

N. Bouwman en R.K. de Romph

ALTERNATIEF PIPINGMODEL?

Onderzoek naar de praktische toepasbaarheid van het Shields-Darcy model bij de beoordeling van piping

BACHELORSCRIPTIE
LAND EN WATERMANAGEMENT

7 juni 2018
Definitief



**van hall
larenstein**
university of applied sciences

Contactpersonen

NIELS BOUWMAN
Afstudeerder

E niels.bouwman@arcadis.com

Arcadis Nederland B.V.
Postbus 264
6800 AG Arnhem
Nederland

RENKO DE ROMPH
Afstudeerder

E renko.deromph@arcadis.com

Arcadis Nederland B.V.
Postbus 264
6800 AG Arnhem
Nederland

RIMMER KOOPMANS
Externe begeleider

E rimmer.koopmans@arcadis.com

Arcadis Nederland B.V.
Postbus 264
6800 AG Arnhem
Nederland

HARRIE VAN ROSMALEN
Interne begeleider

E renko.deromph@arcadis.com

Hogeschool Van Hall Larenstein
Postbus 9001
6880 GB Velp
Nederland

VOORWOORD

Voