het kritieke verval beïnvloed worden door anisotropie en meerlaagsheid. Verder wordt ook gekeken naar hoe de achterland leklengte en de doorlatendheid, dikte en d_{70} van het WVP de effecten van anisotropie of meerlaagsheid dempen of versterken.

Het conceptuele model is ontwikkeld door hypotheses op te stellen op basis van wat verwacht wordt uit de fysica en door deze te valideren aan de hand van numerieke modellen, die in de vorige paragraaf zijn beschreven (D-Geo Flow). Door een gebrek aan proeven met meerlaagsheid en anisotropie kan experimentele data niet gebruikt worden voor de validatie. De resultaten van deze analyse zijn in Tabel 3-1 samengevat en de onderbouwing daarvan op basis van fysica en berekeningen is daarna weergegeven. Voor meer details wordt verwezen naar Bijlage A.

Tabel 3-1 geeft aan of de kritieke pipelengte en kritieke verval verhoogd of verlaagd wordt bij veranderingen in parameter(s). In groen staan de pijlen die positief werken (korter kritieke pipelengte of lager kritiek verval) en in rood negatief (langer kritieke pipelengte of hoger kritiek verval).

Tabel 3-1 Samenvatting van de gevalideerde hypotheses van het conceptuele model voor anisotropie en meerlaagsheid. In groen staan de pijlen die positief werken (korter kritieke pipelengte of lager kritiek verval) en in rood negatief (langer kritieke pipelengte of hoger kritiek verval).

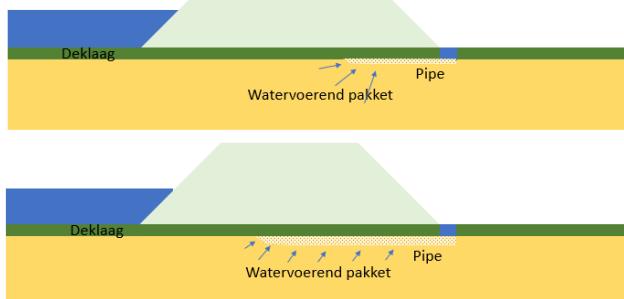
Hypotheses	L_c	H_c
H1: Verhoging van anisotropie	↑	↑
H2: Verhoging in dikte van het WVP voor situaties met gelijke anisotropie	↑	↓
H3: Verhoging in doorlatendheid van het WVP voor situaties met gelijke anisotropie	Geen effect	↓
H4: Verhoging in d_{70} van het WVP voor situaties met gelijke anisotropie	Geen effect	↑
H5: Verhoging in leklengte van het achterland voor situaties met gelijke anisotropie	↑	↓
H6: Verhoging van $\frac{K_2}{K_1}$ met dezelfde $\frac{D_1}{D_2}$, totale dikte (D_{tot}), en gemiddelde doorlatendheid van het WVP (k_{gem})	↑	↑

H7: Verhoging van $\frac{D_1}{D_2}$ met dezelfde $\frac{K_2}{K_1}$, en dezelfde totale debiet ($D_{tot} * K_{gem}$) in het WVP	↑	↑↓ ³
H8: Verhoging dikte WVP (D_{tot}) voor situaties met meerlaagsheid	↑	↓
H9: Verhoging d_{70} van het WVP voor situaties met meerlaagsheid	Geen effect	↑
H10: Verhoging leklengte achterland voor situaties met meerlaagsheid	↑	↓

Elk hypothese is gebaseerd op de fysica die uitgebreid is uitgelegd in het conceptuele model voor pipelengte van Rosenbrand et al. (2022). Hieruit volgt dat een pipe in stappen groeit omdat deze bij lager vervallen tot evenwicht kan komen. Het verval moet verhoogd worden om de pipe verder te laten groeien. Dit gebeurt totdat bij een bepaalde verval (het kritieke verval) de pipe blijft groeien tot dat falen ontstaat. De pipegroei wordt door twee effecten beïnvloed, zie hieronder.

Effect 1: Concentratie van stroming naar de pipe.

Een pipe zal groeien door concentratie van stroming naar de pipe. De pipegroei leidt bij een gegeven verval tot een toename in uitstroomoppervlak, de pipe wordt langer. Hierdoor is er een afname in waterspanning rondom de pipe. Door deze afname kan een evenwicht bereikt worden. Dit is in Figuur 3-9 geïllustreerd, waar twee gevallen met dezelfde verval zijn geschematiseerd. In het eerste geval is de pipe kort en heeft veel concentratie van stroming naar de pipe. In het onderste geval heeft de pipe een evenwicht bereikt door langer te worden waardoor er minder concentratie van stroming is naar de pipe.

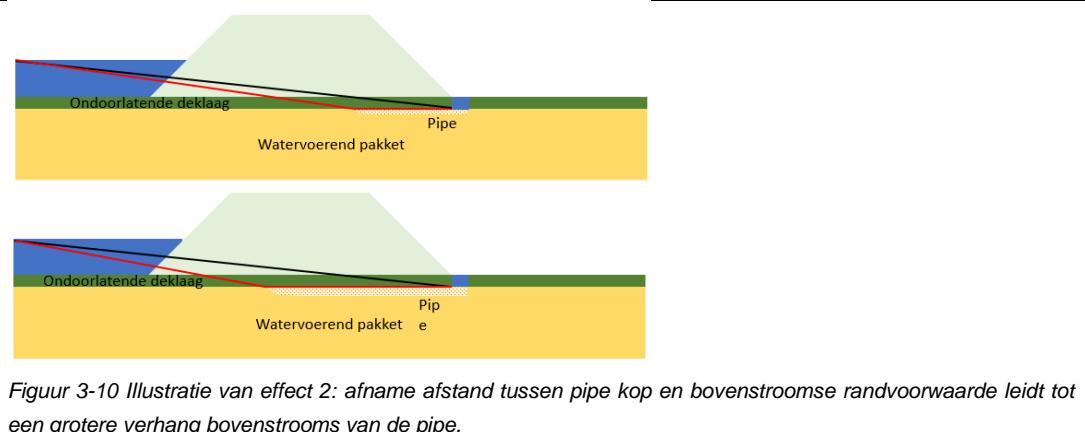


Figuur 3-9 Illustratie van effect 1: pipegroei door concentratie van stroming naar de pipe.

Effect 2: Afstand tussen pipe kop en rivier.

De kop van de pipe komt dichter bij het intredepunt en, omdat de drukval in de pipe kleiner is dan in het zand, neemt het verhang bovenstroms van de pipe toe. Effect 2 is afhankelijk van de drukval in de pipe ten opzichte van de drukval in het WVP, hoe groter het contrast tussen die twee hoe belangrijker effect 2 wordt. Figuur 3-10 illustreert dit. Wanneer er geen drukval in de pipe is (rood in deze figuur), is het verhang bovenstroms van de pipe veel lager bij een kortere pipe dan bij een langere pipe. Dit komt voor wanneer de pipe een oneindig grote doorlatendheid heeft. Wanneer de pipe en het WVP dezelfde doorlatendheid hebben (zwart in deze figuur) is er geen verschil zijn in stijghoogte beneden of bovenstroms van de pipe, effect 2 is niet meer relevant. De werkelijke situatie zit tussen deze twee extreme gevallen.

³ Het effect op het kritieke verval is sterk afhankelijk van K_2/K_1 en bij een hoog K_2/K_1 -waarden van de instroomrandvoorwaarden. In deze studie is het effect van D_1/D_2 alleen onderzocht voor een hoog doorlatendheidcontrast ($K_2/K_1=4,5$). Met dit contrast werd een verhoging in kritiek verval gezien met BC1 en juist een verlaging met BC2. Aanbevolen is om het effect van D_1/D_2 te onderzoeken bij lagere doorlatendheidcontrasten.



Figuur 3-10 Illustratie van effect 2: afname afstand tussen pipe kop en bovenstroomse randvoorwaarde leidt tot een grotere verhang bovenstroms van de pipe.

De kritieke pipelengte is het omslagpunt waar, bij een bepaalde verval (het kritieke verval), effect 2 belangrijker wordt dan effect 1, waardoor de pipe bij gelijkblijvend verval doorgroeit. Dit omslagpunt wordt bereikt omdat naarmate de pipe langer is, wordt de vergroting van het uitstroomoppervlak minder invloed heeft op de waterspanningen naast de pipe. Hierdoor is het langer worden van de pipe (effect 1) relatief minder belangrijk ten opzichte van effect 2.

Het omslagpunt, en dus de kritieke pipelengte, hangt af van de stroming en hoe die naar de pipe convergeert, wat weergegeven wordt door de stijghoogtecontourlijnen. De stijghoogtecontourlijnen zijn afhankelijk van de geometrie van het WVP, de anisotropie en de doorlatendheid van het achterland.

Wanneer er meer concentratie van stroming naar de pipe is, gekenmerkt door een sterkere kromming van de stijghoogtecontouren bij de pipe, is de verwachting dat bij een gelijk verval de pipe langer moet worden om het WVP te ontwateren en daarmee evenwicht te vinden. Een groter uitstroomoppervlak heeft dan ook bij hogere vervallen nog invloed op de waterspanningen. In deze gevallen blijft effect 1 bij hogere vervallen nog belangrijk, omdat de pipe meer moet ontwateren en wordt een langere kritieke pipelengte verwacht.

In deze studie is naast de kritieke pipelengte ook gekeken naar het kritieke verval. Uit de voorlanden 2021 studie bleek dat het onderbouwd meenemen van meer voorlanden ook soms afhankelijk was van pipelengtes bij vervallen onder kritiek verval. Deze pipelengtes zijn afhankelijk van het kritieke verval wat weer beïnvloed wordt door de hoeveelheid water naar de pipe. Wanneer meer debiet naar de pipe gaat wordt het kritieke verval lager.

Op basis van deze theorie zijn hypotheses opgesteld om beter te begrijpen hoe de kritieke pipelengte en het kritieke verval beïnvloed worden door anisotropie of meerlaagsheid in combinatie met de dikte van het WVP (D), de doorlatendheid van het WVP (K), de d_{70} van het WVP, de doorlatendheid van het achterland (K_{AL}) en de type instroomrandvoorwaarden.

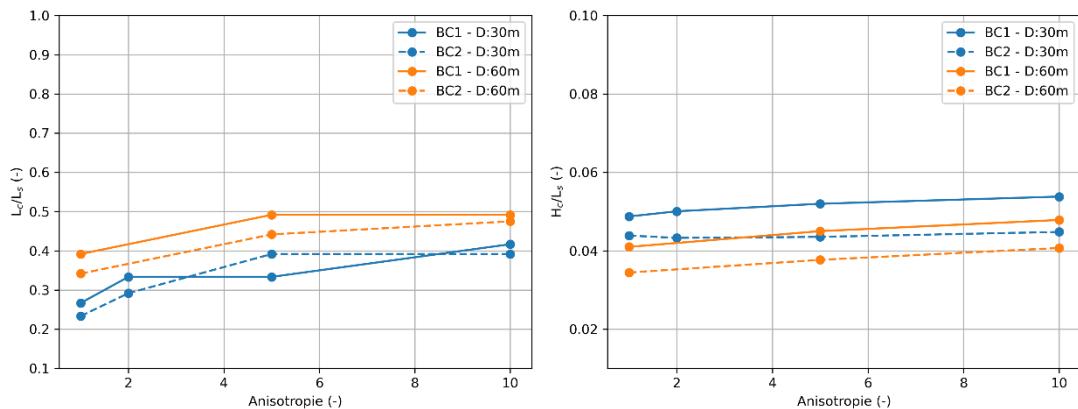
Voor elke hypothese is gekeken naar hoe de stijghoogtecontourlijnen bij kritiek verval beïnvloed wordt door een verandering in parameter(s). Dit wordt als basis gebruikt om een inschatting te maken van de invloed op de kritieke pipelengte (verhoging of verlaging). Om een inschatting te maken van hoe het kritieke verval beïnvloed wordt, is gekeken naar de hoeveelheid debiet naar de pipe. Wanneer deze toeneemt, is de verwachting dat het kritieke verval verlaagd wordt.

3.3.1

Anisotropie

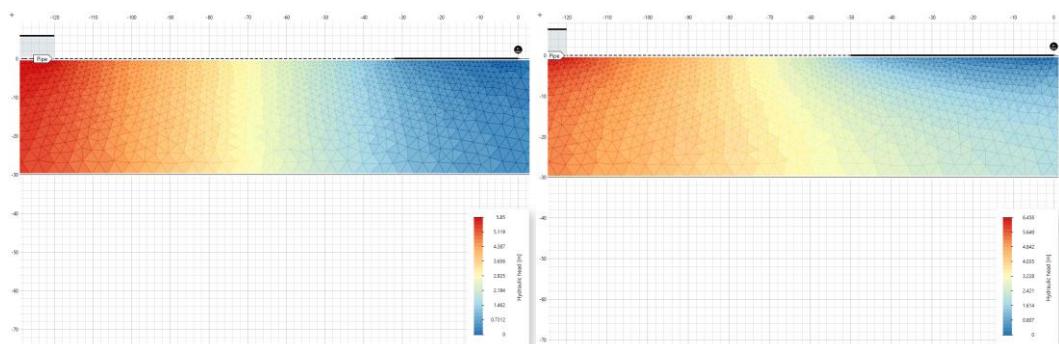
De hypotheses voor anisotropie zijn gevalideerd met een basisschematisatie, zie Figuur 3-4. De eerste hypothese gaat over het effect van anisotropie. De volgende hypotheses bekijken het effect van anisotropie in combinatie met bepaalde parameters (dikte WVP, doorlatendheid WVP, d_{70} WVP en achterland doorlatendheden). Figuur 3-11 illustreert het effect van anisotropie met de basisschematisatie en met een 60 m dik WVP. Volgens de resultaten met

D-Geo Flow, leidt anisotropie inderdaad tot een langere kritieke pipelengte en een hoger kritieke verval.



Figuur 3-11 Effect van Anisotropie op L_c/L_s (links) en H_c/L_s (rechts) voor BC1 (Vert. instr. genoemd) en BC2 (Geen vert. instr. genoemd) gebruikmakend van de basisschematisatie met een 30 m WVP (blauw) en een 60 m dik WVP (oranje).

De reden voor de langere pipes is dat anisotropie tot meer kromming in stijghoogtecontourlijnen naar de pipe leidt (zie Figuur 3-12) (effect 1 blijf bij hogere vervallen belangrijk). Verder stroomt er door anisotropie minder debiet naar de pipe (door een kleiner verticale doorlatendheid), dit leidt tot een hoger kritiek verval.

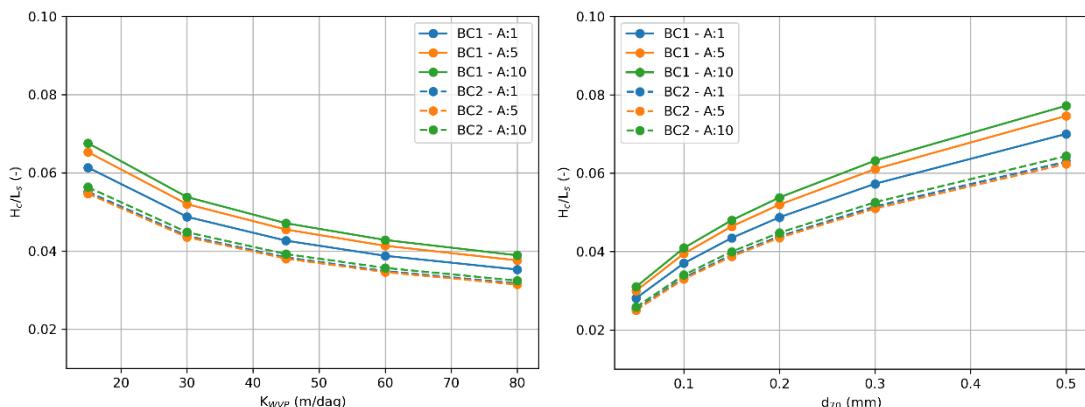


Figuur 3-12 Stijghoogtecontourlijn langs de kwelweglengte ($x = -120$ tot $x = 0\text{m}$) voor een situatie zonder anisotropie (links) en met een anisotropiefactor van 10 (rechts). Beide situatie hebben een horizontale en verticale instroom (BC1).

Het effect van anisotropie in combinatie met bepaalde parameters is in Tabel 3-2 samengevat. Bij een combinatie van toename in anisotropie en een toename in doorlatendheid of d_{70} van het WVP is de invloed op de kritieke pipelengte gedomineerd door de anisotropiefactor omdat de doorlatendheid en d_{70} van het WVP geen invloed hebben op stijghoogtecontourlijnen en dus ook niet op de kritieke pipelengte. Het kritieke verval wordt wel gedomineerd door de doorlatendheid of d_{70} van het WVP en in veel mindere mate door de anisotropiefactor, zie Figuur 3-13.

Tabel 3-2 Samenvatting van de effecten van anisotropie in combinatie met andere parameters op de kritieke pipelengtes en het kritieke verval.

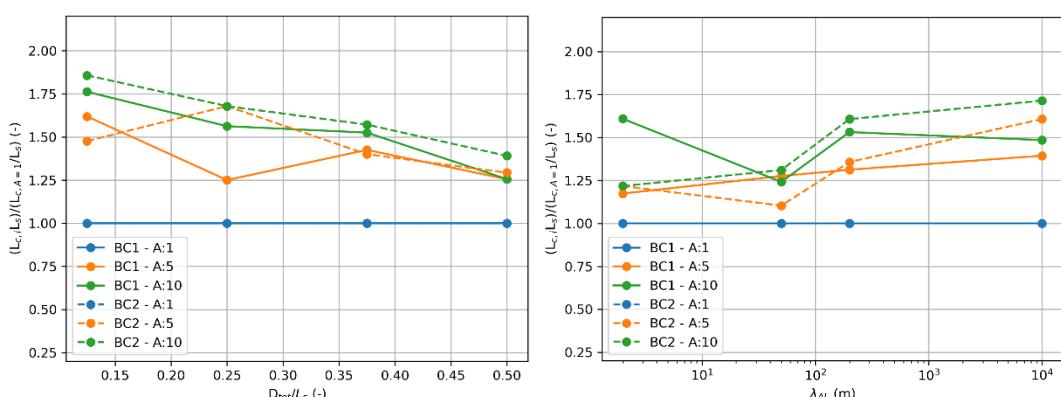
	Effect op L_c	Effect op H_c
Dikker WVP + toename in Anisotropie	Versterkend	Tegengesteld
Meer doorlatend WVP + toename in Anisotropie	Effect van anisotropie dominant	Effect van doorlatendheid dominant
Grotere d_{70} + toename in Anisotropie	Effect van anisotropie dominant	Effect van d_{70} dominant
Meer ondoorlatend achterland + toename in Anisotropie	Versterkend	Tegengesteld



Figuur 3-13 Invloed van de doorlatendheid (links) en de d_{70} (rechts) voor verschillende anisotropiefactoren op het kritieke verval.

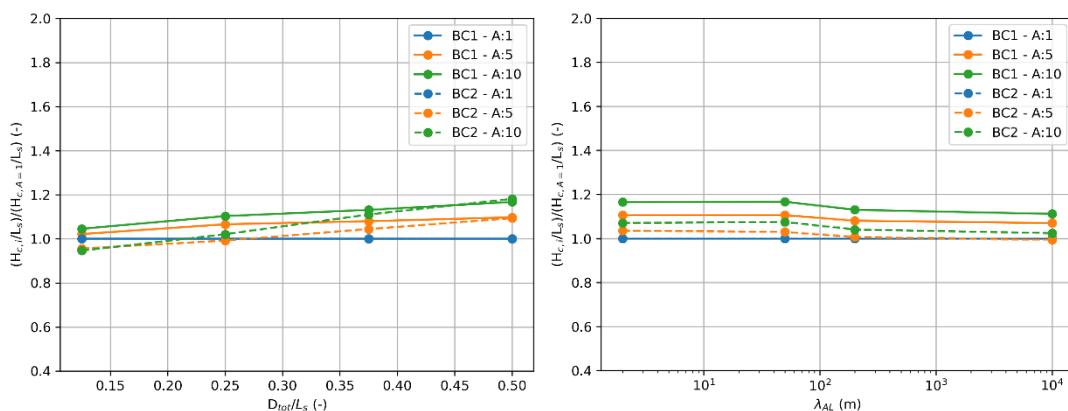
Bij verschillende diktes van het WVP of doorlatenheden van het achterland in combinatie met anisotropie is de dominante parameter op de kritieke pipelengtes en het kritieke verval niet eenvoudig te redeneren. Om dit te onderzoeken worden de kritieke pipelengtes (Figuur 3-14) en kritieke vervallen (Figuur 3-15) berekend relatief aan een basissituatie zonder anisotropie ($\frac{L_c/L_s}{L_{c,A=1}/L_s}$). Figuren links geven de invloed van verschillende diktes van het WVP en figuren rechts voor verschillende doorlatenheden van het achterland.

Uit Figuur 3-14 volgt dat anisotropie altijd tot langere pipelengtes leidt ongeacht de dikte van het WVP en de achterland leklengte. Het effect van anisotropie is sterker bij een laag D_{tot}/L_s of een ondoorlatend achterland.



Figuur 3-14 Relatieve effect van anisotropie ten opzichte van een situatie zonder anisotropie ($A=1$) op de kritieke pipelengte per dikte van het WVP (links) en per achterland leklengte (rechts).

Uit Figuur 3-15 volgt dat het effect van anisotropie op het kritieke verval verwaarloosbaar klein is bij een klein D_{tot}/L_s en groter wordt met toenemende D_{tot}/L_s . Met verschillende achterland leklengtes, is het effect van anisotropie op het kritieke verval het grootste bij een doorlatend achterland (klein leklengte).



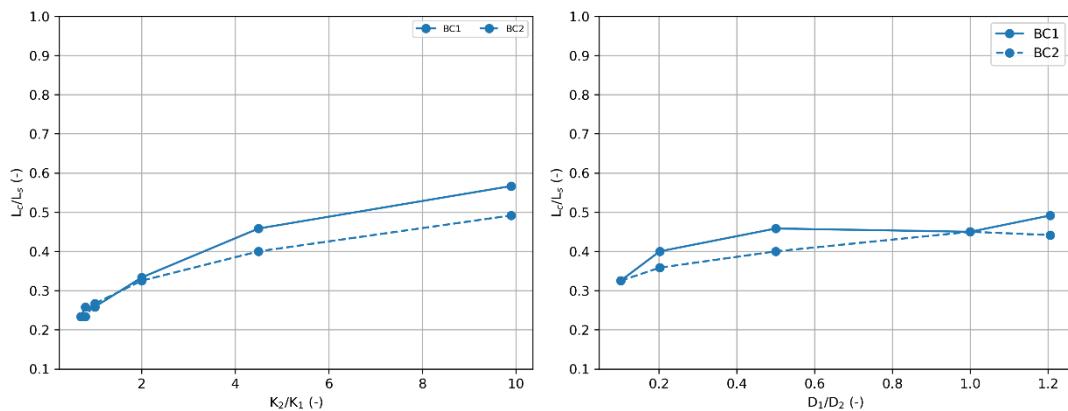
Figuur 3-15 Relatieve effect van anisotropie op het kritieke verval per dikte van het WVP (links) en per achterland leklengte (rechts).

3.3.2 Meerlaagsheid

Het effect van meerlaagsheid op de kritieke pipelengte hangt af van de verhouding tussen de doorlatendheid van de onderste laag (K_2) met die van de bovenste laag (K_1) en van de dikte verhouding tussen beide lagen (D_1/D_2).

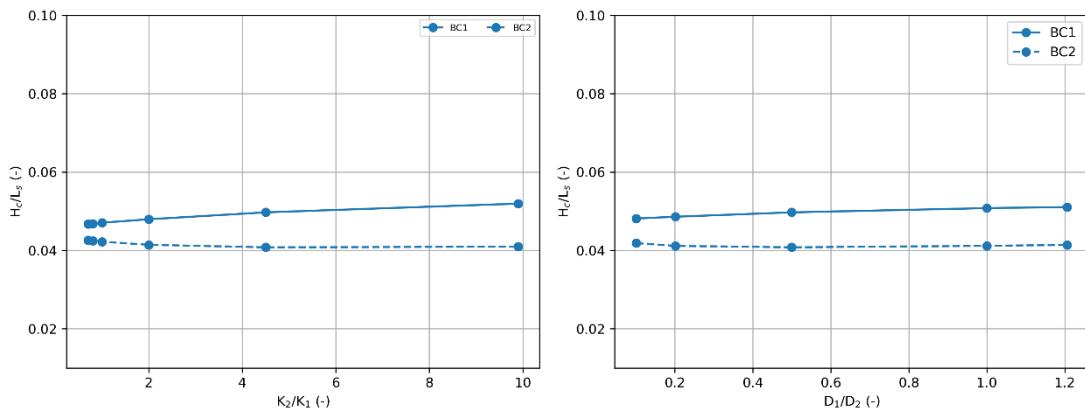
Het effect van K_2/K_1 en D_1/D_2 op de kritieke pipelengte is onderzocht door eerst K_2/K_1 te variëren, bij een constant gemiddelde doorlatendheid, een constant bovenste laag van 10 m dik en onderste laag van 20 m dik. Dan wordt D_1/D_2 gevarieerd met een constant transmissiviteit ($k_{egm} \cdot D$), een K_1 van 10 m/dag en K_2 van 45 m/dag. Deze analyse is uitgevoerd met D-Geo Flow sommen en de geometrie uit Figuur 3-5.

Figuur 3-16 geeft de invloed van K_2/K_1 (links) en D_1/D_2 (rechts) op de kritieke pipelengte. Hier lijkt K_2/K_1 meer invloed te hebben dan D_1/D_2 . Echter, dit geldt voor D_1/D_2 bij een constant K_2/K_1 van 4,5. Mogelijk heeft D_1/D_2 meer invloed bij een hogere K_2/K_1 . Uit Figuur 3-16 geldt dat meerlaagsheid (groter K_2/K_1 en/of groter D_1/D_2) tot langere kritieke pipelengtes leidt.



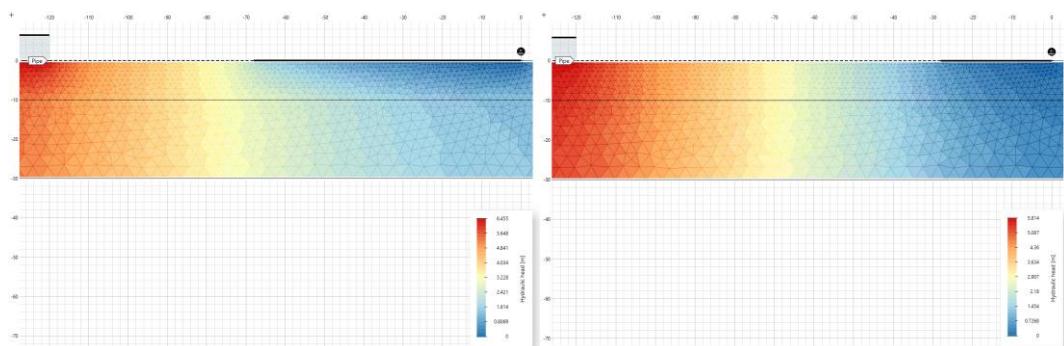
Figuur 3-16 Effect van K_2/K_1 (links) en D_1/D_2 (rechts) op L_c/L_s voor BC1 en BC2 gebruikmakend van de basisschematisatie in Figuur 3-5.

Figuur 3-17 geeft het effect van K_2/K_1 en D_1/D_2 op het kritieke verval. Hieruit volgt dat D_1/D_2 een verwaarloosbaar kleine invloed heeft op het kritieke verval en dat K_2/K_1 een iets groter invloed heeft op het kritieke verval met BC1. Hier ook heeft D_1/D_2 mogelijk meer invloed bij een hogere K_2/K_1 .



Figuur 3-17 Effect van K_2/K_1 (links) en D_1/D_2 (rechts) op H_c/L_s voor BC1 en BC2 gebruikmakend van de basisschematisatie in Figuur 3-5.

Een meerlaags WVP leidt tot langere kritieke pipelengtes door meer kromming van de stijghoogtecontourlijnen naar de pipe toe, zie Figuur 3-18.



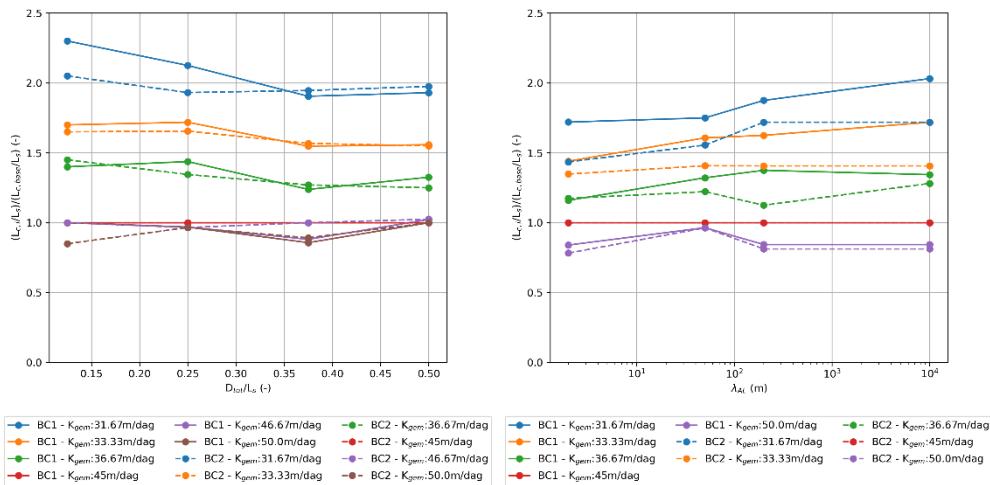
Figuur 3-18 Stijghoogte in een tweelaags WVP met K_2/K_1 van 9,9 (links) en 0,7 mm (rechts) met $D_1/D_2=0,5$ en een totale dikte van 30 m, een 120 m ondoorlatend voorland, een 200 m ondoorlatend achterland en een BC1.

Het effect van meerlaagsheid in combinaties met andere verandering in parameters is in Tabel 3-3 samengevat. Dezelfde conclusies als voor anisotropie kunnen worden gezien omdat meerlaagsheid en anisotropie in dezelfde richting werken op de kritieke pipelengte en het kritieke verval. Dit komt omdat ze beide voor meer kromming zorgen in de stijghoogtecontouren. Uit de tabel volgt dat bij een verandering in d_{70} in combinatie met meerlaagsheid de kritieke pipelengte bepaald wordt door meerlaagsheid en het kritieke verval door d_{70} . Voor de dikte van het WVP en de doorlatendheid van het achterland is dat iets ingewikkelder.

Tabel 3-3 Samenvatting van de effecten van meerlaagsheid in combinatie met andere parameters op de kritieke pipelengtes en het kritieke verval.

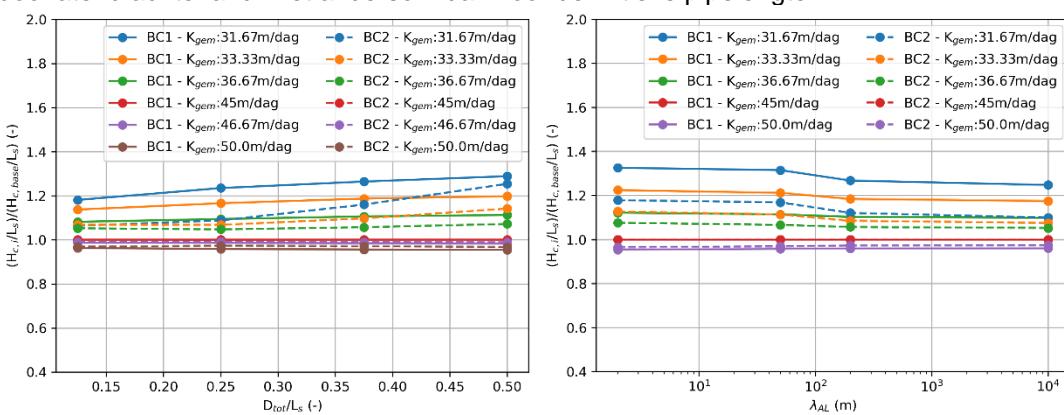
	Effect op L_c	Effect op H_c
Dikker WVP + Meerlaagsheid (toename in K_2/K_1)	Versterkend	Tegengesteld
Grottere d_{70} + Meerlaagsheid (toename in K_2/K_1)	Effect van meerlaagsheid dominant	Effect van d_{70} dominant
Meer ondoorlatend achterland + Meerlaagsheid (toename in K_2/K_1)	Versterkend	Tegengesteld

Het effect van meerlaagsheid in combinatie met dikte van het WVP en doorlatendheid van het achterland op de kritieke pipelengte is in Figuur 3-18 weergegeven. In deze figuur is het relatieve effect van meerlaagsheid berekend bij verschillende diktes en doorlatendheden ($\frac{L_c/L_s}{L_c K_2/K_1=1 / L_s}$). Hieruit volgt dat meerlaagsheid een groter effect heeft bij een laag D_{tot}/L_s en een ondoorlatend achterland.



Figuur 3-19 Relatief effect van meerlaagsheid per totale dikte van het WVP.

Voor het kritieke verval geeft Figuur 3-20 het relatieve effect van meerlaagsheid. Hieruit volgt dat het effect van meerlaagsheid op het kritieke verval het grootste is bij groter D_{tot}/L_s en doorlatend achterland. Net andersom dan voor de kritieke pipelengte.



Figuur 3-20 Relatief effect van meerlaagsheid per leklengte van het achterland.

3.3.3

Verschil tussen BC1 en BC2

De instroom randvoorwaarde BC1 heeft verticale en horizontale instroom waardoor deze meer krommende stroombanen bevat dan BC2 met alleen horizontale instroom. Deze kromming veroorzaakt instroomweerstand die radiale instroomweerstand wordt genoemd. Door deze weerstand wordt een hoger kritiek verval verwacht met BC1 dan met BC2. Dit is ook terug te zien in de Figuren (bijvoorbeeld Figuur 3-17).

Het effect van radiale weerstand is onderzocht in Rosenbrand et al (2022). Hieruit volgt dat de instroomweerstand belangrijker wordt in situaties waar D/L_s richting 1 gaat en bij een doorlatend voorland met een korte leklengte.

De radiale weerstand veroorzaakt kromming in de stroomlijnen waardoor langere kritieke pipelengtes worden verwacht met BC1 dan met BC2. Dit is ook redelijk terug te zien in de figuren (bijvoorbeeld Figuur 3-16) maar op een minder consistente mate dan met het kritieke verval. De reden hiervoor is dat de pipelengte een erg gevoelige parameter is. Een andere mogelijk reden is dat de berekeningen met de nieuwe versie van D-Geo Flow zijn gemaakt die gevoelig is voor pipelengtes berekeningen⁴. Het valt buiten de scope van dit onderzoek om de exacte oorzaak van deze afwijkingen te achterhalen.

Doordat anisotropie en meerlaagsheid voor kromming van de contourlijnen zorgen, zoals extra radiale weerstand, is de verwachting dat het effect van anisotropie en meerlaagsheid versterkt wordt met BC1. Hun effect zal daardoor groter zijn met deze type instroom randvoorwaarde.

3.4

Hoofdbevindingen

De curves voor de bepaling van de pipelengte die in Rosenbrand et al. (2022) zijn afgeleid voor een isotroop homogeen WVP. Anisotropie en meerlaagsheid leiden tot een langere pipelengte bij kritiek verval. Het is niet mogelijk om een generieke correctiefactor voor anisotropie en meerlaagsheid toe te passen omdat hun effecten op het kritieke verval en de kritieke pipelengte afhankelijk zijn van de geometrie en de ondergrondparameters die locatie specifiek zijn.

Het effect van anisotropie en meerlaagsheid op de kritieke pipelengte wordt naar verwachting het grootste bij dijkvakken met een dun watervoerend pakket (WVP), een ondoorlatend achterland en met radiaal weerstand (instroom die zowel horizontaal en verticaal binnenkomt), zie Figuur 3-3. Met deze parameters kunnen de kritieke pipelengtes tot een factor 2,0 en 2,3 hoger zijn dan afgeleid met de curves uit het concept stappenplan voor respectievelijk anisotropie en meerlaagsheid.

Verder is naar voren gekomen dat anisotropie en meerlaagsheid de pipelengte en het kritieke verval anders beïnvloeden. Namelijk, het effect van anisotropie en meerlaagsheid op kritiek verval kan klein zijn, terwijl hun effect op de kritieke pipelengte wel groot kan zijn.

Dit gebeurt met name bij dijkvakken met een dun WVP, waar de invloed van anisotropie en meerlaagsheid op het kritieke verval klein is terwijl er wel langere kritieke pipes zullen ontstaan. De onderbouwing van deze conclusies wordt uitgebreider uitgelegd in Bijlage A.

⁴ DgFlow (de prototype van de oude D-Geo Flow) en D-Geo Flow 2022 kunnen afwijkend kritieke pipelengtes berekenen. De nieuwe D-Geo Flow 2022 is gebouwd in KRATOS, met in plaats van lijnelementen voor de pipe, rechthoekige elementen met zeer kleine dikte. Deze veranderingen hebben mogelijk tot numerieke afwijkingen geleid, waardoor deze verandering in kritieke pipelengte toont. De exacte reden hiervoor wordt nog onderzocht.

4 Verificatie pipelengte bij waterstand lager dan kritiek verval

4.1 Doel van het deelonderzoek en aanpak

Dit deelonderzoek heeft als doel om de pipelengtes onder kritiek verval (L) berekend met het 2D numerieke model D-Geo Flow te valideren voor piping met 2D grondwaterstroming en de afwijking in kaart te brengen bij 3D grondwaterstroming.

Dit wordt gedaan door drie proevenseries (één 2D proef en twee 3D proeven) te modelleren in D-Geo Flow en de pipelengtes van de proeven (L_{exp}) en de numerieke modellen te vergelijken (L_{num}). De vergelijking wordt met genormaliseerde en absolute pipelengtes gemaakt. Bij de genormaliseerde pipelengte wordt L/L_c ⁵ berekend, met L_c de kritieke pipelengte. De genormaliseerde pipelengte geeft een indicatie van hoe goed de vorm van de pipegroei gemodelleerd wordt. Verder wordt ook gekeken naar absolute waarden (L), dit is vooral interessant voor de 3D grondwaterstroming om te verifiëren hoe ver de 2D numerieke modellen afwijken van de actuele pipelengte.

4.2 Validatie pipelengte onder kritiek verval bij 2D proeven

4.2.1 Eigenschappen van de 2D proeven

De validatie voor 2D proeven zijn op basis van Silvis (1991) gemaakt. Drie proeven (T2, T3 en T4) zijn dan grootschalig uitgevoerd in de Delta Flume. De proeven zijn opgebouwd met een 5 m breed en 6 m dik WVP, een sloot als uittredepunt gebouwd over de hele breedte en met een variatie in kwelweglengte van 9 m (T2), 12 m (T3) en 6 m (T4). Uit de resultaten van deze proeven bleek dat er over de breedte van het WVP verscheidene pipes vormden waardoor werd geconcludeerd dat de grondwaterstroming redelijk 2D was.

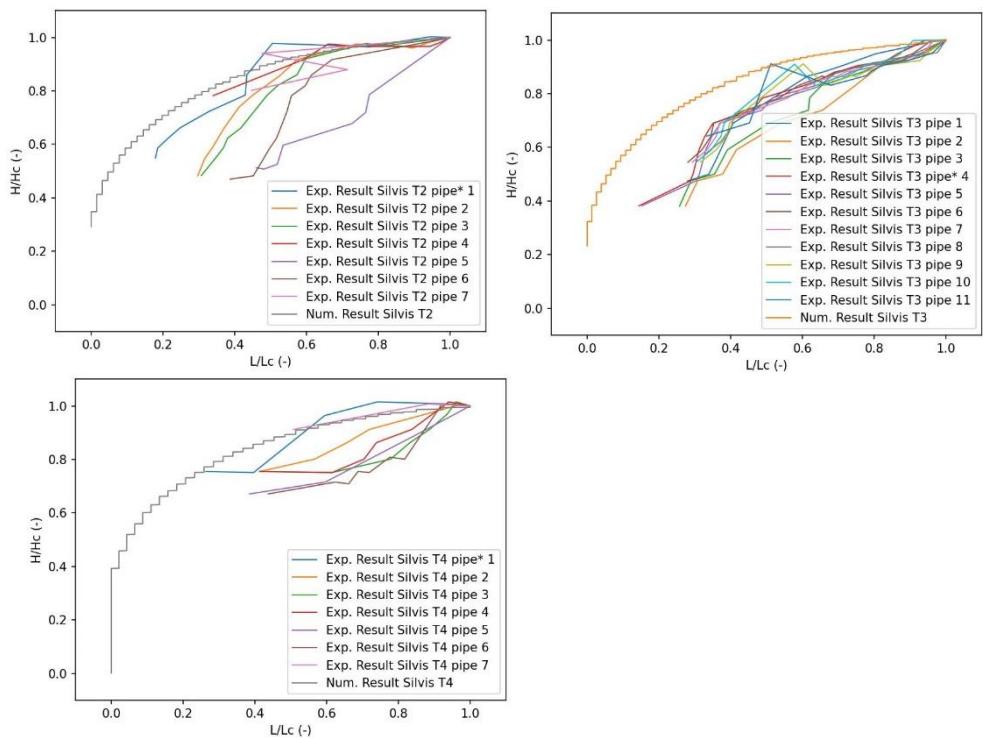
Voor de proeven van Silvis (1991) is Marsdiepzand gebruikt voor alle proeven. De doorlatendheid hiervan is $5,1 \cdot 10^{-4}$ m/s met een d_{70} van 0,247 mm. De grondwatertemperatuur varieerde tijdens de drie proeven: 8,5° voor T2, 6,3° voor T3 (geïnterpoleerd) en 4,0° voor T4. De numerieke modellen in D-Geo Flow zijn gebouwd met dezelfde 2D geometrie en grondigenschappen. Voor meer informatie over de model parameters zie Bijlage B.

4.2.2 Resultaten van de vergelijking tussen experimentele en numerieke pipelengtes

Figuur 4-1 weertelt per proef de genormaliseerd numerieke en experimentele pipelengtes (L/L_c) bij de genormaliseerde vervallen (H/H_c). De niet genormaliseerd grafieken (L ten opzicht van H) zijn in Bijlage B te vinden. In de grafieken zijn per proef meerdere pipes getekend, deze representeren alle pipes die tijdens de proeven zijn ontstaan. Deze pipes hebben een grote spreiding aan pipelengtes onder en bij kritiek verval.

Uit deze grafieken volgt dat de numerieke pipelengtes voor T2 en T4 redelijk goed de vorm van de langste experimentele pipe volgt. T3 geeft de minste spreiding in vorm van de pipegroei tijdens de proef maar geeft de meeste afwijking met de numerieke voorspelling.

⁵ In dit hoofdstuk wordt L als symbool gebruikt voor de pipelengte bij een bepaalde verval in plaats van L_{pipe}

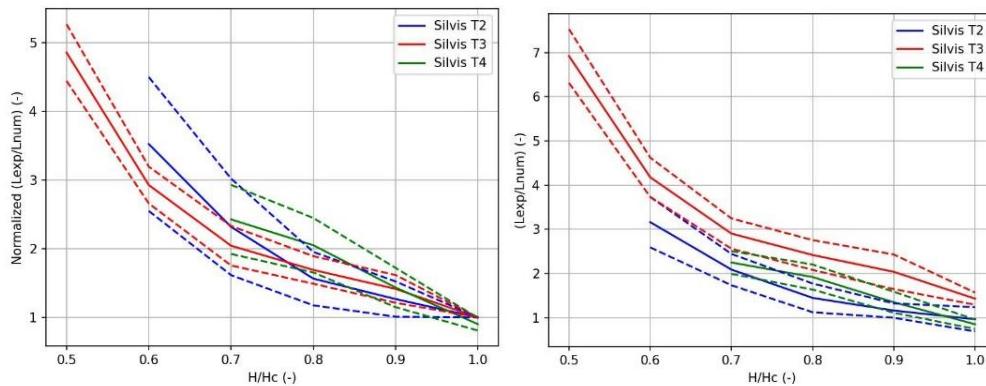


Figuur 4-1 Dimensieloos verval en pipelengte van de Silvis T2 (links boven), T3 (rechts boven) en T4 (links onder) proeven.

Om een beter inzicht te krijgen in hoe goed de numerieke voorspelling is per proef geeft Figuur 4-2 de verhouding tussen experimentele pipelengtes en de numerieke pipelengtes ten opzichte van H/H_c . Links genormaliseerd ($[L_{exp}/L_{c,exp}]/[L_{num}/L_{c,num}]$) en rechts met de absolute waarde (L_{exp}/L_{num}). Dit wordt berekend met de gemiddelde (doorgetrokken lijn) en standaarddeviatie (gebroken lijnen) van de pipelengtes die tijdens één proef zijn ontstaan. De proeven zijn per kleur weergegeven.

Het is duidelijk zichtbaar dat hoe lager het verval ten opzichte van het kritieke verval hoe hoger de afwijking tussen de experimentele en numerieke pipelengte. Bij een H/H_c van 0,5 zien we gemiddeld een factor 5 hogere pipelengte voor het experiment dan voor de simulatie. Bij een toenemende H/H_c zien we dat deze factor lager wordt en naar 1 gaat bij kritiek verval. Dit komt door de normalisatie en betekent niet dat de pipelengtes dan gelijk zijn.

In de niet-genormaliseerde variant is de factor van het daadwerkelijke verschil in pipelengte weergegeven. Hier zien we dezelfde trend alleen is het verschil dat de verschilfactor voor proef T3 een stuk hoger ligt dan voor proeven T2 en T4.



Figuur 4-2 Gemiddelde verhouding plus standaarddeviatie tussen de genormaliseerde (links) en absolute (rechts) experimentele en numerieke pipelengte uitgezet tegen de verhouding tussen verval en kritiek verval.

4.3 Validatie pipelengte onder kritiek verval bij 3D proeven

4.3.1 Eigenschappen van de 3D proeven

De vergelijking van pipelengtes in D-Geo Flow voor 3D proeven zijn op basis van experimenten beschreven door Hanses (1985) en Pol (2022) gemaakt. Deze proeven zijn kleinschalig en hebben een cirkelvormig uittredepunt in plaats van een sloot. Tijdens de Hanses en de Pol proeven is steeds maar één pipe per proef gevormd. Hierdoor werd geconcludeerd dat de grondwaterstroming redelijk 3D was.

Hances bevat 3 sets proeven (set 2, 5 en 7 genoemd) die respectievelijk 5, 2 en 2 keer zijn herhaald. De dikte van het WVP en de kwelweglengte zijn voor de sets: 0,2 m en 0,72 m voor set 2; 0,083 m en 0,66 voor set 5; en 0,33 en 2,64 voor set 7. De proeven van Hanses (1985) zijn met zand uitgevoerd die een doorlatendheid tussen $3 \cdot 10^{-4}$ m/s en $5,1 \cdot 10^{-4}$ m/s heeft. De d_{70} is 0,355 mm en de grondwatertemperatuur is niet gemeten waardoor de normale laboratorium grondwatertemperatuur van 20° is aangenomen.

De proeven in Pol (2022) zijn met dezelfde geometrie uitgevoerd maar met verschillende zandeigenschappen. Het WVP is 0,1 m dik en de kwelweglengte is 0,352 m. Voor dit onderzoek worden de proeven met Baskarp en een fijner zand (FS35) gebruikt omdat deze herhaald zijn. De proeven met Baskarp zijn 10 keer herhaald en met FS35 6 keren herhaald. Het toegepaste Baskarp zand (B25) heeft een doorlatendheid tussen $2,5 \cdot 10^{-4}$ en $3,7 \cdot 10^{-4}$ m/s met een d_{70} van 0,260 mm. Het toegepaste FS35 heeft een doorlatendheid tussen $12,0 \cdot 10^{-4}$ en $9,0 \cdot 10^{-4}$ m/s met een d_{70} van 0,462 mm. Alle proeven hebben een grondwatertemperatuur van 20°.

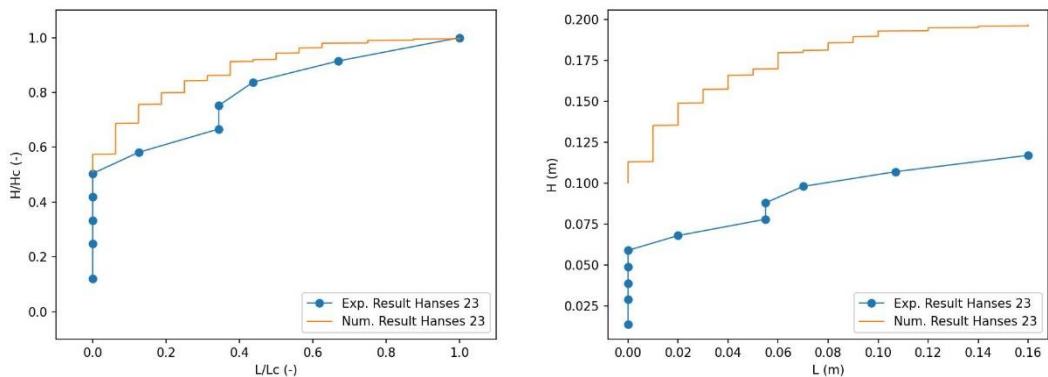
De numerieke modellen in D-Geo Flow zijn gebouwd met dezelfde 2D geometrie en grondeigenschappen. Voor meer informatie over de model parameters zie Bijlage B.

4.3.2 Resultaten van de vergelijking tussen experimentele en numerieke pipelengtes

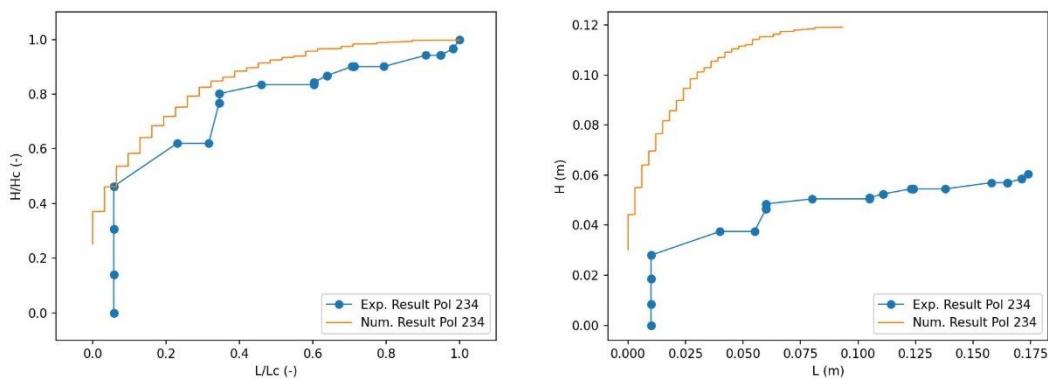
In Bijlage B zijn de resultaten van de vergelijking tussen de experimentele en numerieke pipelengtes voor alle proeven en herhalingsproeven weergegeven. Figuur 4-3 geeft deze vergelijking alleen weer voor proef 23 van Hanses (1985), Figuur 4-4 voor proef 234 van Pol met Baskarp zand en Figuur 4-5 voor proef 240 van Pol met FS35. De figuren links zijn met genormaliseerde getallen (H/H_c en L/L_c) en rechts van de absolute waarden (H en L).

In de linkere grafieken is te zien dat de vorm van pipegroei redelijk goed wordt geschat met het 2D numerieke model. Echter is er een consistente onderschatting van de pipelengte bij

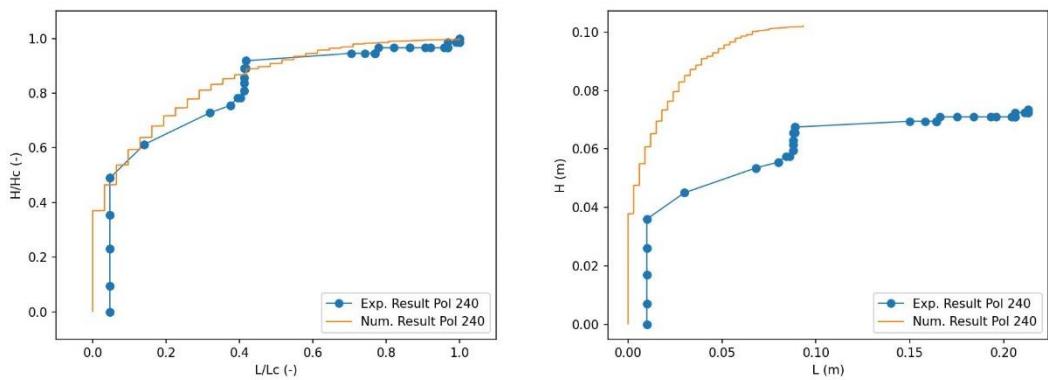
optredende verval door het numerieke model. De absolute waarde van de pipelengtes (figuren rechts) bij een gegeven verval zijn heel anders voor experimentele 3D proeven en 2D numerieke model. De experimenten geven altijd een lager kritiek verval dan het numerieke model. Met FS35 wordt het kritieke verval een stuk minder overschat. De kritieke pipelengte wordt onder- of overschat, maar over het algemeen komt de genormaliseerde curve van pipelengte goed overeen voor experiment en numeriek model.



Figuur 4-3 Resultaten Hances 23 (set 2 herhalingsproeven nummer 3) van de dimensieloos verval versus pipelengte (links) en de absolute verval versus pipelengte (rechts).



Figuur 4-4 Resultaten Pol 234 (met baskarp zand) van de dimensieloos verval versus pipelengte (links) en de absolute verval versus pipelengte (rechts).

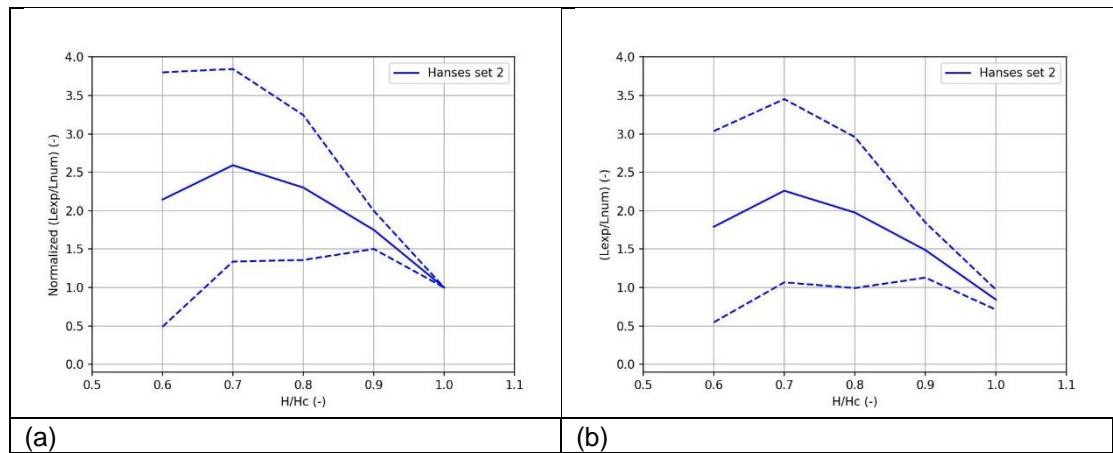


Figuur 4-5 Resultaten Pol 240 (met FS35) van de dimensieloos verval versus pipelengte (links) en de absolute verval versus pipelengte (rechts).

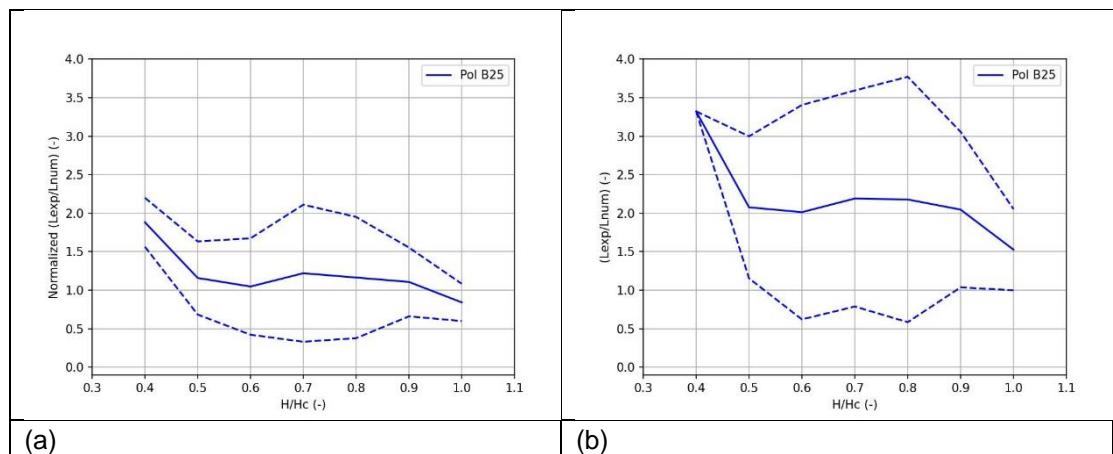
Om een beter inzicht te krijgen in hoe goed de numerieke voorspellingen zijn, is ook voor de 3D proeven gekeken naar de verhouding tussen links de genormaliseerde afwijking in pipelengtes ($[L_{exp}/L_{c,exp}]/[L_{num}/L_{c,num}]$ versus H/H_c) en rechts met de absolute waarden (L_{exp}/L_{num} versus H/H_c). Dit is gedaan voor de gemiddelde (doorgetrokken lijn) en de standaard deviaties (gebroken lijnen) in pipelengtes van de herhalingsproeven. Dit geeft een idee over hoe goed de pipegroei gemodelleerd wordt.

Figuur 4-6 weergegeven de resultaten voor set 2 van Hanses (1985). Set 5 en 7 hadden alleen 2 herhalingsproeven en konden daardoor niet gebruikt worden bij deze analyse. Figuur 4-7 bevat de resultaten van Pol (2022) met Baskarp zand en Figuur 4-8 met FS35.

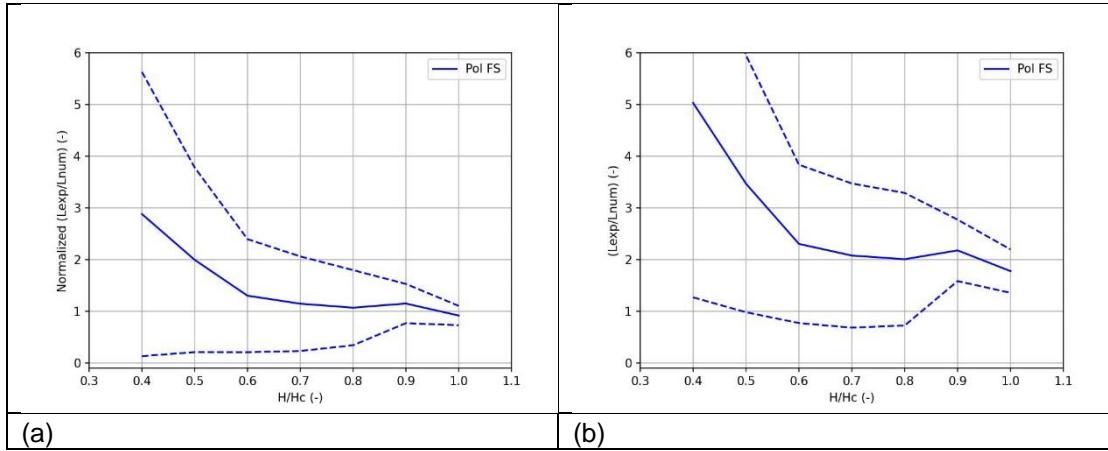
De set 2 van Hanses (1985) en de proeven van Pol (2022) met FS35 geven dezelfde patroon: het verschil tussen gemodelleerd en gemeten pipelengte wordt grotere naarmate het verval kleiner is. Bij de proeven van Pol (2022) met Baskarp zand lijkt de onzekerheid klein te zijn bij lage vervallen en bij het kritieke verval. Verder voor deze proeven geldt dat de numerieke genormaliseerde pipelengtes goed de gemiddelde pipelengtes van alle herhalingsproef voorspellen bij een verval groter dan 60% van het kritieke verval.



Figuur 4-6 (a) Verhouding tussen genormaliseerde experimentele en numeriek berekende pipelengte (b) Ongeschaalde experimentele tegenover numerieke pipelengte. De doorgetrokken lijn is de gemiddelde pipelengte en de gestippelde lijnen de standaarddeviaties.



Figuur 4-7 Verhouding tussen genormaliseerde experimentele en numeriek berekende pipelengte (b) Ongeschaalde experimentele tegenover numerieke pipelengte. De doorgetrokken lijn is de gemiddelde pipelengte en de gestippelde lijnen de standaarddeviaties.



Figuur 4-8 Verhouding tussen genormaliseerde experimentele en numeriek berekende pipelengte (b)
Ongeschaalde experimentele tegenover numerieke pipelengte.

4.4 Hoofdbevinding

Uit dit onderzoek blijkt dat de onzekerheid van de pipelengte berekend met D-Geo Flow groter wordt bij vervallen kleiner dan het kritieke verval. Verder geldt dat D-Geo Flow steeds een onderschatting berekent van pipelengtes onder kritiek verval ($L_{num} < L_{exp}$) bij 2D en 3D situaties.

Uit het onderzoek is ook naar voren gekomen dat het kritieke verval bij experimenten met een 2D grondwaterstroming redelijk goed wordt geschat met het numerieke model terwijl dit niet het geval is bij een 3D situatie. Zoals al bekend was, geeft het numerieke model steeds een ongeveer 2 keer hogere kritieke verval dan gevonden is in het 3D experiment. De kritieke pipelengtes van 2D en 3D situaties zijn soms onder- of overschat bij het numerieke model. De onderbouwing van deze conclusies wordt uitgebreider uitgelegd in Bijlage B.

5 Aanscherping veiligheidsbenadering pipelengte

5.1 Aanleiding, doel en aanpak

5.1.1 Aanleiding

Het meenemen van voorlanden in een Sellmeijer berekening kan leiden tot een aanzienlijk hoger kritiek verval (zie bijvoorbeeld Rosenbrand et al. (2022)) dan wanneer voorlanden niet wordt meegenomen. Echter, als de pipe onder de dijkbasis doorgroeit, en dus onder het voorland komt, is er kans op kortsluiting als er een gat in het voorland zit. In dat geval groeit de pipe niet meer onder het voorland maar maakt een directe verbinding met het buitenwater.

Om dit risico in te schatten en uit te sluiten is het van belang een inschatting te hebben van de pipelengte bij verschillende vervallen. In Rosenbrand et al. (2022) is een eenvoudige methode opgezet om de pipelengte als functie van de buitenwaterstand te bepalen.

Op basis van deze methode, is in Kanning (2021A) gekeken naar welke semi-probabilistische verificaties nodig zijn om ervoor te zorgen dat de kans dat de pipe onder het voorland komt (en dus niet onder de dijkbasis doorgroeit), voldoende klein is. Daarin werd gevonden dat er geen situaties zijn gevonden waarin de kans op doorgroeien van de pipe onder het voorland een significante bijdrage levert aan de totale piping faalkans, voornamelijk omdat de pipe pas bij relatief hoge waterstanden begint te groeien. Dit was op basis van een beperkt aantal case, waaruit de aanbeveling volgde:

“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”.

5.1.2 Doel

Dit deelonderzoek onderbouwd de conclusie van Kanning (2021A) met een case studie uit de praktijk en drie gevoeligheidsanalyses. De conclusie van Kanning (2021A) is dat er geen situaties zijn gevonden waarin de kans op doorgroeien van de pipe onder het voorland een significante bijdrage levert aan de totale piping faalkans.

5.1.3 Aanpak

Het onderzoek bevat twee stappen. De eerste stap is om probabilistische analyses uit te voeren waarbij wordt gekeken naar de kans op falen door piping (overschrijden van het kritieke verval), de kans op falen door kortsluiting (pipegroei tot onder het voorland) en de gecombineerde kans op falen door piping of kortsluiting, zie ook Figuur 5-1. Hiermee kan een inschatting worden gemaakt van hoeveel falen door kortsluiting bijdraagt aan de totale faalkans.

Kortsluiting wordt in dit rapport gelijk genomen aan de kans op het doorgroeien van de pipe onder de dijkbasis door tot onder het voorland. Dit impliceert een kans van 1 dat een pipe die onder de dijkbasis doorgroeit resulteert in kortsluiting tussen zandlaag en rivier door een gat in het voorland. Dit is een conservatieve aanname.

De tweede stap is om, op basis van de probabilistische sommen, de parametercombinaties te vinden waarbij kortsluiting een significante bijdrage heeft aan de totale faalkans. Hier zijn twee mogelijkheden:

- Wanneer gevallen gevonden worden waar kortsluiting een significant bijdraagt heeft aan totale pipingkans, worden semi-probabilistische verificaties gezocht die deze uit kunnen sluiten. De semi-probabilistische verificaties kunnen variëren in de gekozen ontwerpwaterstand (WBN of WBN maal de schadefactor) en een eventuele partiële

- veiligheidsfactor op de berekende pipelengte om zo veel mogelijk aan te sluiten bij het huidige WBI.
- Wanneer geen gevallen gevonden worden, op basis van de probabilistische berekeningen, waar kortsluiting een significant bijdrage heeft aan de totale faalkans, zijn geen semi-probabilistische verificaties nodig.

Deze twee stappen worden uitgevoerd met data van het dijkversterkingsproject Neder Betuwe (NeBe) en op basis van drie gevoelighedsanalyses. In de gevoelighedsanalyses worden het effecten van: (1) minder onzekerheid in de d_{70} en k , (2) meer onzekerheid in m_{pl} (Hoofdstuk 3 laat zien dat de onzekerheid in pipelengte groter is dan eerst gedacht), en (3) dikdere dikttes van het WVP geanalyseerd. De data van NeBe bestaat uit 1888 uittredepunten en bevat daardoor een grote range aan parametercombinaties die representatief zijn voor rivierengebieden (zie Bijlage C voor meer informatie).

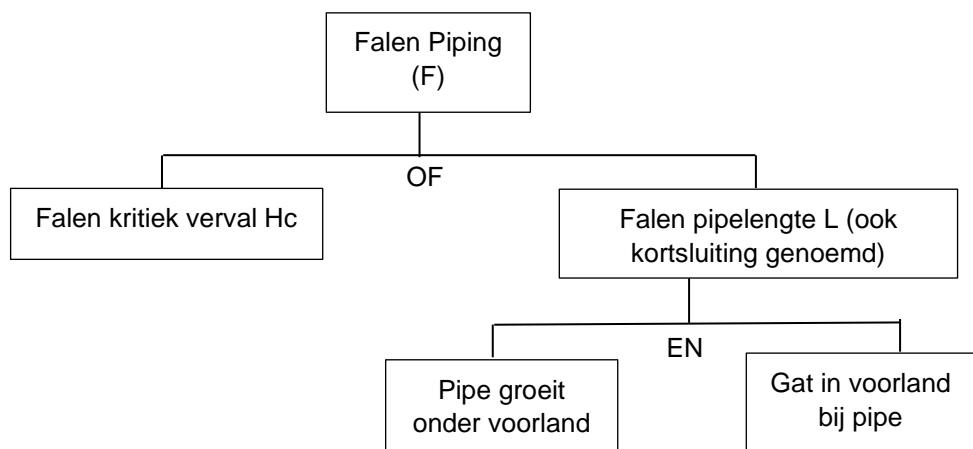
De belangrijkste uitkomsten en aanbevelingen worden hieronder samengevat, de verdere onderbouwing wordt gegeven in Bijlage C.

5.2 Methode: Grenstoestanden en semi-probabilistische verificaties

5.2.1 Grenstoestandsfuncties

Wanneer het voorland meegenomen wordt in de berekening moet een aanvullende gebeurtenis worden beoordeeld. Namelijk het doorgroeien van de pipe tot onder het voorland wat tot kortsluiting kan leiden. Je kunt dus falen door piping (topgebeurtenis) krijgen door ofwel het overschrijden van het kritieke pipingverval H_c (faalmechanisme dat tot nu toe meegenomen wordt), ofwel door falen door de pipelengte L (een extra faalmechanisme door het meenemen van het hele voorland), zie onderstaande Figuur 5-1.

Het kritieke verval H_c is hierbij het verval waarbij doorgaande terugschrijdende erosie optreedt. Falen door de pipelengte kan optreden als de pipe tot onder het voorland groeit (en dus voorbij de dijkbasis) en er een gat in het voorland zit waar de pipe heen groeit. Zoals eerder opgemerkt wordt in dit rapport niet ingegaan op de kans van een gat in het voorland en wordt falen veronderstelt als de pipe tot onder het voorland groeit. Hierbij wordt opgemerkt dat pipegroei sterk gecorreleerd is aan het optredende verval. Het faalmechanisme piping is hiermee opgebouwd met een OF-poort en doordat de componenten sterk gecorreleerd zijn is de bovengrens van de totale pipingfaalkans gelijk is aan de maximum faalkans tussen H_c en L .



Figuur 5-1 Foutenboom falen piping door overschrijden H_c en door doorgroeien pipe onder voorland.

De grenstoestandsfuncties van beide mechanismes (Z_p voor falen kritiek verval en Z_{pl} voor falen pipelengte) staan in onderstaande vergelijkingen. Deze zijn geïmplementeerd in de Probabilistic Toolkit (PTK) om zo op basis van de *First Order Reliability Method* (FORM) voor de 1888 uittredepunten de faalkans te bepalen. Ook is de gecombineerde kans van falen door Z_p of Z_{pl} in de PTK geïmplementeerd als serie-systeem (OF) via directional sampling, met inachtneming van de correlaties. Naast onderstaande grenstoestandsfuncties zijn ook grenstoestandsfuncties voor opbarsten en heave meegenomen (zie bijvoorbeeld Kanning, 2021, voor een beschrijving van hoe dit gebeurt in de uittredepuntenmethode zoals gebruikt bij NeBe), deze zijn echter zelden maatgevend ten opzichte van piping en dus niet verder uitgewerkt.

$$Z_p = m_p H_c - (h_w - h_{exit} - r_c d_{dekklaag}) \quad \text{Vergelijking 2.1}$$

Met:

- Z_p (m): Grenstoestand functie voor het kritieke verval.
- m_p (-): Modelfactor.
- h_w (m): Rivierwaterstand.
- h_{exit} (m): Polderwaterstand ter plaatse van de uitstroomopening.
- r_c (-): Reductiefactor voor de weerstand in de deklaag bij de uittredepunt (op dit moment gebruikelijk $r_c = 0,3$).

$$Z_{pl} = L_{BUT} - m_{pl} L_{pipe} \quad \text{Vergelijking 2.2}$$

Met:

- Z_{pl} (m): Grenstoestand functie voor de pipelengte.
- L_{BUT} (m): Afstand tussen uittredepunt en buitenteen, aangezien falen is gedefinieerd als het groeien van de pipe tot aan het voorland.
- L_{pipe} (m): De berekende pipelengte.
- m_{pl} (-): Modelonzekerheid pipelengte (voor nu: gemiddelde 1, variatiecoëfficiënt = 0,3; op basis van enkele proeven in Rosenbrand et al. (2022)).

Hierin is de optredende pipelengte L_{pipe} bepaald op basis van curves afgeleid in Rosenbrand et al. (2022), zie ook Bijlage C. De modelonzekerheid pipelengte m_{pl} is bepaald door een vergelijking te maken tussen gemeten pipelengte in proeven en voorspelde pipelengte op basis van het hier gebruikte model, beide bij kritiek verval, zie Rosenbrand et al., 2022. Hierdoor neemt deze factor alleen de onzekerheid van de pipelengte bij kritiek verval mee en wordt aangenomen dat die ook toepasbaar is bij vervallen lager dan kritiek verval. In Hoofdstuk 3.4 wordt geconcludeerd dat deze aanname fout is waardoor een gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd met een groter standard afwijking voor m_{pl} .

5.2.2

Semi-probabilistische verificaties

De semi-probabilistische verificaties die bij het overschrijden van het kritieke verval conform vergelijking 2.1 horen, zijn volgens het WBI2017 uitgevoerd met de formule van Sellmeijer en het bijbehorende veiligheidsformat (SH, 2017), deze zijn hier niet verder uitgewerkt. Indien een semi-probabilistische verificatie voor de pipelengte benodigd is zou de verificaties als volgt worden voorzien:

$$L_{aanw,d} > L_{pipe,rep} \cdot \gamma_{PL} \quad \text{Vergelijking 2.3}$$

Waarin:

- $L_{aanw,d}$ de aanwezig dijkbasis (in dit geval, in geval het voorland aantoonbaar geen gaten bevat kan ook het voorland meegenomen).

- $L_{pipe,rep}$ de representatieve waarde van de pipelengte, berekend bij WBN (hypothese) met het stappenplan uit Rosenbrand et al. (2022) en met voor pipelengte veilige karakteristieke waarden (van bijvoorbeeld doorlatendheden) als invoer.
- γ_{PL} de partiale veiligheidsfactor op de pipelengte, deze heeft een waarde van 1,0 als hypothese.

5.3 Resultaten van beide stappen

5.3.1 Stap 1: Probabilistische sommen

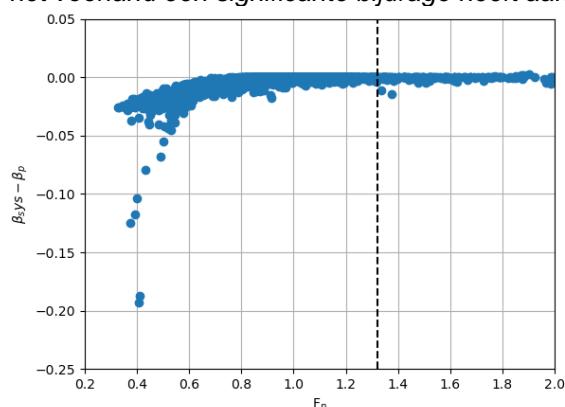
De resultaten van alle 1888 probabilistische analyses zijn in onderstaande figuur samengevat als functie van de veiligheidsfactor voor piping (F_p) welke is berekend met de formule van Sellmeijer conform het gangbare veiligheidsformat (WBI aanpak). Dit is gedaan zodat kan worden gezien of de afwijking afhangt van de mate van veiligheid.

β_{sys} is de gecombineerde systeem kans (uitgedrukt als betrouwbaarheidsindex) op falen door piping (vergelijking 2.1) of kortsluiting (vergelijking 2.2), β_p de betrouwbaarheidindex voor alleen piping weergeeft (vergelijking 2.1). Het verschil tussen de twee termen β_{sys} en β_p geeft de afname in betrouwbaarheid (toename in faalkans) weer door het meenemen van kortsluiting in de analyse en dus de bijdrage van kortsluiting.

Een situatie is veilig wanneer β_{sys} voldoet aan een minimale waarde van 4,96 bij een probabilistische analyse en wanneer F_p voldoet aan een minimale waarde van 1,32 bij een semi-probabilistisch analyse voor NeBe conform de ondergrenswaarden van de traject eis.

Figuur 5-2 bevestigt dat, voor de meeste gevallen, de afname in betrouwbaarheid minder dan 0,05 is. Dit is verwarloosbaar ten opzichte van alle onzekerheden die spelen in de analyse. De gevallen waarbij de afname groter is, zijn gevallen waarbij ook al niet aan de eis van piping ($F_p > 1,32$) wordt voldaan en zijn daardoor niet relevant. Verder moet worden opgemerkt dat de relatie tussen F_p en β_p de kalibratielijn van piping redelijk goed volgt, zie Figuur C 10 uit Bijlage C. Dit geeft ook aan dat de systeemfaalkans niet veel wordt beïnvloed door de pipelengte.

Kortom, er zijn geen gevallen gevonden waarbij de kans op kortsluiting door pipegroei onder het voorland een significante bijdrage heeft aan te totale faalkans.

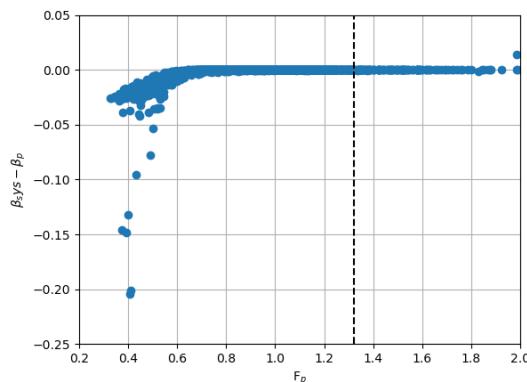


Figuur 5-2 Afname betrouwbaarheid door het meenemen van de kans op kortsluiting. De zwarte gebroken lijn geeft de stabiliteitsfactor van 1,32 aan.

Om de toepasbaarheid van deze resultaten te vergroten zijn drie gevoelighetsanalyse uitgevoerd:

1. Kleiner onzekerheid in d_{70} en k .

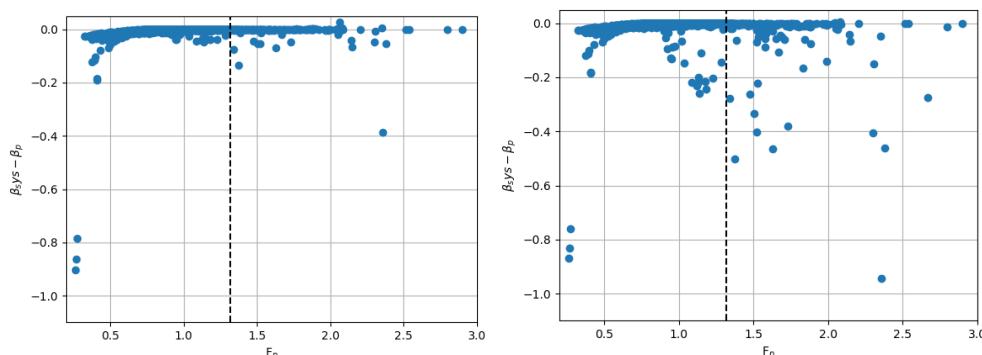
De twee parameters d_{70} en k hebben een dominante invloed op het kritieke verval maar niet op de pipelengte. Het kleiner worden van hun onzekerheid leidt dus tot een verhoging van β_p zonder β_{pl} te beïnvloeden. De pipelengte zou dan meer invloed kunnen hebben op de systeem faalkans. De resultaten zijn in Figuur 5-3 weergegeven en laten geen grote verandering zien ten opzichte van de eerdere resultaten. Dit laat ook zien dat pipelengte geen groot invloed heeft op piping.



Figuur 5-3 Afname betrouwbaarheid door het meenemen van de kans op kortsluiting bij minder onzekerheid in d_{70} en k .

2. Grottere onzekerheid in kritieke pipelengte.

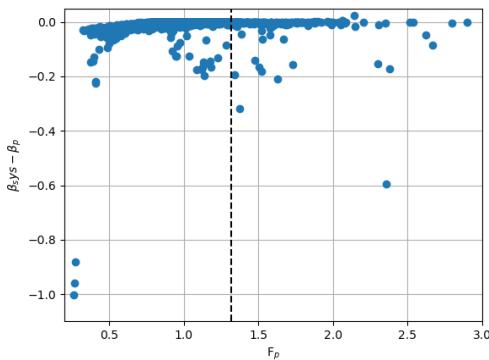
In Hoofdstuk 4 is gevonden dat de onzekerheid in pipelengte bij vervallen kleiner dan kritiek verval groter is dan de onzekerheid in kritieke pipelengte. De gekozen standard afwijking van m_{pl} was gebaseerd op alleen de kritieke pipelengte. Om ook de groter onzekerheid in pipelengtes lager dan kritiek verval mee te nemen in de analyse, is de standard afwijking van m_{pl} vergroot naar 0,4 en 0,5. Figuur 5-4 laat een afwijking zien ten opzichte van de basis situatie (Figuur 5-2). De pipelengte heeft meer invloed op de systeem faalkans, de afname in betrouwbaarheid gaat nu tot 0,4 (bij $\sigma=0,4$) en 1,0 (bij $\sigma=0,5$).



Figuur 5-4 Afname betrouwbaarheid door het meenemen van de kans op kortsluiting bij meer onzekerheid in pipelengte. Links met een standard afwijking van m_{pl} van 0,4 en rechts van 0,5. Andere assen dan Figuur 5-2.

3. Grottere dikte van het WVP.

De schematisaties van NeBe hebben een redelijk dun WVP (20 tot 42 m), bij andere trajecten kunnen dikkere WVP pakketten verwacht worden. Hierdoor is dezelfde analyse gemaakt met 10 m grotere diktes van het WVP in combinatie met een standard afwijking van m_{pl} van 0,4. De resultaten in Figuur 5-5 laten zien dat, zoals gevoelighetsanalyse 2, kortsluiting een grotere invloed heeft op de totale faalkans.

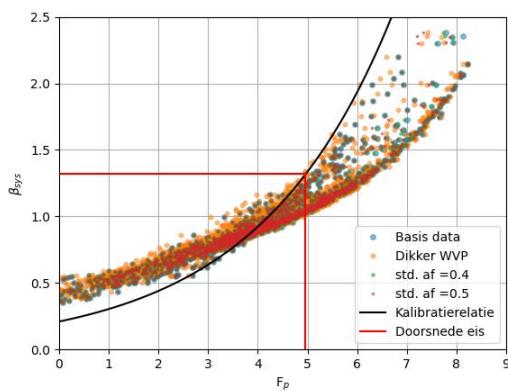


Figuur 5-5 Afname betrouwbaarheid door het meenemen van de kans op kortsluiting bij grotere dikte van het WVP. Andere axis dan Figuur 5-2.

5.3.2

Stap 2: Benodigde semi-probabilistische verificaties

De conclusies uit gevoelighedsanalyse (2) en (3) laten zien dat kortsluiting iets meer invloed heeft op de totale faalkans dan wat met alleen de schematisaties van NeBe is gevonden. De vraag is of dit significant is. Uit Figuur 5-6 is te zien dat de gevoelighedsanalyse tot geen grote afwijking leiden van de kalibratierelatie.



Figuur 5-6 Semi-probabilistische resultaten ten opzicht van de probabilistische resultaten.

Bij de gevoelighedsanalyse (3), met dikkere diktes van het WVP, is één schematisatie gevonden die ontrecht goedkeurt is. Daar werd falen met de probabilistische som verwacht $\beta_{sys} < 4,96$ maar niet met de semi-probabilistische som $F_p > 1,32$.

Er kan worden geconcludeerd dat het kritieke verval blijft het dominante faalmechanisme. Voldoen aan de eisen voor kritiek piping verval is hierbij voldoende. Dit conclusie geldt met default WBI onzekerheden.

5.3.3

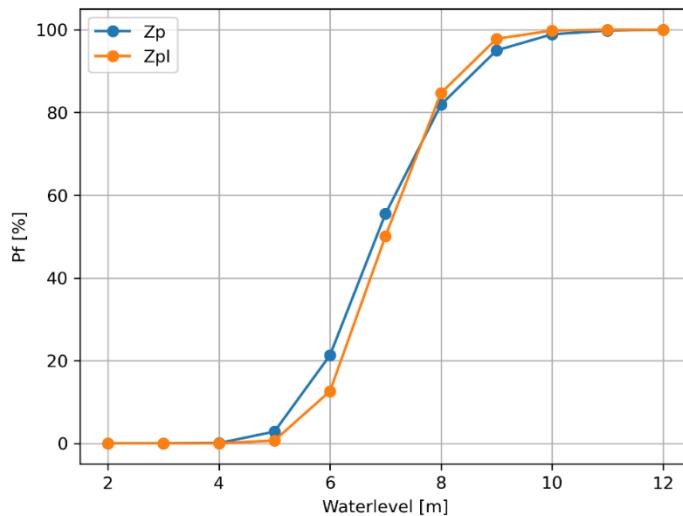
Analyse: Verklaring dat de kans op kortsluiting door pipegroei onder het voorland geen significante bijdrage heeft aan te totale faalkans

De geringe invloed van pipelengte op de betrouwbaarheid wordt voornamelijk verklaard door het feit dat de pipelengte pas sterk kan toenemen bij een verval dicht bij het kritieke verval. Bij lage waterstanden is de kans op piping nog relatief groot door de vele onzekerheden in de bepaling van het kritieke verval (en dus een relatief vlakke fragility curve). De kans op doorgroeien tot onder de dijkbasis is dan verwaarloosbaar.

Er zijn namelijk twee voorwaarden nodig voor een pipe om onder de dijkbasis door te groeien. (1) het kritieke verval moet relatief hoog zijn om lange kritieke pipelengtes te krijgen. (2) het optredende verval moet dicht bij of over het kritieke verval zijn, dan is het optredende

pipelengte bij norm waterstand het langst. Deze twee factoren samen zorgen voor een steilere fragility curve voor kritiek pipelengte dan voor kritiek verval. Hierdoor wordt pipegroei uiteindelijk niet dominant, zie Figuur 5-7.

Bij lange voorlanden zijn de pipes weliswaar langer, maar wordt ook het kritieke verval veel groter waardoor ook in dat geval de pipe in de beschouwde gevallen altijd onder de dijkbasis blijft. Dat pipelengte niet dominant wordt geldt alleen voor de gebruikte default-waarden voor variatiecoëfficiënten, zowel voor de bepaling van kritiek verval als voor pipelengte. Als deze veranderen kan ook pipelengte mogelijk wel dominant worden.



Figuur 5-7 Fragility curve voor de kans op piping (Z_p) en op kortsluiting (Z_{pl}).

5.4

Aanbeveling veiligheidsbenadering pipelengte

In de NeBe cases met WBI defaults voor onzekerheden zijn er geen gevallen gevonden waarin de kans op kortsluiting een significante bijdrage levert aan de faalkans. Dit resulteert in de volgende aanbevelingen voor gevallen die op de beschouwde case lijken (WBI defaults, vergelijkbare range parameters).

In de beschouwde gevallen heeft de pipelengte geen significant effect op de totale pipingfaalkans. Dit kan veranderen als de onzekerheden en de relatieve invloeden van onzekerheden veranderen of bij andere situaties en parametercombinaties die van NeBe afwijken. Het is dus aan de gebruiker om in te schatten of het wel of niet nodig is om pipelengte analyses te doen afhankelijk van of ze binnen de toepassingsgebied vallen van veiligheidsbenadering. Een uitgebreidere uitleg om hoe om te gaan met voorlanden is in een stappenplan in Hoofdstuk 2 toegelicht. Binnen toepassingsgebied van de veiligheidsbenadering betekend dat de lokale karakteristieken moeten vergelijkbaar zijn met die NeBe: diktes van het WVP van ongeveer 20 tot 52 m (maximale WVP dikte van NeBe was 42 m, door een gevoeligheidsanalyse is de toepassingsgebied van D vergroot met 10 m), kwelweglengtes van ongeveer 44,5 tot 290 m, dijbasis van 20 tot 100 m, leklengtes van het voorland van 15 tot 300 m en doorlatendheden van het WVP tussen 45 en 86 m/dag.

In geval de betreffende dijk lijkt op de hier beschouwde gevallen (qua parameters en onzekerheden) is er niet direct een pipelengte analyse nodig. In geval pipelengte analyses wel worden toegepast (door afwijkende karakteristieken), is het nog niet helder welk semi-probabilistisch veiligheidsformat er toegepast moet worden. Het format van formule 2.2 is het

meest voor de hand liggend, maar dient gevalideerd te worden voor gevallen die qua onzekerheden sterk afwijken van de in dit rapport beschouwde cases.

Omdat er nog weinig ervaring is met het meenemen van voorlanden en de rol van pipelengtes hierin moeten de pipelengtes altijd worden beschouwd in het licht van nieuwe kennis via de DSF aanpak (bijvoorbeeld het effect van 3D effecten op de pipelengte). Dit is ook uitgebreider uitgelegd in het stappenplan in Hoofdstuk 2. In alle gevallen, als er kans is op pipegroei onder dijkbasis is, is het goed naar kans op kortsluiting gegeven pipegroei onder de dijkbasis te kijken, deze conditionele kans is nu conservatief als 1 aangenomen. Maar kan afhankelijk van de voorlandkarakteristieken ook een stuk lager worden.

5.5 Impact voorlanden op lengte-effect

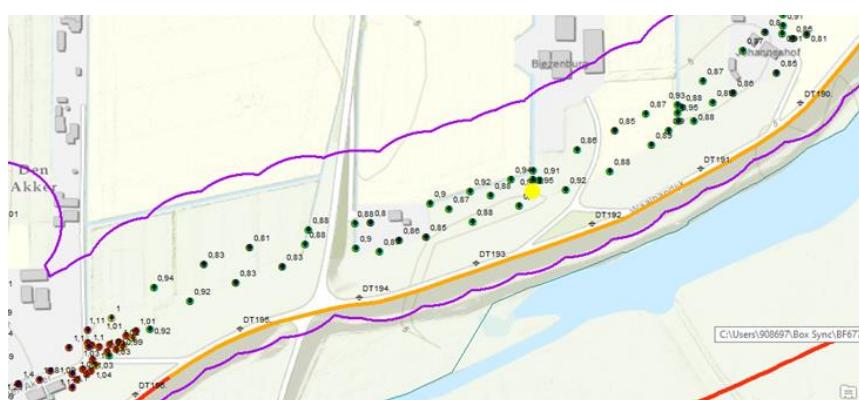
Het lengte-effect geeft weer in hoeverre de faalkans van een dijk toeneemt met de lengte. Het lengte-effect wordt in het WBI en OI weergegeven met de volgende formule:

$$N = 1 + \frac{a \cdot L}{b} \quad (4.X)$$

Waarin N = lengte-effect factor, a = percentage pipinggevoelige lengte, L = trajectlengte en b is de equivalent onafhankelijke lengte. Standaard wordt gerekend met $a = 0,9$ voor het bovenrivierengebied. Er zijn mogelijke effecten te verwachten voor zowel de parameters a als b .

Door het meenemen van voorlanden is de verwachting dat het percentage pipinggevoelige lengte a sterk zal afnemen. Zeker als er met grotere ruimtelijke resolutie naar piping wordt gekeken (zoals met de uittredepuntenmethode van Waterschap Rivierenland), blijkt voor verschillende gevallen dat de piping vooral wordt gedomineerd door zwakke zones, en dat doorgaans niet het hele traject pipinggevoelig is. Zie bijvoorbeeld Kanning (2021B). De verwachting is dat er orde 10% (of wellicht nog minder) overblijft als pipinggevoelig in veel huidige beoordelingen, wat een grote impact heeft op het mee te nemen lengte-effect. Echter, hoe dit generiek uitwerkt (bijvoorbeeld in relatie tot versterken) is niet duidelijk. Het wordt dus ook niet aanbevolen om generiek de lengte-effect factor aan te passen.

Doordat voorland een belangrijke impact op het kritieke verval heeft, zal ook parameter b veranderen. Dit komt omdat invloedscoëfficiënten veranderen. Het is echter niet de verwachting dat dit een groot effect op het lengte-effect zal hebben aangezien de verwachte correlatielengtes van de voorlandparameters niet heel erg afwijken van de correlatielengtes van de normale pipingparameters. En dus dat de factor b niet zoveel zal veranderen dat er een significante invloed is op het lengte-effect.



Figuur 5-8 Illustratief voorbeeld uittredepuntenmethode waarbij voorlanden zijn meegenomen (groene punten voldoen aan de eisen, rode punten niet).

6 Karakteristieke waarde kD in geohydrologische modellen

6.1 Aanleiding doel en aanpak

6.1.1 Aanleiding

Voorlanden worden steeds meer meegenomen bij pipinganalyses. De extra weerstand van voorlanden wordt steeds meer berekend aan de hand van geohydrologische modellen (zoals de Geohydrologische Aanpak (GAP) of de Moria aanpak gebruikt in het dijkversterkingsproject Neder Betuwe (De Wit, 2022)). Deze extra weerstand kan ook berekend worden via analytische formule zoals geïmplementeerd in de uittredepuntenmethode van Waterschap Rivierenland welke ook in de bijlage van dit rapport is gebruikt (zie Bijlage C).

In bovenstaande modellen wordt vaak een kD (bulk doorlatendheid keer dikte) van het watervoerende pakket (WVP) gevonden, in plaats van apart waarden voor k en D . Het bestaande veiligheidsformat is echter afgeleid voor een situatie waarin k en D apart worden meegenomen. Het is dus de vraag welke semi-probabilistische verificaties nodig zijn in geval van het werken met geohydrologische modellen, en meer specifiek welke karakteristieke waarde voor kD moet worden gekozen.

De keuze in kD is niet vanzelfsprekend omdat deze keuze een tegenstrijdig effect heeft op het kritieke verval doordat de doorlatendheid in de leklengte formule voorkomt en in de formule voor kritiek verval die ook afhangt van de leklengte:

- Hoe hoger de doorlatendheid, hoe lager het kritieke verval.
- Hoe hoger de doorlatendheid, hoe langer de leklengte en hoe hoger het kritieke verval.

Waanneer een laag (5%-percentiel) doorlatendheid voor de leklengte en een hoog (95%-percentiel) doorlatendheid voor het kritieke verval wordt gekozen wordt gesproken van een conservatief inconsistent keuze.

6.1.2 Doel

Het doel van deze studie is om te bepalen welke semi-probabilistisch keuzes het meest representatief zijn wanneer piping analyses met kD waardes worden uitgevoerd en voor- en achterlanden expliciet meegenomen worden (zoals in de GAP analyses en de Moria aanpak). Voor meer achtergrondinformatie wordt verwezen naar de Bijlage C.

6.1.3 Aanpak

De volgende stappen worden doorlopen:

1. Identificatie semi-probabilistische verificaties. Hierin worden vijf mogelijke semi-probabilistische verificaties (cases) beschouwd voor de keuze van kD bij de bepaling van zowel de leklengte als het kritieke verval.
2. Opzet probabilistische analyses met FORM. Hierin worden twee probabilistische analyses opgezet: één op basis van k en D als aparte stochasten conform WBI en één op basis van een gecombineerde kD conform een geohydrologische aanpak.
3. Uitvoeren analyses. De semi-probabilistische veiligheidsfactoren worden berekend en vergeleken met de bijbehorende berekende faalkansen.
4. Analyse. Hierin wordt gekeken welke semi-probabilistische verificatie het best aansluit bij het bestaande veiligheidsformat (kalibratielijn) door deze te vergelijken met de probabilistische analyses. Het uitgangspunt hierbij is de huidige kalibratielijn voor piping

handhaven, waarin de veiligheidsfactor F_p wordt bepaald door één van de vijf beschouwde cases.

Disclaimer: De GAP of Moria aanpak is alleen voor de bepaling van de leklengte in dit project. Idealiter wordt de GAP of Moria aanpak ook voor probabilistische analyses gebruikt, maar dit bleek niet mogelijk binnen de scope van dit project. Ook is aangenomen dat de variatie coëfficiënt voor kD een waarden heeft van 0,3. Dit dient gevalideerd te worden. Dit project is daarmee nadrukkelijk een uitgebreide verkenning, zonder definitieve antwoorden te geven.

6.2 Analyses

6.2.1 Stap 1: Identificatie semi-probabilistische verificaties

Er worden vijf mogelijke keuzes van de karakteristieke waarden voor kD bij een semi-probabilistische analyse onderzocht, zie Tabel 6-1. Wanneer kD één stochast is, wordt k berekend met de karakteristieke waarden van kD gedeeld door de gemiddelde waarde van D .

- Case 1: "WBI aanpak". Hier wordt de WBI aanpak gehanteerd en worden k en D als aparte stochasten meegenomen in de berekeningen. Voor de semi-probabilistische berekening worden de hoog-karakteristieke waarden (95%-percentiel) voor k en D gebruikt.
- Case 2: "Conservatief". Hier wordt de data conform een geohydrologisch model gebruikt waaruit één stochast kD wordt gebruikt. Voor de semi-probabilistische berekening wordt uitgegaan van een hoge karakteristieke waarden (95%-percentiel) voor kD bij het berekenen van de leklengte maar van een lage karakteristieke waarden (5%-percentiel) voor kD bij het berekenen van het kritieke verval. Dit is de meest conservatieve manier van rekenen, maar is ook inconsistent. Immers, kD kan niet tegelijkertijd hoog en laag zijn.
- Case 3: Hier wordt de data conform een geohydrologische model gebruikt. Bij de semi-probabilistische berekening wordt altijd uitgegaan van de bovengrens (95%-percentiel) karakteristieke waarden voor kD , voor de leklengte en het kritieke verval wordt.
- Case 4: Hier wordt de data conform een geohydrologisch model gebruikt. Bij de semi-probabilistische berekening wordt altijd gebruik gemaakt van de ondergrens (5%-percentiel) karakteristieke waarden voor kD .
- Case 5: Hier wordt de data conform een geohydrologisch model gebruikt. De leklengte wordt gevonden op basis van een Geohydrologische Aanpak (GAP) of een Moria aanpak (De Wit, 2022) (er wordt Moria gebruikt in de rapportage), en hangt dus niet meer af van karakteristieke kD . De kD uit de geohydrologische model wordt wel nog gebruikt om het kritieke verval te berekenen. Voor de semi-probabilistische berekeningen wordt er uitgegaan van de ondergrenswaarde (5%-percentiel) van kD voor de bepaling van het kritieke verval.

Tabel 6-1 Samenvatting van de keuze in karakteristieke waarden voor de semi-probabilistische berekeningen.

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Naam:	WBI aanpak	Conservatief, inconsistent	Hoge kar. Waarde (conservatief)	Lage kar. Waarde (optimistisch)	Lage kar waarde en Moria (conservatief, nauwkeuriger)
Kritiek verval	k en D bovengrens	kD bovengrens	kD bovengrens	kD ondergrens	kD bovengrens
Leklengte	k en D bovengrens	kD ondergrens	kD bovengrens	kD ondergrens	Moria

De safety factor (F_p) van de vijf semi-probabilistische analyses worden verder bepaald conform de gangbare WBI procedure (SH,2017).

6.2.2

Stap 2: Probabilistische analyses

De faalkansen (uitgedrukt als betrouwbaarheidsindex β_p) van twee probabilistische analyses worden bepaald:

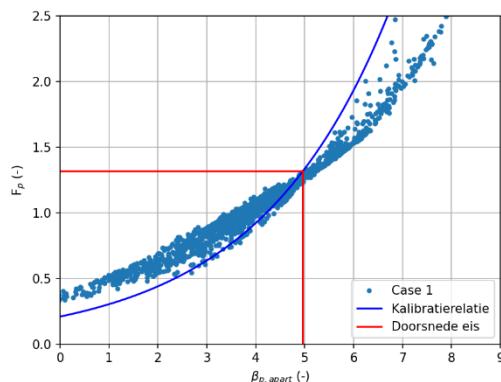
1. Met k en D als aparte stochasten. k heeft een variatie coëfficiënt van 0,5 en D van 0,1. Dit is representatief voor het WBI. De uitkomst is $\beta_{p,apart}$.
2. Met kD als één stochast met een lagere variatie coëfficiënt, representatief voor geohydrologische modellen. kD heeft een aangenomen variatie coëfficiënt van 0,3. De uitkomst is $\beta_{p,samen}$.

6.3

Stap 3: resultaten

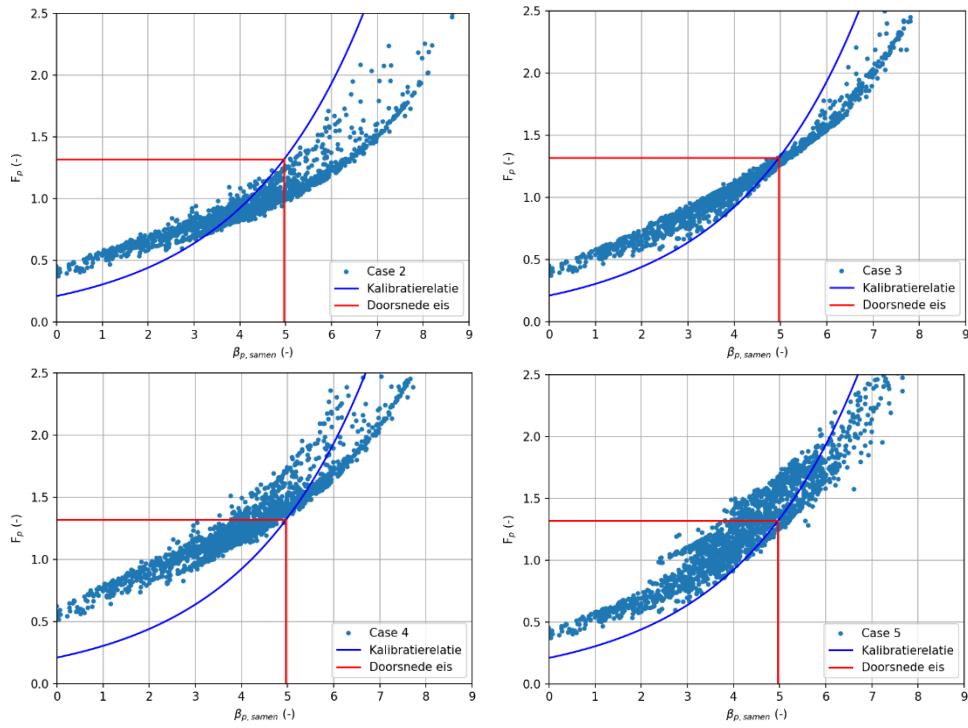
Een vergelijking tussen de semi-probabilistische berekeningen (y-as) en de probabilistische berekeningen (x-as) zijn in onderstaande weergegeven, inclusief in rood de eis uitgedrukt in F_p en β . De probabilistische berekening met k en D apart is strikt gezien alleen relevant voor Case 1. De probabilistische berekening met kD samen is voor de andere cases relevant (2 tot en met 4). Case 5 had vergeleken moeten worden met een probabilistische berekening die leklengtes uit geohydrologische model haalt in plaats van met Vergelijking 1, echter door gebrek aan tijd word case 5 vergeleken met de probabilistische berekening met kD samen.

Figuur 6-1 geeft de vergelijking tussen de probabilistische sommen k en D apart met Case 1 (links). We zien dat de Case 1 de kalibratielijn volgt.



Figuur 6-1 Semi-probabilistische resultaten met case 1 ten opzichte van de probabilistische resultaten met k en D apart.

Vervolgens is gekeken hoe de cases 2 tot en met 5 met de probabilistische sommen met kD samen zich verhouden tot de kalibratielijn in Figuur 6-2. Hierin is te zien dat case 2 de laagste F_p geeft (aangezien hier de meest conservatieve keuzes worden gemaakt voor het bepaling van H_c), en case 4 de hoogste F_p (de minst conservatieve keuzes). Wat verder opvalt is dat bij lage β 's de punten boven de kalibratielijn liggen en bij hoge β 's eronder.



Figuur 6-2 Semi-probabilistische resultaten ten opzichte van de probabilistische resultaten met kD samen voor case 2 tot en met 5.

6.4 Stap 4: Analyse

Om te bepalen welke van de cases het beste aansluit bij het huidige veiligheidsformat kijken we naar de volgende 2 punten:

- Afwijkingen van de verschillende cases ten opzichte van de kalibratielijn. Idealiter resulteert het gekozen semi-probabilistische format zo dicht mogelijk bij de kalibratielijn. Voornamelijk rond het relevante bereik van $\beta_{p,eis}$ (zeg tussen de 3 en 6).
- De spreiding van case 1 (default WBI) in relatie tot de kalibratie lijn en de spreiding van de overige cases. In de default WBI aanpak is er ook redelijk wat spreiding van de cases ten opzichte van kalibratie, de lijn ligt conservatief (relatief hoog, op ongeveer 80%) in de puntenwolk.

Als we bovenstaande punten volgen zien we dat in het relevante bereik:

- Case 2 tot een te veilige situatie leidt, bijna alle punten in het relevante bereik liggen ruim onder de kalibratielijn. Daarnaast is case 2 intern inconsistent.
- Case 4 en 5 relatief vaak leiden tot onterecht goedkeuren; veel punten liggen ruim boven de kalibratielijn.
- Case 3 ligt min of meer rond de kalibratielijn, er wat boven bij lage beta's en er onder bij hoge beta's. Daarnaast worden vergelijkbare afwijkingen en spreidingen als case 1 (WBI defaults) gevonden, wat vertrouwen geeft in het resultaat.

Samengevat lijkt case 3 het beste passen bij de huidige kalibratierelatie.

6.5 Conclusies en aanbevelingen

Op basis van deze analyses is de beste aanpak voor semi-probabilistische berekeningen met een geohydrologische model om een hoog karakteristieke waarden voor kD te gebruiken voor de leklengte en het kritieke verval (case 3). Zoals eerder al is gebleken blijkt ook hier dat het negatieve effect van een hoge kD op H_c veel zwaarder weegt dan het positieve effect van een hoge kD op de effectieve kwelweglengte. De kleinere variatiecoëfficiënt van kD ten opzichte

van k lijkt er verder voor te zorgen dat, ondanks het niet-conservatieve effect van een hoge kD op de effectieve kwelweglengte, er toch geen sterke niet-conservatieve afwijking is ten opzichte van de WBI default waarden.

Er zijn enkele vereenvoudigingen gedaan, waaronder de belangrijkste:

- Er is aangenomen dat kD een variatiecoëfficiënt heeft van 0,3, wat significant lager is dan de 0,5 welke default is voor k in het WBI. De lagere variatiecoëfficiënt komt doordat er voor kD meer metingen beschikbaar zijn. De waarde van 0,3 is in lijn met NeBe analyses. Het is echter de vraag of deze waarde ook voor andere projecten representatief zijn.
- De GAP of Moria aanpak uit zich nu alleen in de bepaling van de leklengte. Idealiter zou deze aanpak integraal in een probabilistische analyse worden meegenomen. Dit bleek niet haalbaar binnen de scope van dit project.
- De waterstandsstatistiek bij NeBe is nu op basis van een benadering, een weibull fit op basis van de norm en de decimeringshoogte, een aanscherping kan ook de resultaten mogelijk veranderen.
- Voor wat betreft het rekenen met voorlanden op basis van een geohydrologische aanpak is alleen gekeken naar kD van het WVP. Overige onzekerheden in deze analyse en het effect hiervan op het veiligheidsformat zijn niet meegenomen.

7 Conclusies

De belangrijkste conclusie uit dit rapport is het stappenplan van Hoofdstuk 2 die een richtlijn geeft om voorlanden altijd mee te nemen in een pipinganalyse. Het stappenplan is opgesteld op basis van onder andere vier deelonderzoeken. De belangrijkste conclusies van de vier deelonderzoeken zijn hieronder samengevat.

7.1 Invloed anisotropie en meerlaagsheid

Zoals besproken in Hoofdstuk 2 hebben anisotropie en meerlaagsheid een groot effect op de pipelengte. Het effect van anisotropie op de kritieke pipelengte hangt af van de geometrie van het watervoerend pakket (dikte WVP en kwelweglengte verhouding) en de doorlatendheid van het achterland. Het effect van meerlaagsheid op de kritieke pipelengte hangt af van de doorlatendheidscontrast (K_2/K_1) en in mindere mate van de dikte verhouding (D_1/D_2), van de totale dikte van het WVP en laatste van de doorlatendheid van het achterland.

Verder is het belangrijk om goed op te letten wanneer anisotropie of meerlaagsheid aanwezig is. Dit omdat anisotropie en meerlaagsheid leiden tot een lager kritiek verval maar tot een langere kritieke pipelengte. Dit gebeurt in de situatie met een dun WVP, waar de invloed van anisotropie en meerlaagsheid op het kritieke verval klein is terwijl er wel langere kritieke pipelengtes zullen ontstaan. Voor een dicht achterland geldt hetzelfde, er is een klein effect op het kritieke verval bij een ondoorlatend achterland, terwijl er wel langere kritieke pipelengtes ontstaan.

Het effect van anisotropie en meerlaagsheid op de kritieke pipelengte is naar verwachting het grootste bij dijkvakken met een dun watervoerend pakket, een ondoorlatend achterland en met radiale weerstand van de instroom, i.e. instroom die horizontaal en verticaal binnentreedt.

De curves afgeleid in het 2021 stappenplan kunnen niet gebruikt worden om de pipelengtes te berekenen. Pipelengtes berekend met D-Geo Flow kunnen voor de berekende gevallen tot een factor 2,3 langer zijn dan die berekend met de curves. Met meerlaagsheid zijn zelfs gevallen gevonden waar de kritieke pipelengte langer is dan de helft van de kwelweglengte. Er moet voor deze gevallen altijd een D-Geo Flow berekening worden gemaakt om de pipelengtes te controleren. Er is geen algemene factor af te leiden voor het meenemen van meerlaagsheid en anisotropie, omdat hun effect afhankelijk is van eigenschappen van het WVP en de doorlatendheid van het achterland. De fout in kritieke pipelengte berekend met de curve kan een factor 1,2 tot 2,3 afwijken van D-Geo Flow.

7.2 Verificatie voorspelling pipelengte bij waterstanden lager dan kritiek verval

In het 2021 onderzoek is een modelonzekerheid bepaald door voorspelde pipelengtes met gemeten pipelengtes te vergelijken. Dit was alleen gedaan voor pipelengtes rond het kritieke verval. In het onderzoek uit Hoofdstuk 3 blijkt dit niet geldig te zijn voor pipelengte bij vervallen kleiner dan het kritieke verval. Dit is gecontroleerd door pipingproeven in D-Geo Flow te modelleren en de gemeten pipelengtes te vergelijken met de berekende pipelengtes voor een verval lager dan het kritieke verval. Hieruit blijkt dat D-Geo Flow consistent een onderschatting berekent van pipelengtes onder het kritieke verval ($L_{num} < L_{exp}$) en dat de onzekerheid in pipelengtes berekend met D-Geo Flow groter wordt bij steeds lagere vervallen dan het kritieke verval. De veiligheidsbenadering, waaruit geconcludeerd werd dat er geen controle nodig is bij

het meenemen van voorlanden, heeft het effect hiervan gecontroleerd met een gevoelighedsanalyse waar meer onzekerheid in m_{pl} meegenomen is.

7.3 Aanscherping veiligheidsbenadering pipelengte

Op basis van 1888 probabilistische sommen uit het dijkversterkingsproject Neder Betuwe (NeBe) is verder onderbouwd dat het doorgroeien van pipes onder het voorland geen significante bijdrage heeft aan de totale piping faalkans. In alle 1888 berekende gevallen leidde het doorgroeien van de pipe tot onder het voorland niet tot een significante toename van de totale pipingfaalkans.

De resultaten suggereren dus dat er geen extra controle nodig is op de pipelengte. De analyses zijn echter voor schematisaties uit NeBe uitgevoerd, waardoor de resultaten voorlopig alleen toepasbaar zijn in situaties met vergelijkbare omstandigheden. Voor toepassing op andere locaties zullen gebruikers een inschatting moeten maken in hoeverre de omstandigheden passen binnen het bereik van de in dit rapport gemaakte analyses, namelijk:

- Dikte watervoerend pakket tussen 20 en 50 m, en doorlatendheid tussen 45 en 86 m/dag.
- Dijkbasis tussen 20 en 100 m, en kwelweglengte tussen 40 en 300 m.
- Leklengte van het voorland tussen 15 en 300 m.
- (Model)onzekerheid van de pipelengte kleiner dan 0,5.
- Default WBI-onzekerheden voor doorlatendheid (k , variatiecoëfficiënt 0,5) en d_{70} (variatiecoëfficiënt 0,12). Uit een gevoelighedsanalyse blijkt het ook mogelijk te zijn om lagere variatiecoëfficiënten voor k ($V=0,1$) en d_{70} ($V=0,05$) te gebruiken.

In andere gevallen, wordt het aanbevolen om probabilistische sommen uit te voeren naar de kans dat de pipe doorgroeit tot onder het voorland, op basis van de pipelengte-curves. Wanneer verwacht wordt dat anisotropie en meerlaagsheid veel invloed zullen hebben op de pipelengte, wordt tevens aanbevolen aanvullende pipelengte berekeningen te maken met D-Geo Flow om te onderbouwen dat de pipe niet zal doorgroeien onder het voorland.

Tot slot, de beslissing om pipelengte analyses te doen en hoe ver deze uit te werken is uitgebreid uitgelegd in het stappenplan van Hoofdstuk 2 en dient vooral ook in het licht van alle onzekerheden in de pipinganalyse te worden beschouwd. Dit kan bijvoorbeeld op basis van de DSF aanpak, waarbij alle onzekere aspecten worden ingeschat op de mate kennis en het effect op de faalkans (Kanning en Rosenbrand, 2023).

7.4 Karakteristieke waarde kD in geohydrologische modellen

Uit het onderzoek blijkt dat het een goede keuze is om hoog karakteristieke kD waarden te gebruiken voor de berekening van het kritieke verval en leklengte. Dit is voor gevallen die vergelijkbaar zijn met Neder Betuwe, met een variatie coëfficiënt van kD van 0,3, de beste optie. Schematisaties vergelijkbaar met NeBe staan in de lijst van Tabel C 2 Paragraaf 7.3 met als uitzondering de diktes van het WVP. Paragraaf 7.3 bevat de resultaten van een gevoelighedsanalyse uitgevoerd om de invloed van grotere WVP diktes te analyseren. Dit is hier niet gedaan waardoor de toepassingsgebied van de WVP diktes de originele diktes van NeBe zijn van ongeveer 20 tot 40 m.

8 Aanbevelingen

Algemeen

Voor alle pipinganalyses is het sterk aanbevolen om altijd een DSF aanpak uit te voeren. Een DSF aanpak is een tool waarmee een overzicht kan worden verkregen van de lokale omstandigheden die bij het dijktraject behoren en afwijken van de Sellmeijer model, bijvoorbeeld 3D grondwaterstroming, anisotropie, etc. Verder wordt er voor elke lokale omstandigheid gekeken hoeveel kennis al bekend is om het effect daarvan mee te nemen in de pipinganalyse. Met dit overzicht kan een onderbouwde afweging gemaakt worden over het wel of niet meenemen van het hele voorland gezien alle andere processen/onzekerheden die nog een rol spelen. Voor meer informatie over het uitvoeren van een DSK aanpak zie Kanning en Rosenbrand (2023).

Anisotropie en meerlaagsheid

De belangrijkste aanbeveling voor anisotropie en meerlaagsheid is om deze waar mogelijk en wenselijk in projecten mee te gaan nemen en vooral goed het effect op de pipelengte in een DSF aanpak mee te nemen.

Voor een meerlaags pakket is het geconcludeerd dat het effect van K_2/K_1 groter is dan voor D_1/D_2 . In deze studie is het effect van D_1/D_2 echter alleen onderzocht voor een hoog doorlatendheidcontrast ($K_2/K_1=4,5$). Aanbevolen wordt om het effect van D_1/D_2 te onderzoeken bij lagere doorlatendheidcontrasten, mogelijk heeft het dan meer invloed.

Verificatie pipelengtes bij lager dan kritieke waterstanden

De onzekerheid in pipelengte wordt groter bij vervallen lager dan het kritieke verval. Dit is nu in rekening genomen door de onzekerheid in modelfactor voor pipelengte te vergroten. Hiermee is de onzekerheid echter niet afhankelijk van de optredende verval en wordt deze dus niet groter bij vervallen kleiner dan kritiek verval. Hier is een aanscherping mogelijk.

Het wordt ook aanbevolen om de waterstandsstatistiek bij NeBe aan te scherpen bij de berekening van de veiligheidsbenadering.

De pipelengte onder kritiek verval bij een 2D situatie is alleen aan de hand van de Silvis proeven gevalideerd. Aanbevolen wordt om deze pipelengtes ook met andere proeven te valideren en wanneer deze niet beschikbaar zijn om meer proeven zelf uit te voeren. Verder dient opgemerkt te worden dat piping over het algemeen een 3D situatie is.

Veiligheidsbenadering pipelengte

Pipelengtes blijven lastig te berekenen gezien de beperkte hoeveelheid experimenten voor validatie, de variatie in proeven, de gevoeligheid voor mesh en rekenstappen etc. Ook is er weinig ervaring mee in projecten. Daarom wordt het aanbevolen om berekende pipelengtes te blijven onderzoeken, vooral door ervaring van projecten op te halen en bevindingen te verwerken. Vooral interessant zijn gevallen waarbij sterk wordt afgeweken van de hier beschouwde situaties en probabilistische analyses die zijn uitgevoerd.

Karakteristieke waarde kD

Het wordt aanbevolen om voor de keuze in kD waarde meer analyses uit te voeren met data van andere echte dijkversterkingsprojecten om de conclusie dat de bovengrenswaarde van kD (case 3) de beste keuze is voor het berekenen van het kritieke verval en de leklengte beter te onderbouwen. Met deze bovengrenswaarde wordt de karakteristieke waarden van k berekend

met een 95%-percentiel (bovengrenswaarde) van de doorlatendheidsvermogen (kD) gedeeld door de gemiddelde dikte van het WVP.

Een ander aanscherping voor deze studie is om een extra probabilistisch berekening uit te voeren waar de leklengte berekend wordt met een geohydrologisch model in plaats van met Vergelijking 1. Hiermee zou de keuze voor case 5 beter overwogen worden.

9 Referenties

- Brinkhuis, M., Rosenbrand, E., Hoogewoud, J. (2021). Handreiking geohydrologische aanpak voor piping, geannoteerde inhoudsopgave. HWBP De Innovatieversneller, Kenmerk 2021-PIP-001.
- De Wit, T. (2022). Piping: DO scope, urgentie- en consequentiebepaling. RHDHV, kenmerk: WATRC_BF6777-114-102_R0080_905329_f2.0.
- Kanning, W. (2021A). Verkenning veiligheidsbenadering piping met voorlanden. Deltares rapport 11206817-010-GEO-0004.
- Kanning, W. (2021B). Probabilistische analyses en combinatie pipinganalyses uittredepuntenmethode. Deltares rapport 11205809-000-GEO-0004.
- Kanning, W., Rosenbrand, E (2023). Omgaan met piping onzekerheden. Deltares rapport 11208057-052-GEO-0004.
- Rosenbrand, E., Wopereis, L., Wiersma, A.P., Kanning, W., Bezuijen, A. en Blinde, J. (2022). Kennis voor Keringen 2021: Achtergrondrapport Voorlanden. Deltares rapport 1206817-010-GEO-0003.
- Rijkswaterstaat (2021). Schematiseringshandleiding piping, RWS, WBI 2017, 28 mei 2021.
- Rijkswaterstaat (2016). Achtergrondrapport Ontwerpinstrumentarium 2014, RWS, OI 2014, December 2016.

A Conceptueel model voor het effect van anisotropie en meerlaagsheid

A.1 Introductie

Dit rapport is een onderdeel van het Kennis voor Keringen programma van Rijkswaterstaat, waarin Deltares onderzoek doet naar een scherpere analyse van het faalmechanisme piping. Dit rapport is een bijlage bij het rapport “Voorlanden 2022 - Achtergrondrapportage” door Wopereis et al. (2022).

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 de 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 × 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.

Het meenemen van voorlanden voor piping heeft een groot effect op de overstromingskans. Indien voorland niet meegenomen wordt leidt dit tot een significante overschatting van de overstromingskans. Om voorlanden onderbouwd mee te kunnen nemen in de analyse van terugschrijdende erosie met de rekenregel van Sellmeijer is het van belang inzicht te hebben in de pipelengte.

Daarom is in 2021 in het Kennis voor Keringen programma voorlanden onderzoek gedaan naar het fysische proces dat leidt tot de pipelengte. De uitkomst van dit onderzoek is een concept stappenplan waarmee een beheerder een onderbouwde afweging kan maken voor hoeveel voorland meegenomen kan worden in de pipinganalyse op basis van de optredende en kritieke pipelengte. Bij het concept stappenplan zijn ook enkele aanbevelingen gedaan voor nader onderzoek om te komen tot een definitieve versie van het stappenplan. Deze vormen de aanleiding voor het vervolgonderzoek van 2022.

A.1.1 Doel van het onderzoek

In het 2022 Kennis voor Keringen programma is een vervolgonderzoek opgesteld om het stappenplan verder uit te breiden. Dit is gedaan door focus te leggen op drie onderdelen:

1. Toepassingsgebied van het stappenplan 2022 voor het meenemen van voorland vergroten.

De methode ontwikkeld voor het meenemen van voorland was gebaseerd op de schematisatie van de rekenregel van Sellmeijer, zodat het voorland in de rekenregel kan worden meegenomen. Echter, parameters die niet in de rekenregel zitten zoals anisotropie en

meerlaagsheid, kunnen in de praktijk voorkomen maar zitten niet in de rekenregel. Het niet meenemen van deze eigenschappen is weliswaar conservatief bij een berekening van het kritieke verval (wat het doel is waarvoor de rekenregel is afgeleid), voor de pipelengte bij kritiek verval is het niet meenemen hiervan echter juist niet conservatief: deze eigenschappen kunnen leiden tot een langere pipelengte bij kritiek verval. Het netto effect op de pipelengte, bij een gegeven verval, kan positief of negatief zijn afhankelijk van de situatie. Een conceptueel inzicht en nadere onderbouwing hiervan zijn nodig om het toepassingsbereik van het stappenplan uit te breiden.

2. Validatie van de tweede grafiek van de stappenplan met pipelengtes bij waterstand onder kritieke verval.

In Rosenbrand et al. (2022A) is een conceptueel, parametrisch model ontwikkeld dat inzicht geeft in de pipelengte bij kritiek verval, en welke factoren deze lengte beïnvloeden. Op basis van het geheel zijn twee grafieken opgesteld aan de hand waarvan een beheerder in kan schatten wat de pipelengte is als functie van het verval en verschillende karakteristieken van de dijk en de ondergrond. Deze twee grafieken zijn de basis van een stappenplan om onderbouwd meer voorland mee te kunnen nemen. Echter, pipelengtes onder kritiek verval van het numerieke model gebruikt om de curves af te leiden zijn nog niet gevalideerd. Alleen de kritieke pipelengtes zijn vorige jaar vergeleken met drie proeven van Silvis. Het doel van deze onderdeel is om deze pipelengtes onder het kritieke verval te valideren aan de hand van drie series van proeven.

3. Aanscherping van de veiligheidsbenadering.

Een eerste verkenning van de veiligheidsbenadering en omgang met de modelonzekerheid van de berekende pipelengte is uitgevoerd in Rosenbrand et al. (2022A) op basis van fictieve doorsneden. 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. In deze studie wordt deze veiligheidsbenadering aangescherpt aan de hand van een pilot. Verder is een aanscherping van de keuze in karakteristieke waarde van de doorlatendheid van het WVP nodig door nieuwe ontwikkelingen in geohydrologische modellen.

Het voorliggende rapport betreft de hierboven genoemde stap 1.

A.1.2

Leeswijzer

Het volgende hoofdstuk bevat de methode gebruikt om de analyse te maken, namelijk het opstellen van het conceptuele model en de beschrijving van de numerieke analyse voor de validatie. Hoofdstuk 3 bevat de resultaten van berekeningen en Hoofdstuk 4 de analyse. De conclusies zijn dan in Hoofdstuk 5 gepresenteerd.

A.2

Methode

Om voorland goed mee te nemen in de pipinganalyse is het van belang om inzicht te hebben in de fysica van het pipingproces. Het is belangrijk om de kritieke pipelengte (L_c) te bepalen om vast te stellen of de pipe niet onder het voorland komt. De rekenregel van Sellmeijer is niet toepasbaar wanneer water van bovenaf door de deklaag in de pipe stroomt, wat zou kunnen gebeuren als de pipe onder het voorland komt. Ook het meest gebruikte erosiemodel, D-Geo Flow, is niet gevalideerd met instroom van bovenaf. Daarnaast bestaat het risico dat de pipe onder het voorland kortsluiting maakt bij een zwakke plek. Door te controleren of de kritieke pipelengte onder de dijkbasis uitkomt, kan er op een onderbouwde manier meer voorland meegenomen worden in de pipingbeoordelingen.

Met een conceptueel model kan de fysica van het pipingproces inzichtelijker worden door het effect van parameters op de pipingproces beter in beeld te brengen. In Rosenbrand et al. (2022A) een eerste conceptueel model opgesteld voor de pipelengte. Het conceptuele model is gevalideerd met een aantal proeven en met numerieke modellen.

In de volgende paragraaf is het conceptuele model van vorig jaar uitgebreid om het effect van anisotropie en meerlaagsheid ook mee te nemen. Deze twee processen treden vaak op in de praktijk maar worden niet mee genomen in de rekenregel. Anisotropie van het Watervoerend pakket (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 ($A = \frac{K_h}{K_v}$).

Meerlaagsheid van het WVP houdt in dat het WVP uit meerdere lagen met verschillende doorlatendheden bestaat. Hier wordt voor meerlaagsheid alleen gekeken naar een twee-laags WVP.

De laatste paragraaf bevat een uitgebreide overzicht van de numerieke modellen opgesteld om het conceptuele model van Hoofdstuk A.2.1 te valideren.

A.2.1

Conceptueel model

Het conceptuele model in dit rapport is gebaseerd op een puur 2D situatie, met andere woorden het gaat uit van een oneindig brede pipe en een 2D uitstroomopening (sloot of geen deklaag). Er wordt uitgegaan van een homogeen zandpakket in de baan van de pipe. In de praktijk treden er niet alleen 2D situaties op. Zoals in Rosenbrand et al. (2022A) is geschat, kunnen op basis van het type uitstroomopening en de hoeveelheid pipes die vormt ruwweg vier situaties worden onderscheiden:

- Situatie 1 - Puur 2D: oneindig brede pipe en een 2D uitstroomopening. Rekenregel en model van Sellmeijer/D-Geo Flow toepasbaar.
- Situatie 2 - Combinatie 2D/3D: 1 eindig brede pipe en een 2D uitstroomopening.
- Situatie 3 - Combinatie 2D/3D: veel pipes en een 3D uitstroomopening (gat, wel door ondoorlatende deklaag).
- Situatie 4 - Puur 3D: één eindige brede pipe en een 3D uitstroomopening.

Alleen situatie 1 kan met de rekenregel van Sellmeijer en D-Geo Flow beschouwd worden. De overige situaties kunnen met 3D modellen beschouwd worden, maar leveren op dit moment nog geen betrouwbare of gevalideerde resultaten voor de praktijk voor kritiek verval of pipelengte.

Voor de pipinganalyse is het ook relevant om inzicht te hebben in het effect van de andere situaties op het pipingproces. Hiervoor wordt verwezen naar Rosenbrand et al. (2022A) en Rosenbrand et al. (2022B).

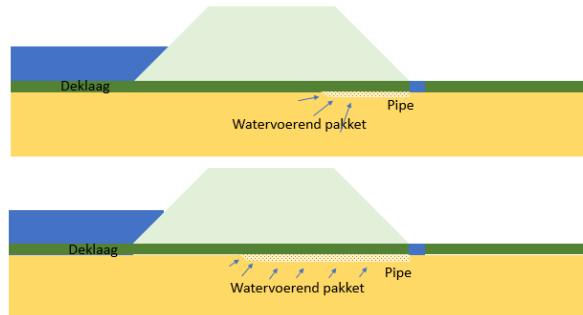
Pipegroei

Het conceptuele model voor het pipingproces is uitgebreid uitgewerkt in Rosenbrand et al. (2022A). Hieronder wordt dit model kort herhaald, omdat deze kennis de basis is voor de nieuwe hypotheses die opgesteld zijn voor anisotropie en meerlaagsheid. Het conceptuele model gaat eerst uit van een situatie met een ondoorlatend voor- en achterland.

De groei van de pipe wordt in de huidige methodiek (rekenregel en D-Geo Flow) beschreven met het model van Sellmeijer (Sellmeijer et al., 2011; Sellmeijer, 1988). Dit model is gebaseerd op het krachten evenwicht op de korrels. Dat wil zeggen dat de pipe groeit wanneer de schuifkracht van het water in de pipe, door stroming vanuit het WVP naar de pipe, voldoende is om korrels te transporteren. De pipe groeit dan totdat een evenwicht is bereikt. Proeven en modellen laten zien dat een pipe vaak bij lagere vervallen dan het kritieke verval een evenwicht bereikt. 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. De pipelengte net voordat de pipe door blijft groeien heet de kritieke pipelengte. Dit gedrag, het wel of niet bereiken van een evenwicht, kunnen we verklaren door een combinatie van twee tegengestelde effecten:

Effect 1: Concentratie van stroming naar de pipe.

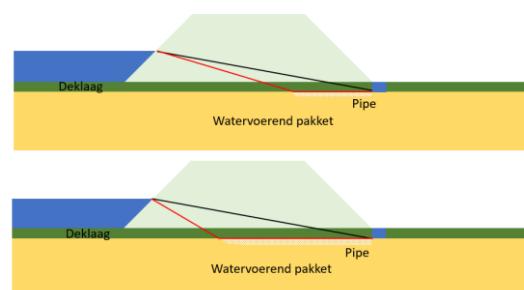
Een pipe zal groeien door concentratie van stroming naar de pipe. De pipegroei leidt bij een gegeven verval tot een toename in uitstroomoppervlak, de pipe wordt langer. Hierdoor is er een afname in waterspanning rondom de pipe. Door deze afname kan een evenwicht bereikt worden. Dit is in Figuur A 1 geïllustreerd, waar twee gevallen met dezelfde verval zijn geschematiseerd. In het eerste geval is de pipe kort en heeft veel concentratie van stroming naar de pipe. In het onderste geval heeft de pipe een evenwicht bereikt door langer te worden waardoor er minder concentratie van stroming is naar de pipe.



Figuur A 1 Illustratie van effect 1: pipegroei door concentratie van stroming naar de pipe.

Effect 2: Afstand tussen pipe kop en rivier.

De kop van de pipe komt dichter bij het intredepunt en, omdat de drukval in de pipe kleiner is dan in het zand, neemt het verhang bovenstroms van de pipe toe. Dit effect is sterk afhankelijk van de drukval in de pipe ten opzichte van de drukval in het WVP, hoe groter het contrast tussen die twee hoe belangrijker effect 2 wordt. Figuur A 2 illustreert dit. Wanneer er geen drukval in de pipe is (rood in deze figuur), is het verhang bovenstroms van de pipe veel lager bij een kortere pipe dan bij een langere pipe. Dit komt voor wanneer de pipe een oneindig grote doorlatendheid heeft. Wanneer de pipe en het WVP dezelfde doorlatendheid hebben is er geen verschil zijn in stijghoogte beneden of bovenstroms van de pipe, effect 2 is niet meer relevant. De werkelijke situatie zit tussen deze twee extreme gevallen.



Figuur A 2 Illustratie van effect 2: afname afstand tussen pipe kop en bovenstroomse randvoorwaarde leidt tot een grotere verhang bovenstroms van de pipe.

De kritieke pipelengte is het omslagpunt waar, bij een bepaald verval (het kritieke verval), effect 2 belangrijker wordt dan effect 1, waardoor de pipe bij gelijkblijvend verval doorgroeit. Dit omslagpunt wordt bereikt omdat naarmate de pipe langer is, de vergroting van het uitstroomoppervlak minder invloed heeft op de waterspanningen naast de pipe. Hierdoor is het langer worden van de pipe (effect 1) relatief minder belangrijk ten opzichte van effect 2.

Aan het begin van pipegroei, bij lage vervallen, heeft een vergroting in uitstroomoppervlak relatief veel effect op de waterspanning naast de pipe, de pipe vindt dan snel evenwicht en groeit in kleine stappen. Naarmate het verval verhoogd wordt met dezelfde stapgrootte, heeft het uitstroomoppervlak minder effect op de waterspanning, en moet de pipelengte groter worden om de waterspanning naast de pipe te beïnvloeden waardoor de pipelengte in grotere stappen toeneemt. Wanneer het groter worden van de pipe weinig invloed meer heeft op de waterspanningen wordt het effect 2 dominant. Dit is het omslagpunt. Deze observaties laten zien dat bij korte pipelengte effect 1 belangrijk is (vergroting van het uitstroomoppervlak heeft veel invloed op de waterspanningen) en met de groei van de pipe wordt effect 2 belangrijker (uitstroomoppervlak heeft minder invloed op de waterspanningen) totdat bij het omslagpunt effect 2 dominant wordt.

Het omslagpunt, en dus de kritieke pipelengte, hangt af van het grondwaterstromingspatroon, met andere woorden van de stijghoogtecontourlijnen. Deze bepalen de waterspanningen naast de pipe bij een bepaalde verval. De stijghoogtecontourlijnen zijn afhankelijk van de geometrie van het WVP, de anisotrop eigenschappen van het WVP en de doorlatendheid van het achterland.

De kritieke pipelengte wordt dus beïnvloed door eigenschappen die stijghoogtecontourlijnen beïnvloeden. Wanneer er meer concentratie van stroming naar de pipe is, gekenmerkt door een sterker kromming van de stijghoogtecontouren bij de pipe, is de verwachting dat een grotere uitstroomoppervlak langer invloed zal hebben. In deze gevallen blijft effect 1 bij hogere vervallen nog belangrijk en wordt een langere kritieke pipelengte verwacht.

Op basis van deze theorie werd in Rosenbrand et al. (2022A) het effect van uitstroomopening, geometrie (dikte/lengte verhouding) van het WVP, schaal, eigenschappen van het zand (doorlatendheid WVP, d_{70} , meerlaagsheid en anisotropie) en doorlatendheid achterland op de pipelengte onderzocht. Hieruit bleek dat het effect van anisotropie en meerlaagsheid afhankelijk waren van de geometrie van het WVP. Hierdoor zijn deze twee effecten in deze studie nader onderzocht.

In deze studie is naast de kritieke pipelengte ook gekeken naar het kritieke verval. Uit de voorlanden 2021 studie bleek dat het onderbouwd meenemen van meer voorlanden ook soms afhankelijk was van pipelengtes bij vervallen onder kritiek verval. Deze pipelengtes zijn afhankelijk van het kritieke verval wat weer beïnvloed wordt door hoeveel water naar pipe gaat bij een gegeven verval en de d_{70} .

Op basis van het conceptuele model weten we dat anisotropie en meerlaagsheid tot langere pipes en hogere kritieke vervallen leiden. Het is echter nog niet duidelijk hoeveel langer of hoger L_c en H_c worden en hoe bepaalde parameters deze beïnvloeden. Hierdoor zijn in de volgende paragraaf hypotheses opgesteld om beter te begrijpen hoe de kritieke pipelengte en het kritieke verval beïnvloed worden door anisotropie of meerlaagsheid in combinatie met de dikte van het WVP (D), de doorlatendheid van het WVP (K), de d_{70} van het WVP, de doorlatendheid van het achterland (K_{AL}) en de type instroomrandvoorwaarden.

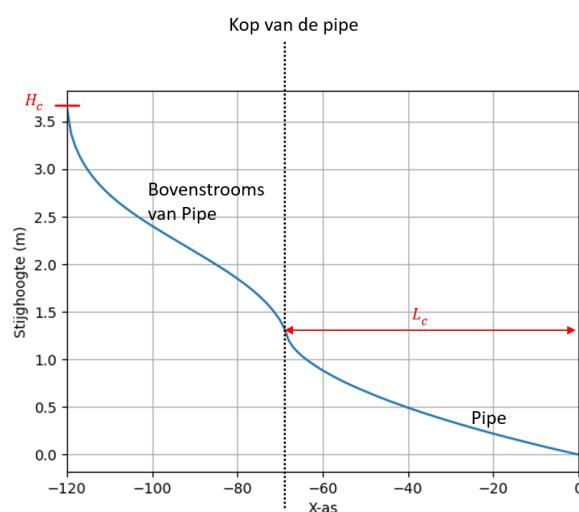
Hypotheses

Voor de invloed van meerlaagsheid en anisotropie zijn in deze paragraaf hypotheses opgesteld. De hypotheses zijn vervolgens gevalideerd met numerieke modellen gebouwd met de D-Geo Flow 2022.01. Er zijn geen proeven om deze hypotheses te valideren. In Hoofdstuk A.2.2 is de opbouw van de numerieke modellen beschreven en in Hoofdstuk A.3 staat een uitgebreid overzicht van alle resultaten van de numerieke modellen die de hypotheses

ondersteunen. Een belangrijke disclaimer is dat D-Geo Flow niet gevalideerd is voor anisotropie.

Het effect van anisotropie en meerlaagsheid is sterk afhankelijk van de geometrie van de instroomrandvoorwaarden, omdat deze veel invloed hebben op het debiet naar de pipe en de stijghoogtecontourlijnen naast de pipe. Daarom zijn steeds twee type instroomrandvoorwaarden gebruikt om de hypotheses te valideren: één met horizontaal en verticale instroom (BC1 genoemd) en een tweede met alleen een horizontale instroom (BC2 genoemd), zie Paragraaf 0.

De hypotheses geven het verwachte effect van een bepaalde parameter op de kritieke pipelengte, gebaseerd op stijghoogtecontourlijnen naast de pipe, en op het kritieke verval, op basis van het debiet naar de pipe. Daarom wordt bij elk hypothese steeds gekeken naar de stijghoogtecontourlijnen bij kritiek verval. Verder wordt ook voor elke hypothese de stijghoogte langs de pipe bij kritiek verval gegeven. In deze figuur zijn het kritieke verval en de kritieke pipelengte makkelijk te lezen, waardoor snel een eerste indruk kan worden verkregen van de invloed van bepaalde parameters op H_c en L_c , zie Figuur A 3.



Figuur A 3 Uitleg van kritiek verval en kritieke pipelengte in de stijghoogte grafiek bij kritiek verval.

Anisotropie

De hypotheses opgesteld voor anisotropie zijn in Tabel A 1 weergegeven. Er zijn vijf hypotheses (van H1 tot H5).

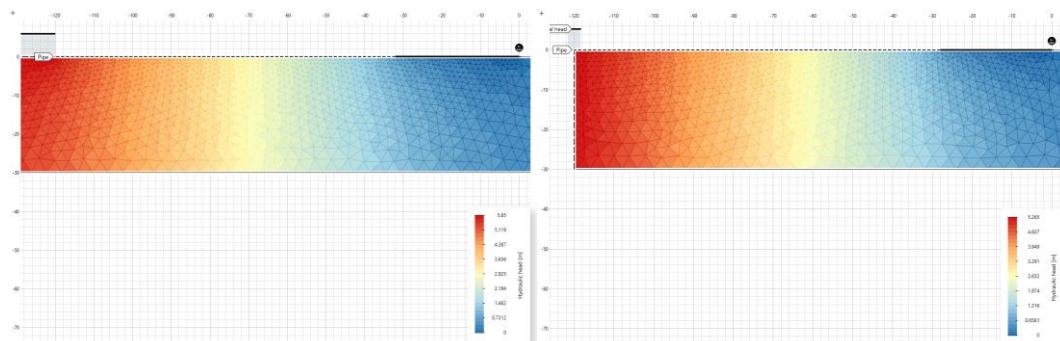
Tabel A 1 Hypotheses voor het effect van verschillende parameters in combinatie met anisotropie op de kritieke pipelengte en het kritieke verval. In groen staan de pijlen die positief werken (korter kritieke pipelengte en lager kritiek verval) en in rood negatief (langere kritieke pipelengte en hoger kritiek verval).

Hypotheses	L_c	H_c
H1: Verhoging van anisotropie	↑	↑
H2: Verhoging in dikte van het WVP voor situaties met gelijke anisotropie	↑	↓
H3: Verhoging in doorlatendheid van het WVP voor situaties met gelijke anisotropie	Geen effect	↓
H4: Verhoging in d_{70} van het WVP voor situaties met gelijke anisotropie	Geen effect	↑
H5: Verhoging in leklengte van het achterland voor situaties met gelijke anisotropie	↑	↓

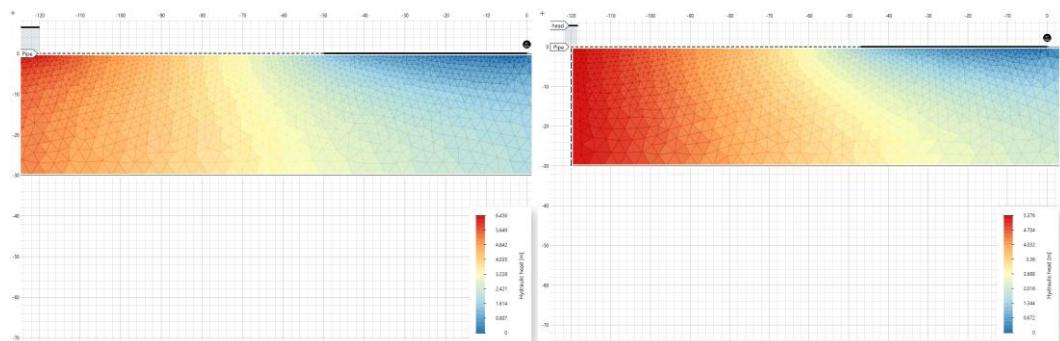
Hypothese 1: Verhoging van Anisotropie leidt tot een langere kritieke pipelengte en een hoger kritiek verval

Een toename van anisotropie leidt tot een sterkere kromming in de stijghoogtecontouren bij de kop van de pipe, vanwege de voorkeur voor horizontale stroming. De mate van kromming is ook sterk afhankelijk van de type instroomrandvoorwaarde. Met verticale en horizontale instroom heb je iets meer kromming dan wanneer je alleen horizontale instroom hebt. Figuur A 4 en Figuur A 5 illustreren dit bij het kritieke verval.

Door deze sterkere kromming, veroorzaakt door anisotropie, zal de pipe langer moeten worden om water te ontladen en zo invloed te hebben op de waterspanningen. Hierdoor is effect 1 relatief belangrijk voor gevallen met anisotropie in vergelijking met gevallen zonder anisotropie en zijn de kritieke pipelengtes bij anisotropie langer.



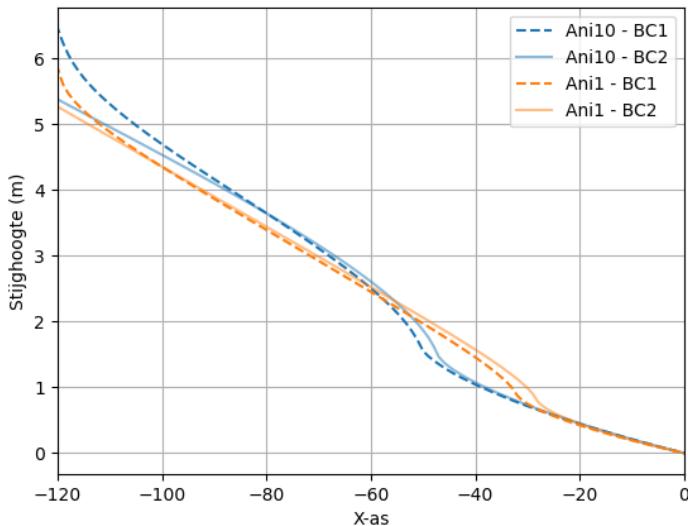
Figuur A 4 Stijghoogte in een 30 dik WVP, een 120 m ondoorlatend voorland, een 200 m ondoorlatend achterland, zonder anisotropie en met BC1 (links) en BC2 (rechts).



Figuur A 5 Stijghoogte in een 30 dik WVP, een 120 m ondoorlatend voorland, een 200 m ondoorlatend achterland, een anisotropiefactor van 10 en met BC1 (links) en BC2 (rechts).

Een hogere anisotropiefactor leidt tot meer weerstand tegen stroming van het WVP naar de pipe, hierdoor is er minder debiet naar de pipe en dus een hoger kritiek verval.

Figuur A 6 geeft een samenvatting van de twee effecten (langere kritieke pipelengte en hoger kritiek verval) die boven zijn toegelicht door de stijghoogte langs de pipe weer te geven bij kritiek verval. Hier is te zien dat het type randvoorwaarde weinig invloed heeft op de kritieke pipelengte bij anisotropie maar heeft wel invloed op het kritieke verval. BC1 heeft altijd de hoogste kritiek verval ongeacht de anisotropiefactor vanwege de radiale intredeweerstand.

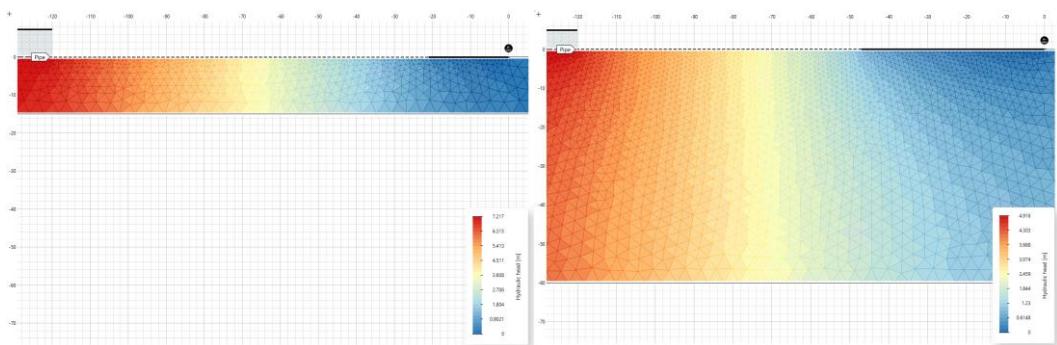


Figuur A 6 Stijghoogte langs de pipe bij kritiek verval in een 30 m dik WVP met een 120 m lang ondoorlatend voorland en 200 m lang ondoorlatend achterland met een anisotropiefactor van 1 en van 10 voor beide type instroomrandvoorwaarden.

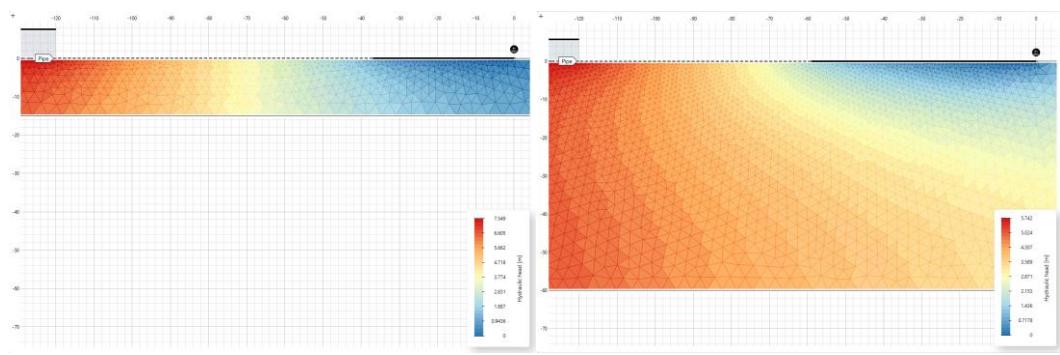
Hypothese 2: Een dikker WVP met dezelfde anisotropiefactor leidt tot een langere kritieke pipelengte en een lager kritiek verval

Rosenbrand et al. (2022A) hebben aangetoond dat de vorm van het WVP een significante invloed heeft op de waterspanningen en daarmee op het omslagpunt, L_c/L_s . Een dikker WVP leidt tot meer stroming van onderaf naar de pipe toe en daardoor zijn de stijghoogtelijnen naast de pipe sterk 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 waardoor de kritieke pipelengte langer wordt. Hypothese 1 geeft aan dat meer anisotropie tot een langere kritieke pipelengte leidt door dezelfde reden. Hierdoor zal een dikker pakket met meer anisotropie tot een nog langere kritieke pipelengte leiden.

De sterker concentratie van stroming is geïllustreerd in onderstaande figuren die het stijghoogtebeeld bij het kritieke verval tonen. Bij een relatief platter pakket (lagere D/L_s) is er relatief minder concentratie van de stroming naar de pipe, zoals te zien is aan de rechtere stijghoogtecontouren en is het effect van anisotropie minder groot.



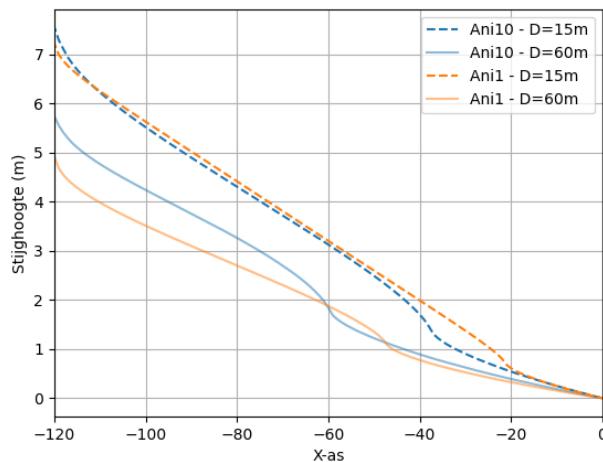
Figuur A 7 Stijghoogte in een 15 m (links) en 60 m (recht) dik WVP, een 120 m ondoorlatend voorland, een 200 m ondoorlatend achterland, zonder anisotropie en met BC1.



Figuur A 8 Stijghoogte in een 15 m (links) en 60 m (recht) dik WVP, een 120 m ondoorlatend voorland, een 200 m ondoorlatend achterland, een anisotropiefactor van 10 en met BC1.

Een dikker WVP leidt tot meer debiet naar de pipe en dus tot een verlaging van het kritieke verval, bij gelijke waarde van anisotropie. Anisotropie leidt tot minder debiet naar de pipe en een verhoging van het kritieke verval. Bij een dikker en meer anisotroop pakket is het netto effect op het kritieke verval niet goed te voorspellen.

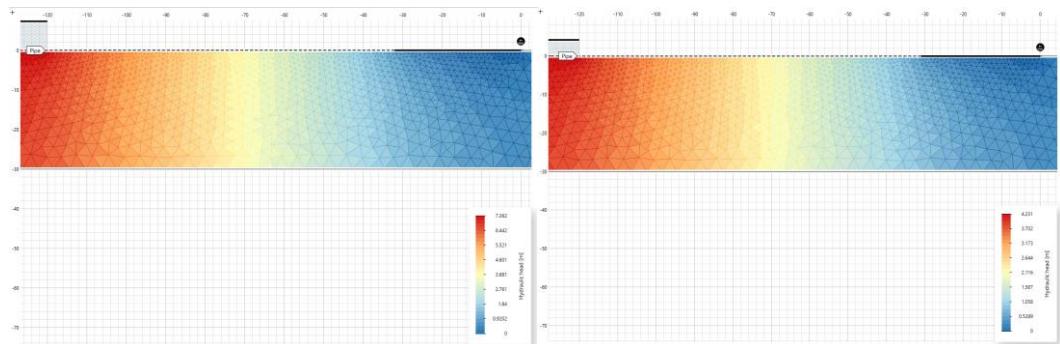
Figuur A 9 geeft de stijghoogte langs de pipe bij kritiek verval voor een dun en dik pakket met en zonder anisotropie. Hier is duidelijk te zien dat het kritieke verval niet veel beïnvloed wordt door anisotropie bij een dun pakket van 15 m. Bij een dik pakket van 60 m leidt een anisotropiefactor van 10 tot 1 m verlaging in kritiek verval in vergelijking met een situatie zonder anisotropie. De kritieke pipelengte wordt wel altijd langer door anisotropie ongeacht de dikte van het WVP.



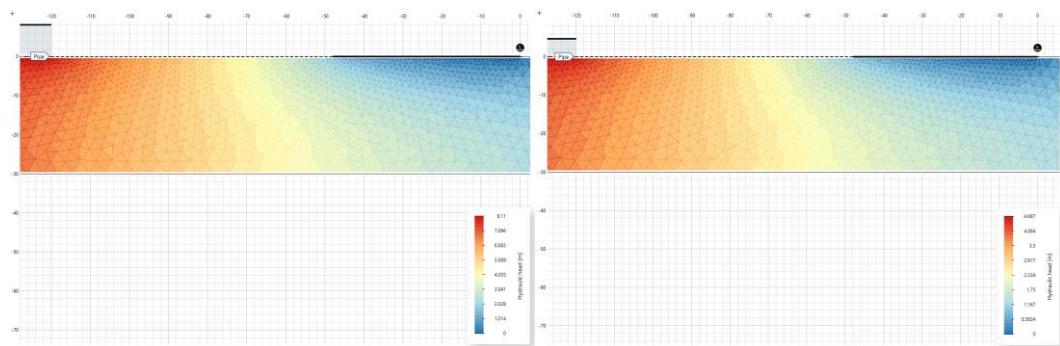
Figuur A 9 Stijghoogte langs de pipe bij kritiek verval in een 15 en 60 m dik WVP met een 120 m lang ondoorlatend voorland en 200 m lang ondoorlatend achterland met een anisotropiefactor van 1 en van 10.

Hypothese 3: Een meer doorlatend WVP met dezelfde anisotropiefactor heeft geen effect op de kritieke pipelengte en leidt tot een lager kritiek verval

Rosenbrand e.al (2022A) hebben aangetoond dat het effect van de doorlatendheid de kritieke pipelengte niet significant beïnvloedt aangezien het stijghoogteprofiel niet veranderd door de doorlatendheid. Dit is in Figuur A 10 terug te zien. Omdat anisotropie wel tot andere stijghoogtelijnen en een langere pipe leidt (zie Figuur A 11) zal een verandering in doorlatendheid van het WVP met meer anisotropie wel tot een langere kritieke pipelengte in vergelijking met een case zonder anisotropie.



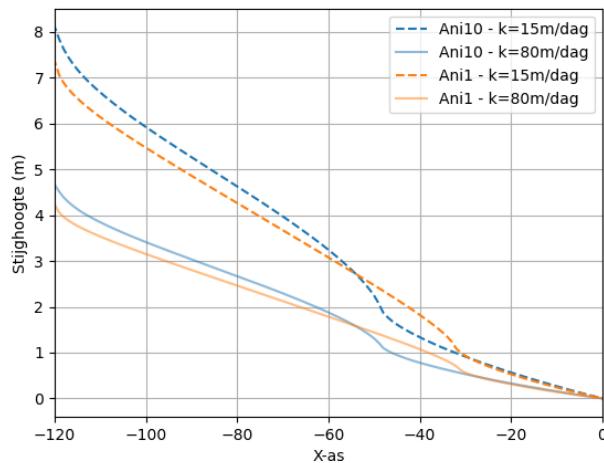
Figuur A 10 Stijghoogte in een 30 m dik WVP met 15 m/dag (links) en 80 m/dag (rechts) doorlatendheid, een 120 m ondoorlatend voorland, een 200 m ondoorlatend achterland, zonder anisotropie en met BC1.



Figuur A 11 Stijghoogte in een 30 m dik WVP met 15 m/dag (links) en 80 m/dag (rechts) doorlatendheid, een 120 m ondoorlatend voorland, een 200 m ondoorlatend achterland, een anisotropiefactor van 10 en met BC1.

Een meer doorlatend WVP leidt tot een lager kritiek verval doordat er meer debiet in het WVP stroomt. Door een verhoging in debiet naar de pipe is er meer schuifkracht en komen de korrels in beweging bij een lager verval. Anisotropie leidt in tegenstelling daarop tot een hoger kritieke verval.

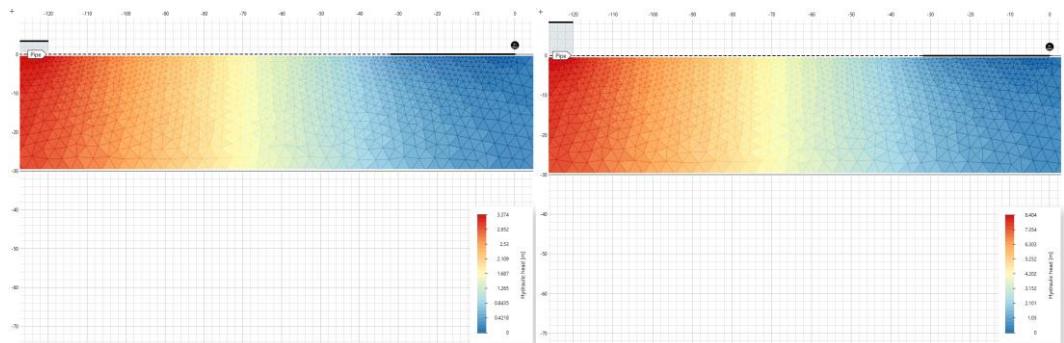
Figuur A 12 geeft de stijghoogte langs de pipe bij kritiek verval. In deze figuur zien we dat een meer doorlatend WVP geen invloed heeft op de kritieke pipelengte maar leidt wel tot een lager kritiek verval. De pipelengte wordt sterk beïnvloed door de anisotropie, maar bij gelijke anisotropiefactor is er geen aanvullend effect van doorlatendheid. In deze figuur zien we ook dat het kritieke verval sterk afhankelijk is van de doorlatendheid van het WV en in mindere mate van anisotropie. Dit komt mede doordat het WVP hier 30 m dik is.



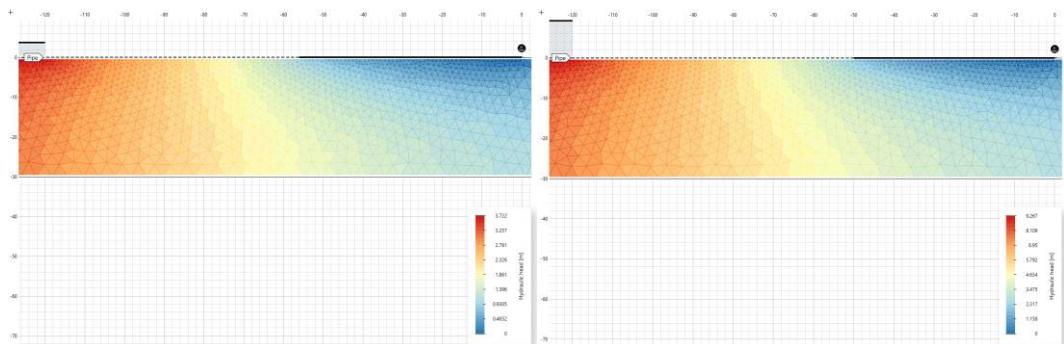
Figuur A 12 Stijghoogte langs de pipe bij kritiek verval in een 30 m dik WVP met 15 m/dag en 80 m/dag doorlatendheid, een 120 m lang ondoorlatend voorland en 200 m lang ondoorlatend achterland met een anisotropiefactor van 1 en van 10.

Hypothese 4: Een grotere d_{70} van het WVP met een verhoging in anisotropie heeft geen effect op de kritieke pipelengte en leidt tot een hoger kritiek verval.

Net als bij hypothese 3 heeft d_{70} geen invloed op de stijghoogtecontourlijnen (Rosenbrand et al., 2022A), hierdoor wordt de kritieke pipelengte niet beïnvloed door deze parameter, zie Figuur A 13. Anisotropie leidt wel tot langere kritieke pipelengtes zoals bij hypothese 1 gezien, waardoor een verandering d_{70} in combinatie met een groter anisotropiefactor wel tot een langere kritieke pipelengte leidt, zie Figuur A 14.



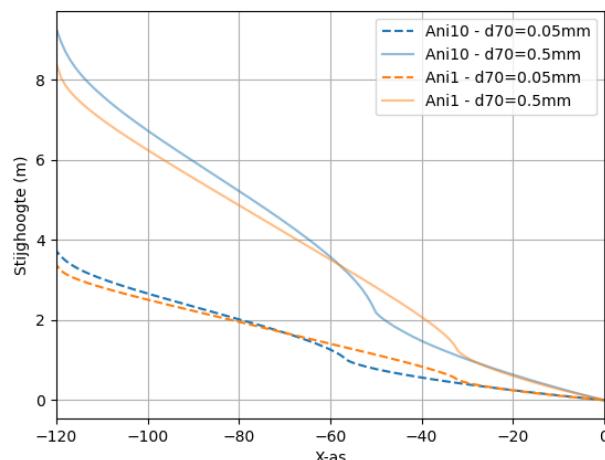
Figuur A 13 Stijghoogte in een 30 m dik WVP met een d_{70} van 0,05 mm (links) en 0,50 mm (rechts), een 120 m ondoorlatend voorland, een 200 m ondoorlatend achterland, zonder anisotropie en met BC1.



Figuur A 14 Stijghoogte in een 30 m dik WVP met een d_{70} van 0,05 mm (links) en 0,50 mm (rechts), een 120 m ondoorlatend voorland, een 200 m ondoorlatend achterland, een anisotropiefactor van 10 en met BC1.

Met een grotere d_{70} is meer stroming nodig om korrels in beweging te krijgen. Hierdoor zal er meer debiet in de pipe nodig zijn voordat kritiek verval bereikt wordt waardoor deze hoger wordt. Anisotropie leidt ook tot een hoger kritiek verval.

Figuur A 15 laat zien dat bij een groter d_{70} het verhang in de pipe hoger is omdat er meer stroming nodig is om de korrels in beweging te krijgen. Verder is het duidelijk dat het kritieke verval sterk afhankelijk is van d_{70} en in minder mate van anisotropie.



Figuur A 15 Stijghoogte langs de pipe bij kritiek verval in een 30 m dik WVP met een d_{70} van 0,05 en 0,5 mm, een 120 m lang ondoorlatend voorland en 200 m lang ondoorlatend achterland met een anisotropiefactor van 1 en van 10.

Hypothese 5: Een meer ondoorlatend achterland (langere leklengte) met een verhoging in anisotropie leidt tot een langere kritieke pipelengte en een lager kritiek verval

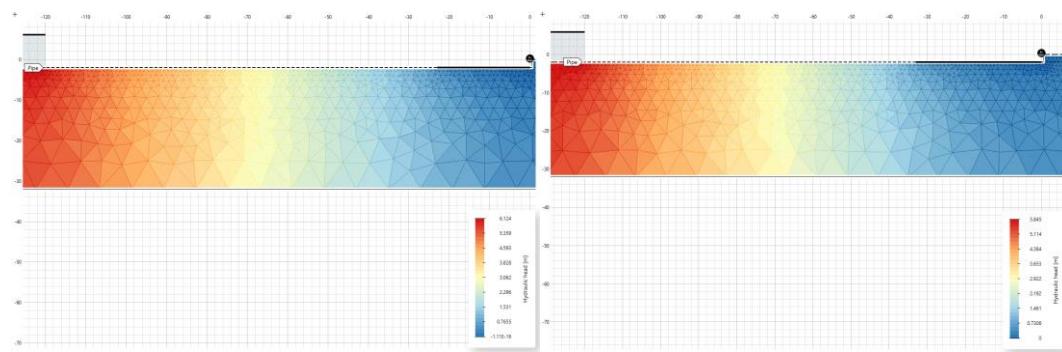
De mate van doorlatendheid van het achterland wordt gerepresenteerd door de leklengte⁶ (ook wel spreidingslengte genoemd). Deze hangt af van de doorlatendheid en dikte van zowel het achterland en het WVP, zie Vergelijking 1. Hoe langer de leklengte, hoe meer ondoorlatend de deklaag is.

$$\lambda = \sqrt{\frac{K_{WVP} D d}{K_{AL}}} \quad \text{Vergelijking 2.}$$

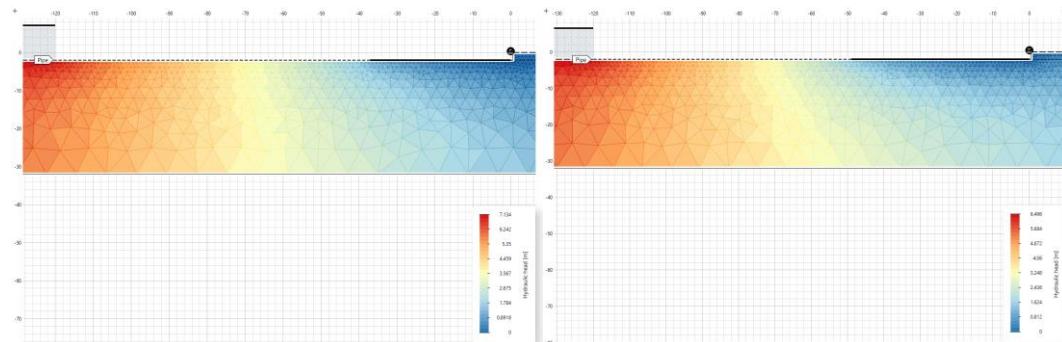
Bij een semi-doorlatend achterland en dus kortere leklengte stroomt er meer water naar het achterland en minder naar de pipe. Er is dus minder kromming van de stijghoogtecontour lijnen naast de pipe, zie Figuur A 16 en Figuur A 17. Daardoor is het effect vergelijkbaar met een groter uitstroomvlak. Omdat er al een groot uitstroomvlak is, zal bij een kortere leklengte de toename in lengte van de pipe relatief minder effect hebben op de waterspanning in de pipe. Effect 1 is hierdoor minder dominant. Er wordt daarom met een semi-doorlatend achterland een kortere kritieke pipelengte verwacht dan met een ondoorlatend achterland.

Anisotropie leidt in tegenstelling tot een semi-doorlatend achterland tot langere kritieke pipelengtes, het netto effect van een anisotroop pakket met een semi-doorlatend achterland op pipelengte is niet makkelijk te voorspellen.

⁶ Disclaimer: de formule voor de leklengte kan geen rekening houden met anisotropie en meerlaagsheid. Door anisotropie verwacht je nog langere leklengtes dan berekend met de formule. Dit is voor deze studie niet heel belangrijk omdat er niet specifiek naar een waarde van leklengte gekeken wordt.

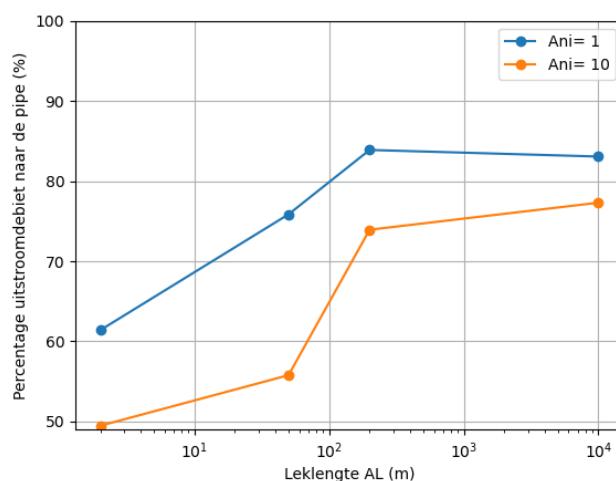


Figuur A 16 Stijghoogte in een 30 m dik WVP, een 120 m ondoorlatend voorland, een 600 m achterland met 2 m (links) en 10.000 m (rechts) leklengte, zonder anisotropie en met BC1. De schaal kleur voor beide grafieken is anders.



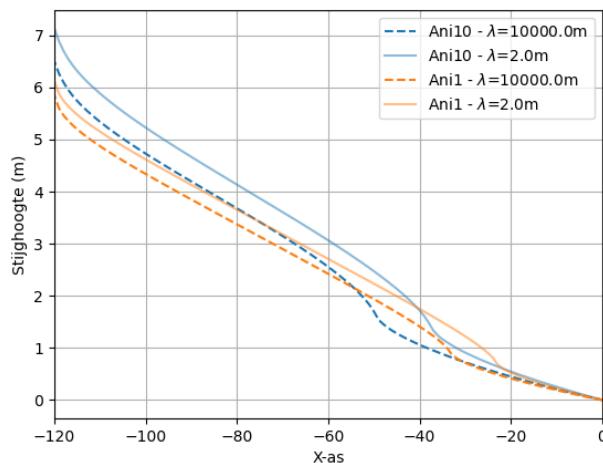
Figuur A 17 Stijghoogte in een 30 m dik WVP, een 120 m ondoorlatend voorland, een 600 m achterland met 2 m (links) en 10.000 m (rechts) leklengte, een anisotropiefactor van 10 en met BC1. De schaal kleur voor beide grafieken is anders.

Bij een minder doorlatend achterland (langere leklengte) kan minder water naar het achterland toestromen en komt er dus meer debiet naar de pipe. Dit is terug te zien in Figuur A 18 waar de percentage debiet naar de pipe geplot is voor verschillende achterland leklengtes. De rest percentage debiet stroomt af door kwel bij het achterland of door het WVP. Er wordt hierdoor een lager kritiek verval verwacht bij een langere leklengte.



Figuur A 18 Percentage debiet naar de pipe bij kritiek verval in een 30 m dik WVP met een 120 m lang ondoorlatend voorland, 200 m lang ondoorlatend achterland en BC1 voor verschillende leklengte van het achterland.

Figuur A 19 laat het verschil zien in stijghoogte langs de pipe bij kritiek verval voor een doorlatend en ondoorlatend achterland met en zonder anisotropie. In deze figuur is duidelijk te zien dat anisotropie en een meer ondoorlatend achterland elkaar versterken en tot een langere kritieke pipelengte leidt. In tegenstelling, leidt anisotropie tot een hoger kritiek verval terwijl een meer ondoorlatend achterland tot lager kritiek verval leidt. In deze figuur zien we dat het effect van doorlatendheid van het achterland groter is bij een hoger anisotropiefactor.



Figuur A 19 Stijghoogte langs de pipe bij kritiek verval in een 30 m dik WVP, een 120 m lang ondoorlatend voorland en 600 m lang achterland met een lekklengte van 2 en 10.000 m en een anisotropiefactor van 1 en van 10.

Meerlaagsheid

De hypotheses opgesteld voor het effect van meerlaagsheid zijn in Tabel A 2 weergegeven. Er zijn vijf hypotheses opgesteld (van H6 tot H10).

Tabel A 2 Hypotheses voor het effect van verschillende parameters in combinatie met meerlaagsheid op de kritieke pipelengte en het kritiek verval. In groen staan de pijlen die positief werken (kortere kritieke pipelengte en lager kritiek verval) en in rood negatief (langere kritieke pipelengte en hoger kritiek verval).

Hypotheses	L_c	H_c
H6: Verhoging van in doorlatendheidscontrast ($\frac{K_2}{K_1}$) met dezelfde $\frac{D_1}{D_2}$, totale dikte (D_{tot}), en gemiddelde doorlatendheid van het WVP (K_{gem})	↑	↑
H7: Verhoging van $\frac{D_1}{D_2}$ met dezelfde $\frac{K_1}{K_2}$, en dezelfde conductiviteit ($D_{tot} * K_{gem}$) in het WVP	↑	↑↓ ⁷
H8: Verhoging dikte WVP (D_{tot}) voor situaties met meerlaagsheid	↑	↓
H9: Verhoging d_{70} van het WVP voor situaties met meerlaagsheid	Geen effect	↑
H10: Verhoging lekklengte achterland voor situaties met meerlaagsheid	↑	↓

Hypothese 6: Een groter K_2/K_1 verhouding leidt tot een kortere kritieke pipelengte en een lager kritiek verval

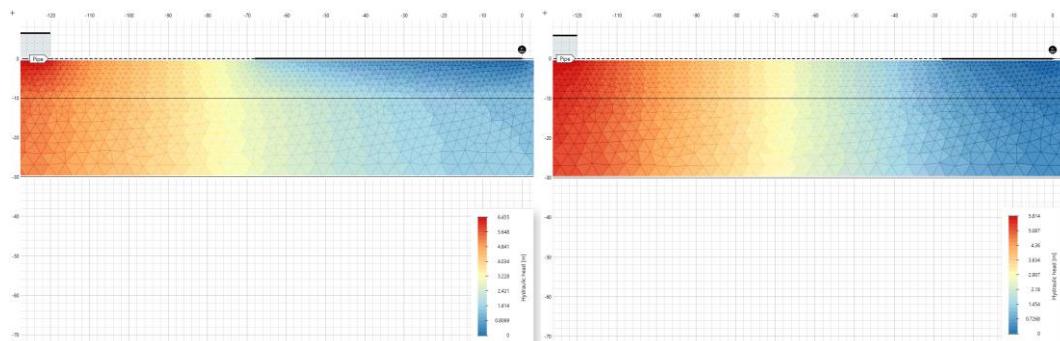
⁷ Het effect op het kritieke verval is sterk afhankelijk van K_2/K_1 en bij een hoog K_2/K_1 -waarden van de instroomrandvoorwaarden. In deze studie is het effect van D_1/D_2 alleen onderzocht voor een hoog doorlatendheidcontrast ($K_2/K_1=4,5$). Met dit contrast werd een verhoging in kritiek verval gezien met BC1 en juist een verlaging met BC2. Aanbevolen is om het effect van D_1/D_2 te onderzoeken bij lagere doorlatendheidcontrasten.

In Rosenbrand et al. (2022) is geconstateerd dat de grootte van het effect van meerlaagsheid afhangt van het doorlatendheidscontrast tussen de twee WVP lagen (K_2/K_1 , met K_1 de doorlatendheid van de bovenste laag en K_2 die van de onderste laag), en van andere locatiespecifieke kenmerken (of de rivier insnijdt in het WVP, hoe lang het voorland is, of anisotropie ook speelt,...). In deze hypothese is alleen gekeken naar het effect van een hoger doorlatendheidscontrast (hogere K_2/K_1) bij dezelfde totale dikte van het WVP van 30 m, dezelfde verhouding in dikte tussen laag 1 en 2 en een constante gewogen gemiddelde doorlatendheid ($\frac{K_1 D_1 + K_2 D_2}{D_{tot}}$) van 30 m/dag.

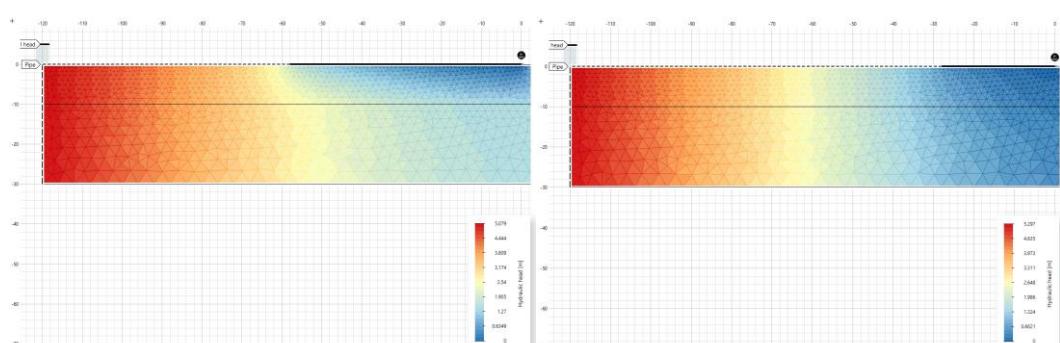
In de vorige studie is geconstateerd dat de kritieke pipelengte beduidend langer wordt in een meerlaagse situatie, en dat het effect al optreedt bij redelijk kleine doorlatendheidscontrasten ($K_2/K_1 = 2,7$) waar het effect op H_c nog verwaarloosbaar is. Het netto effect op kritiek verval en pipelengte kan dus, net als bij anisotropie, gunstig of ongunstig werken. In deze studie wordt gekeken naar doorlatendheidcontrasten (K_2/K_1) tussen 9,9 en 0,7.

Figuur A 20 en Figuur A 21 laten zien waarom er langere kritieke pipelengtes zijn met een groter doorlatendheidcontrast. Het is duidelijk te merken dat met een hoog doorlatendheidcontrast ($K_2/K_1=9,9$) de stijghoogtecontourlijnen heel anders zijn in de boven- en onderlaag van het WVP. Er is meer kromming van de stijghoogtecontourlijnen in de bovenste laag naar de pipe, waardoor langere kritieke pipelengtes worden verwacht. Bij $K_2/K_1=0,7$ is de bovenste laag van het WVP meer doorlatend. In dit geval is er weinig verschil in stijghoogtecontourlijnen tussen beide lagen van het WVP en is er minder kromming naar de pipe.

Het verschil tussen BC1 en BC2 is klein. Je ziet iets meer kromming bij BC1, wat ook het geval was bij anisotropie.

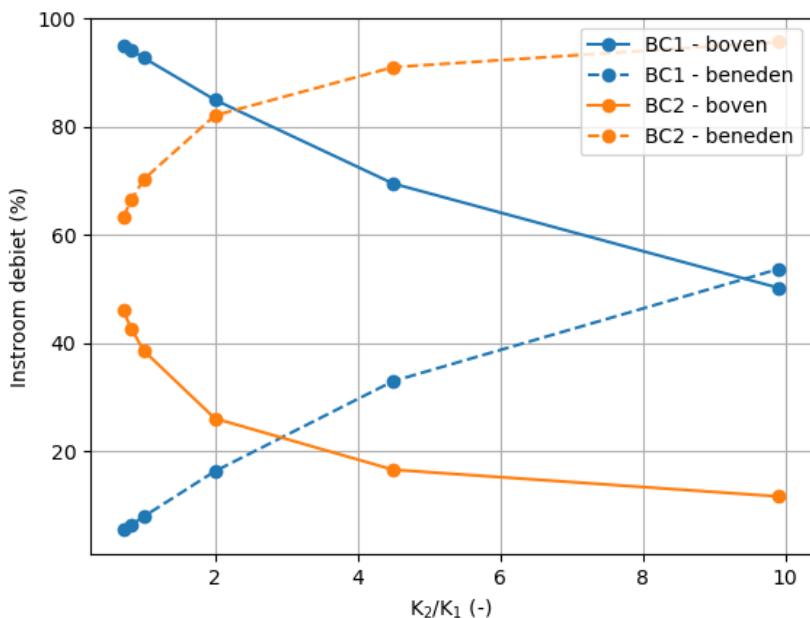


Figuur A 20 Stijghoogte in een twee-laags WVP met K_2/K_1 van 9,9 (links) en 0,7 mm (rechts) met $D_1/D_2=0,5$ en een totale dikte van 30 m, een 120 m ondoorlatend voorland, een 200 m ondoorlatend achterland en met BC1.



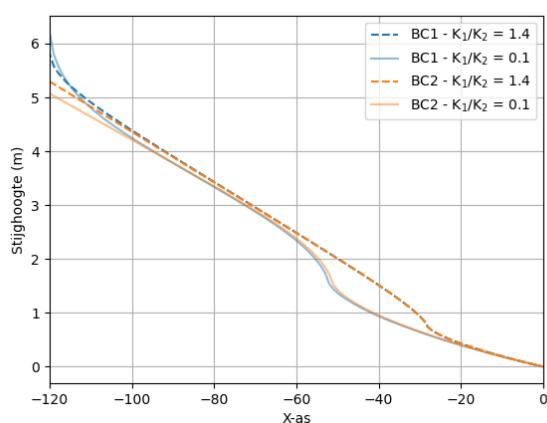
Figuur A 21 Stijghoogte in een twee-laags WVP met K_2/K_1 van 9,9 (links) en 0,7 mm (rechts) met $D_1/D_2=0,5$ en een totale dikte van 30 m, een 120 m ondoorlatend voorland, een 200 m ondoorlatend achterland en met BC2.

Bij een steeds minder doorlatende bovenste laag van het WVP (groter K_2/K_1), kan er minder debiet naar de pipe gaan omdat er ook minder debiet is in de bovenste laag, zie Figuur A 22. Het kritieke verval wordt daardoor hoger. Bij een K_2/K_1 kleiner dan 1 is de bovenste laag van het WVP meer doorlatend dan de onderste laag. Een nog hogere doorlatendheid van de bovenste laag heeft dan bij een gegeven doorlatendheid geen effect meer. Er wordt dan ook geen verandering in kritiek verval meer verwacht.



Figuur A 22 Percentage instroom debiet in de bovenste laag (doorgetrokken lijn) en in de onderste laag (gestippelde lijn) bij de twee verschillende type instroomrandvoorwaarde voor verschillende doorlatendheidscontrasten K_2/K_1 .

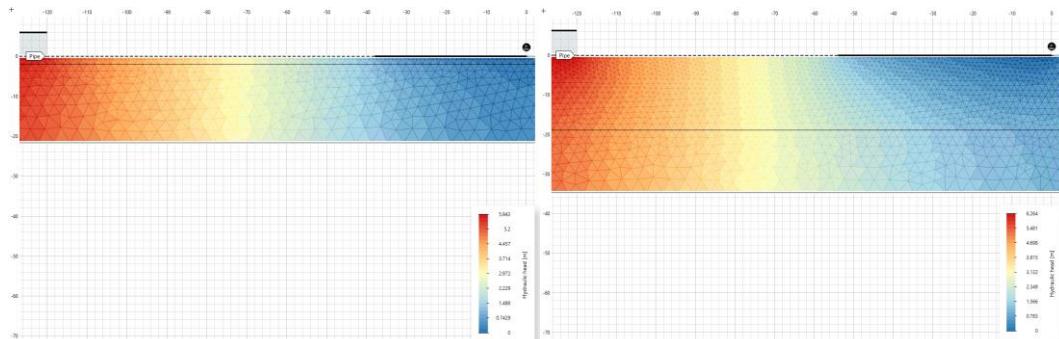
Figuur A 23 geeft de stijghoogtelijnen langs de pipe voor K_2/K_1 is 9,9 en 0,7 met BC1 en BC2 weer. Hieruit is duidelijk te zien dat de type randvoorwaarde weinig invloed heeft op de kritieke pipelengte. Het doorlatendheidscontrast heeft wel veel invloed op de kritieke pipelengte, een hoger K_2/K_1 geeft een veel langere kritieke pipelengte. Het effect van K_1/K_2 op het kritieke verval is redelijk klein.



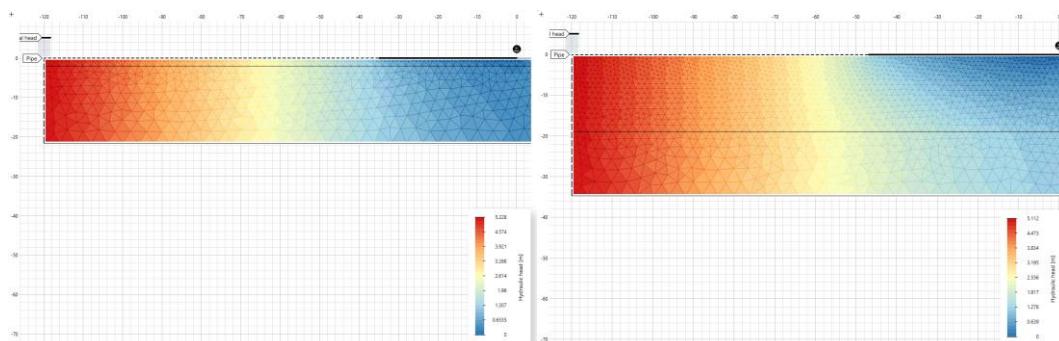
Figuur A 23 Stijghoogte langs de pipe bij kritiek verval in een twee-laags WVP van 30 m totale dikte, $D_1/D_2=0,5$ met een 120 m lang ondoorlatend voorland, 200 m lang ondoorlatend achterland en BC1 voor verschillende K_1/K_2 van het WVP.

Hypothese 7: Een grotere D_1/D_2 verhouding leidt tot een langere kritieke pipelengte en een lager kritiek verval

Voor deze hypothese is de conductiviteit (totale dikte * gemiddelde doorlatendheid – kD waarde) en K_2/K_1 constant gehouden op respectievelijk $900 \text{ m}^2/\text{dag}$ en $4,5$, en is de dikte van de bovenste laag vergroot. Bij een dikker bovenste WVP laag wordt meer kromming van de stijghoogtecontour lijnen verwacht, zie Figuur A 24 en Figuur A 25. Hierdoor, zal een meerlaags WVP met een dikkere bovenlaag een langere kritieke pipelengte hebben dan een meerlaags WVP met een dunnebovenste laag. Door meer kromming met BC1 zal de kritieke pipelengte met deze type instroomrandvoorwaarde langer zijn dan met BC2.



Figuur A 24 Stijghoogte in een twee-laags WVP met D_1/D_2 van $0,1$ (links) en $1,2 \text{ mm}$ (rechts) met $K_1/K_2 = 0,22$ en een instroom debiet van $900 \text{ m}^2/\text{dag}$, een 120 m ondoorlatend voorland, een 200 m ondoorlatend achterland en met BC1.

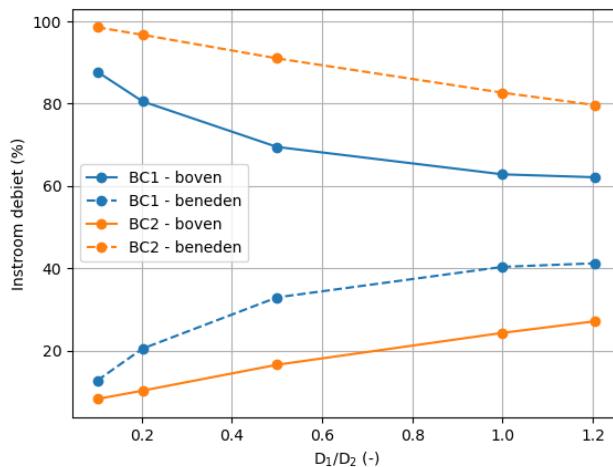


Figuur A 25 Stijghoogte in een twee-laags WVP met D_1/D_2 van $0,1$ (links) en $1,2 \text{ mm}$ (rechts) met $K_1/K_2 = 0,22$ en een instroom debiet van $900 \text{ m}^2/\text{dag}$, een 120 m ondoorlatend voorland, een 200 m ondoorlatend achterland en met BC2.

Het effect van D_1/D_2 op het debiet is sterk afhankelijk van het doorlatendheidcontrast (K_2/K_1). Hoe sterker dit contrast, hoe meer het effect van D_1/D_2 ook afhankelijk is van de instroomrandvoorwaarde. Bij een WVP met een groot doorlatendheidcontrast ($K_2/K_1 = 4,5$), heeft de type instroomrandvoorwaarde veel effect op het debiet naar de pipe en dus op het kritieke verval.

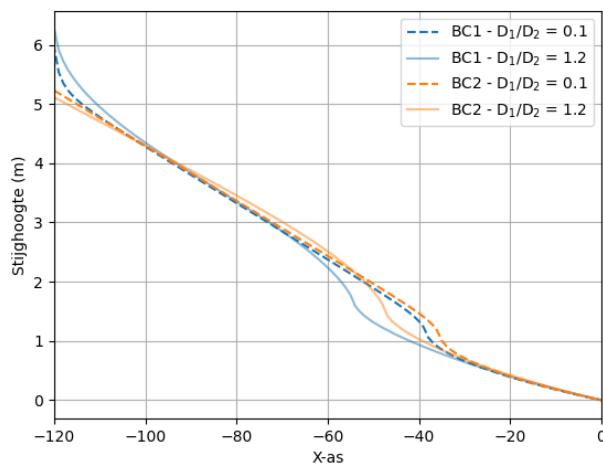
Een WVP met BC1 heeft altijd meer water in de bovenste laag door de extra verticale instroom. Doordat de bovenste laag ook veel minder doorlatend is dan de onderste laag, zal bij een toenamen in D_1/D_2 dezelfde hoeveelheid verticale instroom in de bovenste laag zijn maar wordt deze verdeeld over een groter oppervlakte. Hierdoor wordt netto een afname in debiet in de bovenste laag gezien en wordt een hoger kritiek verval verwacht, zie Figuur A 26.

Met BC2 is er geen verticale instroom. Daardoor heeft de meer doorlatend onderste laag juist het meest debiet bij een laag D_1/D_2 . Een verhoging in D_1/D_2 leidt tot een toenamen in debiet in de bovenste laag doordat deze dikker wordt, zie Figuur A 26. Je krijgt dan een verlaging in kritiek verval bij een toenamen in D_1/D_2 .



Figuur A 26 Percentage instroom debiet in de bovenste laag (doorgetrokken lijn) en in de onderste laag (gestippelde lijn) bij de twee verschillende type instroomrandvoorwaarde voor verschillende dikteverhoudingen D_1/D_2 .

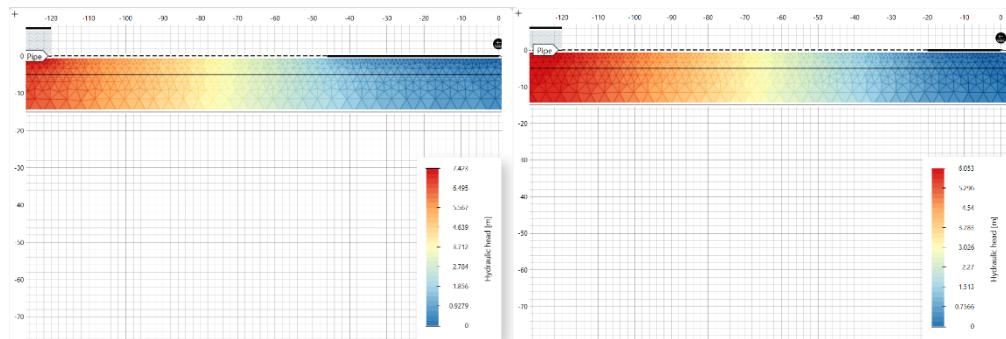
Figuur A 27 geeft de stijghoogte langs de pipe weer bij kritiek verval. Duidelijk te zien is dat een dikke bovenlaag (groter D_1/D_2) in combinatie met BC1 het langste kritieke pipelengte heeft. In deze figuur is ook te zien dat het effect op kritiek verval gedomineerd is door de type randvoorwaarde, met BC1 die altijd tot hoger kritiek vervallen leidt. Voor de kritieke pipelengte, is het effect van D_1/D_2 dominant ten opzichte van de randvoorwaarde.



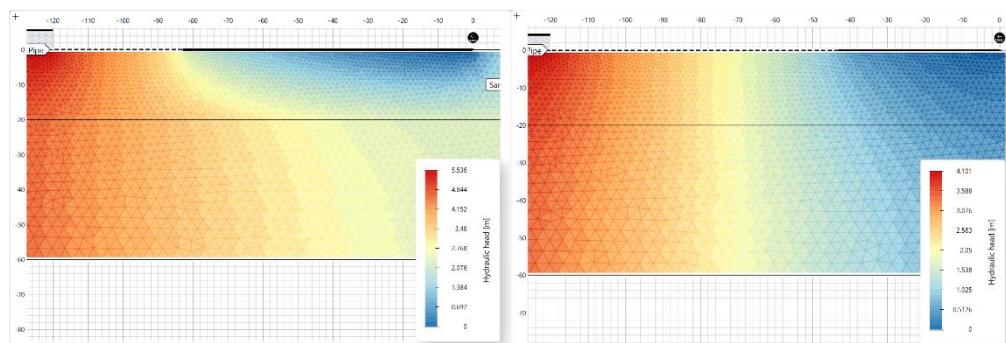
Figuur A 27 Stijghoogte langs de pipe bij kritiek in een twee-laags WVP met $K_1/K_2=0,22$, een 120 m lang ondoorlatend voorland, 200 m lang ondoorlatend achterland en BC1 voor verschillende D_1/D_2 van het WVP.

Hypothese 8: Een dikker WVP met meerlaagsheid leidt tot een langere kritieke pipelengte en een lager kritiek verval

Een dikker meerlaags pakket met een constante D_1/D_2 van 0,5 en ongeacht K_{gem} leidt tot meer kromming van de stijghoogtecontourlijnen en dus langere pipes. Dit is zichtbaar in Figuur A 28 en Figuur A 29, waar de linker grafieken een constant K_{gem} van 31,7 m/dag hebben met K_2/K_1 is 9,9. De rechter grafieken hebben een constant $K_{gem}=50,0$ m/dag en $K_2/K_1=0,7$.



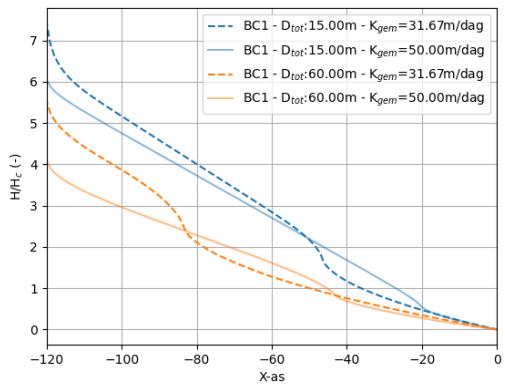
Figuur A 28 Stijghoogte in een twee-laags WVP met $D_1/D_2 = 0,5$, een totale dikte van 15 m en K_{gem} van 31,7 m/dag (links) en 50,0 m/dag (rechts), een 120 m ondoorlatend voorland, een 200 m ondoorlatend achterland en met BC1.



Figuur A 29 Stijghoogte in een tweelaags WVP met $D_1/D_2 = 0,5$, een totale dikte van 60 m en K_{gem} van 31,7 m/dag (links) en 50,0 m/dag (rechts), een 120 m ondoorlatend voorland, een 200 m ondoorlatend achterland en met BC1.

Een dikker meerlaags pakket met een constante D_1/D_2 leidt tot een lager kritiek verval, de mate daarvan hangt af van de doorlatendheidscontrast (K_2/K_1) en D_1/D_2 . Bij een groot doorlatendheidscontrast en een dunner bovenste laag, heeft het invloed van een dikker meerlaags pakket minder invloed, zie Hypothese 7.

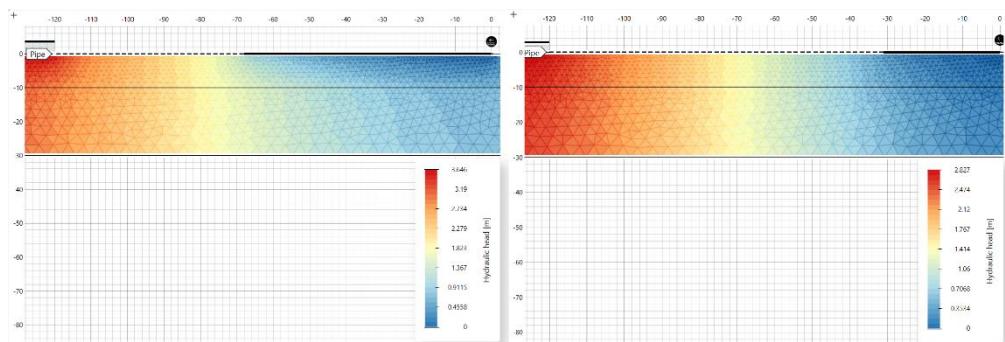
Figuur A 30 geeft de stijghoogte langs de pipe bij kritiek verval. Hier is duidelijk te zien dat het effect van een verhoging in D_{tot} op het kritieke verval groter is bij $K_{gem}= 50$ m/dag. Een verhoging van D_{tot} van 15 m naar 60 m leidt echter, ongeacht K_{gem} , tot ongeveer een verdubbeling in kritieke pipelengte.



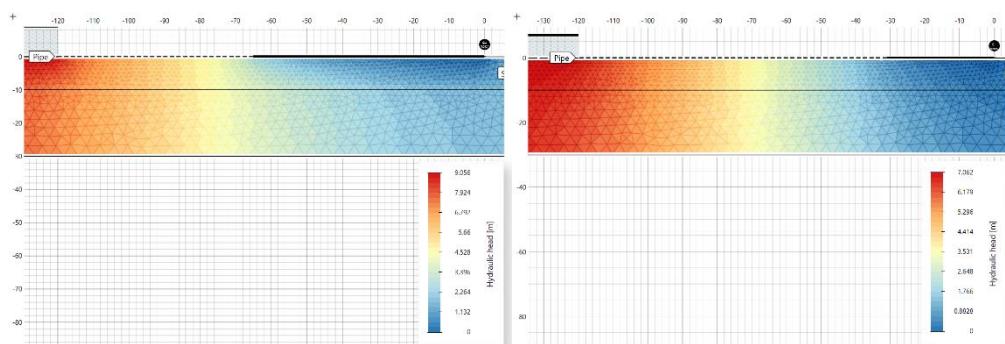
Figuur A 30 Stijghoogte langs de pipe bij kritiek in een twee-laags WVP met $D_1/D_2=0,5$, een 120 m lang ondoorlatend voorland, 200 m lang ondoorlatend achterland en BC1 voor verschillende D_{tot} van het WVP.

Hypothese 9: Een groter d_{70} van het WVP met meerlaagsheid heeft geen effect op de kritieke pipelengte en leidt tot een hoger kritiek verval

Net als bij Hypothese 4, leidt een groter d_{70} tot geen verandering in stijghoogtecontourlijnen ook bij meerlaagsheid. Dit is terug te zien in Figuur A 31 en Figuur A 32. Hierdoor zal een groter d_{70} tot geen verandering in kritieke pipelengte leiden bij dezelfde meerlaagsheid.



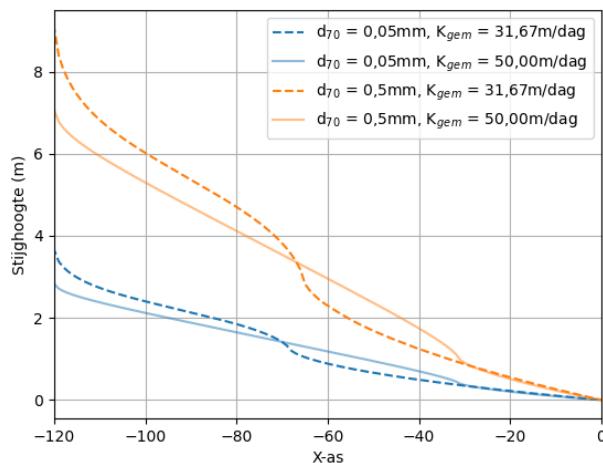
Figuur A 31 Stijghoogte in een twee-laags WVP met $D_1/D_2 =0,5$, een totale dikte van 30 m, een d_{70} van 0,05 mm en K_{gem} van 31,7 m/dag (links) en 50,0 m/dag (rechts), een 120 m ondoorlatend voorland, een 200 m ondoorlatend achterland en met BC1.



Figuur A 32 Stijghoogte in een twee-laags WVP met $D_1/D_2 =0,5$, een totale dikte van 30 m, een d_{70} van 0,50 mm en K_{gem} van 31,7 m/dag (links) en 50,0 m/dag (rechts), een 120 m ondoorlatend voorland, een 200 m ondoorlatend achterland en met BC1.

Een groter d_{70} leidt door de constante stijghoogte tot geen verandering in percentage debiet naar de pipe. Een groter d_{70} leidt wel tot een groter benodigd schuifkracht om de korrels in beweging te krijgen waardoor de totale debiet naar de pipe wel toeneemt. Hierdoor is de verwachting dat een groter d_{70} tot hoger kritieke vervallen zal leiden.

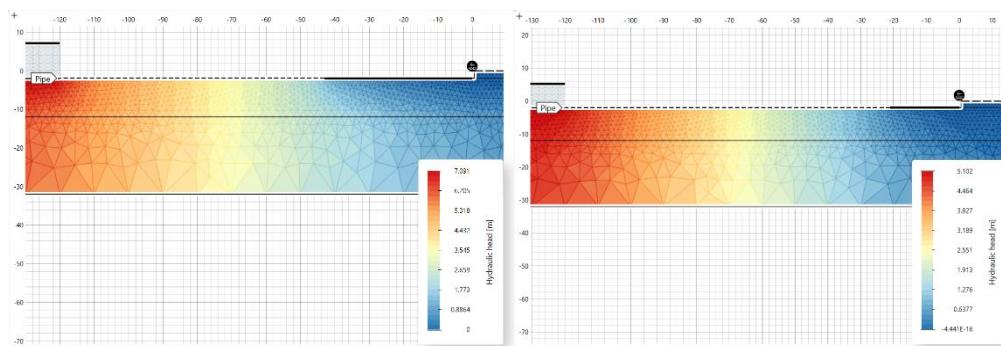
Figuur A 33 illustreert de stijghoogte langs de pipe bij kritiek verval voor gevallen met een d_{70} van 0,05 mm en 0,5 m met een K_{gem} van 31,67 m/dag of 50,00 m/dag met BC1. Hier is duidelijk te zien dat er geen verschil is in kritieke pipelengte. Het effect van d_{70} op het kritieke verval wordt groter met een hoger K_{gem} maar het kritieke verval is vooral gedomineerd door d_{70} .



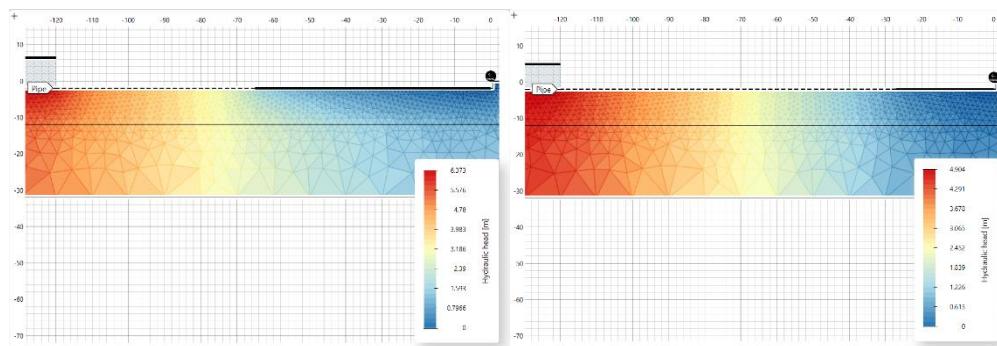
Figuur A 33 Stijghoogte langs de pipe bij kritiek in een twee-laags WVP met $D_1/D_2=0,5$ een totale dikte van 30 m, een 120 m lang ondoorlatend voorland, 200 m lang ondoorlatend achterland en BC1 voor verschillende d_{70} van het WVP.

Hypothese 10: Een meer ondoorlatend achterland (langer leklengte) met meerlaagsheid leidt tot een langer pipelengte en een lager kritiek verval

Deze laatste hypothese geeft het effect van de doorlatendheid van het achterland bij meerlaagsheid van het WVP. Een meerlaags pakket met een meer ondoorlatend achterland leidt tot meer kromming van de stijghoogtecontour lijnen en dus tot een langere kritieke pipelengte, zie Figuur A 34 en Figuur A 35. Deze figuren laten zien met een laag K_{gem} (31,7 m/dag) het effect van een meer ondoorlatend achterland op de stijghoogte iets meer zichtbaar is.

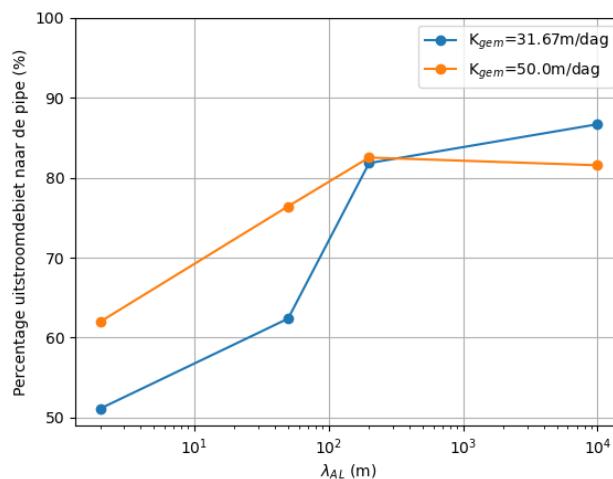


Figuur A 34 Stijghoogte in een twee-laags WVP met $D_1/D_2 =0,5$, een totale dikte van 30 m, een d_{70} van 0,20 mm en K_{gem} van 31,7 m/dag (links) en 50,0 m/dag (rechts), een 120 m ondoorlatend voorland, een 600 m achterland met een leklengte van 2 m en met BC1.



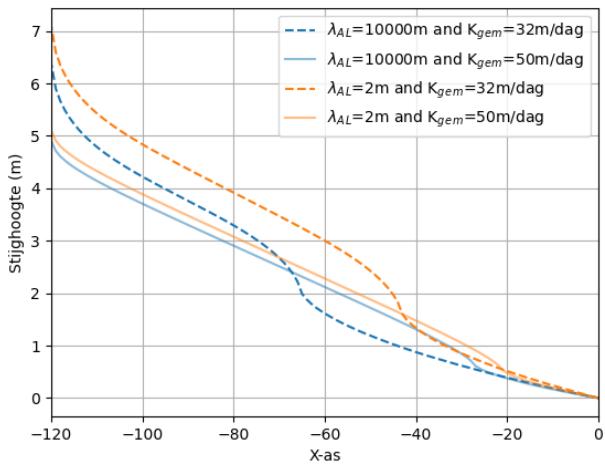
Figuur A 35 Stijghoogte in een twee-laags WVP met $D_1/D_2=0,5$, een totale dikte van 30 m, een d_{70} van 0,20 mm en K_{gem} van 31,7 m/dag (links) en 50,0 m/dag (rechts), een 120 m ondoorlatend voorland, een 600 m achterland met een leklengte van 10.000 m en met BC1.

Het percentage debiet naar de pipe hangt af van de achterland doorlatendheid. Bij een meer doorlatendheid achterland zal er meer debiet naar het achterland gaan, minder naar de pipe en krijg je een verhoging in kritiek verval. In Figuur A 36 is dit goed zichtbaar. Bij een hoog K_{gem} is een omslag punt zichtbaar, waar het effect van achterland doorlatendheid geen invloed meer heeft op de percentage debiet naar de pipe, die gebeurd hier bij een achterland leklengte van 200 m. Bij een laag K_{gem} is tot een leklengte van 10.000 m geen omslag punt zichtbaar en de percentage debiet naar de pipe blijft verhogen bij een langere leklengte van het achterland.



Figuur A 36 Percentage debiet naar de pipe bij kritiek verval in een twee-laags WVP met $D_1/D_2=0,5$ een totale dikte van 30 m, een 120 m lang ondoorlatend voorland, 200 m lang ondoorlatend achterland en BC1 voor verschillende achterland leklengtes.

Figuur A 37 geeft de stijghoogte weer langs de pipe bij kritiek verval voor gevallen met een doorlatend en ondoorlatend achterland, een hoog en laag K_{gem} en BC1. Hier is te zien dat het effect van de achterland leklengte op het kritieke verval en kritieke pipelengte groter is bij een laag K_{gem} (31,7 m/dag).



Figuur A 37 Stijghoogte langs de pipe bij kritiek in een twee-laags WVP met $D_1/D_2=0,5$ een totale dikte van 30 m, een 120 m lang ondoorlatend voorland, 200 m lang ondoorlatend achterland en BC1 voor verschillende achterland leklengtes.

A.2.2 Numerieke analyse

DgFlow & rekeninstellingen

Voor deze analyse is de KRATOS rekenkernel van D-Geo Flow 2022.01 gebruikt. De berekeningen zijn opgezet met Geolib. Om consistentie met de rekenregel en de user interface te borgen is gerekend met het aangepaste model (analoog aan de rekenregel in Bijlage II) en is de kalibratie voor D-Geo Flow resultaten van 0,89 gehanteerd in de rekenregel (deze is vast geïmplementeerd in rekenkernel van D-Geo Flow 2022.01, op basis van de analyses in (van Esch, 2017)). D-Geo Flow 2022.01 heeft een vast nPipeHeightIncr⁸ getal van 1000 en omdat de pipelengte gevoelig is voor de stapgrootte waarmee het verval verhoogd wordt zijn de berekeningen uitgevoerd met een stapgrootte van 1 mm. De viscositeit van water is $1,3 \cdot 10^{-3}$ N·s/m², dit correspondeert met de viscositeit van grondwater in de praktijk.

Schematisatie & randvoorwaarden

Om de hypotheses van het conceptuele model te valideren zijn twee basis basisschematisaties gebruikt, één voor anisotropie en één voor meerlaagsheid. Beide basisschematisaties hebben een ondoorlatend 120 m lange kwelweglengte (voorlengte en dijkbasis). Het basis model voor anisotropie heeft een zandig WVP van 30 m dikte (D). Het basismodel voor meerlaagsheid is het WVP in tweeën gedeeld met een bovenste laag van 10 m dik (D_1) en een onderste laag van 20 m dik (D_2).

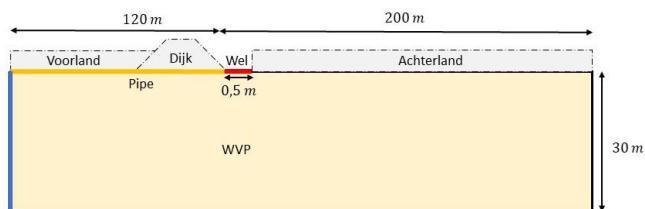
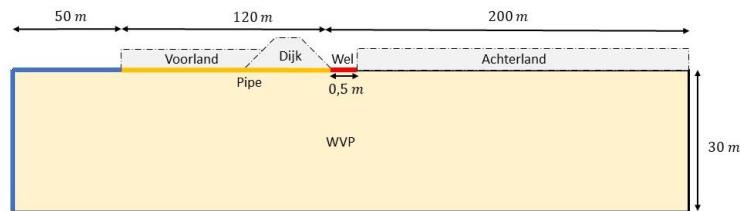
Voor elke basisschematisatie zijn twee typen instroomrandvoorwaarde en twee typen uitstroomrandvoorwaarde toegepast. De twee typen instroomrandvoorwaarden zijn:

1. Een rivierwaterstand met verticaal en horizontaal instroom (BC1 genoemd).
2. Een rivierwaterstand met alleen horizontaal instroom (BC2 genoemd).

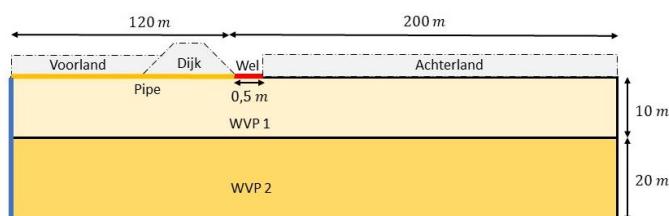
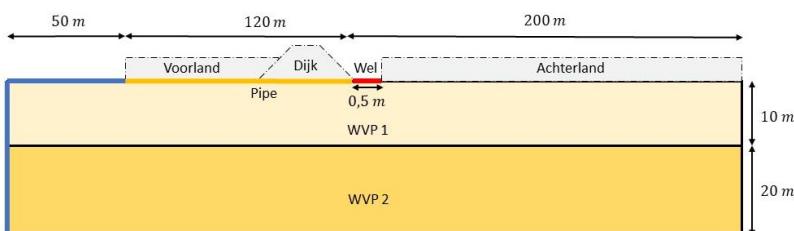
Het type uitstroomrandvoorwaarde hangt af van de doorlatendheid van het achterland. Bij een ondoorlatend achterland is het achterland dicht en 200 m lang. Een dicht achterland betekent dat er geen uitstroom is door de achterland deklaag of door het aquifer. In deze situatie kan

⁸ In de numerieke implementatie van het Sellmeijer model wordt de pipehoogte in een pipe-element incrementeel verhoogd tot de maximale pipehoogte met een vooraf ingesteld aantal stappen. Voor de maximale pipehoogte wordt aangenomen dat deze gelijk is aan 100 maal de d_{70} waarde van het materiaal. Voor een stabiele berekening worden 1000 stappen (nPipeHeightIncr) gebruikt om tot deze maximale pipehoogte te komen.

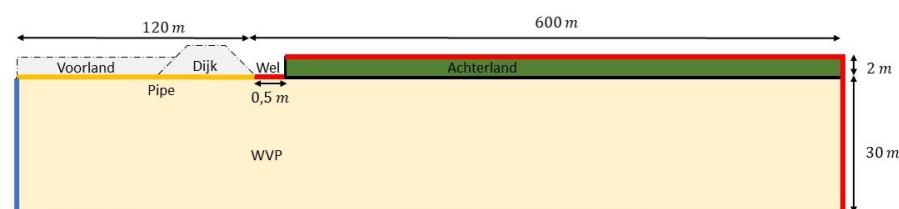
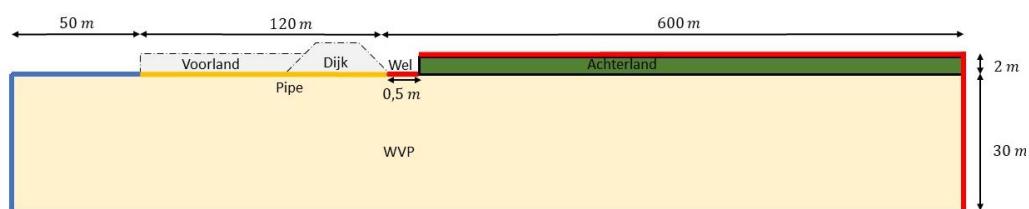
water alleen door de 0,5 m brede wel uitstromen, zie Figuur A 38 en Figuur A 39. Bij een doorlatend achterland is het achterland open en 600 m lang, zie Figuur A 40 en Figuur A 41.



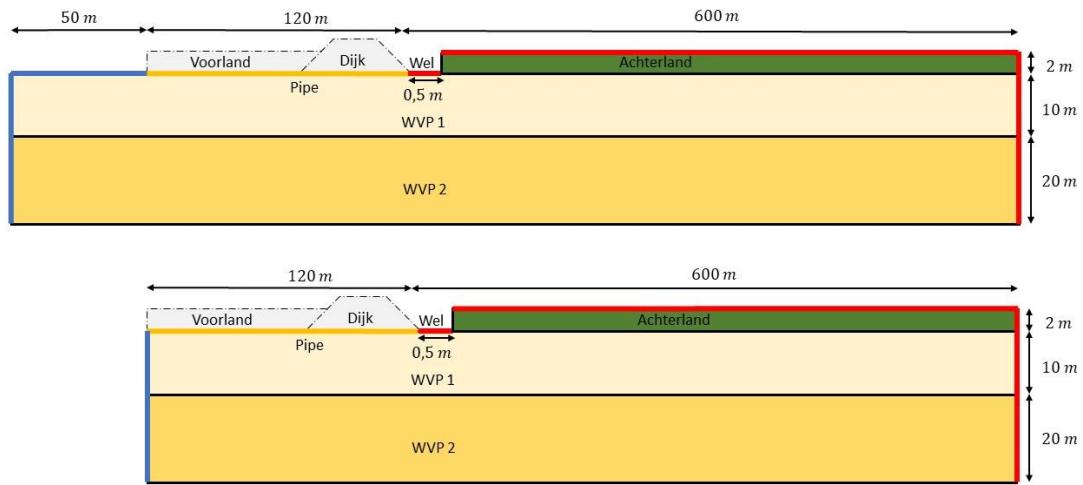
Figuur A 38 Basisschematisatie Anisotropie met BC1 boven en BC2 onder. Beide hebben een ondoorlatend achterland.



Figuur A 39 Basisschematisatie Meerlaagsheid met BC1 boven en BC2 onder. Beide hebben een ondoorlatend achterland.



Figuur A 40 Basisschematisatie Anisotropie met BC1 boven en BC2 onder. Beide hebben een doorlatend achterland.



Figuur A 41 Basisschematisatie Meerlaagsheid met BC1 boven en BC2 onder. Beide hebben een doorlatend achterland.

Grondparameters

Tabel A 3 en Tabel A 4 geven de grondparameters van beide basisschematisaties weer. Deze zijn gebaseerd op realistische waarden die in de praktijk voorkomen.

Tabel A 3 Overzicht van grondparameters voor de basisschematisatie voor anisotropie.

Parameter	Symbol	Waarde
Doorlatendheid WVP (m/dag)	k	30
Anistropie WVP (-)	A	1,0
70-percentielwaarde van de korrelverdeling van het WVP (mm)	d_{70}	0,2

Tabel A 4 Overzicht van grondparameters voor de basisschematisatie voor meerlaagsheid.

Parameter	Symbol	Waarde
Doorlatendheid bovenste laag (m/dag)	K_1	10
Anisotropie bovenste laag (-)	A_1	1,0
Doorlatendheid onderste laag (m/dag)	K_2	45
Anisotropie onderste laag (-)	A_2	1,0
70-percentielwaarde van de korrelverdeling van het WVP (mm)	d_{70}	0,2

Mesh

De meshgrootte heeft veel invloed op de resultaten, hierdoor is deze keuze gemaakt op basis van een mesh analyse waar er gekeken is naar de nauwkeurigheid en rekentijd van verschillende meshgroottes. De beste meshgrootte geeft een nauwkeurig resultaat in een acceptabele rekentijd. Tabel A 5 geeft de resultaten van de mesh analyse met de basisschematisatie weer, voor een berekening met BC1, een ondoorlatend achterland en een stapgrootte van 1 mm. Opvallend met deze resultaten is dat de meshgrootte bij de pipe de meeste invloed heeft op de resultaten en rekentijd. Voor deze studie is gekozen voor een 4 m

meshgrootte en een 1 m pipe meshgrootte. Deze resultaten zijn vergelijkbaar met de fijnste mesh maar heeft een acceptabel rekentijd.

Tabel A 5 Resultaten mesh analyse met basisschematisatie van anisotropie, BC1 met een ondoorlatend achterland.

Meshgrootte (m)	Pipe Meshgrootte (m)	H_c	L_c	Rekentijd (sec)	Rekentijd (min)
2	0,5	5,9	31,0	1968	33
2	1,0	5,8	32,0	640	11
2	2,0	5,7	34,0	202	3
4	0,5	5,9	31,5	727	12
4	1,0	5,9	32,0	220	4
4	2,0	5,7	32,0	68	1
8	0,5	6,0	32,5	401	7
8	1,0	5,9	31,0	108	2
8	2,0	5,8	34,0	33	1

Voor modellen met een doorlatend achterland heeft het achterland ook een meshgrootte nodig. Een mesh analyse is gemaakt met de basisschematisatie voor meerlaagsheid, BC1, een doorlatend achterland met een leklengte van 2 m en een stapgrootte van 10 cm. De resultaten zijn weergegeven in Tabel A 6. Er is gekozen voor een achterland meshgrootte van 1 m.

Tabel A 6 Resultaten mesh analyse met basisschematisatie van meerlaagsheid, BC1 en een doorlatend achterland met een leklengte van 2 m.

Meshgrootte (m)	Pipe Meshgrootte (m)	Achterland meshgrootte (m)	H_c	L_c
4	1,0	0,5	5,0	42,0
4	1,0	1,0	5,0	41,0
4	1,0	4,0	5,1	44,0

Als laatste is een mesh analyse uitgevoerd om de keuze van de meshgrootte van de bovenste laag van een twee-laagspakket te onderbouwen. Deze analyse is gebaseerd op de basisschematisatie voor meerlaagsheid, BC1 en een ondoorlatend achterland. De resultaten zijn in Tabel A 7 gepresenteerd. Er is gekozen voor een 2 m meshgrootte bij de bovenste laag van een meerlaagspakket.

Tabel A 7 Resultaten mesh analyse met basisschematisatie van meerlaagsheid, BC1 en een doorlatend achterland met een leklengte van 2 m.

Meshgrootte bovenste laag WVP (m)	Meshgrootte onderste laag WVP (m)	Pipe Meshgrootte (m)	H_c	L_c
4	1,0	1,0	7,1	29,0
4	2,0	1,0	7,1	29,0
4	4,0	1,0	7,2	33,0

A.3

Resultaten – validatie van hypotheses

De resultaten van de numerieke modellen zijn in dit hoofdstuk gepresenteerd met steeds twee grafieken:

- Het effect van een bepaalde parameter (x-as) op L_c/L_s (y-as).
- Het effect van een bepaalde parameter (x-as) op H_c/L_s (y-as).

Vóór elke grafiek worden de variaties die gemaakt zijn om tot deze resultaten te komen op de basisschematisatie kort toegelicht.

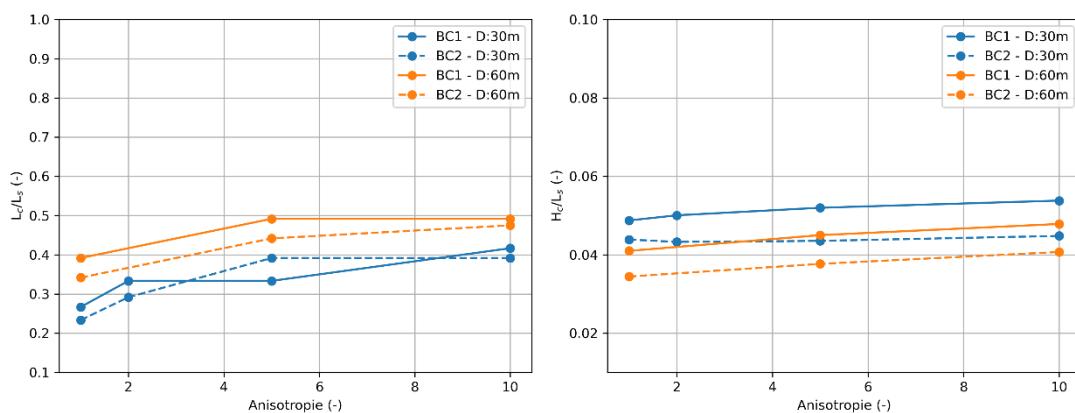
A.3.1

Anisotropie

H1: Effect anisotropie

Het effect van anisotropie is uitgezocht met de basisschematisatie voor anisotropie, een ondoorlatend achterland en met beide type instroomrandvoorwaarden BC1 (met verticale instroom) en BC2 (zonder verticale instroom). De basisschematisatie heeft een 30 m dik WVP, met een doorlatendheid van 30 m/dag, een d_{70} van 0,2 mm, een 120 m lang ondoorlatend voorland en een 200 m lang ondoorlatend achterland.

Om hypothese 1 te valideren is de anisotropiefactor van de basisschematisatie aangepast naar 1, 2, 5 en 10 met een 30 en 60 m dik WVP. De resultaten zijn weergegeven in Figuur A 42.

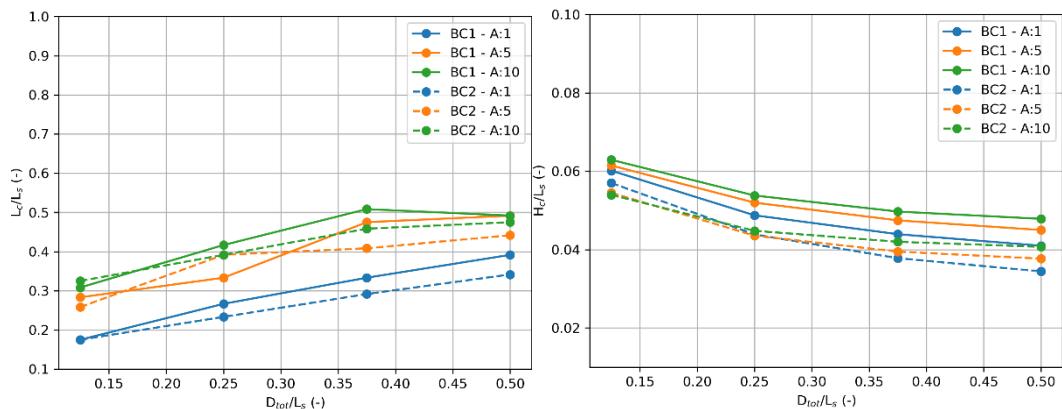


Figuur A 42 Effect van Anisotropie op L_c/L_s (links) en H_c/L_s (rechts) voor BC1 en BC2 gebruikmakend van de basisschematisatie met een 30 m WVP (blauw) en een 60 m dik WVP (oranje).

H2: Effect dikte WVP bij verschillende anisotropiefactor

Het effect van dikte van het WVP in combinatie met anisotropie is uitgezocht met de basisschematisatie voor anisotropie, een ondoorlatend achterland en met beide type instroomrandvoorwaarden BC1 (met verticale instroom) en BC2 (zonder verticale instroom). De basisschematisatie heeft een 30 m dik WVP, met een doorlatendheid van 30 m/dag, een d_{70} van 0,2 mm, een 120 m lang ondoorlatend voorland en een 200 m lang ondoorlatend achterland.

Om hypothese 2 te valideren is de anisotropiefactor van de basisschematisatie aangepast naar 1, 5 en 10 en de dikte van het WVP naar 15, 30, 45 en 60 m. De resultaten zijn weergegeven in Figuur A 43.

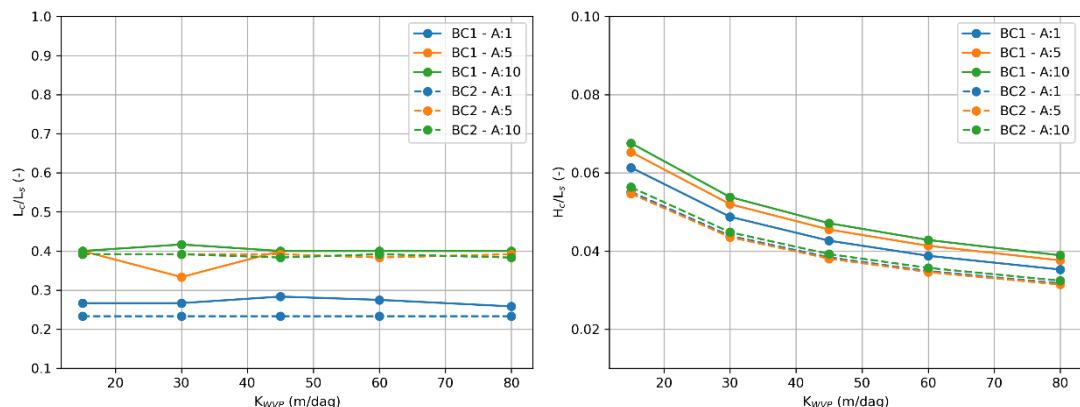


Figuur A 43 Effect van dikte van het WVP op L_c/L_s (links) en H_c/L_s (rechts) voor BC1 en BC2 en voor een anisotropie van 1, 5 en 10 met de basisschematisatie.

H3: Effect doorlatendheid WVP bij verschillende anisotropiefactor

Het effect van de doorlatendheid van het WVP in combinatie met anisotropie is uitgezocht met de basisschematisatie voor anisotropie, een ondoorlatend achterland en met beide type instroomrandvoorwaarden BC1 (met verticale instroom) en BC2 (zonder verticale instroom). De basisschematisatie heeft een 30 m dik WVP, met een doorlatendheid van 30 m/dag, een d_{70} van 0,2 mm, een 120 m lang ondoorlatend voorland en een 200 m lang ondoorlatend achterland.

Om hypothese 3 te valideren is de anisotropiefactor van de basisschematisatie aangepast naar 1, 5 en 10 en de doorlatendheid van het WVP naar 15, 30, 45, 60 en 80 m/dag. De resultaten zijn weergegeven in Figuur A 44⁹.



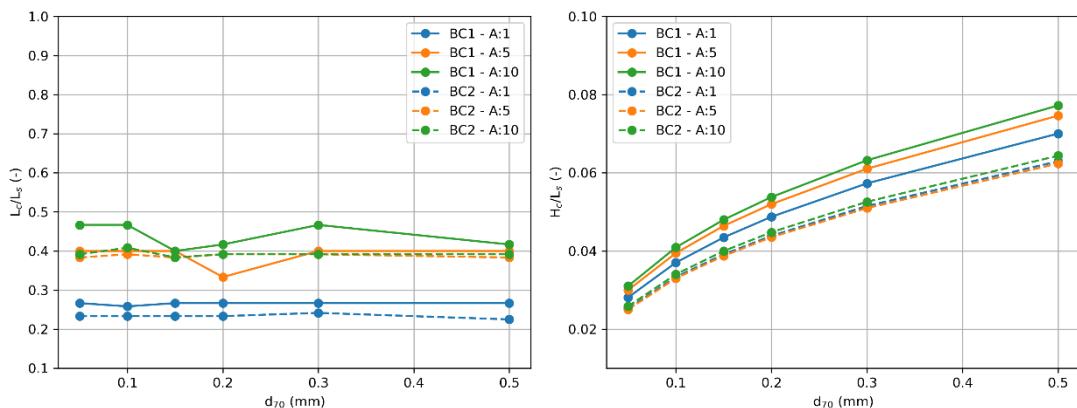
Figuur A 44 Effect van de doorlatendheid van het WVP op L_c/L_s (links) en H_c/L_s (rechts) voor BC1 en BC2 en voor een anisotropie van 1, 5 en 10 met de basisschematisatie.

⁹ Bij een verandering in doorlatendheid of d_{70} wordt geen verandering in kritieke pipelengte verwacht, die is gecontroleerd met DgFlow (de prototype van de oude D-Geo Flow). Wanneer D-Geo Flow 2022 gebruikt wordt zijn wel veranderingen in kritieke pipelengte zichtbaar. De nieuwe D-Geo Flow 2022 is gebouwd in KRATOS, met in plaats van lijnen elementen voor de pipe, rechthoekig elementen. Deze veranderingen hebben mogelijk tot numerieke afwijkingen geleid waardoor deze verandering in kritieke pipelengte toont. De exacte rede hiervoor wordt nog onderzocht.

H4: Effect d₇₀ WVP bij verschillende anisotropiefactor

Het effect van d_{70} van het WVP in combinatie met anisotropie is uitgezocht met de basisschematisatie voor anisotropie, een ondoorlatend achterland en met beide type instroomrandvoorwaarden BC1 (met verticale instroom) en BC2 (zonder verticale instroom). De basisschematisatie heeft een 30 m dik WVP, met een doorlatendheid van 30 m/dag, een d_{70} van 0,2 mm, een 120 m lang ondoorlatend voorland en een 200 m lang ondoorlatend achterland.

Om hypothese 4 te valideren is de anisotropiefactor van de basisschematisatie aangepast naar 1, 5 en 10 en de d_{70} van het WVP naar 0,05, 0,10, 0,15, 0,20, 0,30 en 0,40 mm. De resultaten zijn weergegeven in Figuur A 45¹⁰.



Figuur A 45 Effect van d_{70} van het WVP op L_c/L_s (links) en H_c/L_s (rechts) voor BC1 en BC2 en voor een anisotropie van 1, 5 en 10 met de basisschematisatie.

H5: Effect achterland doorlatendheid bij verschillende anisotropiefactor

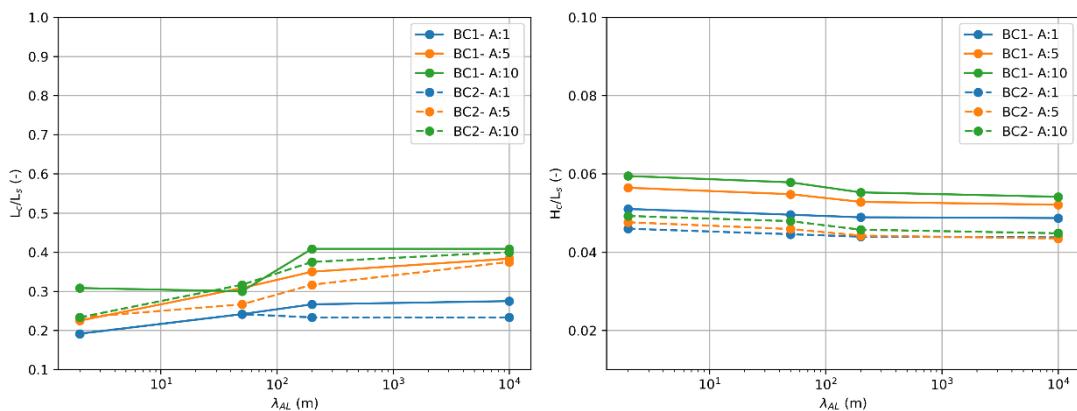
Het effect van het achterland doorlatendheid in combinatie met anisotropie is uitgezocht met de basisschematisatie voor anisotropie, een doorlatend achterland en met beide type instroomrandvoorwaarden BC1 (met verticale instroom) en BC2 (zonder verticale instroom). De basisschematisatie heeft een 30 m dik WVP, met een doorlatendheid van 30 m/dag, een d_{70} van 0,2 mm, een 120 m lang ondoorlatend voorland en een 600 m lang doorlatend achterland.

Om hypothese 2 te valideren is de anisotropiefactor van de basisschematisatie aangepast naar 1, 5 en 10 en de achterland leklengte naar 2, 50, 200 en 100.000 m door de doorlatendheid van het 2 m dikke achterland aan te passen, zie Tabel A 8. De resultaten zijn weergegeven in Figuur A 46.

Tabel A 8 Doorlatendheid van het achterland en bijbehorende leklengte voor de basisschematisatie met anisotropie.

Achterland leklengte (m)	Achterland (m/dag)	doorlatendheid
2	450	
50	0,72	
200	0,045	

¹⁰ Zie Footnote 10



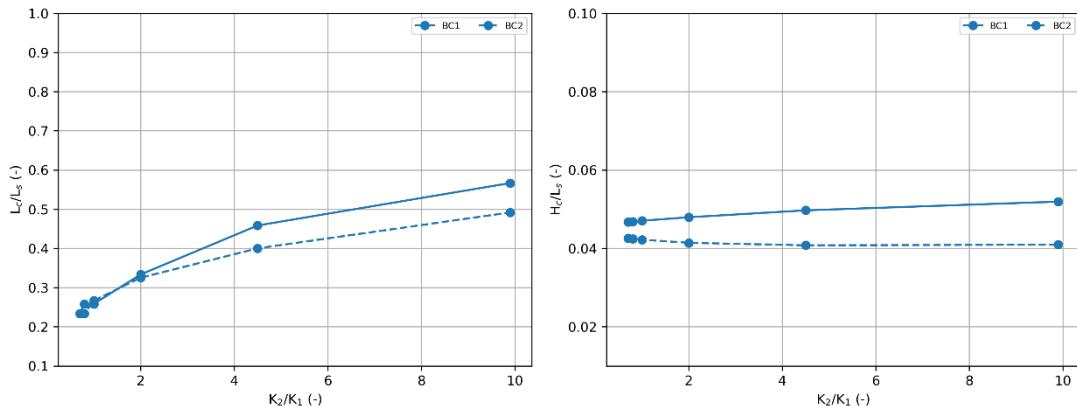
Figuur A 46 Effect van de achterland leklengte op L_c/L_s (links) en H_c/L_s (rechts) voor BC1 en BC2 en voor een anisotropie van 1, 5 en 10 met de basisschematisatie.

A.3.2 Meerlaagsheid

H6: Effect meerlaagsheid k_1/k_2

Het effect van meerlaagsheid is in twee delen uitgezocht. Eerst is met H6 gekeken naar het effect van het doorlatendheidcontrast (K_2/K_1) en daarna met H7 naar het effect van de dikte verhouding (D_1/D_2). Deze analyses zijn met de basisschematisatie voor meerlaagsheid gemaakt met een ondoorlatend achterland en met beide type instroomrandvoorwaarden BC1 (met verticale instroom) en BC2 (zonder verticale instroom).

Om hypothese 6 te valideren is K_2/K_1 aangepast naar 9,9, 4,5, 2,0, 1,0, 0,8 en 0,7 met K_{gem} constant gehouden op ca. 30 m/dag en met een totale dikte van het WVP van 30 m, zie Tabel A 9 voor de corresponderende doorlatenheden K_1 en K_2 . De resultaten zijn weergegeven in Figuur A 47.



Figuur A 47 Effect van K_1/K_2 van het WVP op L_c/L_s (links) en H_c/L_s (rechts) voor BC1 en BC2 met de basisschematisatie.

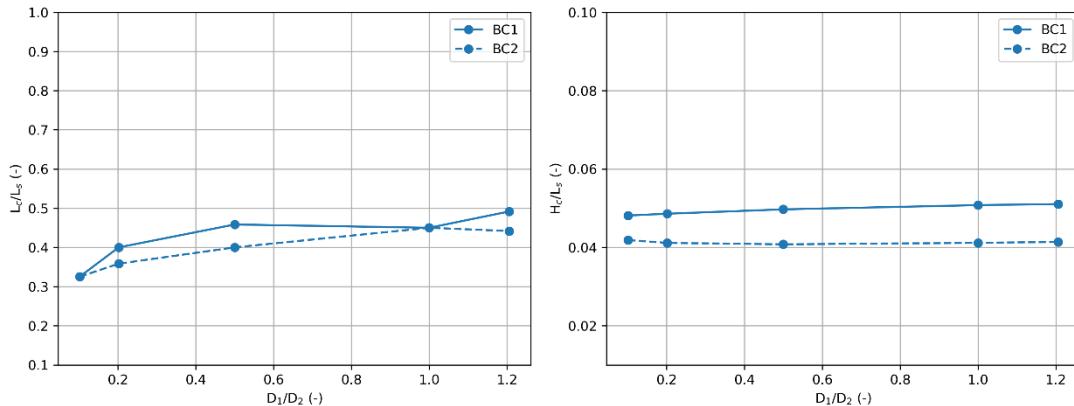
Tabel A 9 Overzicht van K_1 en K_2 gebruikt voor de validatie van H6.

D_1	D_2	D_{tot}	K_1	K_2	K_2/K_1	K_{gem}
10	20	30	4,8	47,6	9,9	33,3
10	20	30	10,0	45,0	4,5	33,3
10	20	30	20,0	40,0	2,0	33,3
10	20	30	33,3	33,3	1,0	33,3
10	20	30	37,5	31,3	0,8	33,4
10	20	30	41,2	29,4	0,7	33,3

H7: Effect meerlaagsheid D1/D2

Het effect van de dikte verhouding (D_1/D_2) is geanalyseerd met de basisschematisatie voor meerlaagsheid met constant K_2/K_1 van 4,5 en een constante conductiviteit $D_{tot} * K_{gem}$ van ongeveer 1000 m²/dag, een ondoorlatend achterland en met beide type instroomrandvoorwaarden BC1 (met verticale instroom) en BC2 (zonder verticale instroom).

Om hypothese 7 te valideren is D_1/D_2 aangepast naar 0,10, 0,20, 0,50, 1,00, en 1,20, zie Tabel A 10. De resultaten zijn weergegeven in Figuur A 48.



Figuur A 48 Effect van D_1/D_2 van het WVP op L_c/L_s (links) en H_c/L_s (rechts) voor BC1 en BC2 met de basisschematisatie.

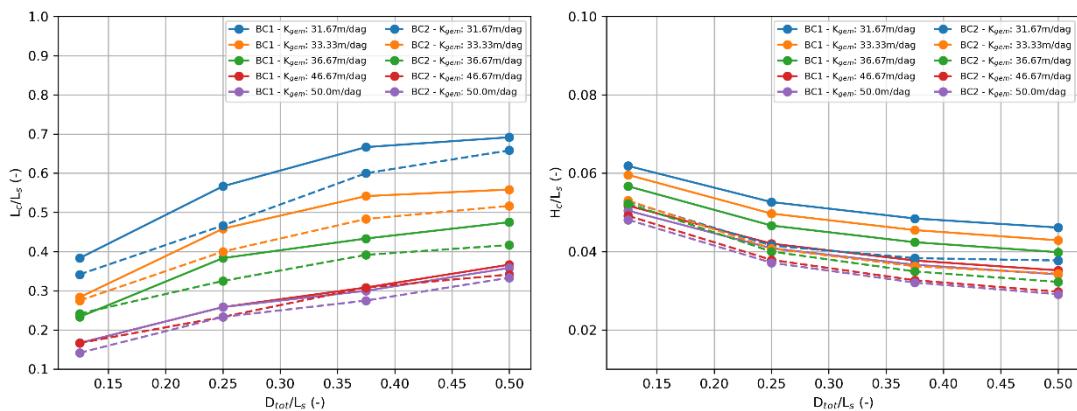
Tabel A 10 Overzicht van D_1 en D_2 gebruikt voor de validatie van H7.

D_1	D_2	D_{tot}	D_1/D_2	K_{gem}
2,2	21,7	23,9	0,1	41,8
4,3	21,3	25,6	0,2	39,1
1,0	20,0	30,0	0,5	33,3
18,2	18,2	36,4	1,0	27,5
21,1	17,5	38,6	1,2	25,9

H8: Effect dikte WVP bij verschillende K_2/K_1

Het effect van het totaal WVP dikte in combinatie met meerlaagsheid is geanalyseerd met de basisschematisatie voor meerlaagsheid gemaakt met een ondoorlatend achterland en met beide type instroomrandvoorwaarden BC1 (met verticale instroom) en BC2 (zonder verticale instroom) en voor verschillende K_2/K_1 .

Om hypothese 8 te valideren is D_{tot} aangepast naar 15, 30, 45 en 60 m met steeds $D_1/D_2=0,5$, en K_2/K_1 is aangepast naar 9,0, 4,5, 2,3, 1,0, 0,9 en 0,8. De resultaten zijn weergegeven in Figuur A 49 waar K_1/K_2 en dus K_{gem} constant is per curve.

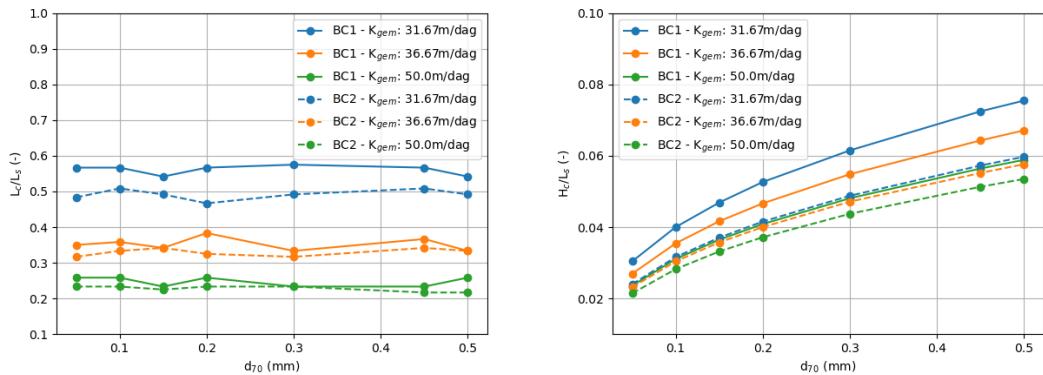


Figuur A 49 Effect van D_{tot} van het WVP op L_c/L_s (links) en H_c/L_s (rechts) voor BC1 (Vert. instr. genoemd) en BC2 (Geen vert. instr. genoemd) en verschillende K_{gem} met de basisschematisatie.

H9: Effect d70 WVP bij verschillende K_2/K_1

Het effect van d_{70} van het WVP in combinatie met meerlaagsheid is geanalyseerd met de basisschematisatie voor meerlaagsheid gemaakt met een doorlatend achterland en met beide type instroomrandvoorwaarden BC1 (met verticale instroom) en BC2 (zonder verticale instroom).

Om hypothese 9 te valideren is d_{70} aangepast naar 0,05, 0,10, 0,15, 0,20, 0,30, 0,45 en 0,50 mm en K_2/K_1 is aangepast naar 9,0, 2,3, en 0,7. De resultaten zijn weergegeven in Figuur A 50¹¹.



Figuur A 50 Effect van d_{70} van het WVP op L_c/L_s (links) en H_c/L_s (rechts) voor BC1 (Vert. instr. genoemd) en BC2 (Geen vert. instr. genoemd) en verschillende K_{gem} met de basisschematisatie.

H10: Effect leklengte achterland bij verschillende K_2/K_1

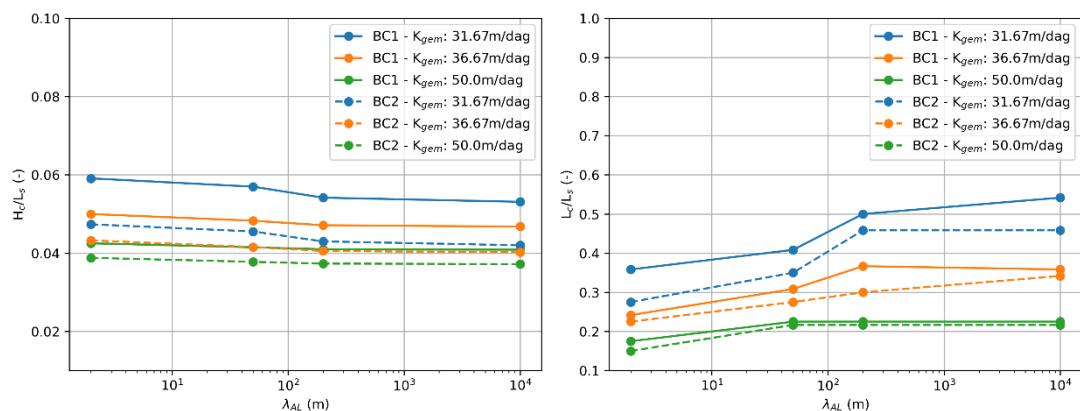
Het effect van achterland doorlatendheid in combinatie met meerlaagsheid is geanalyseerd met de basisschematisatie voor meerlaagsheid gemaakt met een doorlatend achterland en met beide type instroomrandvoorwaarden BC1 (met verticale instroom) en BC2 (zonder verticale instroom).

¹¹ Zie Footnote 10

Om hypothese 10 te valideren is de achterland leklengte aangepast naar 2, 50, 200 en 10.000 m door de doorlatendheid van de 2 m dikke achterland te variëren, zie Tabel A 11, en K_2/K_1 is aangepast naar 9,0, 2,3, en 0,7. De resultaten zijn weergegeven in Figuur A 51.

Tabel A 11 Doorlatendheid van het achterland en bijbehorende leklengte voor de basisschematisatie met meerlaagsheid.

K_1 (m/dag)	K_2 (m/dag)	K_{gem} (m/dag)	λ_{AL} (m)	K_{AL} (m/dag)
5,00	45,00	31,67	2	475
5,00	45,00	31,67	50	0,76
5,00	45,00	31,67	200	0,0475
5,00	45,00	31,67	10000	0,000019
10,00	45,00	33,33	2	500
10,00	45,00	33,33	50	0,8
10,00	45,00	33,33	200	0,05
10,00	45,00	33,33	10000	0,00002
33,33	33,33	33,33	2	499,95
33,33	33,33	33,33	50	0,79992
33,33	33,33	33,33	200	0,049995
33,33	33,33	33,33	10000	2 e-05
20,00	45,00	36,67	2	550
20,00	45,00	36,67	50	0,88
20,00	45,00	36,67	200	0,055
20,00	45,00	36,67	10000	0,000022
60,00	45,00	50,00	2	750
60,00	45,00	50,00	50	1,2
60,00	45,00	50,00	200	0,075
60,00	45,00	50,00	10000	0,00003



Figuur A 51 Effect van de achterland leklengte op L_c/L_s (links) en H_c/L_s (rechts) voor BC1 en BC2 en verschillende K_{gem} met de basisschematisatie.

A.4

Analyse

In Hoofdstuk A.2.1 zijn de effecten van totale dikte, doorlatendheid en d_{70} van het WVP en de achterland leklengte op de kritieke pipelengte en het kritieke verval in combinatie met anisotropie en meerlaagsheid geanalyseerd. Het is bekend wanneer een parameter met anisotropie en meerlaagsheid tot een verlaging of verhoging van het kritieke pipelengte en/of kritiek verval leidt. Het is echter nog onduidelijke welke combinatie van parameters tot de langste kritieke pipelengte of hoogste kritiek verval leidt, dit wordt in Paragraaf A.4.1 toegelicht. Paragraaf A.4.2 geeft een vergelijking van de resultaten met de stappenplan curve voor kritieke pipelengte van 2021. Paragraaf A.4.3 geeft een vertaling naar de praktijk.

A.4.1

Belang van parameters

In deze paragraaf ligt de focus op welke van de onderzochte parameters in combinatie met anisotropie of meerlaagsheid de grootste effect heeft op kritieke pipelengte en kritiek verval. Dit wordt gedaan door het relatieve effect van parameters ten opzichte van een situatie zonder anisotropie en meerlaagsheid te onderzoeken met:

$$\frac{L_{c,i}/L_S}{L_{c,base}/L_S}$$

En

$$\frac{H_{c,i}/L_S}{H_{c,base}/L_S}$$

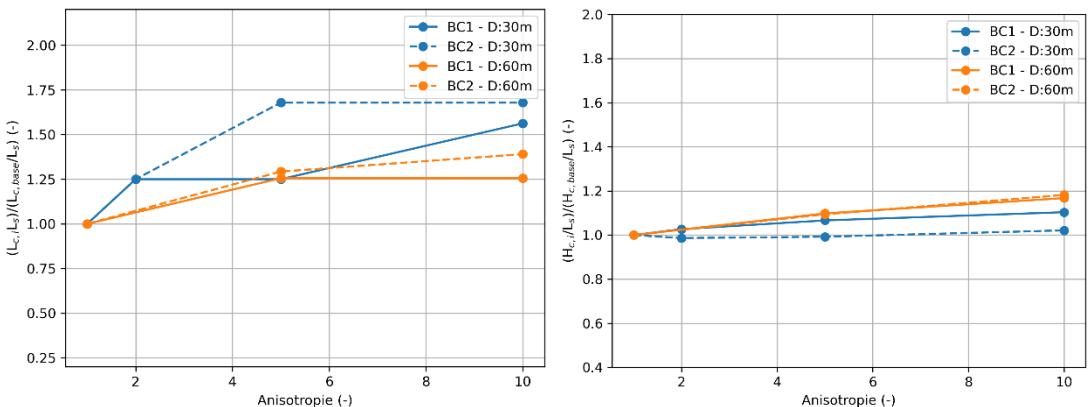
$L_{c,i}$ en $H_{c,i}$ zijn de kritieke pipelengte en kritiek verval bij een variante i . $L_{c,base}$ en $H_{c,base}$ zijn de pipelengte en kritiek verval bij een basis situatie. Voor anisotropie is dat de variante zonder anisotropie ($A=1$) en voor meerlaagsheid is dat of de situatie zonder meerlaagsheid of de situatie met de basisschematisatie van meerlaagsheid (K_1/K_2 is 0,2, K_{gem} is 33,3 m/dag en D_1/D_2 is 0,5, zie 0).

Anisotropie

Anisotropie leidt tot een langere pipe en een hoger kritiek verval zoals in Paragraaf 0 aangegeven.

In Figuur A 52 zien we, relatief aan de basissituatie zonder anisotropie, dat anisotropie met een dun (30 m) en dikker (60 m) WVP altijd tot langere kritieke pipelengtes leidt. Hoe hoger de anisotropiefactor, hoe langer de kritieke pipelengte. Voor de onderzochte schematisaties, kan de kritieke pipelengte tot een factor 1,74 langer zijn met een anisotropiefactor van 10. Verder heeft het type instroomrandvoorwaarde ook invloed op beide parameters en geeft BC2 (alleen horizontale instroom) ten opzichte van de basissituatie langere kritieke pipelengtes. In de figuur is ook de zien dat met een 30 m dik WVP het effect van anisotropie op de kritieke pipelengte relatief groter is dan met een 60 m dik WVP.

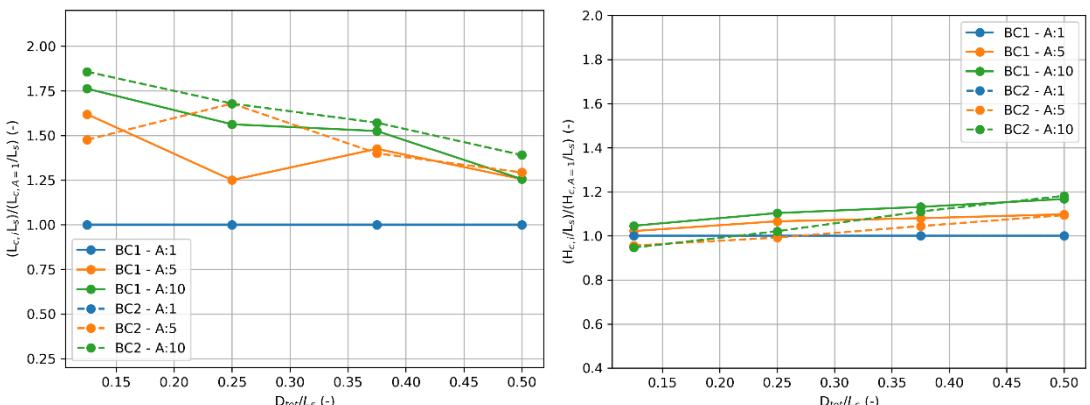
Voor het kritieke verval zien we dat anisotropie bij een dun WVP (30 m dik) en BC2 geen effect heeft maar wel met BC1 (verticale en horizontale instroom). Bij de basisschematisatie met een 60 m dik WVP is het relatieve effect van anisotropie op het kritieke verval groter en lijkt niet meer beïnvloed te zijn door de type instroomrandvoorwaarde.



Figuur A 52 Relatief effect avn anisotropie voor basisschematisatie met een 30 m en 60 m dik WVP.

Figuur A 53 geeft het relatief effect van anisotropie per dikte van het WVP. In deze figuur zien we dat anisotropie ongeacht de dikte van het WVP tot langere pipes leidt, terwijl voor het kritieke verval het effect van anisotropie verwaarloosbaar klein is bij een dunner WVP van 30 m dikte. Het effect van anisotropie op de kritieke pipelengte neemt af bij een dikker WVP, terwijl het effect op het kritieke verval juist toe neemt. Anisotropie bij een dun pakket van 30 m kan geen verschil maken in kritiek verval maar kan wel leiden tot een factor 1,8 langere kritieke pipelengte.

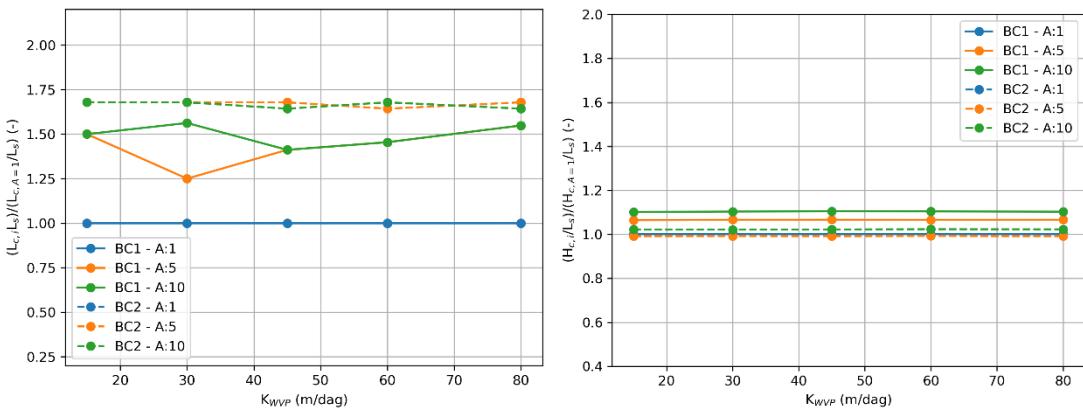
De invloed van de type instroomrandvoorwaarde op de kritieke pipelengte is niet consistent waardoor er geen conclusies hierover getrokken kunnen worden. Een combinatie van BC2 en een 30 m dik WVP leidt tot inconsistent resultaten (lager kritiek verval met anisotropie), de reden hiervoor is niet bekend en zou verder moeten worden onderzocht.



Figuur A 53 Relatieve effect van anisotropie per totale dikte van het WVP.

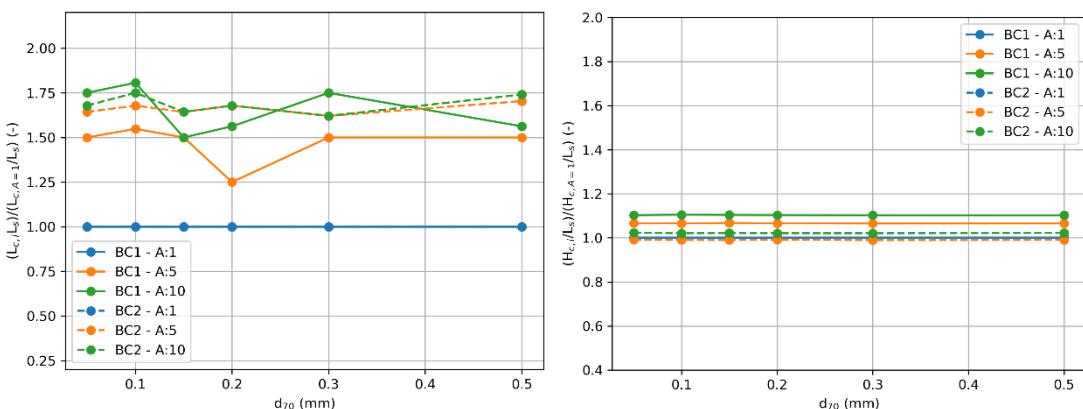
Figuur A 54 geeft de invloed van anisotropie weer voor verschillende doorlatendheden door de kritieke pipelengte en het kritieke verval bij een bepaalde doorlatendheid te delen door de kritieke pipelengte en het kritieke verval bij dezelfde doorlatendheid maar zonder anisotropie. De invloed van anisotropie op kritieke pipelengte en kritiek verval verandert niet met verschillende doorlatendheden van het WVP, de zichtbare fluctuaties bij kritieke pipelengtes komen door numerieke onzekerheden¹².

¹² Zie Footnote 10



Figuur A 54 Relatieve effect van anisotropie per doorlatendheid van het WPV.

Het effect van anisotropie op kritieke pipelengte en kritiek verval voor verschillende d_{70} is vergelijkbaar met het effect van doorlatendheid, zie Figuur A 55. Er is geen verschil in effect van anisotropie op het kritieke verval voor verschillende d_{70} . Voor de kritieke pipelengte zijn er wel veranderingen maar deze komen door numerieke onzekerheden¹³.



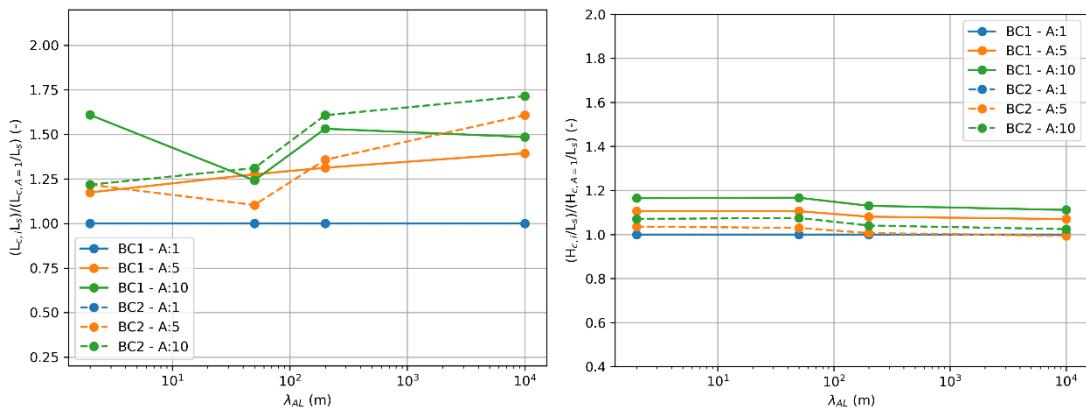
Figuur A 55 Relatieve effect van anisotropie per d_{70} van het WPV.

Het effect van anisotropie op de kritieke pipelengte is groter bij een meer ondoorlatend achterland. In tegenstelling hierop is het effect van anisotropie op het kritieke verval juist kleiner bij een meer ondoorlatend achterland, hoewel de range van factoren ook kleiner is voor kritiek verval. Dit is terug te zien in Figuur A 56 waar L_c/L_s en H_c/L_c gedeeld door $L_{c,base}/L_s$ en $H_{c,base}/L_c$ (zonder anisotropie maar met dezelfde achterland leklengte) gegeven is per leklengte van het achterland.

Het effect van anisotropie op het kritieke verval is kleiner bij een meer ondoorlatend achterland omdat beide effect in tegenstelling werken op het kritieke verval. Anisotropie leidt tot hogere kritieke vervallen terwijl een ondoorlatend achterland leidt tot lagere kritieke vervallen.

Bij een doorlatend achterland kan het kritieke verval met ongeveer 18% verhoogd worden door anisotropie terwijl het kritieke verval 10% verhoogd wordt bij een ondoorlatend achterland. Het effect op pipelengte is iets minder consistent, maar met BC2 kunnen we zien dat met een anisotropie van 10 de kritieke pipelengte met 25% ongeveer verhoogd wordt bij een doorlatend achterland, en 75% langer bij een ondoorlatend achterland.

¹³ Zie Footnote 10

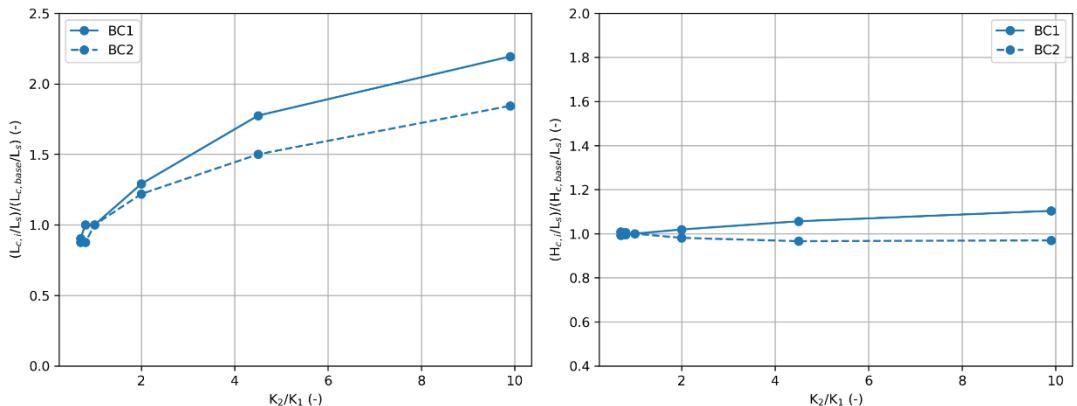


Figuur A 56 Relatieve effect van anisotropie per lekkelengte van het achterland.

Meerlaagsheid

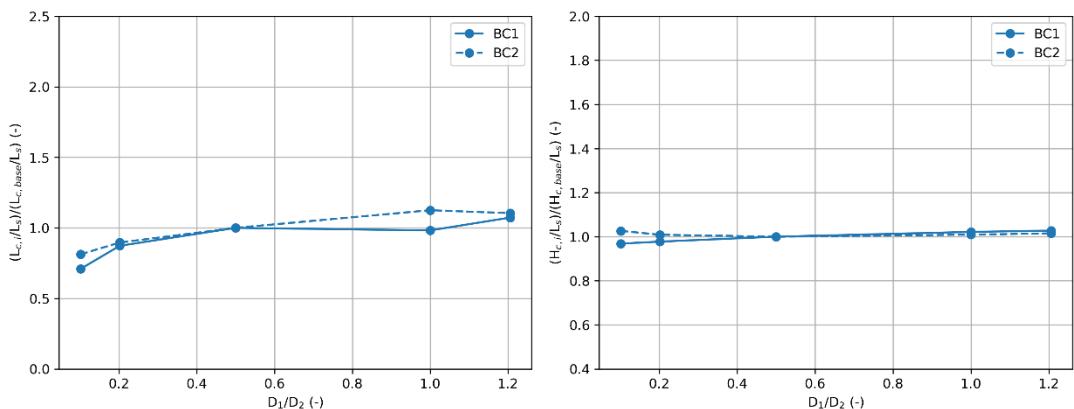
Meerlaagsheid leidt net als bij anisotropie tot langere kritieke pipelengtes en een hoger kritiek verval, zie Paragraaf 0.

Figuur A 57 geeft het effect van K_2/K_1 relatief aan een situatie zonder meerlaagsheid ($K_2/K_1=1$). In deze figuur zien we dat met de basisschematisatie, een K_2/K_1 van 9,9 en BC1 de kritieke pipelengte tot een factor van ongeveer 2,25 keer langer kan worden terwijl het invloed op kritiek verval veel kleiner is (10%).



Figuur A 57 Relatief effect van meerlaagsheid met de basisschematisatie.

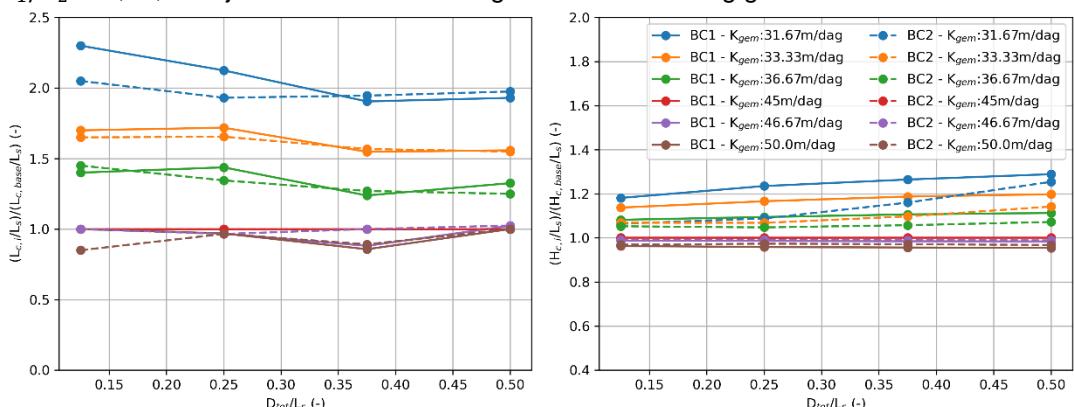
Figuur A 58 geeft het effect van D_1/D_2 relatief aan de basissituatie ($D_1/D_2=0,5$, $K_2/K_1=4,5$ en $K_{gem}=33,3$ m/dag) weer. We zien dat een kleiner D_1/D_2 verhouding tot kortere kritieke pipelengtes leidt (ongeveer -25%) en een hoger tot langere kritieke pipelengtes (ongeveer 5%). D_1/D_2 lijkt weinig invloed te hebben op het kritieke verval met de basisschematisatie.



Figuur A 58 Relatief effect van dikte verhouding van het WVP ten opzichte van de basischematisatie.

In Figuur A 59 zijn L_c/L_s en H_c/L_s weergegeven ten opzichte van een situatie zonder meerlaagsheid ($K_{gem}=45$ m/dag) voor 15, 30, 45, en 60 m totale dikte. Hieruit is duidelijk te zien dat de meerlaagsheid veel invloed heeft op de pipelengte en dat meerlaagsheid tot relatief langere kritieke pipelengtes leidt bij een dunner WVP, dit was ook terug te zien met anisotropie in Paragraaf 0. In tegenstelling hierop is het effect van meerlaagsheid op het kritieke verval kleiner bij een dunner WVP.

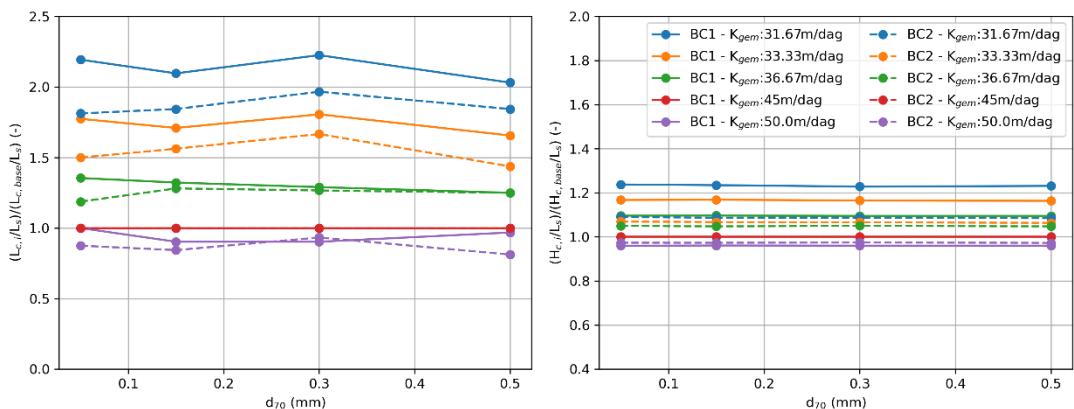
Er kunnen tot wel 150% langere kritieke pipelengte ontstaan bij een K_{gem} van 31,67 m/dag met K_1/K_2 is 0,11, terwijl het kritieke verval ongeveer 20% omhoog gaat.



Figuur A 59 Relatief effect van meerlaagsheid per totale dikte van het WVP.

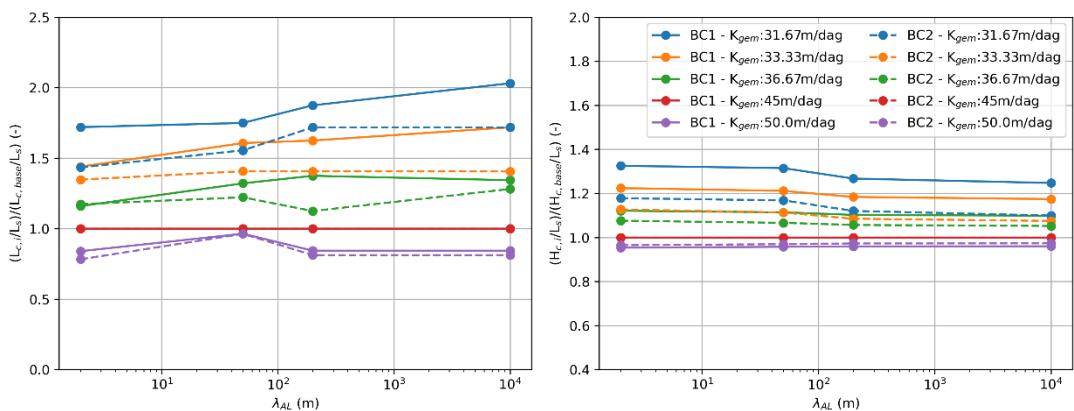
Figuur A 60 geeft het relatief effect van meerlaagsheid op verschillende d_{70} . Hier is duidelijk te zien dat het effect van meerlaagsheid onafhankelijk is van de d_{70} . Voor de kritieke pipelengte zijn door numerieke onzekerheden wat sprongen zichtbaar¹⁴.

¹⁴ Zie Footnote 10



Figuur A 60 Relatief effect van meerlaagsheid per d_{70} van het WVP.

Figuur A 61 geeft het relatieve effect van meerlaagsheid per leklengte van het achterland. Hieruit volgt dat een meer doorlatend achterland met meerlaagsheid tot minder lange kritieke pipelengtes leidt (75% verhoging met BC1) dan bij een ondoorlatend achterland (100% verhoging met BC1). In tegenstelling hierop wordt het kritieke verval juist hoger met een doorlatend achterland (ongeveer 30%) dan met een ondoorlatend achterland (ongeveer 22%).



Figuur A 61 Relatief effect van meerlagsheid per leklengte van het achterland.

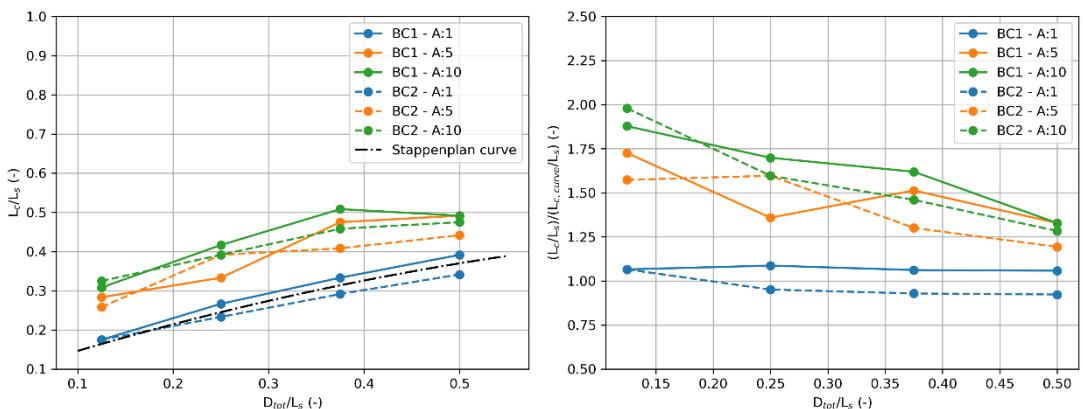
A.4.2

Invloed anisotropie en meerlaagsheid op stappenplan curve

Het doel van het onderzoek was om te kijken hoe goed de curve die vorige jaar is afgeleid voor het bepalen van de kritieke pipelengte op basis van de geometrie van het WPV (D/L_s) nog toepasbaar is bij een situatie met anisotropie of meerlaagsheid.

Voor anisotropie is dit in Figuur A 62 weergegeven waar L_c/L_s gegeven is voor verschillende anisotropiefactor en instroomrandvoorwaarde met D-Geo Flow en met de curve. Hieruit is duidelijk te zien dat anisotropie altijd leidt tot een hogere L_c/L_s . Bij een dun pakket kan zelfs een factor 2 zitten tussen de curve en een anisotropie van 10 afhankelijk van D/L_s en de type instroomrandvoorwaarde.

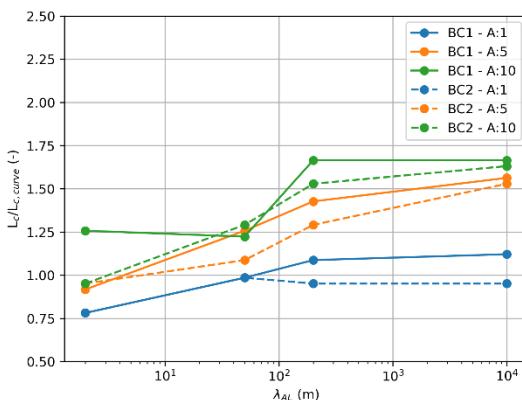
Voor gevallen zonder anisotropie (blauw in Figuur A 62) geeft de curve een redelijk goed inschatting van de kritieke pipelengte. De afwijking komt door de andere type instroomrandvoorwaarde gebruikt bij de curve. Voor grotere D_{tot}/L_s zijn proeven gebruikt met alleen een verticale instroom.



Figuur A 62 Kritieke pipelengte gedeeld door de kwellenglengte (links) en kritieke pipelengte berekend met D-Geo Flow gedeeld door de kritieke pipelengte berekend met de curve (rechts) voor verschillende geometrieën van het WVP en met anisotropie.

Verder is in Figuur A 63 de verhouding tussen L_c afgeleid met D-Geo Flow en $L_{c,curve}$ afgeleid met de stappenplan curve weergegeven voor verschillende achterland leklengtes. Hieruit volgt dat zonder anisotropie en met een dicht (ondoorlatend) achterland de curve van de stappenplan een redelijk goede inschatting geeft van de kritieke pipelengte. Verder zien we ook dat de fout in schatting tussen L_c met D-Geo Flow en de curve met anisotropie kleiner is bij een doorlatend achterland. Dit komt omdat de doorlatendheid van het achterland voor kortere pipelengtes zorgt, wat in de stappenplan curve niet is meegenomen. Voor specifieke situaties met anisotropie in combinatie met een open achterland en bepaalde instroomrandvoorwaarde kan L_c zelfs lager dan geschat op basis van de curve. Deze situaties zijn echter nog niet goed te voorspellen en moet er altijd een D-Geo Flow berekening worden gemaakt.

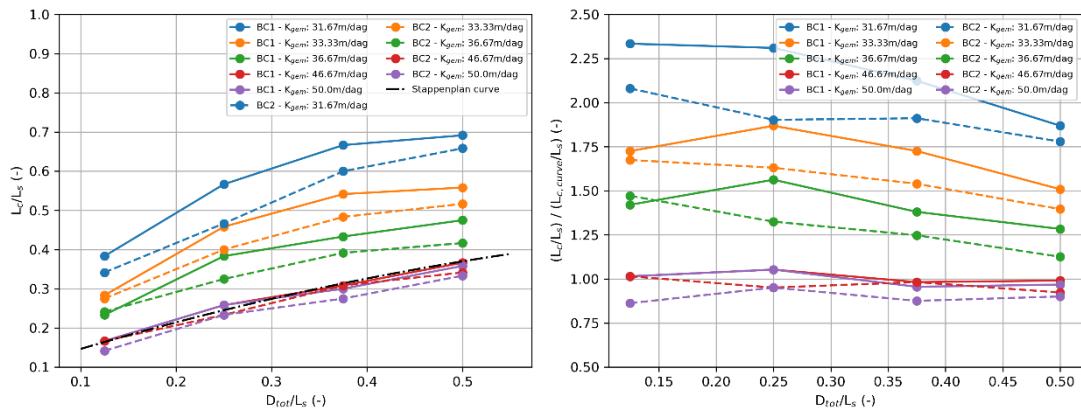
Bij een ondoorlatend achterland en BC1 geeft de curve een redelijk goed inschatting van de kritieke pipelengte zonder anisotropie (gestippeld blauwe lijn).



Figuur A 63 Verhouding tussen kritieke pipelengte gevonden met D-Geo Flow en met de curve voor verschillende achterland leklengtes met en zonder anisotropie.

Het effect van meerlaagsheid op de curve is in Figuur A 64 gepresenteerd. Hieruit is duidelijk te zien dat meerlaagsheid tot nog langere kritieke pipelengtes kan leiden dan anisotropie. De curve ligt bij een dun pakket en BC1 soms een factor 2,3 hoger. Wanneer K_{gem} hoger is dan 45 m/dag en K_1/K_2 groter is dan 1, zitten L_c/L_s wel onder de curve.

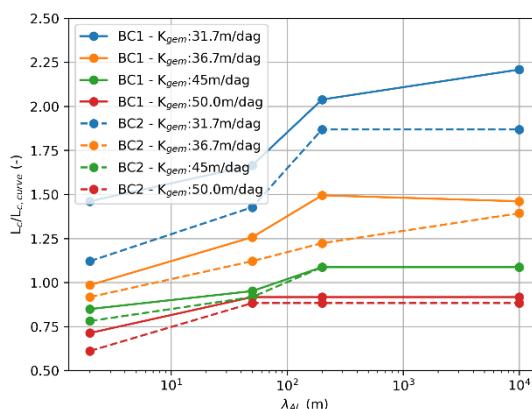
Voor situatie zonder meerlaagsheid of met een meer doorlatend bovenlaag (K_{gem} groter dan 45 m/dag) geeft de curve een redelijk goede inschatting van de kritieke pipelengte.



Figuur A 64 Kritieke pipelengte gedeeld door de kwelweglengte (links) en kritieke pipelengte berekend met D-Geo Flow gedeeld door de kritieke pipelengte berekend met de curve (rechts) voor verschillende geometrieën van het WVP en met meerlaagsheid.

In Figuur A 65 is de verhouding tussen L_c afgeleid met D-Geo Flow en $L_{c,curve}$ afgeleid met de stappenplan curve weergegeven voor verschillende achterland leklengtes. Hieruit volgt dat zonder meerlaagsheid of met een meer doorlatend bovenste laag van het WVP in combinatie met een dicht (ondoorlatend) achterland de curve van de stappenplan een redelijk goed inschatting geeft van de kritieke pipelengte.

Verder zien we dat met een doorlatend achterland de fout met meerlaagsheid tussen D-Geo Flow en de curves kleiner is. In specifiek situaties kan de L_c geschat met de curve waanneer meerlaagsheid in combinatie met een open (doorlatend) achterland aanwezig is redelijk goed zijn. Deze situaties zijn echter niet te voorspellen zonder een D-Geo Flow berekening.



Figuur A 65 Verhouding tussen kritieke pipelengte gevonden met D-Geo Flow en met de curve voor verschillende achterland leklengtes met en zonder meerlaagsheid.

A.4.3 Toepassing

Uit deze onderzoek volgt dat het effect van anisotropie en meerlaagsheid op pipelengte en kritiek verval sterk afhankelijk is van de geometrie van het WVP (D/L_s), het achterland en de type instroomrandvoorwaarde. Het effect van anisotropie en meerlaagsheid wordt niet beïnvloed door parameters die het grondwaterstromingspatroon niet wijzigen, zoals doorlatendheid en d70. Voor meerlaagsheid geldt dat er langere kritieke pipelengtes zijn dan bij de curve is afgeleid wanneer de bovenste laag minder doorlatend is. Wanneer de bovenste

meer doorlatend is lijkt de curve van 2021 redelijk goed te kloppen met de onderzochte schematisaties.

Doordat het effect van meerlaagsheid en anisotropie erg verschillend is afhankelijk van de geometrie, achterland doorlatendheid en type instroomrandvoorwaarde is het niet mogelijk om een generieke factor toe te passen op de kritieke pipelengte en het kritieke verval.

Het is wel mogelijk om af te leiden welke situaties tot langere kritieke pipelengtes leiden:

- Bij een dun WVP is het effect van anisotropie of meerlaagsheid op de kritieke pipelengte sterk maar wordt het kritieke verval weinig beïnvloed.
- Bij een meer doorlatend achterland is het effect van anisotropie of meerlaagsheid op de kritieke pipelengte groot en op het kritieke verval is deze klein.
- Een instroomrandvoorwaarde die leidt tot meer kromming naar de pipe zal tot langere kritieke pipelengtes leiden. Dit kan bijvoorbeeld zijn een instroomrandvoorwaarde met verticale en horizontale instroom.

De situaties die het meest afwijken van de stappenplan zijn dus situatie met een dun WVP en een groot K_2/K_1 of anisotropiefactor. Omdat de curve afgeleid is met een dicht achterland en een verticale instroomrandvoorwaarde zullen de afwijkingen niet veel groter worden door deze twee parameters. De curve kan zelfs langere kritieke pipelengtes dan D-Geo Flow geven in een situatie waar het achterland doorlatend is .

A.5 Conclusie

In dit onderzoek is een conceptueel model ontwikkeld voor het effect van anisotropie en meerlaagsheid en hypotheses zijn opgesteld voor hun effect op de kritieke pipelengte en het kritieke verval. Deze hypotheses zijn met numerieke modellen gevalideerd door een gebrek aan proeven. De numerieke modellen tonen echter soms wat onverwachte variaties in L_c aan door de grote numerieke gevoeligheid van het kritieke pipelengte en zijn niet gevalideerd met proeven voor meerlaagsheid en anisotropie.

- Echter, was het wel duidelijk te zien dat anisotropie en meerlaagsheid tot langere kritieke pipelengtes leiden en tot een hoger kritiek verval. De mate van deze invloed hangt met name af van de geometrie (D/L), de achterland doorlatendheid en de instroomrandvoorwaarde: Het effect van anisotropie en meerlaagsheid op pipelengte is groter bij een dun WVP dan bij een dik WVP, terwijl het effect op kritieke verval juist groter is bij een dik WVP.
- Bij een dicht achterland is dit ook te zien, er worden langere kritieke pipelengtes verwacht bij een dicht achterland terwijl er juist relatief weinig effect op het kritieke verval verwacht wordt bij een dicht achterland.

Anisotropie en meerlaagsheid kunnen hierdoor leiden tot een onderschatting van de pipelengte bij een dun WVP met een ondoorlatend achterland. In deze situatie verandert het kritieke verval weinig, terwijl de kritieke pipelengte wel veel langer wordt.

Het effect van anisotropie en meerlaagsheid op de kritieke pipelengte wordt naar verwachting het grootst bij een dun WVP en een ondoorlatend achterland met instroom die horizontaal en verticaal binnentkomt.

Referenties Bijlage A

Rosenbrand, E., Wopereis, L., Wiersma, A.P., Kanning, W., Bezuijen, A. en Blinde, J. (2022A). Kennis voor Keringen 2021: Achtergrondrapport Voorlanden. Deltares rapport 1206817-010-GEO-0003.

Rosenbrand, E. en Wopereis, L. (2022B). Kennis voor Keringen Piping 2022: achtergrondrapport 3D effect. Deltares rapport 11208057-027-GEO-0003.

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 ijkdijk experiments. Eur. J. Environ. Civ. Eng. 15. <https://doi.org/10.1080/19648189.2011.9714845>

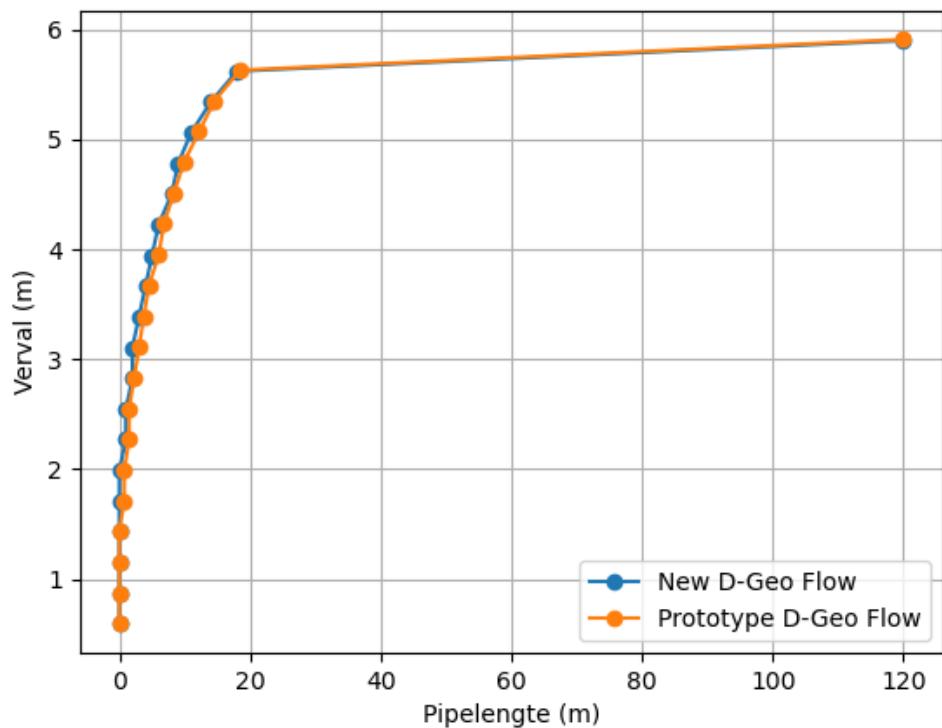
Sellmeijer, J., 1988. On the mechanism of piping under impervious structures. TU Delft.

Bijlage AA Validatie new D-Geo Flow 2022.01

Om de nieuwe release van D-Geo Flow 2022.01 die voor dit onderzoek gebruikt is te valideren is de basisschematisatie voor anisotropie BC1 met een ondoorlatend achterland gebruikt, zie Paragraaf 0. Deze schematisatie is opgebouwd in de prototype van D-Geo Flow die gebruikt is bij de eerdere studies met dezelfde model parameters (meshgrootte, Sellmeijer kalibratiefactor van 0,89 en nPipeHeightIncr van 1000).

Voor deze schematisatie en meshgrootte is de pipegroei met D-Geo Flow 2022.01 en de prototype van D-Geo Flow (DgFlow) berekend. De vergelijking van de pipegroei uit beide modellen is weergegeven in Figuur A 66. Uit deze figuur lijkt de pipegroei goed te kloppen.

De kritieke pipelengte en het kritieke verval berekend met beide modellen zijn ook vergeleken in Tabel A 12. Hieruit volgt dat voor een kleine stapgrootte deze twee parameters bijna identiek zijn.



Figuur A 66 Vergelijking van de pipegroei met D-Geo Flow 2022.01 en de prototype van D-Geo Flow.

Tabel A 12 Vergelijking van de kritieke pipelengte en het kritieke verval met D-Geo Flow 2022.01 en de prototype van D-Goe Flow voor verschillende stapgroottes.

Stapgrootte (cm)	Oud		New	
	H_c	L_c	H_c	L_c
10	5,9	29,076	5,8	23,000
0,1	5,907	31,594	5,885	31,000

B Validatie van de pipelengte onder kritiek verval bij 2D en 3D situaties

B.1 Introductie

Dit rapport is een onderdeel van het Kennis voor Keringen programma van Rijkswaterstaat, waarin Deltares onderzoek doet naar een scherpere analyse van het faalmechanisme piping. Dit rapport is een bijlage bij het rapport “Onderzoek rapport Voorlanden - KvK2022” door Wopereis et al. (2022).

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 de 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 × 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.

Het meenemen van voorlanden voor piping heeft een groot effect op de overstromingskans. Indien voorland niet meegenomen wordt leidt dit tot een significante overschatting van de overstromingskans. Om voorlanden onderbouwd mee te kunnen nemen in de analyse van terugschrijdende erosie met de rekenregel van Sellmeijer is het van belang inzicht te hebben in de pipelengte.

Daarom is in 2021 in het Kennis voor Keringen programma voorlanden onderzoek gedaan naar het fysische proces dat leidt tot de pipelengte. De uitkomst van dit onderzoek is een concept stappenplan waarmee een beheerder een onderbouwde afweging kan maken voor hoeveel voorland meegenomen kan worden in de pipinganalyse op basis van de optredende en kritieke pipelengte. Bij het concept stappenplan zijn ook enkele aanbevelingen gedaan voor nader onderzoek om te komen tot een definitieve versie van het stappenplan. Deze vormen de aanleiding voor het vervolgonderzoek van 2022.

B.1.1 Doel van het onderzoek

In het 2022 Kennis voor Keringen programma is een vervolgonderzoek opgesteld om het stappenplan verder uit te breiden. Dit is gedaan door focus te leggen op drie onderdelen:

1. Toepassingsgebied van het stappenplan 2022 voor het meenemen van voorland vergroten.

De methode ontwikkeld voor het meenemen van voorland was gebaseerd op de schematisatie van de rekenregel van Sellmeijer, zodat het voorland in de rekenregel kan worden meegenomen. Echter, parameters die niet in de rekenregel zitten zoals anisotropie en meerlaagsheid, kunnen in de praktijk voorkomen maar zitten niet in de rekenregel. Het niet

meenemen van deze eigenschappen is weliswaar conservatief bij een berekening van het kritieke verval (wat het doel is waarvoor de rekenregel is afgeleid), voor de pipelengte bij kritiek verval is het niet meenemen hiervan echter juist niet conservatief: deze eigenschappen kunnen leiden tot een langere pipelengte bij kritiek verval. Het netto effect op de pipelengte, bij een gegeven verval, kan positief of negatief zijn afhankelijk van de situatie. Een conceptueel inzicht en nadere onderbouwing hiervan zijn nodig om het toepassingsbereik van het stappenplan uit te breiden.

2. Validatie van de tweede grafiek van de stappenplan met pipelengtes bij waterstand onder kritieke verval.

Een conceptueel, parametrisch model is in Rosenbrand et al. (2022A) ontwikkeld dat inzicht geeft in de pipelengte bij kritiek verval, en welke factoren deze lengte beïnvloeden. Op basis van het geheel zijn twee grafieken opgesteld aan de hand waarvan een beheerder in kan schatten wat de pipelengte is als functie van het verval en verschillende karakteristieken van de dijk en de ondergrond. Deze twee grafieken zijn de basis van een stappenplan om onderbouwd meer voorland mee te kunnen nemen. Echter, pipelengtes onder kritiek verval van het numerieke model gebruikt om de curves af te leiden zijn nog niet gevalideerd. Alleen de kritieke pipelengtes zijn vorige jaar vergeleken met drie proeven van Silvis. Het doel van deze onderdeel is om deze pipelengtes onder het kritieke verval te valideren aan de hand van drie series van proeven.

3. Aanscherping van de veiligheidsbenadering.

Een eerste verkenning van de veiligheidsbenadering en omgang met de modelonzekerheid van de berekende pipelengte is uitgevoerd in Rosenbrand et al. (2022A) op basis van fictieve doorsneden. 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. In deze studie wordt deze veiligheidsbenadering aangescherpt aan de hand van een pilot. Verder is een aanscherping van de keuze in karakteristieke waarde van de doorlatendheid van het WVP nodig door nieuwe ontwikkelingen in geohydrologische modellen.

Het voorliggende rapport betreft achtergronden bij de hierboven genoemde stap 2.

Om de numerieke pipelengtes berekend met D-Geo Flow bij vervallen lager dan kritiek verval te valideren is gebruik gemaakt van de proevenseries zoals beschreven door Silvis (Silvis, 1991), Hanses (Hances, 1985) en Pol (Pol, 2022). Door de pipe-ontwikkeling in de drie typen proeven te vergelijken met de pipe-ontwikkeling voorspeld met numerieke simulaties in D-Geo Flow is het mogelijk om inzicht te krijgen in:

1. Hoe goed de predictie is van de pipegroei voor 2D situaties (Silvis) met het numerieke model.
2. Hoe de pipegroei zich gedraagt in een experimentele 3D situatie (Hances en Pol) in vergelijking met een equivalent numerieke 2D situatie.

Stap 1 wordt met de 2D proeven van Silvis onderzocht en stap 2 met de 3D proeven van Hanses en Pol. Om het gedrag van de pipegroei te onderzoeken kijken we naar de verhouding van verval over kritiek verval (H/H_c) uitgezet tegen de verhouding pipelengte en kritieke pipelengte (L/L_c) bij experimenten en bij numerieke modellen. Hiermee kunnen we identificeren of de pipe hetzelfde dimensiooze pad volgt en dus vergelijkbaar gedrag vertoont in proef en simulatie.

Naast het dimensiooze pad kijken we ook naar het daadwerkelijke verval tegen de daadwerkelijke pipelengte. Hiermee kan het absolute verschil in pipegroei tussen experimenten en het numerieke model inzichtelijker worden gemaakt.

In de pipingexperimenten wordt het verval gedurende de experimenten stapsgewijs verhoogd totdat het punt wordt bereikt waarbij de pipe blijft groeien. De pipelengte wordt tussentijds genoteerd bij een gegeven verval. In de analyse wordt dan gekeken wat het daadwerkelijke kritiek verval is en de kritieke pipelengte.

Voor de numerieke analyse van het pipingprobleem wordt gebruik gemaakt van D-Geo Flow. D-Geo Flow is een door Deltares ontwikkeld grondwaterstromingsmodel waarin het Sellmeijer model als erosiemodule is geïmplementeerd (Esch, 2013) om de pipegroei te voorspellen als functie van het verval. Aan de hand van deze berekening wordt het kritieke verval (H_c) gedefinieerd als het verval net voor doorbraak. Met andere woorden, het verval net voordat de pipe doorgroeit is het hoogste verval wat de kering kan weerstaan voordat een open kanaal ontstaat tussen rivier en polderzijde van de dijk. De kritieke pipelengte is de pipelengte behorend bij het kritieke verval.

B.1.2

Leeswijzer

Hoofdstuk B.2 geeft een overzicht van de proeven en hun geometrie en grondeigenschappen. Hoofdstuk B.3 bevat de uitleg van de numerieke modellen. De experimenten en numerieke modellen worden in Hoofdstuk B.4 vergeleken. De conclusies zijn in Hoofdstuk B.5 gepresenteerd.

B.2 Experimenten

B.2.1 Silvis

De proeven van Silvis T2, T3 en T4 zijn uitgevoerd in 1991 (Silvis, 1991). Deze proeven waren grootschalig en zijn elk eenmaal uitgevoerd. In tegenstelling tot de data uit de thesis van Hanses is er van de Silvis experimenten alleen een piping pad mapping beschikbaar waarin handmatig verschillende pipepaden zijn getekend. Uit deze data is de pipelengte bij verschillende vervallen achterhaald.

Bij de proeven van Silvis werd in de Delta flume een dijk nagebootst met een sloot als uittredepunt over de gehele breedte van 5 meter. De kwelweglengte is gevarieerd (T2: 9 m, T3: 12 m, T4: 6 m). Uit de resultaten van deze proeven bleek dat er over de breedte van het zandpakket verscheidene pipes vormden, zie Bijlage BA1. Op basis van de uitgangspunten en het pipepatroon is aangenomen dat deze proeven vergeleken kunnen worden met het 2D pipingmodel, aangezien dit model een oneindige sloot en pipe voorstelt.

B.2.2 Hanses

De proeven van Hanses sets 2 (5 herhalingen), 5 (2 herhalingen) en 7 (2 herhalingen) zijn uitgevoerd in 1985 (Hances, 1985). Van de proeven zijn de geometrie van het model het verloop in verval tegen de groei van de pipelengte goed gedocumenteerd.

In de Hanses experimenten wordt een cirkelvormig uittredepunt gebruikt wat forceert dat er een enkele pipe ontstaat. In het geval van deze proeven moet de grondwaterstroming als een 3D situatie gezien worden aangezien er geen interferentie is met andere pipes en het grondwater van alle kanten de pipe in zal stromen.

B.2.3 Pol

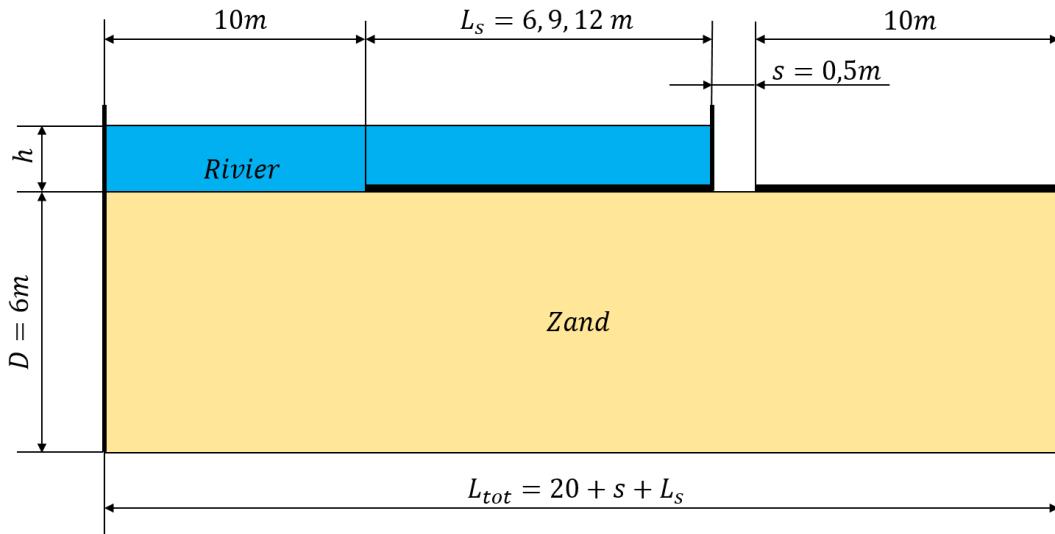
De proeven van Pol (Pol, 2022) zijn uitgevoerd met drie typen zand waarvan wij alleen de resultaten van Baskarp (BS25) en fijn zand (FS35) zullen gebruiken. Het derde type zand wordt niet gebruikt omdat deze er met deze zandsoort maar één enkele test is uitgevoerd. Net zoals bij de proeven uitgevoerd door Hanses is bij de opstelling van Pol een geometrie gekozen met een uittredegat in plaats van een sloot waardoor deze gezien kan worden als een 3D situatie. De meetdata van deze proeven heeft een hoger detailniveau dan de Hanses set waardoor we meer meetpunten hebben om de curves uit de D-Geo flow simulaties te kunnen verifiëren.

B.2.4 Geometrieën

In de volgende tabel zijn de afmetingen van de proeven van Silvis gegeven, zie ook Figuur B 1. De dikte van het watervoerend pakket is in alle proeven gelijk aan 6 m en de lengte van de afdekplaat over het pakket is respectievelijk 9, 12, en 6 m. L_s definieert de lengte van het uittredepunt tot aan de rivier en L_{tot} is de totale lengte van de bak. In de proeven van Silvis vormt een sloot het uittredepunt waar s staat voor de breedte van de sloot. Het verval wat opgelegd wordt is aangegeven met h .

Tabel B 1 Geometrie van proeven van Silvis.

	D (m)	L_{voor} (m)	L_s (m)	L_{tot} (m)	s (m)
Silvis T2	6	10	9	29,5	0,5
Silvis T3	6	10	12	32,5	0,5
Silvis T4	6	10	6	26,5	0,5



Figuur B 1 Schematische tekening Silvis proefopstelling.

De proeven van Silvis zijn niet herhaald. Door de breedte van het zandpakket en uittredepunt over de gehele breedte zijn er meerdere pipes parallel naast elkaar ontstaan waarvoor het verval en de corresponderende pipelengte zijn verkregen, zie Bijlage BA1.

De proeven van Hanses en Pol bestaan uit 3 typen proeven die elk een aantal keer herhaald zijn, zie Figuur B 2. Voor de proeven van Hanses zijn dit sets 2*, 5* en 7*. Hanses 2* is 5 maal herhaald, Hanses 5* twee maal en Hanses 7* tweemaal. De dikte van het zandpakket is aangegeven met D , de lengte tot de rand van het uitstroomgat met L_s , de totale lengte van het sample met L_{tot} en de diameter van het uitstroomgat met d . Het verval wordt aangegeven met h .

Tabel B 2 Geometrie van proeven van Hanses.

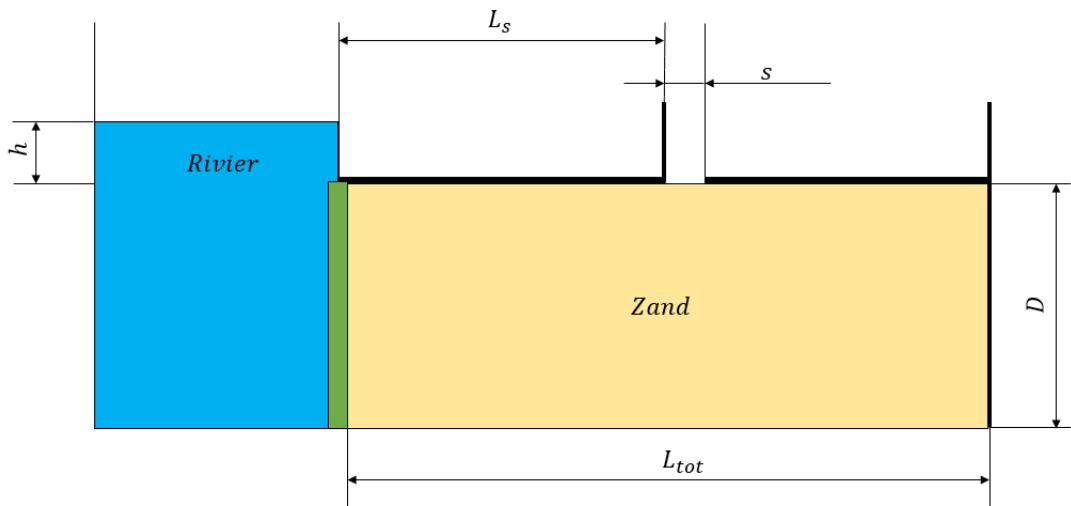
	D (m)	L_s (m)	L_{tot} (m)	s (m)
Hanses 2*	0,2	0,72	0,96	0,06
Hanses 5*	0,083	0,66	0,9	0,06
Hanses 7*	0,33	2,64	3,52	0,06

In Tabel B 3 zijn de afmetingen van de geometrie van de proeven van Pol gedefinieerd. Deze geometrie is gebruikt om proeven te doen met drie soorten zand: Baskarp 25, FS35 en FPH. Voor de 3D verificatiestudie maken wij alleen gebruik van de resultaten voor Baskarp en FS35.

Tabel B 3 Geometrie van de proeven van Pol.

	D (m)	L_{voor} (m)	L_s (m)	L_{tot} (m)	d (m)
Pol	0,1	-	0,352	0,48	0,006

In de pipingproeven ontstaat de pipe onder het verhogen van het verval bij de linkerkant van het gat en verplaatst zich naar links.



Figuur B 2 Schematische tekening Hanses en Pol proefopstelling, groene blok is filter.

B.2.5 Zandeigenschappen

Voor de proeven van Silvis is Marsdiepzand gebruikt welke over de drie experimenten dezelfde eigenschappen heeft. Voor de proeven van Hanses is Sand A gebruikt waarvan de doorlatendheid verschilt per experiment. De waarden corresponderend met ieder experiment zijn gegeven in onderstaande tabel. Voor de proeven van Pol is Baskarp en fijn zand (FS35) gebruikt voor de respectievelijke proeven. In kolom 2 van Tabel B 4 staan de labels toegekend aan de experimenten. Kolom 3 geeft de d_{70} , kolom 4 de doorlatendheid k , kolom 5 de kinematische viscositeit bij de aangenomen temperatuur. Kolom 6 geeft de bijbehorende intrinsieke permeabiliteit en in de laatste kolom wordt de vaste stof dichtheid gegeven.

Tabel B 4 Zandeigenschappen.

	Exp	$d_{70}(m)$	$k \left(\frac{m}{s} \right)$	μ_{kin}	$\kappa \left(\frac{m^2}{s} \right)$	$\rho_s \left(\frac{kg}{m^3} \right)$	RD (relative density)
Sand A	21	3,55 e-4	4,0 e-4	1,0 e-3 aangenomen n.b.	4,08 e-11	2610	-
	22	"	4,0 e-4	"	4,08 e-11	"	-
	23	"	3,9 e-4	"	3,98 e-11	"	-
	24	"	3,7 e-4	"	3,77 e-11	"	-
	25	"	4,0 e-4	"	4,08 e-11	"	-
	51	"	4,0 e-4	"	4,28 e-11	"	-
	52	"	4,7 e-4	"	4,08 e-11	"	-
	71	"	4,7 e-4	"	4,79 e-11	"	-
	72	"	5,1 e-4	"	4,49 e-11	"	-
Marsdiepzand	T2	2,47 e-4	5,1 e-4	1,40 e-3 ($T = 8,5^\circ C$)	7,30 e-12	2529	-

	T3	"	5,1 e-4	1,46 e-3 ($T = 6,3^{\circ}\text{C}$, geinterpoleerd)	7,30 e-12	"	-
	T4	"	5,1 e-4	1,57 e-3 ($T = 4,0^{\circ}\text{C}$)	7,30 e-12	"	-
Baskarp	232	2,6 e-4	2,7 e-4	1,00 e-3 ($T = 20,0^{\circ}\text{C}$)	2,75 e-11	2650	1,02
	233	"	3,6 e-4	"	3,67 e-11	"	0,90
	234	"	3,7 e-4	"	3,77 e-11	"	0,90
	236	"	2,5 e-4	"	2,55 e-11	"	1,02
	243	"	2,6 e-4	"	2,65 e-11	"	1,02
	245	"	3,1 e-4	"	3,16 e-11	"	0,91
	247	"	2,4 e-4	"	2,45 e-11	"	0,92
	248	"	2,5 e-4	"	2,55 e-11	"	1,03
	249	"	2,5 e-4	"	2,55 e-11	"	1,03
	250	"	2,5 e-4	"	2,55 e-11	"	1,03
FS35	238	4,62 e-4	1,0 e-3	"	1,02 e-10	2650	1,02
	239	"	9,0 e-4	"	9,17 e-11	"	1,07
	240	"	1,2 e-3	"	1,22 e-10	"	0,91
	241	"	1,2 e-3	"	1,22 e-10	"	0,91
	242	"	8,7 e-4	"	8,87 e-11	"	1,04
	246	"	9,0 e-4	"	9,17 e-11	"	1,04

Notitie: Verschillen ten opzichte van Kennis voor keringen 2020 achtergrondrapportage Voorlanden

Voor de Silvis proeven is de doorlatendheidsproef leidend en wordt de intrinsieke permeabiliteit die nodig is voor de Dgeoflow berekeningen bepaald met een viscositeit van $0,0014 \left(\frac{\text{Ns}}{\text{m}^2} \right)$ bij een temperatuur van 8,5 graden Celsius bij de doorlatendheidsproef. Voor de viscositeit van water gebruiken we wel de temperatuur bij iedere afzonderlijke proef.

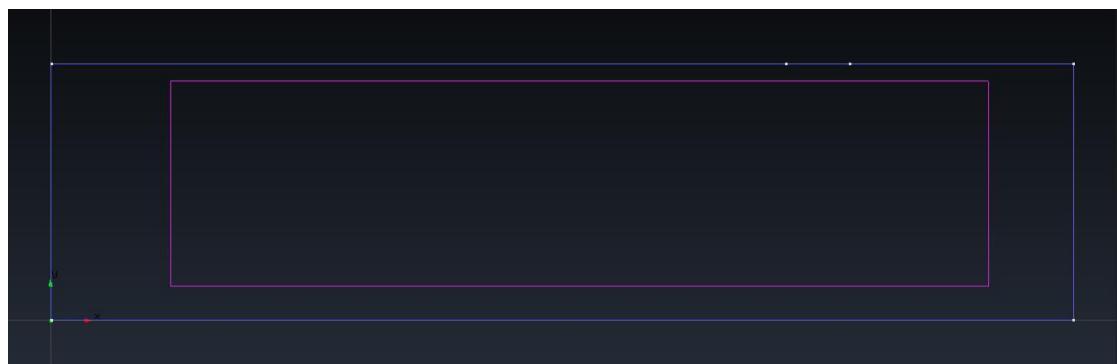
In het rapport uit 2020 is voor het bepalen van de intrinsieke doorlatendheid uitgegaan van een viscositeit van $0,001 \left(\frac{\text{Ns}}{\text{m}^2} \right)$ bij een temperatuur van 20 graden Celsius. Dit zorgt voor een afwijking in de intrinsieke doorlatendheid en daarmee een kleine afwijking in het kritieke verval maar niet op de kritieke pipelengte.

B.3

Numerieke modellen en resultaten

De proeven van Hanses, Silvis en Pol zijn vertaald naar een 2D model in GiD waarmee pipeberekeningen zijn uitgevoerd.

Voor de GiD modellen zijn de nodes in een tekstbestand Hanses*.txt, Silvis*.txt of Pol*.txt gezet waar de * wordt vervangen door het nummer van de proefset, zie Bijlage BA2. Op basis van de nodes wordt de geometrie verder gedefinieerd. De tekstbestanden zijn opgezet volgens de gegevens in Paragraaf 2.4.



Figuur B 3 Voorbeeld van een geometrie in GiD.

Het Sellmeijer model maakt gebruik van een calibratiefactor die gelijk is aan 0,89 en toegepast wordt in alle beschreven situaties. In de numerieke implementatie van het Sellmeijer model wordt de pipehoogte in een pipe-element incrementeel verhoogd tot de maximale pipehoogte met een vooraf ingesteld aantal stappen. Voor de maximale pipehoogte wordt aangenomen dat deze gelijk is aan 100 maal de d_{70} waarde van het materiaal. Voor een stabiele berekening worden 1000 stappen (nPipeHeightIncr) gebruikt om tot deze maximale pipehoogte te komen. In D-Geo flow is dit de standaard. Voor de dichtheid van water wordt uitgegaan van $1000 \frac{kg}{m^3}$ en voor de gravitatieconstante $9,81 \frac{m}{s^2}$.

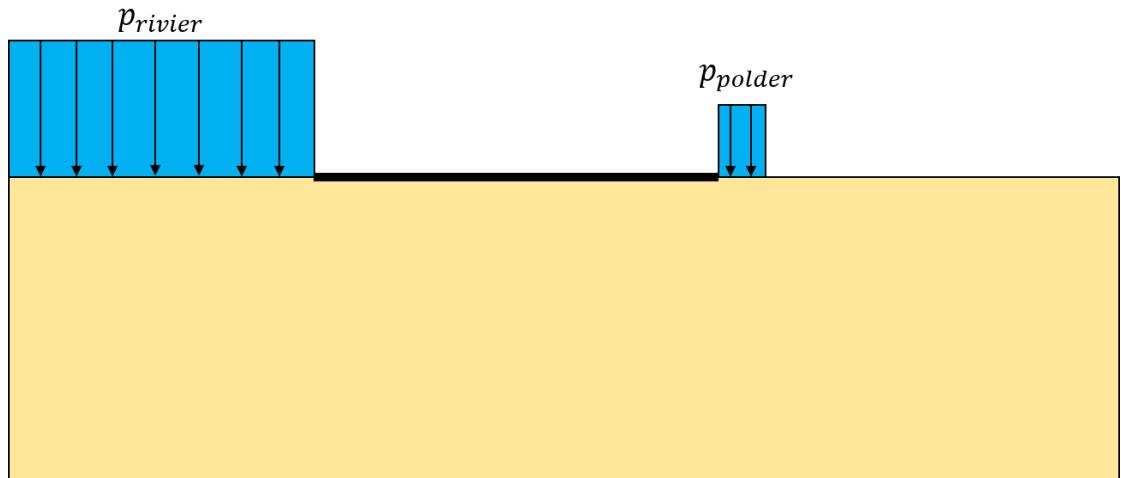
B.3.1

Randvoorwaarden

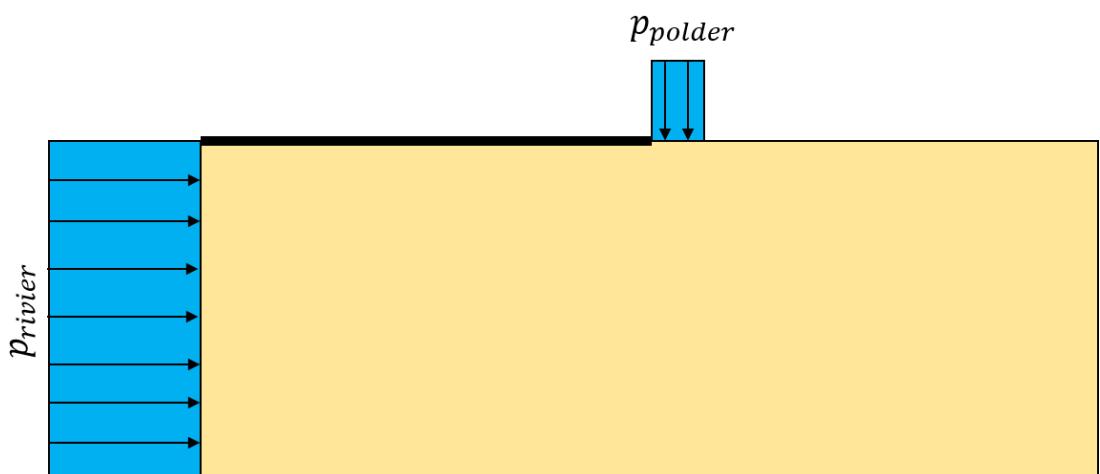
In D-Geo Flow worden de randvoorwaarden aan de rivier en polderzijde gekozen, zie Figuur B 4 en Figuur B 5. Hierbij definiëren we aan de rivierzijde de initiële waterstand, kolom 1, en de eind waterstand, kolom 2. Over dit bereik verhogen we de waterhoogte in Nsteps uit kolom 3 wat resultert in een genoemde stapgrootte in kolom 4. Het verval wat opgelegd wordt is het verschil met de polderstand wat op 0 gehouden wordt.

Tabel B 5 Randvoorwaarden.

	Initiële hoogte (m)	Eind hoogte (m)	Nsteps	StepSize Verval (m)
Hanses 21-25	0,10	0,20	500	2,0 e-4
Hanses 51-52	0,15	0,35	1000	2,0 e-4
Hanses 71-72	0,10	0,70	1200	5,0 e-4
SilvisT2	0,50	2,00	1500	1,0 e-3
SilvisT3	0,50	2,50	2000	1,0 e-3
SilvisT4	0,00	1,50	1500	1,0 e-3
Pol Baskarp	0,03	0,15	1200	1,0 e-4
Pol FS	0,03	0,15	1200	1,0 e-4



Figuur B 4 Schets van de randvoorwaarden voor het numeriek model van de Silvis proeven.



Figuur B 5 Schets van de randvoorwaarden voor het numeriek model van de proeven van Hanses en Pol.

B.3.2

Mesh

Voor het oplossen van het pipingprobleem moet de geometrie gemeshed worden. Vanwege de variërende maten van de testopstellingen is de beoogde elementgrootte niet gelijk. Voor Hanses 2* is de gekozen elementgrootte voor het watervoerend pakket 2 cm en voor de pipe 1 cm. Voor de Hanses 5* proeven is gekozen voor een elementgrootte van 1,5 cm in het watervoerend pakket en voor 0,5 cm voor de pipe. Voor de Hanses 7* proeven hebben we gekozen voor elementgroottes voor de pipe van 2 cm en in het watervoerend pakket een elementgrootte van 4 cm. De proeven van Silvis waren op grote schaal, hiervoor hebben we gekozen voor een elementgrootte voor de pipe van 10 cm en voor het watervoerend pakket 40 cm. Voor de proeven van Pol is gekozen voor een meshgrootte rondom de pipe van 3 mm en in het watervoerend pakket 6mm.

Tabel B 6 Meshgroottes.

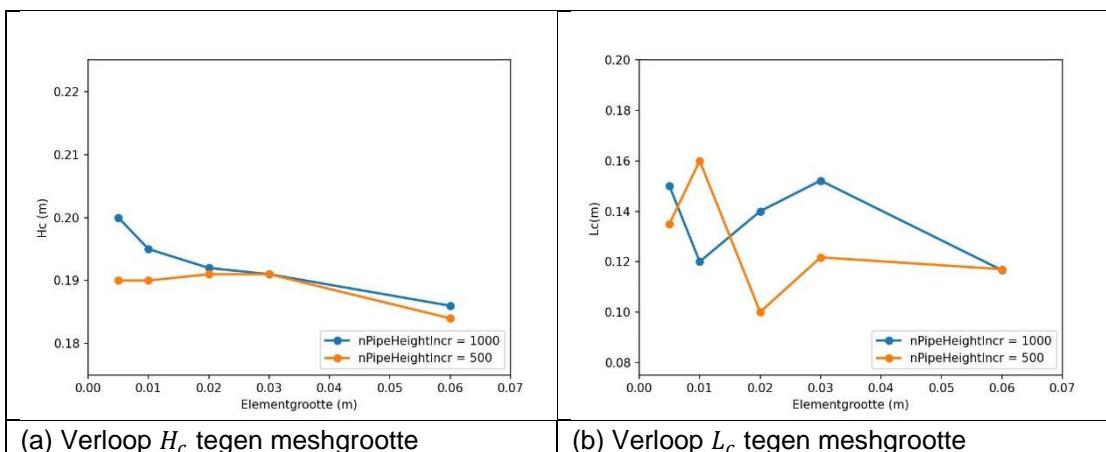
Proef	Elementgrootte mesh (m)	Elementgrootte pipe en uitredepunt (m)
Hanses 21-25	0,020	0,010
Hanses 51-52	0,015	0,005
Hanses 71-72	0,040	0,020
Silvis T2-T4	0,400	0,100
Pol Baskarp en FS	0,006	0,003

De keuze in meshgrootte is gebaseerd op een mesh-analyse van de proeven van Hanses. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Tabel B 7. Hieruit blijkt dat de kritieke pipelengte zeer afhankelijk is van de gekozen meshgrootte terwijl de berekening van het kritieke verval iets minder gevoelig is.

Tijdens deze simulaties is gebruik gemaakt van een initieel verval van 0,15 m wat met stappen van 0,001 m oploopt tot 0,25 m. De meshgrootte gebruikt is deze analyse is gebruikt voor het WVP (elementgrootte in Tabel B 7 genoemd) en de pipe en uitredepunt elementen.

Tabel B 7 Meshsize vergelijking.

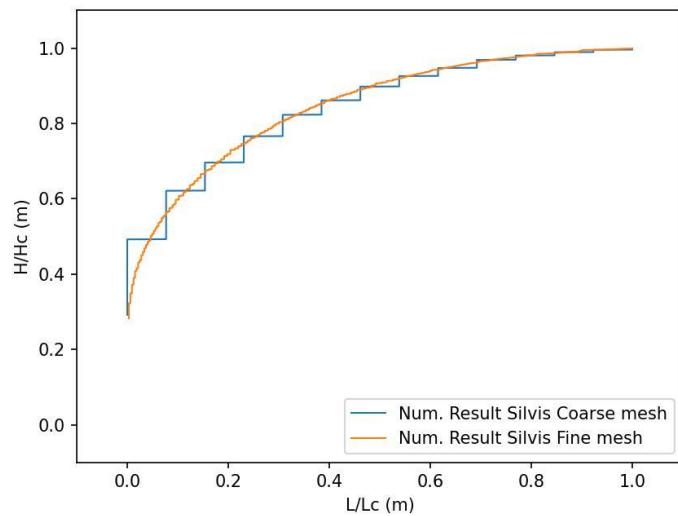
Hanses 23	Meshgrootte (m)	$n_{\text{PipeHeightIncr}} = 1000, \Delta h = 0,001 \text{ m}$		$n_{\text{PipeHeightIncr}} = 500 \Delta h = 0,001 \text{ m}$	
		$H_c (\text{m})$	$L_c (\text{m})$	$H_c (\text{m})$	$L_c (\text{m})$
	0,060	0,1860	0,11660	0,1840	0,1170
	0,030	0,1910	0,15217	0,1910	0,1217
	0,020	0,1920	0,14000	0,1910	0,1000
	0,010	0,1950	0,12000	0,1900	0,1600
	0,005	0,2000	0,15000	0,1900	0,1350



Waarom is de pipelengte zo afhankelijk van de gekozen mesh?

De resolutie van de gegeven pipelengte wordt gegeven door de meshgrootte ter hoogte van de kritieke pipelengte. Bij een fijner mesh is de pipelengte dus veel accurater en zal tijdens de pipegroei het verloop veel geleidelijker zijn dan bij een grove mesh zoals te zien in onderstaande figuur. Verder is de gevoeligheid van de meshgrootte het grootst rondom het

kritieke verval omdat de pipelengte dan in grotere stappen groeit. Figuur B 6 illustreert het effect van meshgrootte voor de Silvis T2 proeven met een meshgrootte van 0,25 m en 0,01 m.



Figuur B 6 Vergelijking pipegroei bij grove en fijne mesh voor de pipe-elementen.

B.4

Vergelijking Experimenten en Numerieke modellen

De vergelijken van experimenten en numerieke modellen wordt steeds met twee curves uitgevoerd:

1. Om de validatie van pipelengte onder kritiek verval te maken worden de resultaten van experimenten en numerieke simulaties vergeleken op basis van het dimensieloos verval (H/H_c) en de dimensieloze pipelengte (L/L_c).
2. Om een indicatie te krijgen van het 3D effect wat niet meegenomen wordt in het Sellmeijer model wordt ook gekeken naar absolute waarden: verval (H) tegen pipelengte (L).

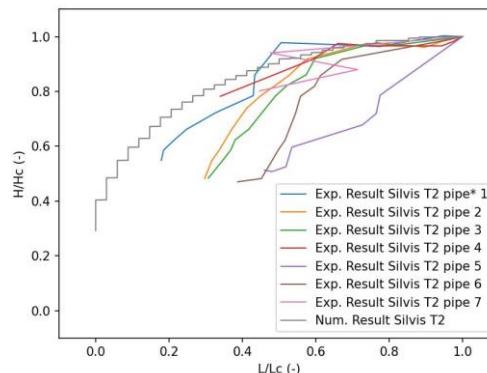
B.4.1

Silvis

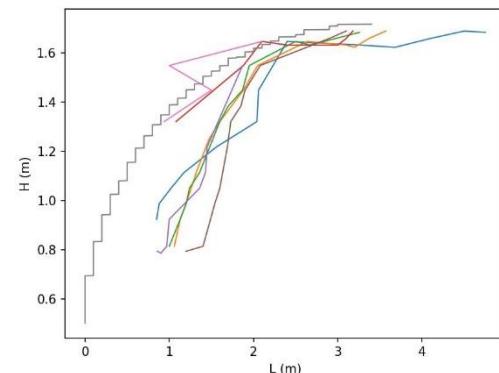
In onderstaande figuren zien we de dimensieloze kritiek verval-pipelengte curves waarbij duidelijk te zien is dat voor Silvis T2 het grootste gedeelte van de pipes zich redelijkerwijs vormen zoals het pipingmodel voorspelt. Hier zien we ook dat het missende stuk van 1,5 m waar de wel zit ervoor zorgt dat we een deel van de informatie missen die bij de proeven van Hanses wel in zijn geheel te zien was (zie Paragraaf B.4.2). Dit leidt ertoe dat bij alle Silvisproeven we niet kunnen verifiëren of de pipegroei bij vervallen lager dan ongeveer 60% van het kritieke verval overeenkomt met de voorspelling van het pipingmodel.

De T3 proef laat een meer consistente verhouding tussen toenemend verval en de groei van de pipelengte zien voor bijna alle gevormde pipes. Op basis van de grafiek zou je kunnen zeggen dat de groei van de pipe al bij lagere waardes voor het verval op zou moeten treden dan wordt voorspeld door het model. Dit zou in mindere mate ook gezegd kunnen worden voor de T2 proef resultaten maar voor T4 is daar te beperkt data voor.

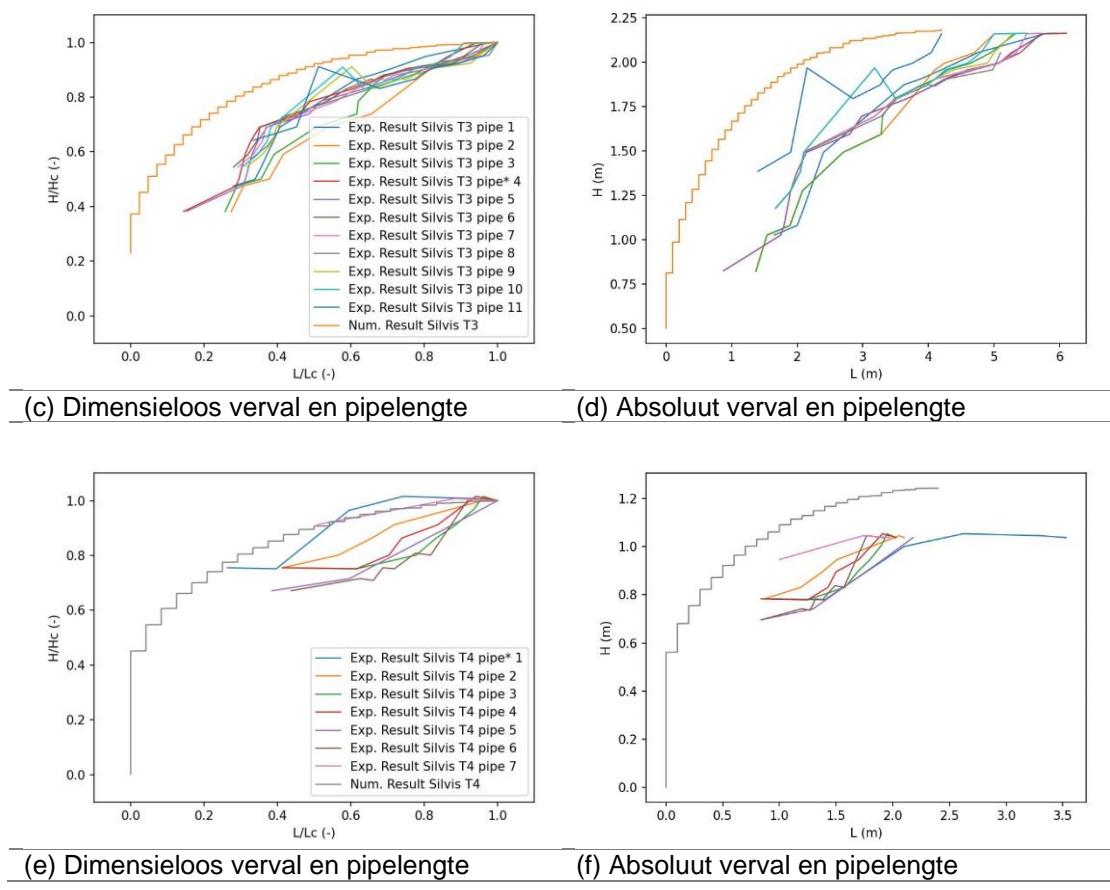
Bij de T4 proef resultaten is, net als T2, het duidelijk zichtbaar dat het gebrek aan meetdata voor het pipegroei verloop in de eerste 1,5 m ervoor zorgt dat er niets gezegd kan worden over de eerste pipelengte en of dit overeenkomt met het model. Wel is duidelijk te zien dat bij het naderen van het kritieke verval de pipe relatief veel groeit in zowel experiment als simulatie. Een kanttekening is dat de pipegroei in de experimenten gestopt zijn voor doorgroei van de pipe waardoor de kritieke pipelengtes mogelijk een beetje overschat worden.



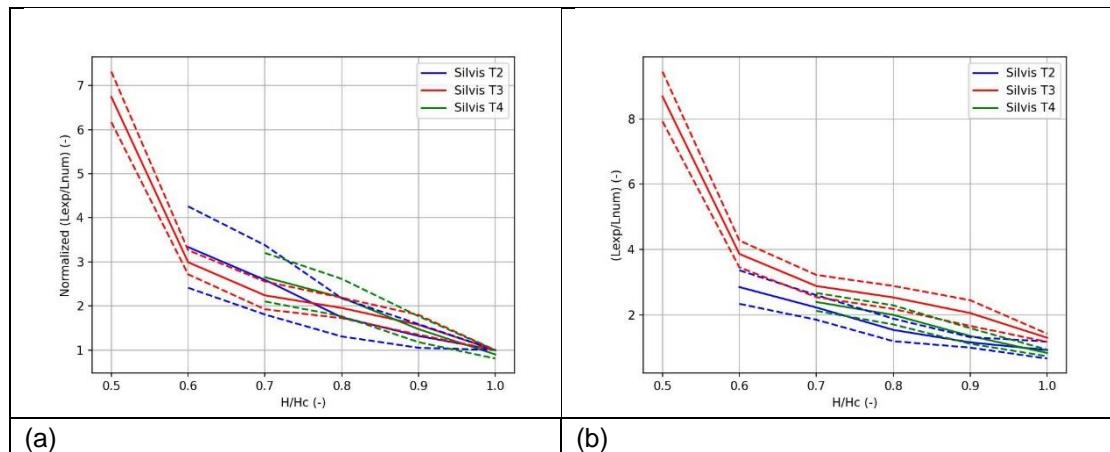
(a) Dimensieloos verval en pipelengte



(b) Absoluut verval en pipelengte



Figuur B 7 Resultaten Silvis T2 (a en b), T3 (c en d) en T4 (e en f) proeven.



Figuur B 8 In figuur (a) is de gemiddelde verhouding plus standaarddeviatie tussen de genormaliseerde experimentele en numerieke pipelengte uitgezet tegen de verhouding tussen verval en kritiek verval. (b) toont dezelfde informatie maar dan met de absolute waarde voor numerieke en experimentele pipelengte.

In Figuur B 8 (a) laten we zien hoe goed de experimentele en numerieke pipelengte overeenkomt voor dezelfde verhouding tussen verval en kritiek verval. Zoals te zien is er voor de T3 proef de meeste informatie over de pipes, gevolgd door de T2 en T4 proef. Het is duidelijk zichtbaar dat hoe lager het verval ten opzichte van het kritieke verval hoe hoger de afwijking

tussen de experimentele en numerieke pipelengte. Bij een $\frac{H}{H_c}$ van 0,5 zien we gemiddeld een factor 5 hogere pipelengte voor het experiment dan voor de simulatie. Bij een toenemende $\frac{H}{H_c}$ zien we dat deze factor lager wordt en naar 1 gaat bij kritiek verval. Dit komt door de normalisatie en betekent niet dat de absolute pipelengtes dan gelijk zijn.

In Figuur B 8 (b) is de niet-genormaliseerde variant getoond die een factor van het daadwerkelijke verschil in pipelengte weergeeft. Hier zien we dezelfde trend alleen is het verschil dat de verschilfactor voor proef T3 een stuk hoger ligt dan voor proeven T2 en T4.

In de volgende tabellen zijn de resultaten van de Silvisproeven en de 2D pipeberekening weergegeven. In kolom 1 staat het nummer van de pipe, kolom 2 het kritieke verval uit de berekening ($H_{c,num}$), kolom 3 het kritieke verval ($H_{c,exp}$) vanuit de experimenten, kolom 4 de verhouding van het numerieke en experimentele kritiek verval ($\frac{\Delta H_{exp}}{\Delta H_{num}}$), kolom 5 de kritieke pipelengte vanuit de berekening ($L_{c,num}$), kolom 6 de kritieke pipelengtes van het experiment ($L_{c,exp}$) en in kolom 7 de verhouding tussen de kritieke pipelengte van het experiment en de berekening ($\frac{L_{c,exp}}{L_{c,num}}$). Kolom 8 geeft aan wat de ratio is tussen de stappen die in verval worden genomen door het model Δh en het kritieke verval uit het experiment H_{c-exp} . Voor de vergelijking tussen de proefresultaten en simulaties is het van belang te weten dat de Silvis experimenten onderdeel uitmaakten van de set waarmee het D-Geo flow model is gekalibreerd. De verwachting is dus dat het kritieke verval van simulatie en experimenten enigszins overeen zullen komen.

Voor Silvis T2 zien we dat de verhouding tussen het kritieke verval van de pipeberekening en het experiment een factor van ongeveer 0,98 is. Dit geeft aan dat er over het algemeen een hoger kritiek verval uit de berekening komt dan daadwerkelijk in het experiment wordt geobserveerd maar dat het verschil erg klein is. Voor de pipelengte geldt dat er in de experimenten pipes met een lengte van 1,87 tot 4,75 meter vormen waarbij die uit de simulatie op 3,23 meter uitkomt.

Tabel B 8 Resultaten Silvis T2 proef.

T2	$\Delta H_{c,exp}(m)$	$\Delta H_{c,num}(m)$	$\frac{\Delta H_{c,exp}}{\Delta H_{c,num}}$	$L_{c,exp}(m)$	$L_{c,num}(m)$	$\frac{L_{c,exp}}{L_{c,num}}$	$\frac{\Delta h}{\Delta H_{c,exp}} (\%)$
P1*	1,684	1,719	0,980	4,750	3,400	1,397	1,684
P2	1,689	1,719	0,983	3,570	3,400	1,050	1,689
P3	1,684	1,719	0,980	3,260	3,400	0,959	1,684
P4	1,689	1,719	0,983	3,180	3,400	0,935	1,689
P5	1,549	1,719	0,901	1,870	3,400	0,550	1,549
P6	1,689	1,719	0,983	3,100	3,400	0,912	1,689
P7	1,647	1,719	0,958	2,100	3,400	0,618	1,647

De Silvis T3 resultaten laten een perfecte match zien tussen het kritieke verval van het experiment en het resultaat van de simulatie. Voor de pipelengte zien we dat deze over het algemeen hoger is dan het numerieke model voorspeld maar schommelt tussen de 1 en 1,4.

Tabel B 9 Resultaten Silvis T3 proef.

T3	$\Delta H_{exp}(m)$	$\Delta H_{num}(m)$	$\frac{\Delta H_{exp}}{\Delta H_{num}}$	$L_{c,exp}(m)$	$L_{c,num}(m)$	$\frac{L_{c,exp}}{L_{c,num}}$	$\frac{\Delta h}{\Delta H_{exp}} (\%)$
P1	2,164	2,184	0,991	5,900	4,200	1,405	2,164
P2	2,160	2,184	0,989	5,000	4,200	1,190	2,160
P3	2,160	2,184	0,989	5,320	4,200	1,267	2,160
P4*	2,164	2,184	0,991	6,100	4,200	1,452	2,164
P5	2,160	2,184	0,989	5,750	4,200	1,369	2,160
P6	2,164	2,184	0,991	5,950	4,200	1,417	2,164
P7	2,164	2,184	0,991	5,700	4,200	1,357	2,164
P8	2,054	2,184	0,940	5,100	4,200	1,214	2,054
P9	2,160	2,184	0,989	5,280	4,200	1,257	2,160
P10	2,164	2,184	0,991	5,500	4,200	1,310	2,164
P11	2,160	2,184	0,989	4,200	4,200	1,000	2,160

In de Silvis T4 resultaten zien we dat de verhouding voor het kritieke verval uitkomt op 1,15 en dat de numerieke kritieke pipelengte ongeveer hetzelfde bedraagt van wat gevonden wordt met het experiment op een enkele lange pipe na.

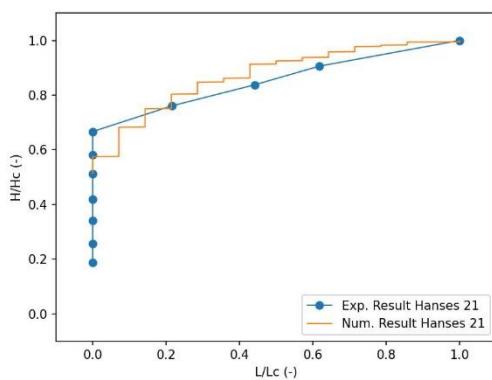
Tabel B 10 Resultaten Silvis T4 proef.

T4	$\Delta H_{c,exp}$	$\Delta H_{c,num}$	$\frac{\Delta H_{c,exp}}{\Delta H_{c,num}}$	L_{c-exp}	L_{c-num}	$\frac{L_{c-exp}}{L_{c-num}}$	$\frac{\Delta h}{\Delta H_{c,exp}} (\%)$
P1*	1,037	1,244	0,834	3,530	2,400	1,471	1,037
P2	1,037	1,244	0,834	2,100	2,400	0,875	1,037
P3	1,037	1,244	0,834	2,030	2,400	0,846	1,037
P4	1,037	1,244	0,834	2,030	2,400	0,846	1,037
P5	1,037	1,244	0,834	2,180	2,400	0,908	1,037
P6	1,037	1,244	0,834	1,920	2,400	0,800	1,037
P7	1,037	1,244	0,834	1,970	2,400	0,821	1,037

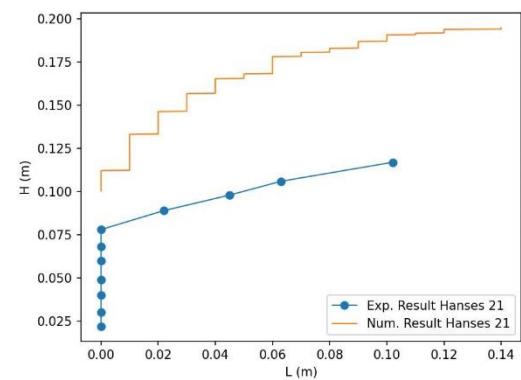
B.4.2 Hanses

Voor de proeven van Hanses is er meetdata van de initiatie van de pipegroei tot het punt van kritiek verval en bereiken van de kritieke pipelengte.

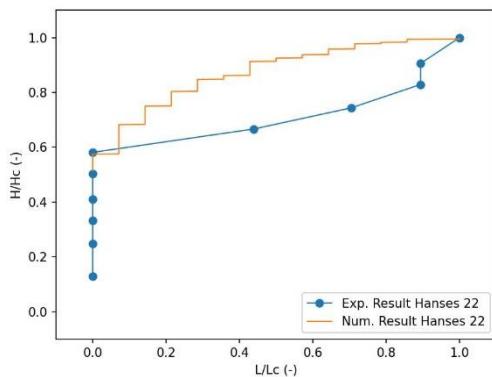
De resultaten voor de Hanses experimenten en pipingmodelberekeningen laten zien dat de start van de pipegroei en het gevolgde pad tot de kritieke pipelengte is bereikt redelijk goed samenkommen zie Figuur B 9 tot en met Figuur B 11.



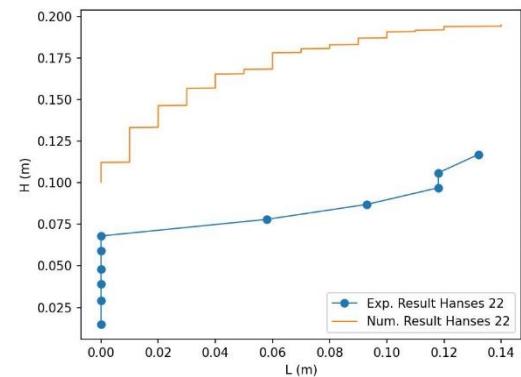
(a) Dimensionless head and pipelength



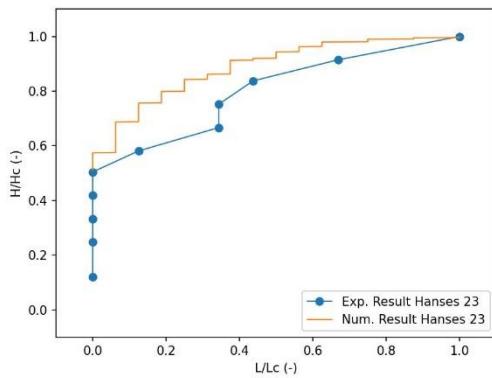
(b) Real head and pipelength



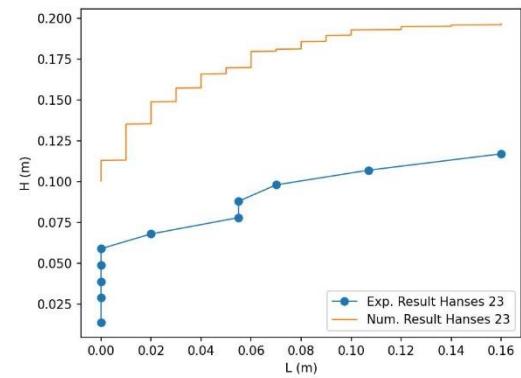
(c) Dimensionless head and pipelength



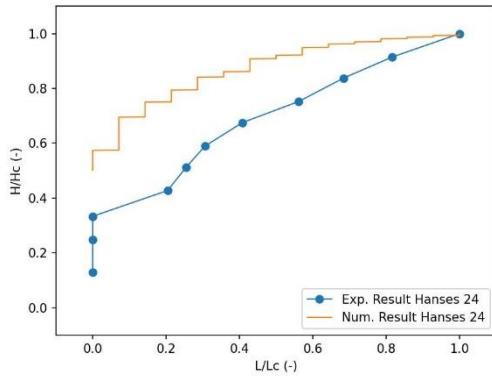
(d) Real head and pipelength



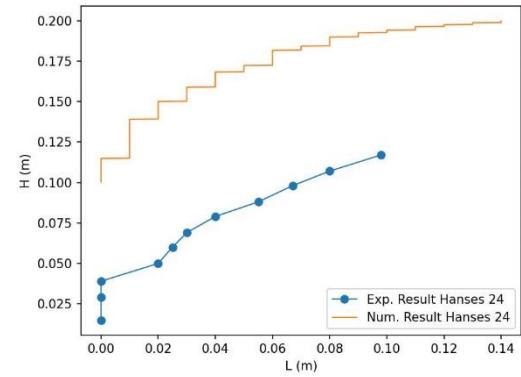
(e) Dimensionless head and pipelength



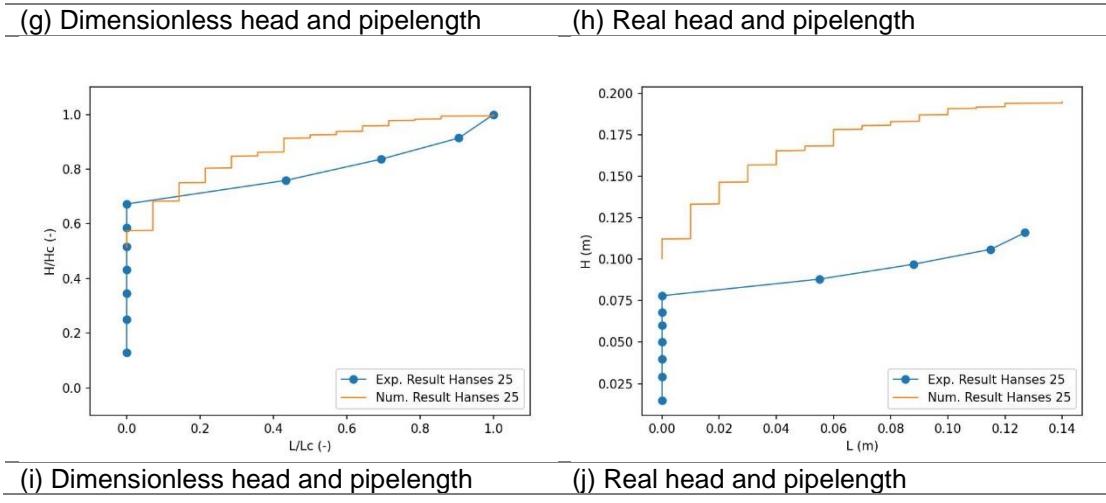
(f) Real head and pipelength



(g) Dimensionless head and pipelength



(h) Real head and pipelength

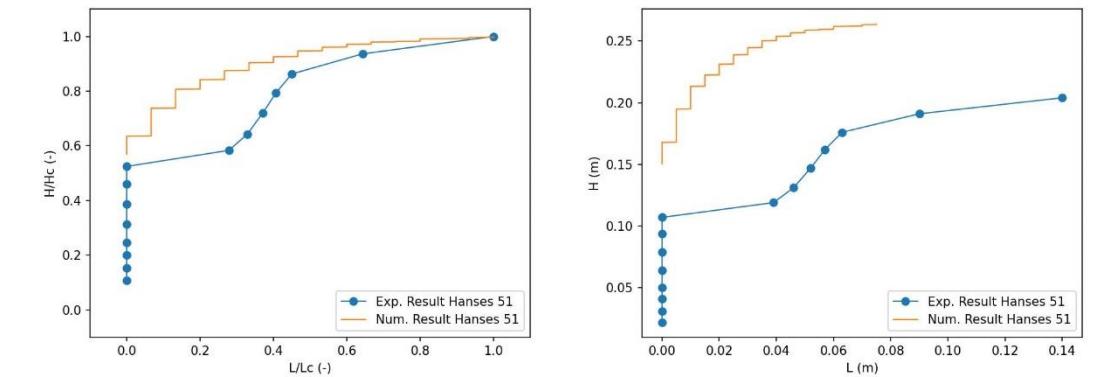


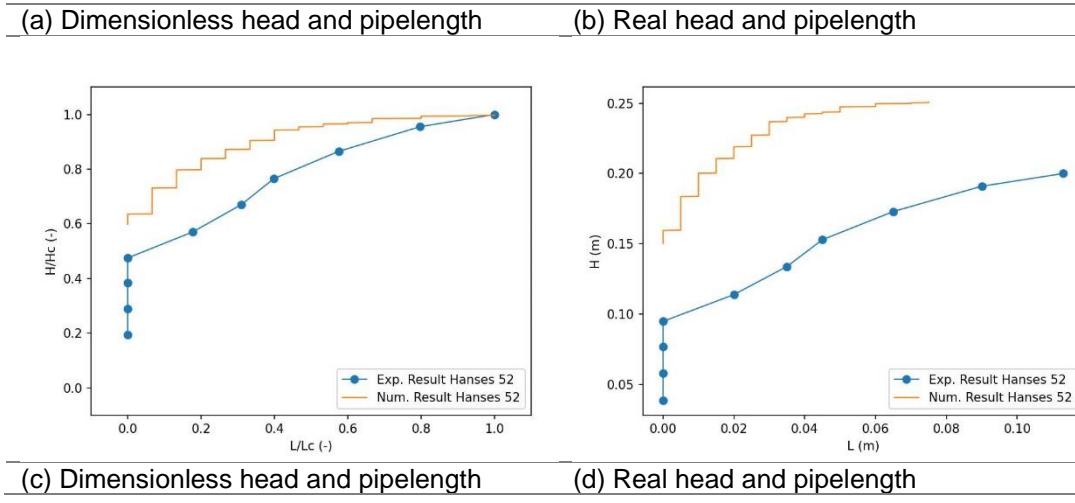
Figuur B 9 Resultaten Hances 2* proeven.

Tabel B 11 Resultaten Hances 2* proeven.

	$\Delta H_{c,exp}$	$\Delta H_{c,num}$	$\frac{\Delta H_{c,exp}}{\Delta H_{c,num}}$	L_{c-exp}	L_{c-num}	$\frac{L_{c-exp}}{L_{c-num}}$	$\frac{\Delta h}{\Delta H_{c,exp}} (\%)$
Hances 21	0,117	0,195	0,599	0,102	0,140	0,729	0,17
Hances 22	0,117	0,195	0,599	0,132	0,140	0,943	0,17
Hances 23	0,117	0,197	0,595	0,160	0,160	1,000	0,17
Hances 24	0,117	0,200	0,585	0,098	0,140	0,700	0,17
Hances 25	0,116	0,195	0,594	0,127	0,140	0,907	0,17

Het is duidelijk zichtbaar dat wat betreft initiatie het pipingmodel start op een goed moment. Het verhang waarvoor de pipegroei van het pipingmodel begint komt goed overeen met de resultaten. In bovenstaande tabel zien we de verhouding van het kritieke verval en kritieke pipelegte vanuit de simulaties ($H_{c,num}, L_{c,num}$) en experimenten ($H_{c,exp}, L_{c,exp}$). Hier is het duidelijk dat het kritieke verval uit de D-Geo Flow berekening 1,7 maal hoger is dan het verval uit de experimenten. Wat betreft de kritieke pipelengte zien we dat deze experimenteel altijd korter is dan voorspeld door het numerieke model. Dit geeft aan dat we te maken hebben met een over-predictie van de kritieke pipelengte.



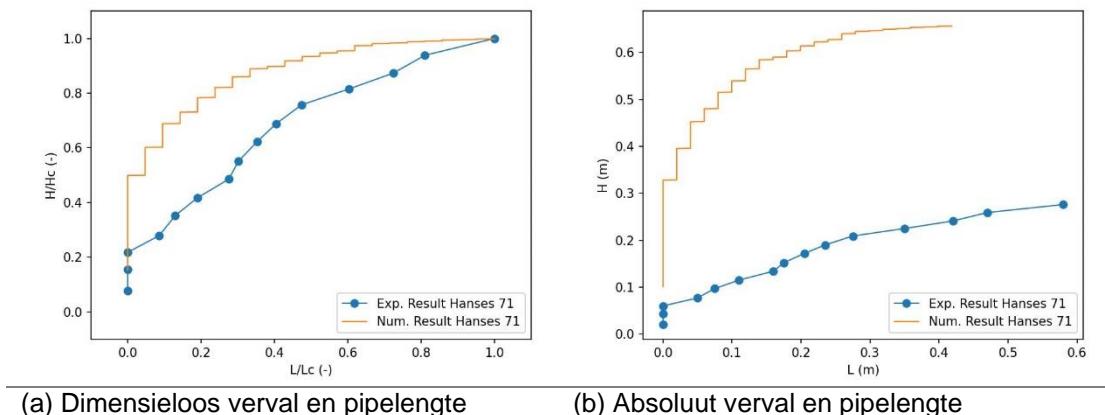


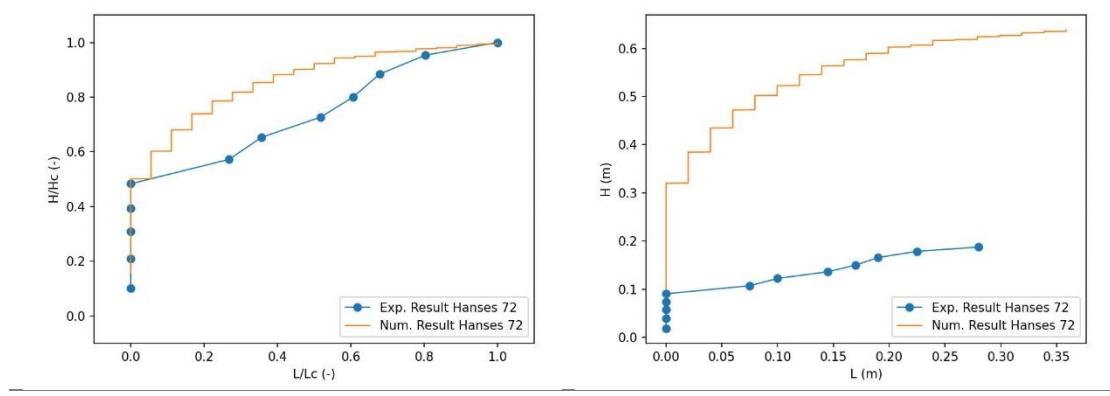
Figuur B 10 Resultaten Hances 5* proeven.

Tabel B 12 Resultaten Hances 5* proeven.

	$\Delta H_{c,exp}$	$\Delta H_{c,num}$	$\frac{\Delta H_{c,exp}}{\Delta H_{c,num}}$	L_{c-exp}	L_{c-num}	$\frac{L_{c-exp}}{L_{c-num}}$	$\frac{\Delta h}{\Delta H_{c,exp}} (%)$
Hances 51	0,204	0,264	0,772	0,140	0,075	3,500	0,098
Hances 52	0,200	0,251	0,796	0,113	0,075	1,413	0,1

Voor de Hances 51 en 52 proeven zien we dat het globale gedrag van de pipevorming iets anders is dan dat wat in het model zit. De pipegroei begint bij een lager verval dan in het numerieke model en volgt vergelijkbaar gedrag vanaf 80% van het kritieke verval. Kijkende naar de waarde voor het kritieke verval dan zien we dat het kritieke verval 20% wordt overschat ten opzichte van de experimenteel vastgestelde waarde. Wat betreft de pipelengte zien we dat de voorspelde kritieke pipelengte de helft is van de experimenteel geobserveerde waarde.





(c) Dimensieloos verval en pipelengte

(d) Absoluut verval en pipelengte

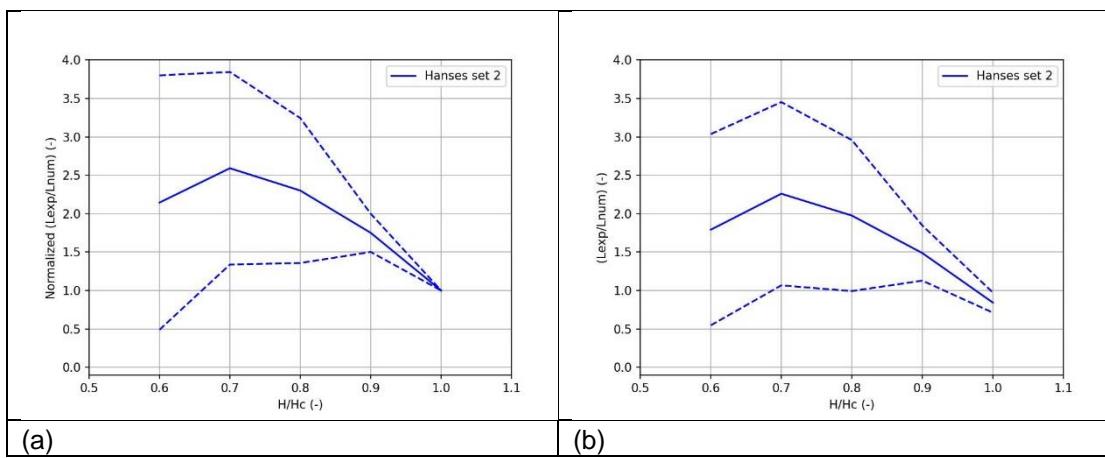
Figuur B 11 Resultaten Hances 7* proeven.

Tabel B 13 Resultaten Hances 7* proeven.

	ΔH_{exp}	ΔH_{num}	$\frac{\Delta H_{exp}}{\Delta H_{num}}$	L_c-exp	L_c-num	$\frac{L_c-exp}{L_c-num}$	$\frac{\Delta h}{\Delta H_{exp}} (\%)$
Hances71	0,276	0,658	0,420	0,580	0,418	1,386	0,18
Hances72	0,187	0,639	0,293	0,280	0,359	0,781	0,27

De Hances 71 en 72 proeven laten vergelijkbare trends zien met de Hances 51 en 52 proeven. Een groot verschil kan geobserveerd worden wanneer het kritieke verval nader bekeken wordt. Het verschil is gemiddeld een factor 2,9 hoger dan experimenteel gemeten. Kijkende naar de kritieke pipelengte zien we bij Hances 71 dat de numerieke pipelengte kleiner is dan de gemeten experimentele kritieke pipelengte. Het tegenovergestelde zien we voor Hances 72 waar de gemeten experimentele kritieke pipelengte kleiner is dan de numerieke pipelengte.

In Figuur B 12 zijn de verhouding tussen de genormaliseerde experimentele en numerieke berekende pipelengte getoond in (a) en ongeschaald in (b). Voor de proeven van Hances worden alleen de resultaten voor set 2 getoond aangezien dit de enige proef was met meerdere herhalingen. In deze resultaten zien we een vergelijkbaar gedrag als geobserveerd bij de resultaten van de proeven van Silvis. Bij een verval van 0,7 maal het kritieke verval zit de verhouding tussen de experimentele en numerieke pipelengte op een factor van ongeveer 2,5. Dit toont aan dat in het numerieke model de pipelengte niet hetzelfde groeit als de pipe in het experiment. Naarmate we dichter bij kritiek verval komen komt het gedrag wel beter in lijn met de experimentele pipegroei. Uit deze vergelijkingen blijkt dat de pipelengte experimenteel bij veel vervallen kleiner dan het kritieke verval groter is dan uit het numerieke model blijkt.

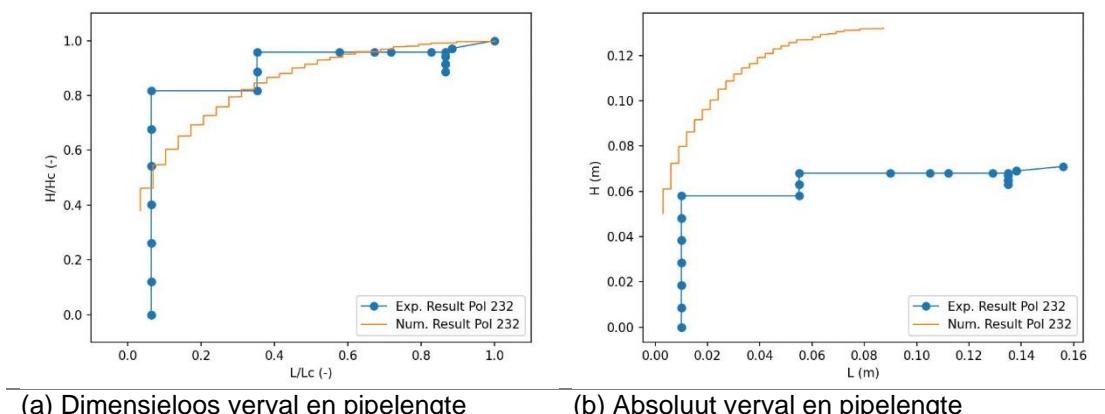


Figuur B 12 (a) Verhouding tussen genormaliseerde experimentele en numeriek berekende pipelengte (b)
Ongeschaalde experimentele tegenover numerieke pipelengte.

B.4.3 Pol

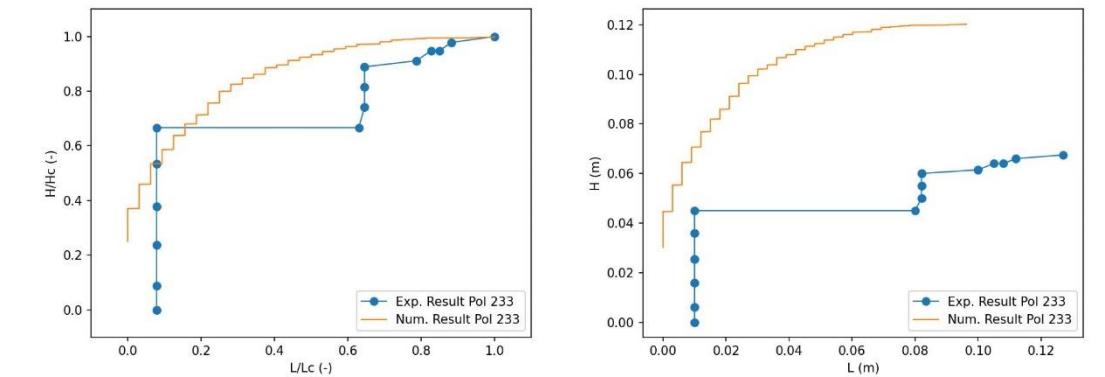
De experimenten van Pol bestaan uit twee sets met het Baskarp (B25) en het fijne zand (FS35), (Pol, 2022). Resultaten voor Baskarp zand (BS25)

In de figuren aan de linkerkant zijn het dimensieloze kritieke verval uitgezet tegen de dimensieloze kritieke pipelengte. In de figuren aan de rechterkant zijn het daadwerkelijke kritieke verval en de pipelengte weergegeven. In de figuur zijn alleen de resultaten van de eerste vijf proeven met Baskarp zand weergegeven. Hier zien we dat vooral bij proeven 234 en 243 een soortgelijk patroon als het Sellmeijer model wordt gevolgd door de experimentele resultaten, weergegeven in Figuur B 13 (e and i).

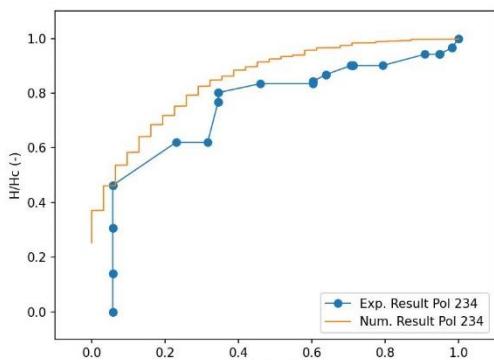


(a) Dimensieloos verval en pipelengte

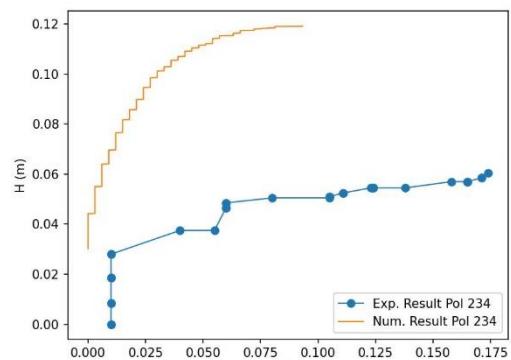
(b) Absoluut verval en pipelengte



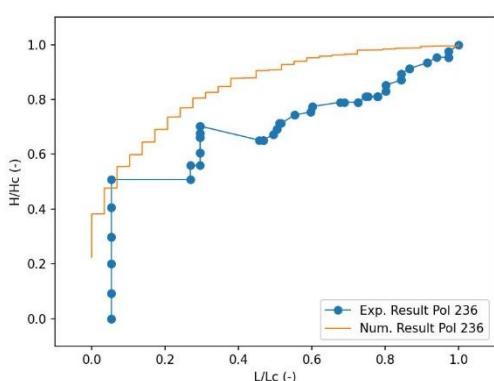
(c) Dimensieloos verval en pipelengte



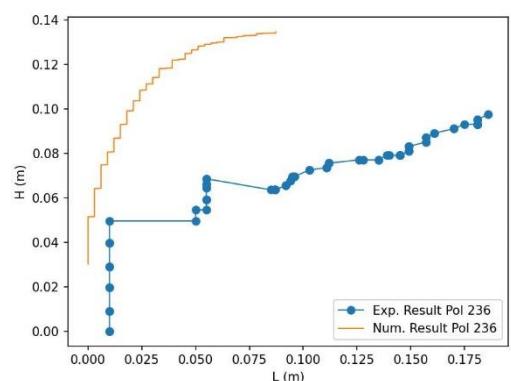
(d) Absoluut verval en pipelengte



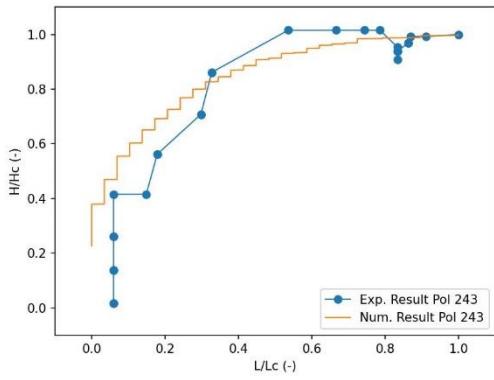
(e) Dimensieloos verval en pipelengte



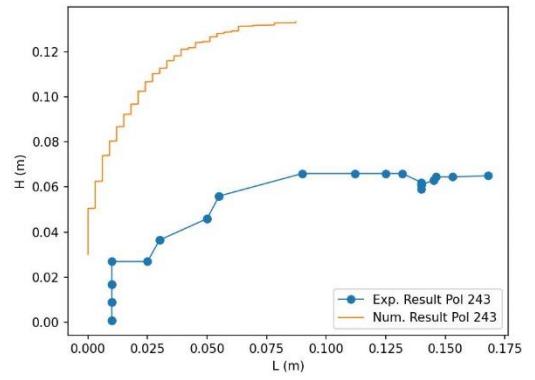
(f) Absoluut verval en pipelengte



(g) Dimensieloos verval en pipelengte



(h) Absoluut verval en pipelengte



(i) Dimensieloos verval en pipelengte

(j) Absoluut verval en pipelengte

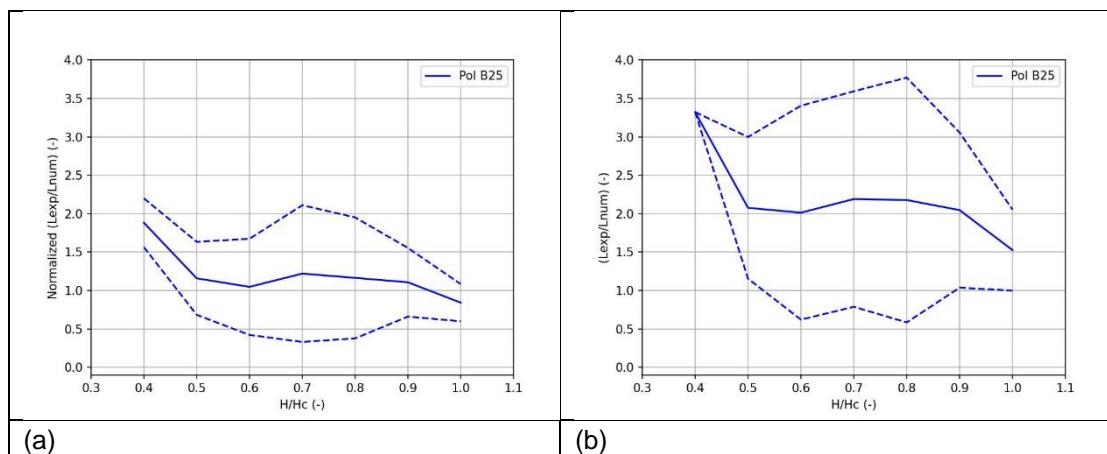
Figuur B 13 Resultaten proeven van Pol 232, 233, 234, 236 en 243.

In Tabel B 14 zijn de resultaten van de pipingproeven en de D-Geo Flow berekeningen voor de geometrie van de proeven van Pol weergegeven. Hier zien we dat het gevonden kritiek verval voor de numerieke berekening bijna altijd tussen de 1,4-2,2 maal groter is dan wordt gevonden in het experiment. Gemiddeld komen we uit op een factor van 1,9. Voor de pipelengte zien we dat de experimenten in vele gevallen ongeveer 1,8 maal zo groot is als de numerieke berekening laat zien.

Tabel B 14 Resultaten Pol Baskarp proeven.

Pol Baskarp	$\Delta H_{c,exp}$	$\Delta H_{c,num}$	$\frac{\Delta H_{c,exp}}{\Delta H_{c,num}}$	L_{c-exp}	L_{c-num}	$\frac{L_{c-exp}}{L_{c-num}}$	$\frac{\Delta h}{\Delta H_{c,exp}} (%)$
Pol 232	0,071	0,132	0,537	0,156	0,087	1,788	0,14
Pol 233	0,068	0,121	0,560	0,127	0,096	1,319	0,14
Pol 234	0,060	0,119	0,507	0,174	0,093	1,866	0,167
Pol 236	0,098	0,135	0,724	0,186	0,087	2,132	0,102
Pol 243	0,065	0,133	0,488	0,168	0,087	1,926	0,154
Pol 245	0,059	0,126	0,469	0,197	0,081	2,425	0,169
Pol 247	0,064	0,136	0,469	0,149	0,087	1,708	0,156
Pol 248	0,067	0,117	0,569	0,125	0,087	1,433	0,149
Pol 249	0,061	0,135	0,453	0,150	0,087	1,719	0,164
Pol 250	0,067	0,135	0,494	0,160	0,087	1,834	0,149

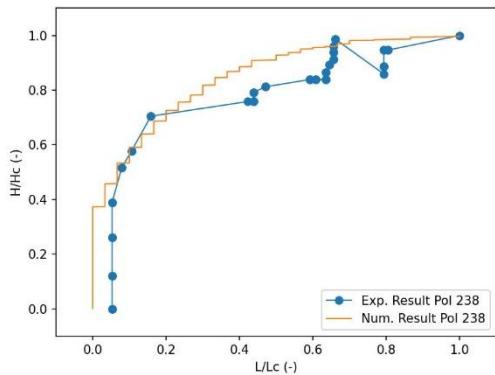
In Figuur B 14 tonen we de verhouding tussen de genormaliseerde pipegroei voor het experiment en het numerieke model. Hier zien we dat de pipegroei gemiddeld gezien dezelfde trend volgt bij experiment en simulatie. Onder een verval van 0,5 van het kritieke verval zien we dat de verschillen weer toenemen. Hier komen we wel weer in het gebied terecht waarin er een pipe begint te ontstaan wat onzeker is.



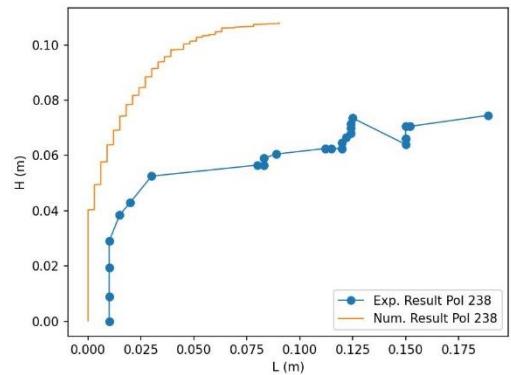
Figuur B 14 Verhouding tussen genormaliseerde experimentele en numeriek berekende pipelengte (b)
Ongeschaalde experimentele tegenover numerieke pipelengte.

Resultaten voor fijn zand (FS35)

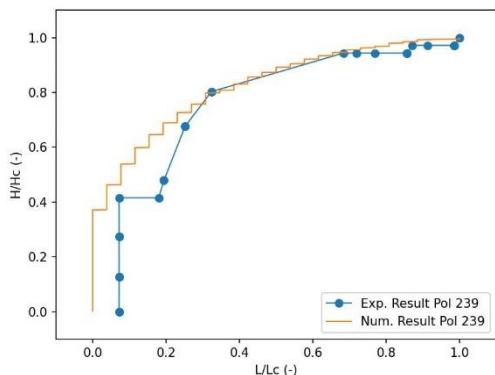
De testopstelling van Pol is ook gebruikt om pipingexperimenten te doen met fijn zand (FS35). Bij deze proeven is het veel duidelijker te zien dat het gedrag van het experiment overeenkomt met het gedrag van het Sellmeijer model. Net als bij de proeven met het Baskarp zand zien we dat de gevonden pipelengtes langer zijn bij de experimenten dan uit de simulaties naar voren komt.



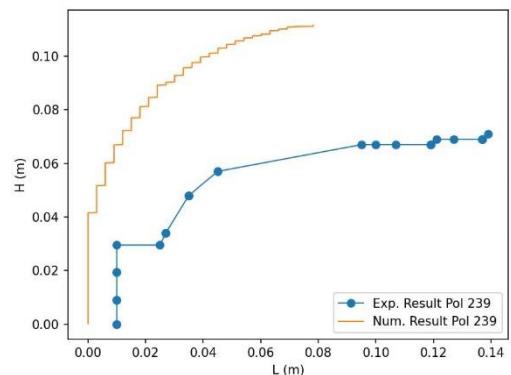
(a) Dimensieloos verval en pipelengte



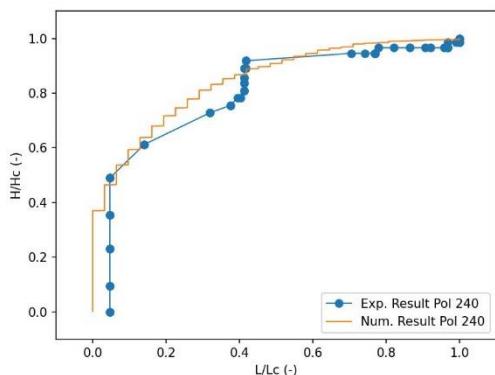
(b) Absoluut verval en pipelengte



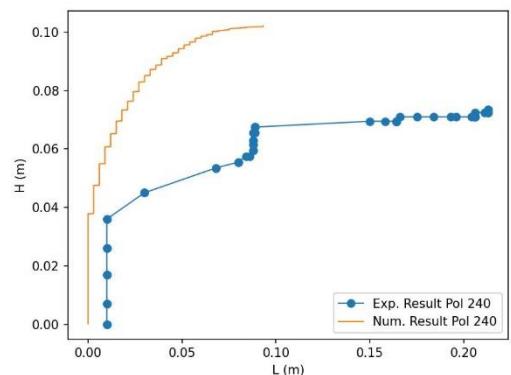
(c) Dimensieloos verval en pipelengte



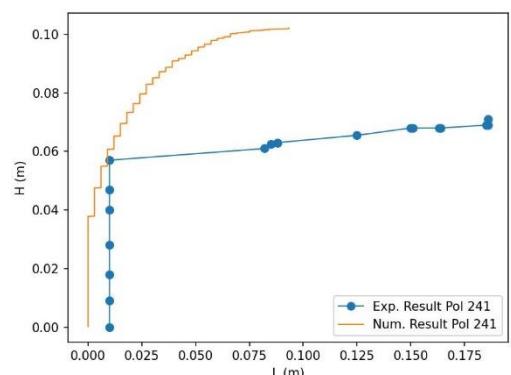
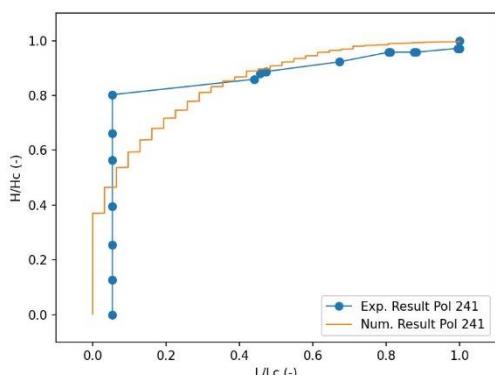
(d) Absoluut verval en pipelengte



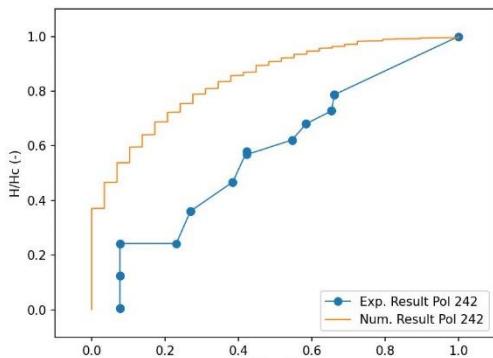
(e) Dimensieloos verval en pipelengte



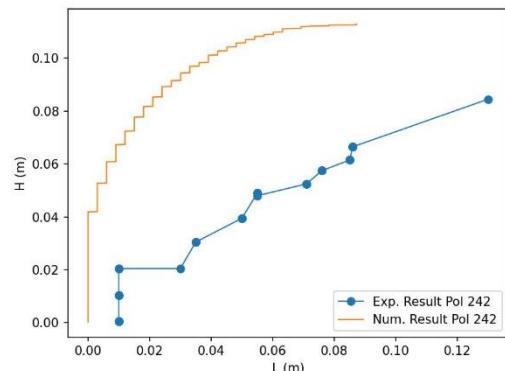
(f) Absoluut verval en pipelengte



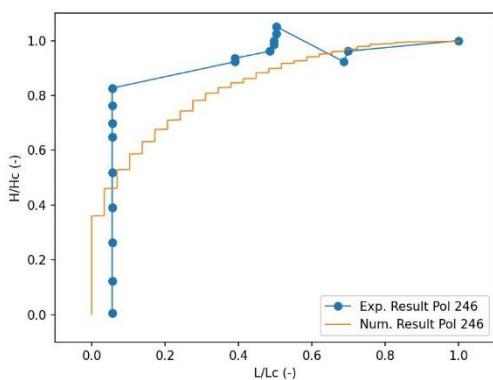
(g) Dimensieloos verval en pipelengte



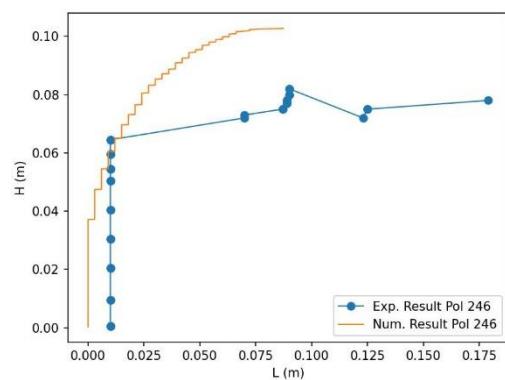
(h) Absoluut verval en pipelengte



(i) Dimensieloos verval en pipelengte



(j) Absoluut verval en pipelengte



(k) Dimensieloos verval en pipelengte

(l) Absoluut verval en pipelengte

Figuur B 15 Resultaten proeven van Pol 238, 239, 240, 241, 242 en 246.

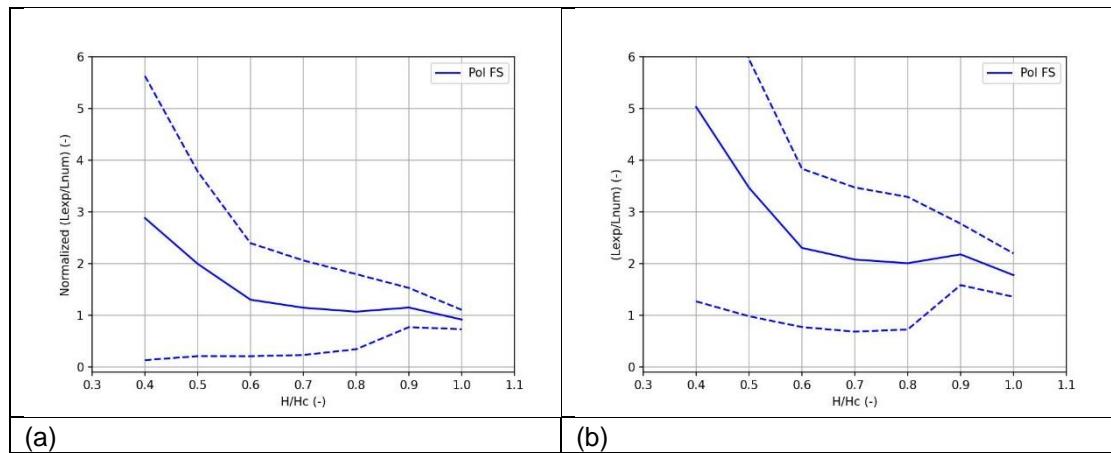
In Tabel B 15 zijn de numerieke waarden van de resultaten voor FS35 te zien. Kijkende naar het kritieke verval zien we dat het numerieke kritieke verval 1,4 maal hoger is dan het experimenteel gemeten kritiek verval. Dit is significant lager dan bij de proeven met Baskarp zand. Bij de resultaten voor de pipelengte zien we dat deze over het algemeen 1,95 maal zo klein zijn als de pipelengtes die in de experimenten gemeten zijn.

Tabel B 15 Resultaten Pol FS35 proeven.

Pol FS35	ΔH_{exp}	ΔH_{num}	$\frac{\Delta H_{exp}}{\Delta H_{num}}$	L_{c-exp}	L_{c-num}	$\frac{L_{c-exp}}{L_{c-num}}$	$\frac{\Delta h}{\Delta H_{exp}} (\%)$
Pol 238	0,074	0,108	0,689	0,189	0,090	2,094	0,074
Pol 239	0,071	0,112	0,635	0,139	0,078	1,777	0,071
Pol 240	0,073	0,102	0,718	0,213	0,093	2,284	0,073
Pol 241	0,071	0,102	0,694	0,186	0,093	1,994	0,071
Pol 242	0,084	0,113	0,747	0,130	0,087	1,490	0,084
Pol 246	0,078	0,103	0,757	0,179	0,087	2,052	0,078

In Figuur B 16 tonen we dezelfde resultaten als voor de proeven van Pol maar dan met het fijne zand (FS). Hier zien we dat de pipegroei gemiddeld gezien overeenkomt tot een verhouding van 0,6 tussen verval en kritiek verval. Daarna beginnen de curves af te wijken. Net als bij de Baskarp proeven van Pol zien we dat er goede overeenkomsten zijn tussen de

experimentele en numerieke pipelengte bij veranderend verval. Een verklaring voor de goede overeenkomsten tussen experiment en numeriek kan worden gevonden in de nauwkeurigheid waarmee de proeven van Pol zijn uitgevoerd. Bij deze proeven is het verval met kleine stapjes verhoogd (millimeters) in tegenstelling tot centimeters bij de proeven van Silvis en Hanses. Hierdoor is de groei van de pipe een stuk nauwkeuriger te volgen.



Figuur B 16 Verhouding tussen genormaliseerde experimentele en numeriek berekende pipelengte (b)
Ongeschaalde experimentele tegenover numerieke pipelengte.

B.5

Conclusies

Het doel van deze studie is om de pipelengte onder kritieke verval te valideren en het 3D effect wat niet in het Sellmeijer model zit voor een 2D simulatie te identificeren, door de numerieke resultaten te vergelijken voor 2D (Silvis) en 3D (Hanses en Pol) experimenten.

De validatie wordt gedaan door het verloop van het kritieke verval en de groei van de pipelengte in numerieke modellen te vergelijken ten opzichte van het verloop in de experimenten. De validatie is gelukt wanneer het dimensioze verhouding tussen de experimentele en gesimuleerde pipegroei en het kritieke verval redelijk gelijk zijn voor de verschillende proevenseries.

Het huidige pipingmodel voorspelt een hoger kritiek verval dan gemeten in de experimenten voor de 3D aangenomen situaties. Dit duidt erop dat het pipingmodel niet conservatief is ten opzichte van de veiligheid in het voorspellen van het kritieke verval. Deze bevinding was al eerder bekend (Rosenbrand et al., 2022B). In het geval van de proeven van Hanses is voor set 2* de overschatting 70%, voor set 5* 25% en voor set 7* tussen de 100 en 200%. Bij de proeven van Pol is geconstateerd dat het kritieke verval voorspeld door het numerieke model 90% hoger is voor het Baskarp zand en 40% hoger voor het fijne zand.

In het geval van de 2D proeven zien we dat het pipingmodel redelijk accurate voorspellingen geeft voor het kritieke verval. Voor de Proeven van Silvis geldt dat voor de T4 proef (6 m kwelweglengte) een overschatting van 15% van kritiek verval wordt geconstateerd, bij de T2 proef (9 m kwelweglengte) 2% en bij de T3 proef (12m kwelweglengte) 0,1%. Dit was ook te verwachten omdat deze proeven gebruikt zijn voor de kalibratie van het Sellmeijer model.

De voorspelling van de pipelengte in het huidige pipingmodel ten opzicht van de experimenten is niet consistent. Soms worden de pipelengtes overschat en soms juist onderschat. Bij de 2D proeven van Silvis zien we dat de pipelengte korter maar ook langer kan zijn in het experiment als vergeleken met de numerieke berekening. Voor deze gevallen is het dus mogelijk dat het model zowel een onderschatting als overschatting geeft van de daadwerkelijke kritieke pipelengte:

- Proeven van Silvis:
 - T2: kritieke pipelengte tussen de 40% korter en 50% langer in simulatie dan in experiment.
 - T3: kritieke pipelengte tussen de 10% en 60% langer in het experiment dan in simulatie.
 - T4: kritieke pipelengte tussen de 20% korter en 50% langer in het experiment dan in simulatie.
- Proeven van Hanses:
 - Hanses 2*: kritieke pipelengte tussen de 30% en 0% korter in experiment dan in simulatie.
 - Hanses 5*: kritieke pipelengte tussen de 50 en 250% langer in experiment dan in simulatie.
 - Hanses 7*: kritieke pipelengte tussen de 20% korter en 50% langer in experiment dan in simulatie.
- Proeven van Pol:
 - Baskarp: kritieke pipelengte tussen de 30 en 140% langere pipelengte in experiment dan in simulatie.
 - FS35: kritieke pipelengte tussen de 50 en 130% langere pipelengte in experiment dan in simulatie.

Op basis van deze resultaten kunnen we zeggen dat in absolute zin de pipelengte niet goed kan worden voorspeld voor zowel de 2D als 3D situatie waarbij dit in de 3D situatie extremer

is. Voor de 3D situatie komt dit deels doordat het kritieke verval niet goed wordt voorspeld en waarvoor bij de afwijking in absolute lengte niet gecorrigeerd is.

Voor het kritieke verval geldt dat voor de 2D situatie bij de proeven van Silvis een redelijk accuraat kritiek verval wordt voorspeld. Bij de 3D situatie voor Hanses en Pol zien we dat het kritieke verval flink hoger wordt voorspeld dan in het experiment gemeten.

Het laatste aspect wat besproken dient te worden is in hoeverre de groei van de pipelengte na correctie voor kritiek verval overeenkomt tussen experiment en numeriek model. Voor de proeven van Silvis zien we dat er bij een verval van 0,7 maal kritiek verval een factor tussen 2 en 3 verschil is tussen experimentele en numeriek berekende pipelengte. De proeven van Hanses tonen hier een flinke afwijking van een factor 2,5 tot 0,7 maal het kritieke verval. Bij een toenemend verval zien we dat het verval kleiner wordt en dus beter de trend van het model volgt. In de set proeven van Pol zien we dat van 0,6-1 maal het kritieke verval een goede match tussen het pipegroei verloop voor experiment en numeriek is. Op basis van de omschrijving van de experimenten blijkt dat de proeven van Pol met een hoge nauwkeurigheid zijn uitgevoerd en dat dit tot kwalitatief hoogwaardige data leidt. Dat de pipegroei dezelfde trend volgt bij zowel de experimenten als het numeriek model geeft aan dat het numeriek model tot op zekere hoogte een redelijke voorspelling kan doen van de pipelengte tegenover verval vanaf 0,6 maal het kritieke verval.

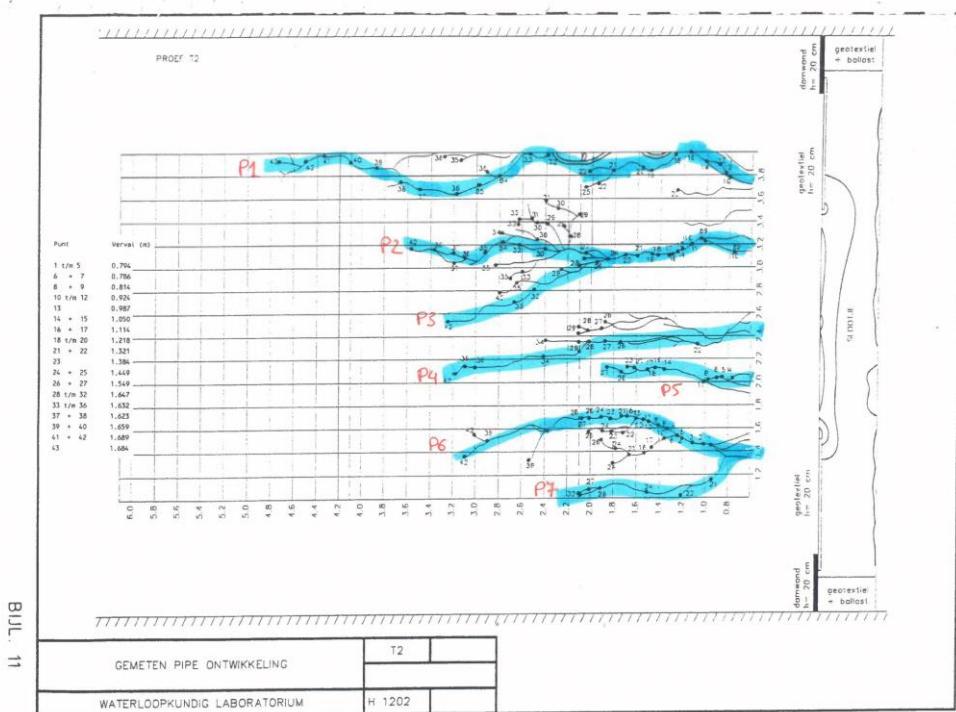
Referenties Bijlage B

- Esch, J. v. (2013). *Modelling groundwater flow and piping under dikes and dams model validation and verification*. Delft: Deltares.
- Hanses, U. (1985). *The mechanics of the development of erosion pipes in a layered substratum beneath dams*. Berlin: Universitätsbibliothek der Technischen Universität Berlin.
- Pol, W. K. (2022). Temporal evolution of backward erosion piping in small-scale experiments. *Acta Geotechnica*, 4555-4576.
- Silvis. (1991). *Verificatie Piping Model: Proeven in de Deltagoot - Evaluatierapport*. Delft: GeoDelft.

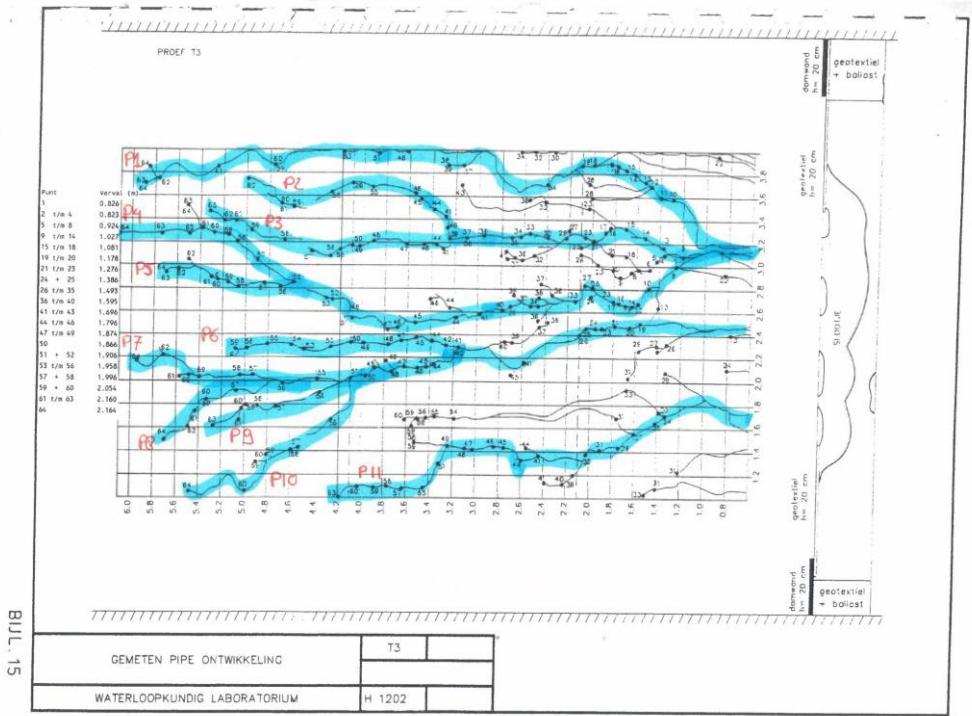
Bijlagen BA

In de bijlagen worden de afmetingen en geometrieën van de proeven en gebruikte meshes gedefinieerd,

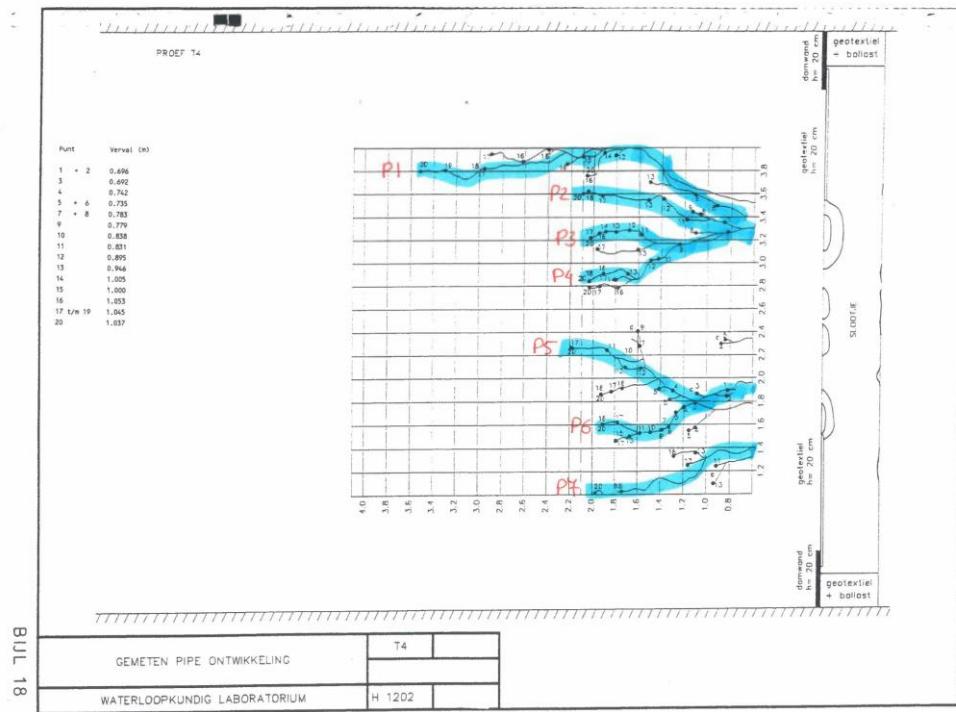
Bijlage BA1 Pipes



Figuur B 17 Pipes van T2 (source: Silvis, 1991).



Figuur B 18 Pipes van T3 (source: Silvis, 1991).



Figuur B 19 Pipes van T4 (source: Silvis, 1991).

Bijlage BA2 Geometrieën

SilvisT2.txt

0 0 0
29.5 0 0
29.5 6 0
19.5 6 0
19 6 0
10 6 0
0 6 0

SilvisT3.txt

0 0 0
32.5 0 0
32.5 6 0
22.5 6 0
22 6 0
10 6 0
0 6 0

SilvisT4.txt

0 0 0
26.5 0 0
26.5 6 0
16.5 6 0
16 6 0
10 6 0
0 6 0

Hanses2.txt

0 0 0
0.96 0 0
0.96 0.24 0
0.75 0.24 0
0.69 0.24 0
0 0.24 0

Hanses5.txt

0 0 0
0.9 0 0
0.9 0.083 0
0.69 0.083 0
0.63 0.083 0
0 0.083 0

Hanses7.txt

0 0 0
3.52 0 0
3.52 0.33 0
2.67 0.33 0
2.61 0.33 0
0 0.33 0

Pol.txt

0 0 0
0.48 0 0
0.48 0.1 0
0.358 0.1 0
0.352 0.1 0
0 0.1 0

C Aanscherping van de veiligheidsbenadering en keuze in karakteristieke *k*-waarden

C.1 Introductie

Deze bijlage is een onderdeel van het Kennis voor Keringen programma van Rijkswaterstaat, waarin Deltares onderzoek doet naar een scherpere analyse van het faalmechanisme piping. Dit rapport is een bijlage bij het rapport “Onderzoeksrapport Voorlanden - KvK2022” door Wopereis et al. (2022).

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 de 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 × 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.

Het meenemen van voorlanden voor piping heeft een groot effect op de overstromingskans. Indien voorland niet meegenomen wordt leidt dit tot een significante overschatting van de overstromingskans. Om voorlanden onderbouwd mee te kunnen nemen in de analyse van terugschrijdende erosie met de rekenregel van Sellmeijer is het van belang inzicht te hebben in de pipelengte.

Daarom is in 2021 in het Kennis voor Keringen programma voorlanden onderzoek gedaan naar het fysische proces dat leidt tot de pipelengte. De uitkomst van dit onderzoek is een concept stappenplan waarmee een beheerder een onderbouwde afweging kan maken voor hoeveel voorland meegenomen kan worden in de pipinganalyse op basis van de optredende en kritieke pipelengte. Bij het concept stappenplan zijn ook enkele aanbevelingen gedaan voor nader onderzoek om te komen tot een definitieve versie van het stappenplan. Deze vormen de aanleiding voor het vervolgonderzoek van 2022.

C.1.1 Doel van het onderzoek

In het 2022 Kennis voor Keringen programma is een vervolgonderzoek opgesteld om het stappenplan verder uit te breiden. Dit is gedaan door focus te leggen op drie onderdelen:

1. Toepassingsgebied van het stappenplan 2022 voor het meenemen van voorland vergroten.

De methode ontwikkeld voor het meenemen van voorland was gebaseerd op de schematisatie van de rekenregel van Sellmeijer, zodat het voorland in de rekenregel kan worden meegenomen. Echter, parameters die niet in de rekenregel zitten zoals anisotropie en meerlaagsheid, kunnen in de praktijk

voorkomen maar zitten niet in de rekenregel. Het niet meenemen van deze eigenschappen is weliswaar conservatief bij een berekening van het kritieke verval (wat het doel is waarvoor de rekenregel is afgeleid), voor de pipelengte bij kritiek verval is het niet meenemen hiervan echter juist niet conservatief: deze eigenschappen kunnen leiden tot een langere pipelengte bij kritiek verval. Het netto effect op de pipelengte, bij een gegeven verval, kan positief of negatief zijn afhankelijk van de situatie. Een conceptueel inzicht en nadere onderbouwing hiervan zijn nodig om het toepassingsbereik van het stappenplan uit te breiden.

2. Validatie van de tweede grafiek van de stappenplan met pipelengtes bij waterstand onder kritiek verval.

Een conceptueel, parametrisch model is in Rosenbrand et al. (2022) ontwikkeld dat inzicht geeft in de pipelengte bij kritiek verval, en welke factoren deze lengte beïnvloeden. Op basis van het geheel zijn twee grafieken opgesteld aan de hand waarvan een beheerder in kan schatten wat de pipelengte is als functie van het verval en verschillende karakteristieken van de dijk en de ondergrond. Deze twee grafieken zijn de basis van een stappenplan om onderbouwd meer voorland mee te kunnen nemen. Echter, pipelengtes onder kritiek verval van het numerieke model gebruikt om de curves af te leiden zijn nog niet gevalideerd. Het doel van deze onderdeel is om deze pipelengtes te valideren aan de hand van drie proevenseries.

3. Aanscherping van de veiligheidsbenadering.

Een eerste verkenning van de veiligheidsbenadering en omgang met de modelonzekerheid van de berekende pipelengte is uitgevoerd in Rosenbrand et al. (2022) op basis van fictieve doorsneden. 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. In deze studie wordt deze veiligheidsbenadering aangescherpt aan de hand van een pilot. Verder is een aanscherping van de keuze in karakteristieke waarde van de doorlatendheid van het WVP nodig door nieuwe ontwikkelingen in geohydrologische modellen.

Het voorliggende rapport betreft achtergronden bij de hierboven genoemde stap 3..

C.2 Achtergrond

Vorige jaar is naar voren gekomen dat de veiligheidsfilosofie niet bijgewerkt werd bij nieuw kennis ontwikkelingen. Deze studie onderzoekt de kenniselementen van twee ontwikkelingen:

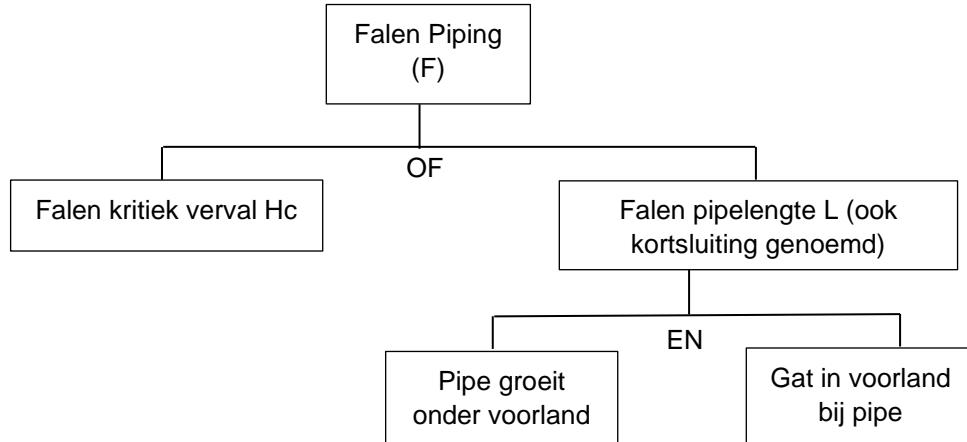
- Het gebruik van geohydrologische modellen hebben geleid tot nauwkeuriger lokale data van doorlatendheden van het WVP (Brinkhuis et al., 2021). Deze worden vaak uitgedrukt in een kD -waarden (doorlatendheid en dikte) van het WVP in plaats van de gebruikelijk k -waarden. Deze kD waarden worden gebruikt in bijvoorbeeld grootschalige geohydrologische modellen, maar ook analytische modellen waarin de bijvoorbeeld de voorlandweerstand explicet wordt meegenomen. De keuze van welke karakteristieke kD -waarden gebruikt moet worden bij een semi-probabilistische analyse is niet vanzelfsprekend en moet onderzocht worden.
- Het meenemen van meer voorland is uitgebreid onderzocht afgelopen jaren, vorige jaar is een stappenplan hiervoor ontwikkeld. Echter is er nog geen veiligheidsfilosofie ontwikkeld om uit te werken welke semi-probabilistisch verificaties en eventuele veiligheidsfactoren nodig zijn om te zorgen dat er veilig met de hele voorlandlengte kan worden gerekend.

Voor beide kenniselementen zijn vorige jaar al stappen gemaakt. Hieronder wordt een kort samenvatting gegeven van wat de meeste belangrijke resultaten.

C.2.1 Veiligheidsfilosofie om voorlanden mee te nemen

Eind 2021 is een verkenning analyse gedaan naar welke verificaties er nodig zijn om veilig voorlanden mee te kunnen nemen in de piping analyses en om op basis van probabilistische analyses een indruk te krijgen van benodigde veiligheidsfactoren (Kanning, 2021). In deze studie is de faalpaden van piping onderzocht waaruit kwam dat afhankelijk van de kans op

kortsluiting falen door piping op meerdere manier kan ontstaan. In dit onderzoek is de focus op een situatie waar de kans op kortsluiting 1 is. Voor deze gevallen kan falen ontstaan door overschrijding van het kritieke verval of doordat de pipe onder de dijkbasis groeit en een kortsluiting maakt in het voorland, zie Figuur C 1.



Figuur C 1 Foutenboom falen piping door overschrijden H_c en door doorgroeien pipe (source: Kanning, 2021).

Middels probabilistische analyses (Vergelijking C 1 en Vergelijking C 2) op basis van deze foutenboom is vorige jaar voor zeven situaties onderzocht of een semi-probabilistische veiligheidsfactor van 1,5 (m_{pl} , zie Vergelijking C 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 proeven (Rosenbrand e.a, 2022).

Hierbij is gekeken naar doorsneden waarbij het kritieke verval dicht bij de waterstand ligt waarbij voldaan wordt aan de eis, de pipelengte bij deze norm waterstand (WBN) is dan vrij lang. Maar ook naar doorsneden waarbij het kritieke verval door het meenemen van voorland veel hoger ligt, de pipelengte bij de WBN is dan vrij kort. De zeven fictieve doorsneden bevatten een kwelweglengte van 100 of 150 m en een dikte van het WVP van 20, 40 of 75 m.

Voor de probabilistische berekeningen, wordt de grenstoestand functie in Vergelijking C 1 gebruikt om de faalkans te berekenen voor het falen door kritiek verval, deze komt uit de Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI) (SH, 2017). De grenstoestand functie voor falen door de pipelengte is opgesteld op basis van curves afgeleid in Rosenbrand e.a (2022), zie Vergelijking C 2.

$Z_p = m_p H_c - (h_w - h_{exit} - r_c d_{deklaag})$	Vergelijking C 1
--	------------------

Met:

- Z_p (m): Grenstoestand functie voor het kritieke verval.
- m_p (-): Modelfactor.
- h_w (m): Rivierwaterstand bij norm.
- h_{exit} (m): Polderwaterstand.
- r_c (-): Reductiefactor voor de weerstand in de deklaag bij de uittredepunt (op dit moment gebruikelijk $r_c = 0,3$).

$Z_{pl} = L_{BUT} - m_{pl} L_{pipe}$	Vergelijking C 2
--------------------------------------	------------------

Met:

- Z_{pl} (m): Grenstoestand functie voor de pipelengte.
- L_{BUT} (m): Afstand tussen uitredepunt en buitenteen, aangezien falen is gedefinieerd als het groeien van de pipe onder het voorland.
- L_{pipe} (m): De berekende pipelengte, zie de 2 stappen hieronder.
- m_{pl} (-): Modelonzekerheid pipelengte (voor nu: gemiddelde 1, variatiecoëfficiënt = 0.3; op basis van enkele proeven).

De stappen om de pipelengte te bepalen zijn hieronder beschreven. 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 et al. (2022) voor een verdere onderbouwing van **Figuur C 2** en **Figuur C 3**.

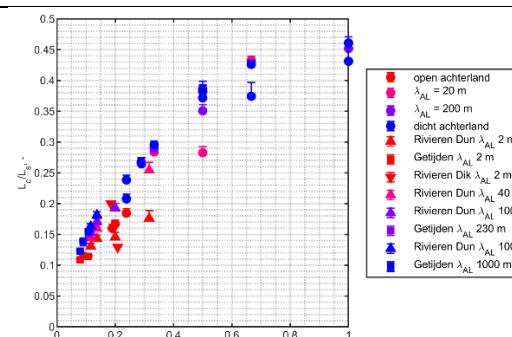
1. Bepaling kritieke pipelengte L_c op basis van **Vergelijking C 3** (geparametriseerd op basis van **Figuur C 2**).
2. Bepaling optredende pipelengte L_{pipe} op basis van **Vergelijking C 4** (geparametriseerd op basis van **Figuur C 3**)

$$L_c = L_s \left[-0,3984 \left(\frac{D}{L_s} \right)^2 + 0,7979 \frac{D}{L_s} + 0,0707 \right]$$

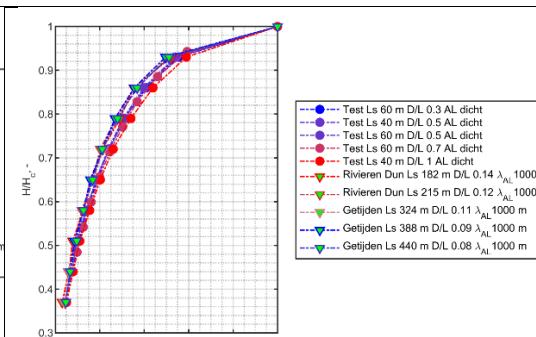
Vergelijking C 3

$$L_{pipe} = L_c \left[164,5 \left(\frac{H}{H_c} \right)^8 - 570,1 \left(\frac{H}{H_c} \right)^7 + 797,6 \left(\frac{H}{H_c} \right)^6 - 575,5 \left(\frac{H}{H_c} \right)^5 + 227,7 \left(\frac{H}{H_c} \right)^4 - 48,99 \left(\frac{H}{H_c} \right)^3 + 5,966 \left(\frac{H}{H_c} \right)^2 - 0,367 \left(\frac{H}{H_c} \right)^1 + 0,00757 \right]$$

Vergelijking C 4



Figuur C 2 Bepaling kritieke pipelengte L_c .



Figuur C 3 Bepaling optredende pipelengte L_{pipe} .

De berekening voor de semi-probabilistische sommen zijn uitgevoerd op basis van safety factors in plaats van grenstoestand functies, zie **Vergelijking C 5** en **Vergelijking C 6**.

$$F_p = \frac{m_p H_c}{(h_w - h_{exit} - r_c d_{deklaag})} \quad \text{Vergelijking C 5}$$

$$F_{pl} = \frac{L_{BUT}}{m_{pl} L_{pipe}} \quad \text{Vergelijking C 6}$$

Met:

- F_p (-): Safety factor voor het kritieke verval.
- F_{pl} (-): Safety factor voor de pipelengte, hier wordt volgens de onderzoek een waarden van 1,5 gebruikt voor m_{pl} .

De analyses laten zien dat er geen redenen zijn om te veronderstellen dat de semi-probabilistische aanpak met een modelonzekerheid van 1,5 op de pipelengte tot onveilige situaties leidt. Ze laten ook zien dat er waarschijnlijk nog aanscherping mogelijk is.

Daarom is een paar maanden later, in begin 2022, meer onderzoek gedaan naar de veiligheidsfilosofie voor pipelengte. In deze studie zijn probabilistische berekeningen uitgevoerd voor 336 fictieve doorsneden met een kwelweglengte van 150 m en variaties in:

- Dikte van het WVP van 5, 10, 15, 20, 30, 40, en 50 m.
- Deklaag dikte in het achterland van 2 en 4 m.
- Intredeweerstand van 2, 5, 10, 20 dagen.
- Doorlatendheden van het WVP van 10, 20, 30, 40, 50, 65 m/dag.

Om mogelijkheden voor aanscherping te controleren zijn situaties gezocht waar falen door de pipelengte dominant was over falen door het kritieke verval ($\beta_p < \beta_{pl}$). Dit wordt gedaan omdat het voor deze situaties belangrijk is om de modelfactor voor pipelengte te kalibreren. Wanneer falen alleen door het kritieke verval optreedt is de pipelengte niet meer relevant.

Voor elk van de 336 doorgerekende gevallen is de betrouwbaarheidsindex voor falen door overschrijven van het kritieke verval (β_p) en de betrouwbaarheidsindex voor falen doordat de pipe onder de dijkbasis doorgroeit (β_{pl}) berekend. Hieruit kwam dat in geen van de gevallen het doorgroeien van de pipe onder de dijkbasis een significante bijdrage aan de totale betrouwbaarheid levert.

In dezelfde studie is daarna een verkenning gemaakt naar situaties waar de kans op pipegroei onder het voorland dominant is ($\beta_p > \beta_{pl}$), en dus een significant bijdrage aan de overstromingskans van de systeem levert. Dit is gedaan door dezelfde probabilistische analyse uit te voeren voor gevallen waar, op basis van de fysica, mag worden verwacht dat er relatief lange pipes zullen ontwikkelen. 68 doorsneden zijn berekend met:

- Kwelweglengte van 250 of 50 m.
- Een waterstand bij de norm van 6 en 10 m.
- Dikte van het WVP van 40, 60, 80 m.
- Dikte van de deklaag van 2 en 4 m.
- Intredeweerstand van 20, 40, en 50 dagen.

Ook uit deze doorsneden is naar voren gekomen dat de pipelengte nooit dominant was. Situaties waar de pipelengte wel iets meer dominant was waren voor gevallen met een negatief betrouwbaarheidsindex, 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 kalibratierelatie liggen.

Het werd aanbevolen om de probabilistische analyses toe te passen op een groot aantal echte doorsneden 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. Dit is in deze studie uitgevoerd op basis van een praktijk case studie, zie Hoofdstuk C.3. De aanpak hiervoor is in Paragraaf C.5.1 uitgelegd.

C.2.2 Keuze van karakteristieke *k*-waarden

In een semi-probabilistische berekening heeft de keuze in karakteristieke waarden van de doorlatendheid van het WVP (boven- of ondergrenswaarden) invloed op de leklengte en het kritieke verval. De leklengte beïnvloedt ook het kritieke verval.

Een hoge doorlatendheid van het WVP leidt tot een hoge leklengte, zie Vergelijking C 7.

$$\lambda = \sqrt{kDc_1}$$

Vergelijking C 7

Met:

- λ (m): Leklengte.
- k (m/dag): Doorlatendheid van het WVP.
- D (m): Dikte van het WVP.
- c_1 (dag): Intredeweerstand ($= k_{deklaag}/d_{deklaag}$).
- $k_{deklaag}$ (m/dag): Darcy doorlatendheid van de deklaag.
- $d_{deklaag}$ (m): Dikte deklaag.

Het kritieke verval wordt beïnvloed door de doorlatendheid van het WVP en de leklengte, zie Vergelijking C 8 en Vergelijking C 10. Deze twee effecten zijn tegenstrijdig:

- Hoe hoger de doorlatendheid, hoe lager het kritieke verval.
- Hoe hoger de doorlatendheid, hoe langer de leklengte en hoe hoger het kritieke verval

$$H_c = F_r F_s F_g L_s$$

Vergelijking C 8

$$F_r = \frac{\gamma_{sub,particles} - \gamma_w}{\gamma_w} \eta \tan(\theta)$$

Vergelijking C 9

$$F_s = \frac{d_{70}}{\sqrt[3]{\kappa L_s}} \left(\frac{d_{70}}{d_{70,m}} \right)^{0,4}, \kappa = \frac{\nu_{water}}{g} k$$

Vergelijking C 10

$$F_g = 0.91 \left(\frac{D}{L_s} \right)^\zeta$$

Vergelijking C 11

$$\zeta = \frac{0.24}{\left(\frac{D}{L_s} \right)^{2.8} - 1}$$

Vergelijking C 12

Met:

- H_c (m): Kritiek verval (Sellmeijer formule).
- F_r (-): Weerstands term.
- F_s (-): Schaal term.
- F_g (-): Geometrische term.
- ζ (-): Coëfficiënt geometrische term.
- d_{70} (m): 70-percentielwaarde van de korrelverdeling van watervoerende pakket.
- $d_{70,m}$ (m): Referentie d70-waarde (in deze studie wordt een waarden van $2,08 \cdot 10^{-4}$ m gebruikt).
- ν_{water} (m/s): Kinetische viscositeit van water (voor grondwater van 10° Celsius: $1,33 \cdot 10^{-6}$ m/s).
- g (m/s²): Zwaartekrachtversnelling (= 9,81 m/s²).
- k (m/s): Darcy doorlatendheid van het WVP.
- η (-): Coëfficiënt van White (sleepkrachtfactor) (in deze studie wordt een waarden van 0,25 gebruikt).
- θ (°): Rolweerstandshoek van zandkorrels van de aangepaste Sellmeijer-regel (in deze studie wordt een waarden van 37° gebruikt).
- $\gamma_{sub,particles}$ (kN/m³): Volumegewicht van zandkorrels onder water.
- γ_w (kN/m³): Volumegewicht van water.
- L_s (m): Kwelweglengte.

Bij een doorlatend voorland is de kwelweglengte bepaalt op basis van de leklengte, zie Vergelijking C 13.

$$L_v = \lambda \tan\left(\frac{L_1}{\lambda}\right)$$

$$L_s = L_v + L_{BUT}$$

Vergelijking C 13

Vergelijking C 14

Met:

- L_1 (m): Geometrische voorlandlengte.
- L_v (m): Effectieve voorlandlengte.
- L_{BUT} (m): Afstand wel tot buitenteen.

De doorlatendheid heeft dus een tegenstrijd effect op het kritieke verval. Het netto effect is niet vanzelfsprekend. In een deelonderzoek uitgevoerd in begin 2022 (Rosenbrand e.a, 2022), en geen onderdeel van dit rapport, werd dit onderzocht door middel van semi-probabilistische berekeningen en Monte Carlo (MC) simulaties. Tijdens deze studie zijn twee semi-probabilistische analyses uitgevoerd, één met de bovengrens karakteristieke waarden van k en D en een tweede met de ondergrenswaarden. Deze twee semi-probabilistische analyses zijn met de MC simulaties vergeleken. De parameters van de fictieve case gebruikt voor deze studie zijn in Tabel C 1 weergegeven.

Tabel C 1 Parameters van de case gebruikt in de deelonderzoeken uitgevoerd in begin 2022 naar het netto effect van keuze in karakteristieke waarden voor k en D op het kritieke verval (Rosenbrand e.a (2022)).

Variabel	Symbol	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) = $d_{deklaag}/k_{deklaag}$	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 van 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 (μm)	d_{70}	Lognormaal	$\mu = 450; \sigma = 54$
Referentie d70-waarde (m)	d_{70m}	Deterministisch	208
Rolweerstandshoek van zandkorrels van de aangepaste Sellmeijer-regel ($^\circ$)	θ	Deterministisch	37
River waterstand (m)	MHW	Weibull	$\mu = 3,2007; \sigma = 0,8648$
Polder waterstand (m)	ϕ_{polder}	Deterministisch	-0,5

Uit dit vorige onderzoek bleek dat een bovengrens van k en D tot een lager kritiek verval (lager dan de 5% onderschrijdingskans van de MC) en een langere kritieke pipelengte (wel lager dan de 95% onderschrijdingskans van de MC) leiden dan met een ondergrens van k en D .

Het doel van dit deelonderzoek is om te bepalen welke karakteristieke waarde van kD gekozen moet worden in een semi-probabilistische pipinganalyse waarbij voor- en achterland worden meegenomen, zoals GAP, Moria aanpak en de uittredepuntenmethode. Dit wordt gedaan op basis van de case-studie Neder Betuwe (zie Hoofdstuk 2), waar 1888 uittredepunten zijn beschouwd. Dit wordt verder uitgewerkt in Hoofdstuk 4.

C.3

Case studie: Neder Betuwe

Dit onderzoek is uitgevoerd met data van de dijkversterking project bij Neder Betuwe (NeBe), zie Figuur C 4. Dit dijktraject heeft een lengte van ongeveer 22,53 km, een signaleringsfaalkans van 1/30.000 en een ondergrensfaalkans van 1/10.000 volgens de norm. Dit geeft een doorsnede faalkans ($P_{f,dsn}$) berekend met de ondergrenswaarde van $3,50 \cdot 10^{-7}$ en een betrouwbaarheidsindex van 4,96, zie Vergelijking C 15. Dit resulteert in een benodigde veiligheidsfactor voor piping (F_p) van 1,32 waarin een doorsnede moet voldoen om aan de veiligheidseisen te voldoen.

$$P_{f,dsn} = \frac{\omega P_{eis}}{N_{dsn}} = 3,50 \cdot 10^{-7} \quad \text{Vergelijking C 15}$$

$$N_{dsn} = 1 + \frac{a L}{b} \quad \text{Vergelijking C 16}$$

Met:

- ω (-): Faalkansruimtefactor, voor piping wordt 0,24 gebruikt.
- N_{dsn} (-): Lengte-effectfactor berekend met Vgl. 7.13 uit WBI 2017 Bijlage III Sterkte en veiligheid.
- a (-): Mechanismegevoelige fractie van de dijktrajectlengte. Voor deze pipinggevoelige fractie van het dijktraject wordt een waarden van 0,9 gebruikt.
- b (m): Referentie-lengte voor het lengte-effect. Hier wordt 300 m gebruikt.
- L (m): Lengte van het traject.

Het project NeBe bevat 1888 doorsneden. Het WVP is onderverdeeld in een pleistoceen en holocene laag, waarbij de holocene laag niet altijd aanwezig is. De pleistocene laag bevat de formatie van Kreftenheye met een grote doorlatendheid (45 tot 85 m/dag) en daaronder de formatie van Waalre met een relatief lage doorlatendheid (20 m/dag). Het WVP wordt vertaald naar een éénlaagswatervoerendpakket met een gereduceerd dikte op basis van een gewogen gemiddelde en met de doorlatendheid van het bovenliggende Kreftenheye pakket, zie vergelijking hieronder. De aanpak is onderbouwd doormiddel van een Modflow en een D-Geo Flow analyse.

$$D = \frac{k_{Kreftenheye} D_{Kreftenheye} + k_{Waalre} D_{Waalre} + k_{Holocene} D_{Holocene}}{k_{Kreftenheye}} \quad \text{Vergelijking C 17}$$

Het project NeBe gebruikt de geohydrologische Moria model om effectieve kwelwegleng te bepalen. Dit model is gekalibreerd op basis van peilbuismetingen gemeten tijdens het hoog water van februari 2018. De effectieve kwelwegleng worden bepaalt aan de hand van stijghoogterasters welke worden gegenereerd met het Moria model. Het dijktraject heeft ter indicatie ongeveer een decimeringshoogte van 0,4 m (Witteveen +Bos, 2008), de waterstandsverdelingen zij lokaal bepaald door het NeBe project met Moria en gebruikt in de PTK analyses. De minimum en maximum waardes van de gemiddelde geometrische- en grondparameters in het dijktraject zijn in Tabel C 2 samengevat. Voor de variatiecoëfficiënten wordt verwezen naar Tabel C 4. Enkele aandachtspunten over Tabel C 2:

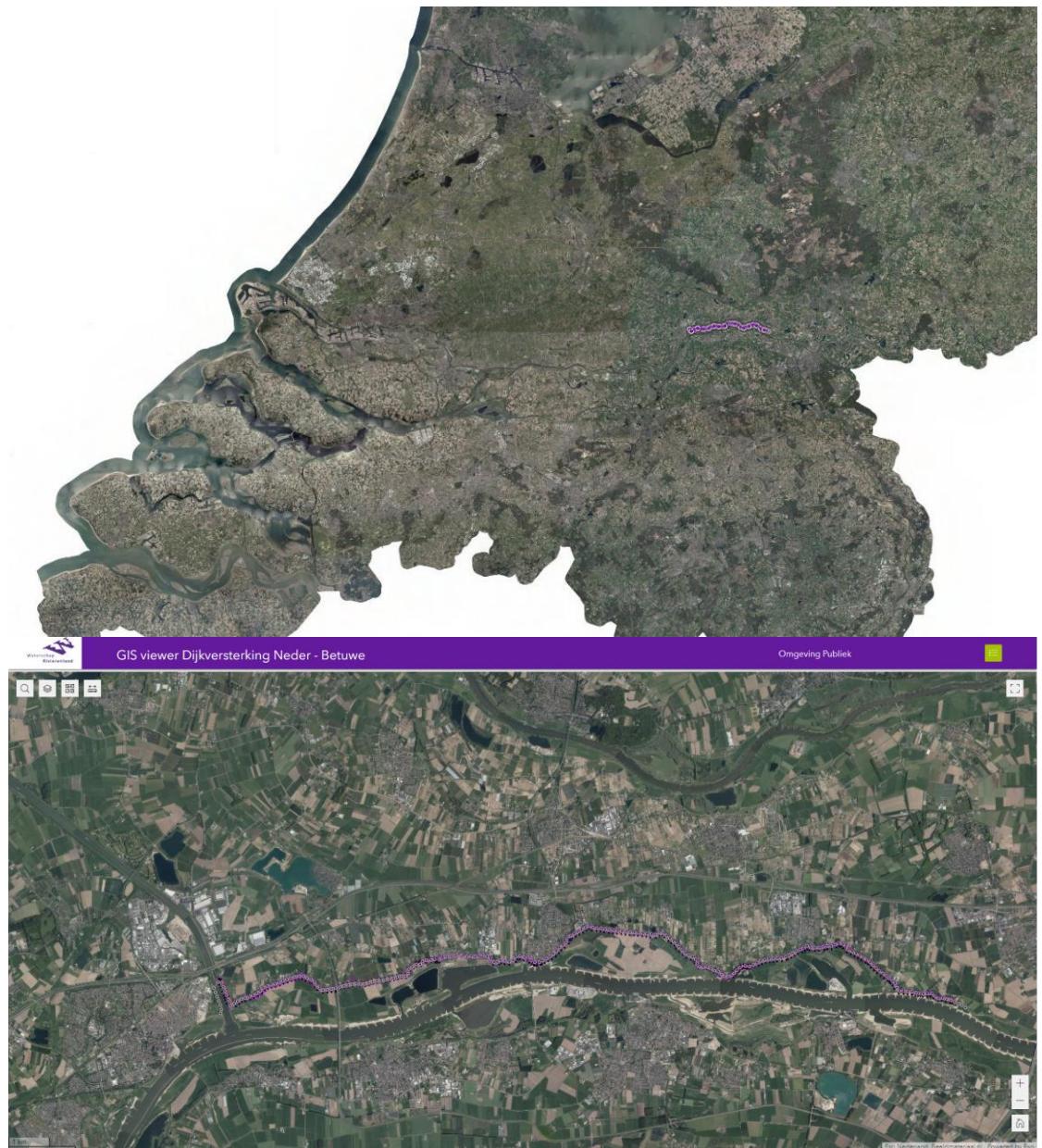
- Als minimale waarde van de bodemhoogte is NAP-10 m aangegeven. Dit is geen daadwerkelijk gemeten waarde. Deze waarde is bij sloten/strangen/wielen gebruikt door

een gebrek aan metingen. Indien op deze locaties vervolgens niet op piping werd voldaan zijn metingen uitgevoerd.

- In de tabel staat een intredeweerstand van het voorland genoemd gelijk aan 10 dagen. Het project NeBe heeft in principe hier geen gebruik van gemaakt. Alle leklengtes zijn met Moria bepaald waardoor geen intredeweerstand nodig was. Alleen op locaties zonder veel peilbuisraaien, waar het Moria model minder betrouwbaar is, is deze intredeweerstand gebruikt om een inschatting te kunnen maken van een realistische en veilige spreidingslengte.
- De diktes van het watervoerendpakket zijn de effectieve diktes na het toepassen van het gewogen gemiddelde. De daadwerkelijke dikte is dus groter.

Tabel C 2 Data van NeBe, range aan waarde van de belangrijkste parameters.

Parameter	Parameter	Minimum waarde	Maximum waarde
Bodemhoogte (m + NAP)	h_{bodem}	-10	11,8299
Polderpeil (m + NAP)	h_{exit}	4,00	8,13
Deklaag dikte (m)	$d_{deklaag}$	0,10	9,33
Rivierwaterstand bij norm (m + NAP)	WBN	12,158	13,763
Dikte van het WVP (m)	D	19,25	32,04
Doorlatendheid van het WVP (m/dag)	k	45	86
Geometrische voorlandlengte (m)	L_1	0,07	292,87
Afstand van uitstredenpunt tot binnenteen (m)	L_{BIT}	0	151,10
Afstand van uitstredenpunt tot buitenteen (m)	L_{BUT}	19,62	186,61
Dijkbasis (m)	DB	20	100
70-percentielwaarde van de korrelverdeling van het WVP (mm)	d_{70}	0,31	0,45
Volumegewicht van zandkorrels onder water (kN/m ³)	$\gamma_{sub,particles}$	17	17
Intredeweerstand van het voorland (dag)	c_1	10	10
Leklengte van het voorland (m)	λ	15,08	300,87



Figuur C 4 Locatie van het dijktraject Neder Betuwe, genomen op 5 december 2022 van <https://experience.arcgis.com/experience/d499033a20fd4ad3abaa947a8067d373/page/GIS-viewer/>.

C.4 Keuze van kD -waarden voor semi-probabilistische pipinganalyse

Het doel van dit hoofdstuk is om te bepalen welke semi-probabilistisch keuzes het meest representatief zijn in geval je piping analyses met kD waardes uitvoert en voor- en achterlanden expliciet meeneemt (zoals in de GAP analyses, Moria aanpak en de uittredepuntenmethode).

C.4.1 Aanpak

Het verkennende onderzoek van vorige jaar is uitgebreid om echte doorsneden (1888 doorsneden van NeBe, zie Hoofdstuk C.3) en meer variaties te onderzoeken. De focus ligt nu ook op het verschil tussen een WBI aanpak (met apart karakteristieke waarden voor k en voor D) in vergelijking met een geohydrologische model aanpak (Brinkhuis et al., 2021) (waar kD één waarden is) op de berekende *safety factor* voor piping (Vergelijking C 5). Vorige jaar is alleen gekeken naar k en D apart.

De volgende stappen worden doorlopen:

5. Identificatie semi-probabilistische verificaties. Hierin worden vijf mogelijke semi-probabilistische verificaties (cases) beschouwd voor de keuze van kD bij de bepaling van zowel de leklengte als het kritieke verval.
6. Opzet probabilistische analyses met de *First Order Reliability Method* (FORM). Hierin worden twee probabilistische analyses opgezet: één op basis van k en D als aparte stochasten conform WBI en één op basis van een gecombineerde kD conform een geohydrologische aanpak.
7. Uitvoeren analyses. De semi-probabilistische veiligheidsfactoren worden berekend en vergeleken met probabilistische pipinganalyses.
8. Analyse. Hierin wordt gekeken welke semi-probabilistische verificatie het best aansluit bij het bestaande veiligheidsformat (kalibratielijn) door deze te vergelijken met de probabilistische analyses. Het uitgangspunt hierbij is de huidige kalibratielijn voor piping handhaven, waarin de veiligheidsfactor F_p wordt bepaald door één van de vijf beschouwde cases.

Disclaimer: De Moria aanpak is alleen voor de bepaling van de leklengte in dit project. Idealiter wordt de Moria aanpak ook voor probabilistische analyses gebruikt, maar dit bleek niet mogelijk binnen de scope van dit project. Ook zijn er enkele aannames gemaakt dit gevalideerd dienen te worden. Dit project is daarmee nadrukkelijk een uitgebreide verkenning, zonder definitieve antwoorden te geven.

C.4.2 Analyses

Stap 1: Identificatie semi-probabilistische verificaties

Er worden vijf mogelijk keuzes van de karakteristieke waarden voor k bij een semi-probabilistische analyse onderzocht, zie ook samenvatting in Tabel C 3. Wanneer kD één stochast is, wordt k berekend met de karakteristieke waarden van kD gedeeld door de gemiddelde waarde van D . Een bovengrens is een 95%-percentiel waarden en een ondergrens een 5%-percentiel waarden.

- Case 1: WBI aanpak. Hier wordt de WBI aanpak gehanteerd en worden k en D als aparte stochasten meegenomen in de berekeningen. Voor de semi-probabilistische berekening worden de hoog karakteristieke waarden voor k en D gebruikt.
- Case 2: Conservatief. Hier wordt de data conform een geohydrologische model gebruikt waaruit één stochast kD wordt gebruikt. Voor de semi-probabilistische berekening wordt uitgegaan van een hoge karakteristieke waarden voor kD bij het berekenen van de leklengte maar van een lage karakteristieke waarden voor kD bij het berekenen van het kritieke verval. Dit meest conservatieve manier van rekenen, maar ook inconsistent. Immers, kD kan niet tegelijkertijd hoog en laag zijn.

- Case 3: Hier wordt de data conform een geohydrologische model gebruikt. Bij de semi-probabilistische berekening wordt consistent omgegaan met de keuze van de karakteristieke waarden voor kD . Voor de leklengte en het kritieke verval wordt uitgegaan van de bovengrenswaarden.
- Case 4: Hier wordt de data conform een geohydrologische model gebruikt. Bij de semi-probabilistische berekening wordt net als case 3 consistent omgegaan met de keuze van de karakteristieke waarden voor kD en wordt deze keer gebruik gemaakt van de ondergrenswaarden.
- Case 5: Hier wordt de data conform een geohydrologische model gebruikt. De leklengte gevonden op basis van de geohydrologische model Moria (De Wit, 2022) wordt gebruikt. Voor de semi-probabilistische berekeningen wordt er uitgegaan van de ondergrenswaarden van kD voor het kritieke verval.

Tabel C 3 Samenvatting van de keuze in karakteristieke waarden voor de semi-probabilistische berekeningen.

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Naam:	WBI aanpak	Conservatief, inconsistent	Hoge kar. Waarde (conservatief)	Lage kar. Waarde (optimistisch)	Lage kar waarde en Moria (conservatief, nauwkeuriger)
Kritiek verval	k en D bovengrens	kD bovengrens	kD bovengrens	kD ondergrens	kD bovengrens
Leklengte	k en D bovengrens	kD ondergrens	kD bovengrens	kD ondergrens	Moria

De safety factor (F_p) van de vijf semi-probabilistische analyses worden verder bepaald conform de gangbare WBI procedure (SH, 2017).

Stap 2: Probabilistische analyses

De faalkansen (uitgedrukt als betrouwbaarheidsindex β_p) van twee probabilistische analyses worden bepaald:

1. met k en D als aparte stochasten. Dit is representatief voor het WBI. De uitkomst is $\beta_{p,apart}$
2. met kD als één stochast met een lagere variatie coëfficiënt, representatief voor geohydrologische modellen. De uitkomst is $\beta_{p,samen}$.

De probabilistische sommen worden met de Probabilistische Toolkit van Deltares uitgevoerd op basis van de WBI grenstoestand functie (Vergelijking C 1) waarbij H_c bepaald wordt inclusief voorlandlengte (zie Bijlage CA). De *First Order Reliability Method* (FORM) wordt gebruikt om de rekentijd te beperken. De verdelingen en variatie coëfficiënten die gebruikt zijn voor de probabilistische sommen, zijn in Tabel C 4 weergegeven. Deze volgens uit de WBI (SH, 2017) behalve voor de variatie coëfficiënt van kD hiervoor is een aanname gemaakt. De waterstand heeft een weibull verdeling gefit op basis van de waterstand bij de norm (WBN), de decimeringshoogte en de norm faalkans.

Tabel C 4 Parameters en verdelingen van stochasten gebruikt bij de probabilistische sommen.

Parameter	Verdeling	Variatie coëfficiënt
k	Lognormaal	0,5
D	Lognormaal	0,1
kD	Lognormaal	0,3
c_1	Lognormaal	0,15

$d_{deklaag}$	Lognormaal	0,1
m_p	Lognormaal	0,12
d_{70}	Lognormaal	0,12
γ_{sat}	Lognormaal	0,05

C.4.3

Stap 3: Resultaten

De resultaten van de semi-probabilistische analyse worden eerst gepresenteerd, gevolgd door die van de probabilistische analyses, en daarna worden beide met elkaar vergeleken.

Resultaten semi-probabilistische analyses

Het verschil tussen de resultaten van semi-probabilistische berekeningen wordt in drie stappen geanalyseerd:

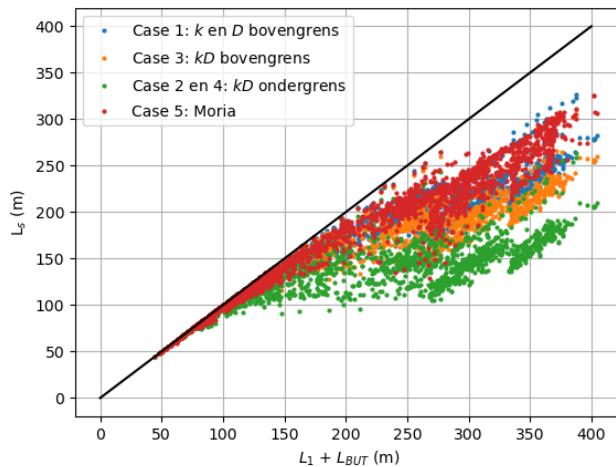
1. Eerst wordt per case gekeken naar het verschil in berekende leklengte op basis van de karakteristieke waarde van kD .
2. Dan per case naar het verschil in doorlatendheid van het WVP.
3. Als laatste wordt gekeken naar het kritieke verval per case.

De kwelweglengtes berekend met verschillende karakteristieke waarden van k zijn in Figuur C 5 weergegeven ten opzichte van de geometrische kwelweglengte (geometrisch voorlandlengte (L_1) + afstand tot uittredepunt (L_{BUT})). De volgende karakteristieke waarde van k zijn gebruikt:

- k en D bovengrens, dit correspondeert met case 1 (conform WBI).
- kD bovengrens, dit correspondeert met case 3 (conservatief consistent).
- kD ondergrens, dit correspondeert aan case 2 (conservatief, inconsistent) en 4 (optimistisch), waar Case 2 een bovengrens gebruikt voor het kritieke verval en case 4 een ondergrens daarvoor.
- *Moria*, hier wordt de leklengte berekend op basis van de geohydrologische model, wat correspondeert aan case 5 (conservatief, Moria).

Uit Figuur C 5 kunnen meerdere conclusies getrokken worden:

- Bij **korte** geometrische kwelweglengte, kleiner dan ongeveer 100 m, is geen verschil in fictieve kwelweglengtes (fictieve voorlandlengte + afstand tot uittredepunt) ongeacht de keuze in karakteristieke waarden van de doorlatendheid van het WVP. De kwelweglengte is gedomineerd door de geometrische voorlandlengte.
- Bij **langere** geometrische voorlandlengtes geeft een ondergrens kD -waarden de kortste kwelweglengtes, gevolgd door een bovengrens kD -waarden. Een bovengrens van k en D apart geeft de langste kwelweglengtes. De kwelweglengtes berekend met Moria geven een vergelijkbaar kwelweglengte als een bovengrenswaarden van k en D apart.

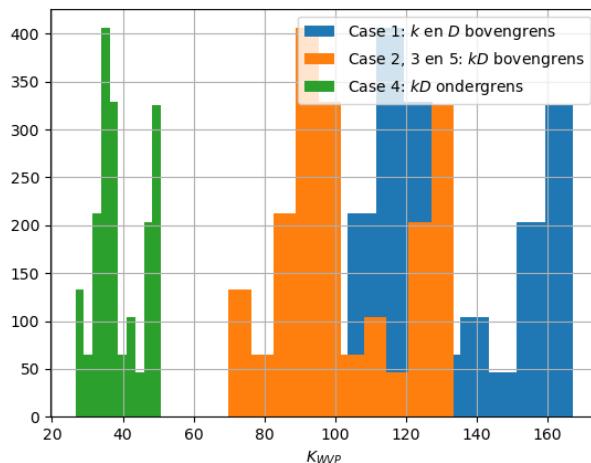


Figuur C 5 Fictieve leklengte berekend op basis van verschillende karakteristieke waarden van k ten opzichte van de bijbehorende geometrische kwelweglengte.

Een overzicht in karakteristieke waarden van de doorlatendheid afhankelijk van de keuze in case is in Figuur C 6 weergegeven. De volgende karakteristieke waarde van k zijn gebruikt:

- k en D bovengrens, dit correspondeert aan case 1.
- kD bovengrens, dit correspondeert aan case 2, 3 en 5.
- kD ondergrens, dit correspondeert aan case 4.

Uit Figuur C 6 komt duidelijk naar voren dat een ondergrenswaarden van kD de laagste doorlatendheid geeft, zoals verwacht. Het verschil tussen bovengrenswaarden voor kD of k en D is iets minder groot maar een bovengrenswaarden van k geeft altijd een groter waarden dan de bovengrenswaarden van kD . Dit is omdat k en D apart een grotere onzekerheid heeft dan kD samen. Dit is ongeacht de geometrische voorlandlengte.



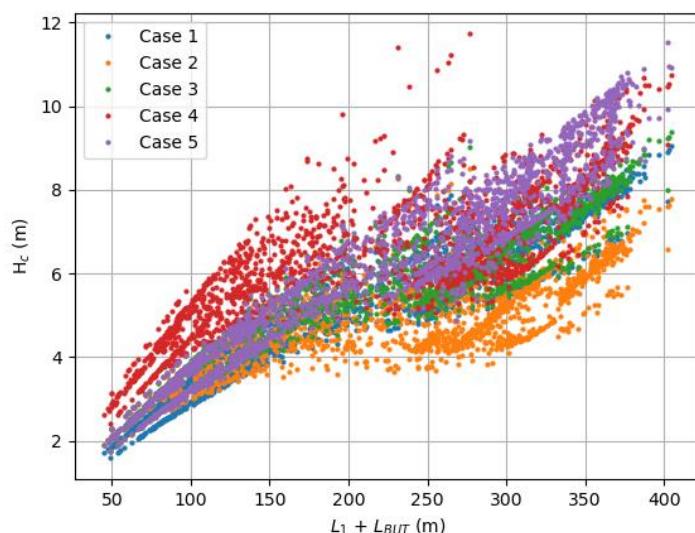
Figuur C 6 Karakteristieke waarden van de doorlatendheid van het WVP voor alle 1888 gevallen berekend met de boven- of ondergrenswaarden en met of zonder geohydrologisch model.

Figuur C 7 geeft het berekende kritieke verval voor alle vijf semi-probabilistische analyses (waarbij dus zowel het effect op leklengte (Figuur C 5) als op doorlatendheid (Figuur C 6) is meegenomen). Uit deze figuur is duidelijk te zien dat hoe hoger L_1 , hoe hoger het kritieke

verval. Verder is er een zichtbaar verschil in verloop van kritiek verval per case te zien, afhankelijk van L_1 .

- Case 4 geeft de hoogste kritieke vervallen. Dit is de meest gunstige aannname voor kritiek verval en meest ongunstige aanname voor leklengte. Blijkbaar is de aanname voor het kritieke verval dominant.
- Andersom geeft case 2 de laagste kritieke vervallen. Hier wordt voor kritiek verval de meest ongunstige aanname gemaakt. Dit blijkt dominant ten opzichte van de meest gunstige aanname voor leklengte.
- Bij **korte** geometrische kwelweglengte, kleiner dan ongeveer 100 m is de kwelweglengte gedomineerd door de geometrische lengte. Hierdoor zijn alle kwelweglengtes gelijk aan de geometrische kwelweglengtes en is het verschil in kritiek verval tussen de vijf cases alleen afhankelijk van k . Hierdoor geeft case 1 de laagste kritieke vervallen (hoogste k), case 2, 3 en 5 geven dezelfde kritieke vervallen en case 4 de hoogste (laagste k).
- Bij **langere** geometrische voorlandlengtes is het verschil in kritiek verval per case iets minder duidelijk. Wat wel opvallend is, is dat in case 2 nu de laagste kritieke vervallen berekend worden en dat, in tegenstelling tot wat er bij lage L_1 is gezien, case 4 niet meer altijd de hoogste kritieke vervallen berekend worden.

Uit deze observatie lijkt het erop dat bij kortere L_1 k dominant is en bij langere L_1 wordt de leklengte steeds meer dominant op het kritieke verval.

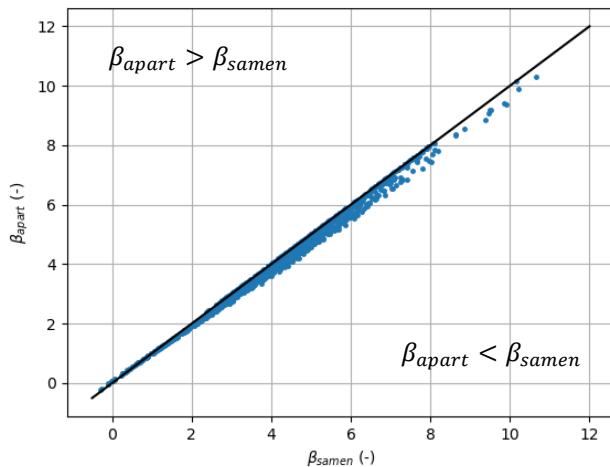


Figuur C 7 Kritiek verval berekend op basis van de verschillende cases ten opzichte van de bijbehorende geometrische kwelweglengte.

Resultaten probabilistische sommen

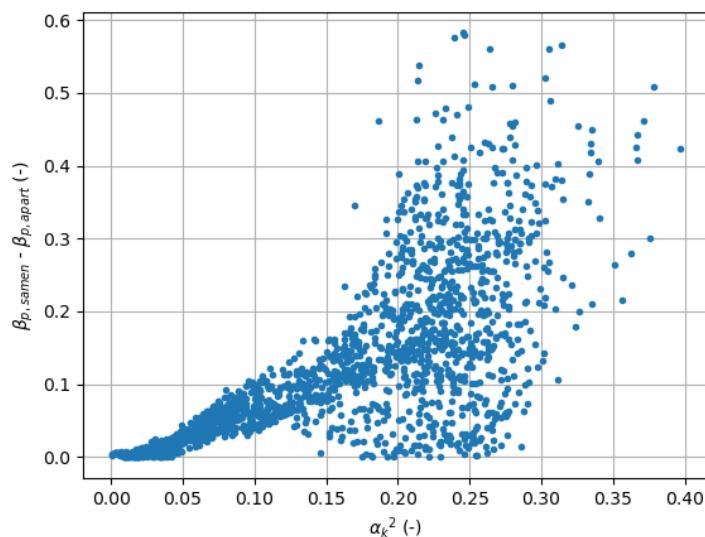
Figuur C 8 geeft de resultaten weer van de probabilistische berekeningen met k en D als twee stochasten (apart, op de y-as) en kD als één stochast (samen, op de x-as). Uit deze figuur is duidelijk te zien dat de betrouwbaarheid berekend met k en D apart altijd lager is dan die met kD samen door de lagere standard afwijking van kD . Behalve bij heel lage betrouwbaarheden onder 1 ongeveer, dan is het andersom. Deze situaties zijn echter niet relevant omdat ruimschoots niet aan de eisen voldoen.

Dit komt omdat de doorlatendheid berekend met k en D apart een grotere onzekerheid heeft dan die berekend met kD . De onzekerheid in k ($VC = 0,5$) is belangrijker in de analyse dan de onzekerheid in D ($VD=0,1$), waardoor deze gezamenlijk meer onzekerheid geven dan de aangenomen gecombineerde waarde van 0,3..



Figuur C 8 Betrouwbaarheidsindices berekend met k en D apart of kD samen.

Het verschil tussen β_{samen} en β_{apart} wordt groter wanneer k belangrijker wordt. Dit is te zien in Figuur C 9, waar $\beta_{samen} - \beta_{apart}$ op de y-as is weergegeven met de invloedscoëfficiënten α_k^2 op de x-as. Uit deze figuur is duidelijk dat hoe groter het verschil tussen β_{samen} en β_{apart} , hoe hoger α_k^2 . Dit geldt tot een bepaalde waarden van α_k^2 . De redenen voor deze effecten zijn nog niet duidelijk.



Figuur C 9 Verschil tussen de betrouwbaarheidsindices berekend met kD samen en k en D apart ten opzichte van de invloedscoëfficiënt berekend met FORM van de doorlatendheid van het WVP.

Semi-probabilistisch en probabilistische vergelijking

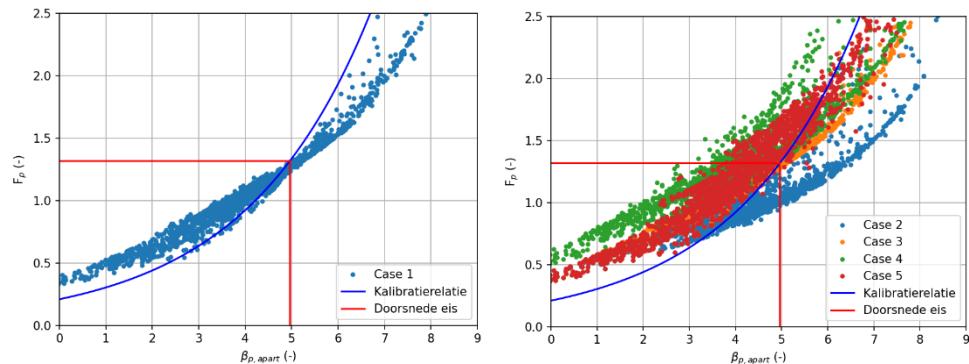
Een vergelijking tussen de semi-probabilistische berekeningen (y-as) en de probabilistische berekeningen (x-as) zijn in Figuur C 10 en Figuur C 11 weergegeven, inclusief in rood de eis uitgedrukt in F_p en β . In deze figuur is in blauw de kalibratie relatie gepresenteerd, zie Vergelijking C 17. De kalibratierelatie is afgeleid voor een situatie waarin k en D apart zijn meegenomen.

$$\beta_p = \frac{\ln\left(\frac{F_p}{1.04}\right) + 0.43\beta_{norm}}{0.37}$$

Vergelijking C 17

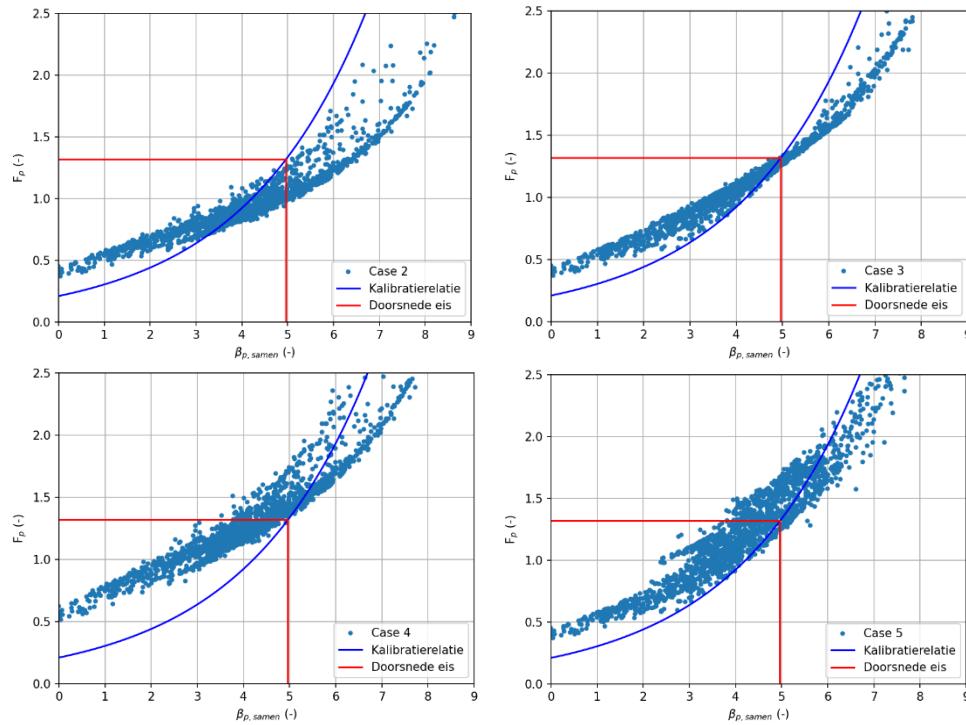
De probabilistische berekening met k en D apart is strikt gezien alleen relevant voor Case 1. De probabilistische berekening met kD is voor de andere cases relevant (2 tot en met 4). Case 5 had vergeleken moeten worden met een probabilistische berekening die leklengtes uit geohydrologische model haalt in plaats van Vergelijking C 7, echter door gebrek aan tijd word case 5 vergeleken met de probabilistische berekening met kD samen.

Figuur C 10 geeft de vergelijking tussen de probabilistische sommen k en D apart met Case 1 (links) en de andere cases (rechts) ter informatie. Alleen de linker figuur is relevant en we zien dan ook dat de Case 1 netjes de kalibratielijn volgt.



Figuur C 10 Semi-probabilistische resultaten ten opzicht van de probabilistische resultaten met k en D apart.
Links met case 1 en recht met case 2 tot en met 5.

Vervolgens is gekeken hoe de cases 2 tot en met 5 met de probabilistische sommen met kD samen zich verhouden tot de kalibratielijn in Figuur C 11. Hierin is duidelijk te zien dat conform verwachting case 2 de laagste F_p geeft (aangezien hier de meest conservatieve keuzes worden gemaakt voor het bepaling van H_c), en case 4 de hoogste F_p (de minst conservatieve keuzes). Wat verder opvalt is dat bij lage beta's de punten boven de kalibratielijn liggen en bij hoge beta's eronder. Het snijpunt verschilt van case tot case.



Figuur C 11 Semi-probabilistische resultaten ten opzicht van de probabilistische resultaten met kD samen voor case 2 tot en met 5.

C.4.4 Stap 4: Analyse

Om te bepalen welke van de cases het beste aansluit bij het huidige veiligheidsformat kijken we naar de volgende 2 punten:

- C. De afwijkingen van de verschillende cases ten opzichte van de kalibratielijn. Idealiter resulteert het gekozen semi-probabilistische format zo dicht mogelijk bij de kalibratielijn. Voornamelijk rond het relevante bereik van $\beta_{p,eis}$ (zeg tussen de 4 en 7).
- D. De spreiding van case 1 (default WBI) in relatie tot de kalibratie lijn en de spreiding van de overige cases. In de default WBI aanpak is er ook redelijk wat spreiding van de cases ten opzichte van kalibratie, de lijn ligt conservatief (relatief hoog, op ongeveer 80%) in de puntenwolk.

Als we bovenstaande punten volgen zien we dat in het relevante bereik:

- Case 2 tot een te veilige situatie leidt, bijna alle punten in het relevante bereik liggen ruim onder de kalibratielijn. Daarnaast is case 2 intern inconsistent.
- Case 4 en 5 tot een onveilige situaties leiden, veel punten liggen ruim boven de kalibratielijn.
- Case 3 ligt meer rond de kalibratielijn, er wat boven bij lage beta's en er onder bij hoge beta's. Daarnaast worden vergelijkbare afwijkingen en spreidingen als case 1 (WBI defaults) gevonden, wat vertrouwen geeft in het resultaat.

Samengevat lijkt case 3 de meest geschikte keuzen.

Verdere duiding van de resultaten voor case 3 :

- Zoals eerder al is gebleken blijkt ook hier dat het negatieve effect van een hoge kD op H_c veel zwaarder weegt dan het positieve effect van een hoge kD op de effectieve kwelweglengte.

- De kleinere variatiecoefficient van kD ten opzichte van k lijkt er verder voor te zorgen dat, ondanks het niet-conservatieve effect van een hoge kD op de effectieve kwelweglengte, er toch geen sterke niet-conservatieve afwijking is ten opzichte van de WBI defaults.

C.4.5 Conclusies en aanbevelingen

Op basis van deze analyses is de beste aanpak voor semi-probabilistische berekeningen met een geohydrologische model om consistent hoog karakteristieke waarden voor kD te gebruiken voor de leklengte en het kritieke verval (case 3).

Er zijn enkele vereenvoudigingen gedaan, waaronder de belangrijkste:

- Er is aangenomen dat kD een variatiecoëfficiënt heeft van 0,3, wat significant lager is dan de 0,5 welke default is voor k in het WBI. De waarde van 0,3 is in lijn met NeBe analyses. Het is echter de vraag of deze waarde ook voor andere projecten (bijvoorbeeld GAP projecten met geohydrologische modellen) representatief zijn.
- De Moria aanpak wordt nu alleen in de bepaling van de leklengte gebruikt. Idealiter zou deze integraal in een probabilistische analyse worden meegenomen. Dit bleek niet haalbaar binnen de scope van dit project.
- De waterstandsstatistiek bij NeBe is nu op basis van een benadering, een aanscherping kan ook de resultaten mogelijk veranderen.
- Voor wat betreft het rekenen met voorlanden op basis van een geohydrologische aanpak is alleen gekeken naar kD van het WVP. Overige onzekerheden in deze analyse en het effect hiervan op het veiligheidsformat zijn nog niet meegenomen.

De voorlopige conclusies moeten dus ook vooral in het ligt van bovenstaande worden beschouwd. Mochten deze aannames belangrijk blijken voor de toepassing, dan is aanvullende analyse noodzakelijk.

C.5 Veiligheidsfilosofie pipelengte

C.5.1 Aanpak

Net als bij de studie van vorige jaar, zie Paragraaf C.2.1, wordt bij dit onderzoek semi-probabilistische en probabilistische sommen uitgevoerd om te bepalen welke semi-probabilistische verificaties nodig zijn zodat de kans op pipegroei tot onder het voorland voldoende klein is. Dit keer met data van een echte case, zie Hoofdstuk C.3.

De semi-probabilistische sommen zijn berekend op basis van de rekenregel van Sellmeijer, inclusief het meenemen van effectieve voorlandlengte, zie Vergelijking C 5. De probabilistische sommen zijn berekend op basis van de foutenboom in Figuur C 1 met de PTK. Hiervoor is FORM gebruikt met dezelfde variatie coëfficiënten als in Tabel C 4 en een weibull verdeling voor de waterstand gefit op basis van de waterstand bij de norm (*WBN*), de decimeringshoogte en de norm faalkans.

In de PTK is falen gedefinieerd als een serie systeem waar falen op kan treden door het overschrijden van het kritieke verval (β_p , zie Vergelijking C 1) of door pipegroei onder het voorland (β_{pl} , zie Vergelijking C 2). De faalkans van deze serie systeem wordt gerefereerd als β_{sys} . Deze is berekend in de PTK met directional sampling.

In dit onderzoek wordt gekeken naar hoe dominant de pipelengte is. Dit wordt gedaan door het verschil tussen de betrouwbaarheid van de systemen en het kritieke verval te berekenen. Hoe meer dominant de pipelengte is, hoe groter $\beta_{sys} - \beta_p$. Op basis hiervan wordt een analyse uitgevoerd waarbij gekeken wordt of situaties waar pipelengte redelijk dominant is ($\beta_{sys} - \beta_p > 0,5$) voldoende door F_p worden gedekt.

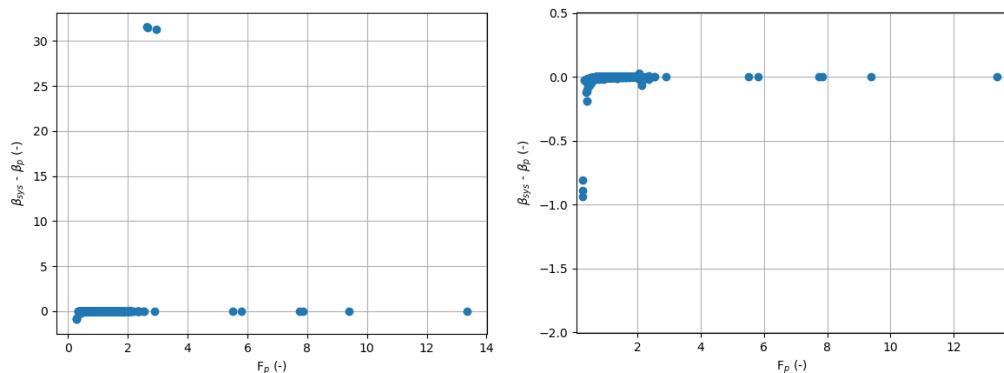
Dit wordt gedaan met data van NeBe, m_{pl} met $\mu=1$ en $\sigma=0,3$ en drie gevoeligheidsanalyse:

1. NeBe met minder onzekerheid in d_{70} en k .
2. NeBe met meer onzekerheid m_{pl} ($\sigma=0,4$ en $\sigma=0,5$).
3. 10 m dikker WVP.

C.5.2 Resultaten: Probabilistische sommen

Basis resultaten

De resultaten van $\beta_{sys} - \beta_p$ en F_p voor alle 1888 doorsneden zijn in Figuur C 12 weergegeven. In deze figuur zijn drie uitschieters te zien die een $\beta_{sys} - \beta_p$ groter dan 30 hebben. Dit betekent dat voor deze drie gevallen gecombineerd falen nooit optreedt, de reden is niet helemaal helder. Door deze drie punten buiten beschouwing te nemen komen drie andere uitschieters naar voren waar $\beta_{sys} - \beta_{Hc}$ kleiner is dan -1,25. Deze gevallen hebben een bijbehorende safety factor van 0,3 waardoor falen door het kritieke verval optreedt. Daardoor is het niet meer relevant of de pipelengte ook faalt en wel of niet dominant is.

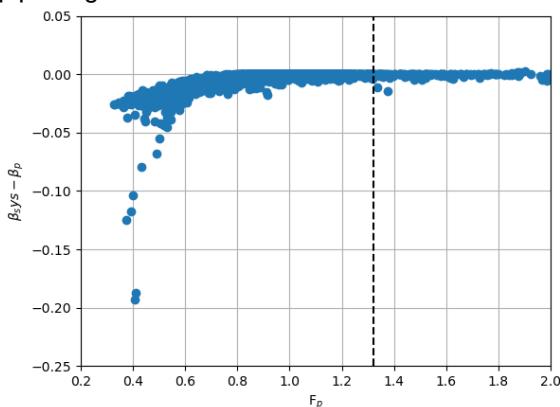


Figuur C 12 Verschil tussen de systeem betrouwbaarheidsindex en de betrouwbaarheidsindex op basis van het kritieke verval ten opzichte van de safety factor van het kritieke verval. Links voor alle 1888 doorsneden, en rechts ingezoomd tussen 0,5 en -2,0 op de y-as.

Figuur C 13 geeft een meer ingezoomde overzicht van de resultaten, waar de zes uitschieters uitgehaald zijn met de F_p tussen 0,2 en 2,0 en β tussen 0 en -0,25 is weergegeven. Hogere F_p waarden geven allemaal een $\beta_{sys} - \beta_{Hc}$ van nul en zijn daardoor ook niet relevant.

Uit deze figuren is het duidelijk dat de grootste verschillen tussen β_{sys} en β_{Hc} (grooter dan 0,1) voorkomen bij F_p kleiner dan 0,4 en dus waar falen door het kritieke verval al optreden volgens Sellmeijer. Zoals eerder gezien zijn deze gevallen niet relevant. Een verschil in β_{sys} en β_{Hc} kleiner dan 0,1 valt binnen de nauwkeurigheid van het model en kan dus worden gezien als verwaarloosbaar.

Uit deze observaties kan worden geconcludeerd dat in geen van de 1888 gevallen de pipelengte dominant is over het kritieke verval.



Figuur C 13 Verschil tussen de systeem betrouwbaarheidsindex en de betrouwbaarheidsindex op basis van het kritieke verval ten opzichte van de safety factor van het kritieke verval. Ingezoomd tussen -0,25 en 0,05 op de y-as.

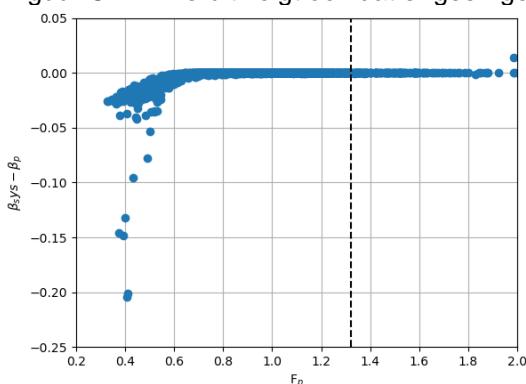
Tabel C 5 geeft een overzicht van de bijbehorende gemiddelde gekwadrateerde alpha-waarden (α^2 , ook influence factor genoemd) van de stochastische parameters gebruikt bij de FORM berekeningen. Deze waarden geven aan hoe belangrijk een bepaalde parameter is voor de berekening. Hieruit volgt dat de waterstand, de modelfactor voor piping en de doorlatendheid van het WVP de drie belangrijkste parameters zijn van de probabilistische berekeningen. De d_{70} is daarna de belangrijkste. Dit is overeenkomstig met wat bijvoorbeeld in de piping kalibratie is gevonden, wat vertrouwen geeft in de gevonden uitkomsten.

Tabel C 5 Gemiddelde gekwadrateerd alpha-waarden (α^2 , ook influence factor genoemd) van de stochast parameters gebruikt bij de FORM berekeningen .

Parameter	Influence factor (α^2)
k	0,165
D	0,003
c_1	0,015
$d_{deklaag}$	0,013
m_p	0,267
m_{pl}	0,0005
d_{70}	0,045
γ_{sat}	0,0004
WBN	0,490

Resultaten met minder onzekerheid in d_{70} en k

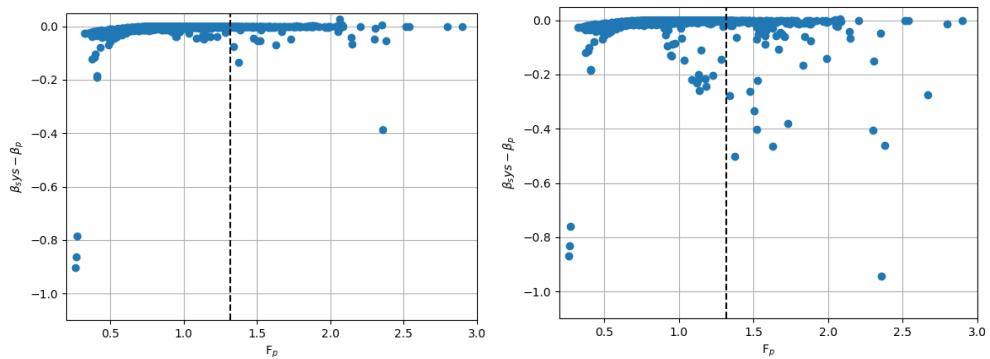
Omdat de doorlatendheid en de d_{70} van het WVP belangrijk parameters zijn voor het kritieke verval maar niet op de pipelengte, is deze studie opnieuw gemaakt voor een lagere onzekerheid van k ($V = 0,10$) en van d_{70} ($V = 0,05$). Een kleiner onzekerheid van beide parameters leidt tot een hogere betrouwbaarheid voor falen door kritiek verval. Daardoor zou door een hoge kritiek verval de pipelengte net dominant kunnen worden ($\beta_{sys} - \beta_{Hc}$ wordt groter). De resultaten zijn (ingezoomed tussen een F_p van -0,25 en 0,05) weergegeven in Figuur C 14. Hieruit volgt ook dat er geen gevallen zijn met een dominant pipelengte.



Figuur C 14 Verschil tussen de systeem betrouwbaarheidsindex en de betrouwbaarheidsindex op basis van het kritieke verval en met minder onzekerheid in doorlatendheid van het WVP en d_{70} ten opzichte van de safety factor van het kritieke verval. Ingezoomd tussen -0,25 en 0,02 op de y-as.

Resultaten met meer onzekerheid in model factor voor pipelengte

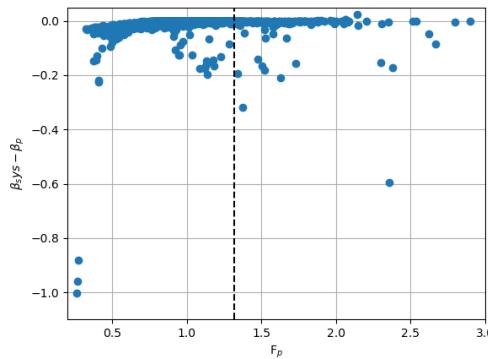
In Bijlage B is gevonden dat de onzekerheid in pipelengte bij vervallen kleiner dan kritiek verval groter is dan de onzekerheid in kritieke pipelengte. Om de invloed hiervan te analyseren is de standard afwijking van m_{pl} vergroot naar 0,4 en 0,5. Figuur C 15 laat een afwijken zien van de basis situatie (Figuur C 13). De pipelengte heeft meer invloed op de systeem faalkans.



Figuur C 15 Afname betrouwbaarheid door het meenemen van de kans op kortsluiting bij meer onzekerheid in pipelengte. Links met een standard afwijking van m_{pl} van 0,4 en rechts van 0,5. Andere axis dan Figuur 5-2.

Resultaten met dikkere WVP en meer onzekerheid in model factor voor pipelengte

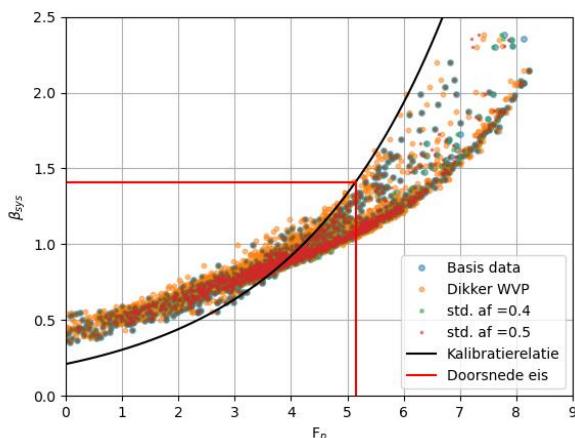
De data van NeBe hebben een redelijk dun WVP, bij andere trajecten kunnen dikkere WVP pakketten verwacht worden. Hierdoor is dezelfde analyse gemaakt met 10 m dikkere diktes van het WVP in combinatie met een standard afwijking van m_{pl} van 0,4. De resultaten in Figuur C 16 laten zien dat, zoals Figuur C 15, kortsluiting een grotere invloed heeft op de totale faalkans.



Figuur C 16 Afname betrouwbaarheid door het meenemen van de kans op kortsluiting bij 10 m dikkere WVP.

C.5.3 Analyse: Is de kans op kortsluiting dominant met meer onzekerheid in pipelengte en dikkere WVP?

Figuur C 17 laat zien dat ook met meer onzekerheid in pipelengtes en dikkere WVP is er geen grote afwijking van de kalibratie relatie. Uit alle onderzochte case is maar één gevonden (bij 10 m dikkere WVP) waarbij falen voor de probabilistische som werd voorspeld ($\beta_{sys} < 4,96$) en niet voor de semi-probabilistische som ($F_p > 1,32$). Dit is onvoldoende data om hiermee een extra semi-probabilistische check uit te leiden voor pipelengte en laat zien dat ook al is de pipelengte soms iets meer dominant, het kritieke verval blijft het dominante mechanisme.



Figuur C 17 Semi-probabilistische resultaten ten opzicht van de probabilistische resultaten

Uit de resultaten die hierboven zijn gepresenteerd is het duidelijk dat de pipelengte niet dominant is over het kritieke verval. Er geen extra semi-probabilistische verificaties nodig bij het mee nemen van extra voorland onder de toepassing gebied van de afgeleide grafieken gebruikt voor dit onderzoek, de standard WBI uitgangspunten (distributies en standard afwijkingen conform de norm) en voor gevallen vergelijkbaar met schematisaties uit NeBe (zie Tabel C 2).

C.6 Conclusie

Deze studie heeft op basis van data van de dijkversterkingsproject Neder Betuwe voor 1888 doorsneden onderzocht wat de beste keuze is in karakteristieke waarden voor de doorlatendheid en dikte van het WVP en welke semi-probabilistische verificaties nog nodig zou zijn voor het meenemen van het hele voorland in een pipinganalyse.

De keuze in karakteristieke waarde van de doorlatendheid was nooit vanzelfsprekend omdat deze de leklengte en het kritieke verval beïnvloed in een tegenstrijdig manier:

- Hoe hoger de doorlatendheid, hoe lager het kritieke verval.
- Hoe hoger de doorlatendheid, hoe langer de leklengte en hoe hoger het kritieke verval.

Door ontwikkelingen in geohydrologische modellen is deze kennisleermethode weer naar voren gekomen. Uit het onderzoek blijkt dat de invloed van de doorlatendheid afhangt van de geometrische voorlandlengte. Wanneer deze korter is dan de leklengte wordt het kritieke verval alleen beïnvloed door de doorlatendheid van het WVP en niet bij de leklengte. Voor deze gevallen leidt een hoog doorlatendheid tot een laag kritiek verval. Wanneer de leklengte langer is dan de geometrische voorlandlengte dan is het netto effect van doorlatendheid minder duidelijk omdat de leklengte het kritieke verval ook beïnvloed.

Een goede keuze die voor alle geometrische voorlandlengte werkt is om een hoog karakteristieke kD waarden te gebruiken voor de berekening van het kritieke verval en leklengte. Dit is voor gevallen die vergelijkbaar zijn met Neder Betuwe de beste optie. Het wordt aanbevolen om nooit de conservatieve keuze van een ondergrenswaarden te kiezen om de leklengte te berekenen en een bovengrenswaarden om het kritieke verval te berekenen.

Het onderzoek naar een aanscherping van de veiligheidsfilosofie voor het meenemen van meer voorland is uitgevoerd door uit te zoeken wanneer het effect van pipelengte dominant was over het kritieke verval. Uit de 1888 doorsneden berekend en drie gevoeligheidsanalyses bleek de pipelengte niet dominant te zijn. De gevoeligheidsanalyse hebben het effect

meegenomen van minder onzekerheid in de WVP doorlatendheid en de d70, meer onzekerheid in de pipelengte en dikkere WVP.

Hierdoor is het strikt genomen, voor gevallen vergelijkbaar met NeBe, niet nodig om een extra veiligheidscontrole uit te voeren voor het meenemen van meer voorland gebruikmakend en in de toepassingsgebied van het stappenplan (zie Hoofdstuk 2).

Referenties Bijlage C

Brinkhuis, M., Rosenbrand, E., Hoogewoud, J. (2021). Handreiking geohydrologische aanpak voor piping, geannoteerde inhoudsopgave. HWBP De Innovatieversneller, Kenmerk 2021-PIP-001.

Witteveen +Bos, 2008. Decimeringshoogten TMR2006. Rapport RW1708-1/zeir/008

De Wit, T. (2022). Piping: DO scope, urgentie- en consequentiebepaling. RHDHV, kenmerk: WATRC_BF6777-114-102_R0080_905329_f2.0.

Kanning, W. (2021). Verkenning veiligheidsbenadering piping met voorlanden. Deltares rapport 11206817-010-GEO-0004.

Rosenbrand, E. et al. (2022). Kennis voor Keringen 2021: Achtergrondrapport Voorlanden. Deltares rapport 1206817-010-GEO-0003.

Schematiseringshandleiding piping, RWS, WBI 2017, 28 mei 2021.

Bijlage CA Script gebruikt in de Probabilistische ToolKit

```
//Stijghoogteverloop model 4A;  
kD = k * D;  
L2 = L_BUT - L_BIT;  
λ1 = Math.Pow(kD * c1, 0.5);  
λ3 = Math.Pow(kD * c3, 0.5);  
Φ1 = Φ_polder + (MHW - Φ_polder) * (L2 + λ3 * Math.Tanh(L3 / λ3)) / (λ1 * Math.Tanh(L1 / λ1) + L2 + λ3 * Math.Tanh(L3 / λ3));  
Φ2 = Φ_polder + (MHW - Φ_polder) * λ3 * Math.Tanh(L3 / λ3) / (λ1 * Math.Tanh(L1 / λ1) + L2 + λ3 * Math.Tanh(L3 / λ3));  
Φ_uittrede = Φ_polder + (Φ2 - Φ_polder) * (Math.Sinh((L3 - L_BIT) / λ3)) / Math.Sinh(L3 / λ3);  
  
//UPLIFT;  
ΔΦc = d_deklaag * ((y_satdek - y_water) / y_water);  
h_uittrede = Math.Max(maaiveld, Φ_polder);  
ΔΦ = Φ_uittrede - h_uittrede;  
Zu = mu * ΔΦc - ΔΦ;  
  
//HEAVE;  
i = (Φ_uittrede - h_uittrede) / d_deklaag;  
Zh = ic - i;  
  
//PIPING;  
L_effvoorland = λ1 * Math.Tanh(L1 / λ1);  
L = m_kwl * (L_effvoorland + L_BUT);  
  
//Sellmeijer;  
Fr = ((26.0 - y_water) / y_water) * 0.25 * Math.Tan(37 * 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 geparametriserde 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;

Zcomb = Math.Min(Zpl, Zp);

D Leklengte berekenen

De leklengte van het voorland kan met de volgende formule worden berekend:

$$\lambda_{VL} = \sqrt{\frac{K_{WVP} D d_{deklaagVL}}{K_{deklaagVL}}} = \sqrt{K_{WVP} D c}$$
$$c = \sqrt{\frac{d_{deklaagVL}}{K_{deklaagVL}}}$$

Met:

- c (dag): intredeweerstand, ofwel de dikte gedeeld door de doorlatendheid van de deklaag.
- $d_{deklaagVL}$ (m): dikte deklaag in voorland.
- $K_{deklaagVL}$ (m/dag): doorlatendheid deklaag in voorland.
- D (m): dikte van het WVP.
- K_{WVP} (m/dag): doorlatendheid van het WVP.

Voorlanden kunnen zeer heterogeen zijn, waardoor bepaling van de 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 gevoelighedsanalyse 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 gevoelighedsanalyse aanbevolen.*
- Probabilistische trekkingen van c en van K_{WVP} en D en een ondergrenswaarde van de resulterende leklengte. *Met gevoelighedsanalyse voor effect bij een verwachtingswaarde.*
- Indien data beschikbaar is (peilbuismetingen) kunnen deze worden gebruikt (TAW, 2004).
- Een geohydrologisch model waarin de λ_{VL} bepaald wordt 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 gevoelighedsanalyse 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).

De leklengte van het achterland wordt op dezelfde manier berekend dan voor het voorland:

$$\lambda_{AL} = \sqrt{\frac{K_{WVP} d_{deklaagAL} D}{K_{deklaagAL}}}$$

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



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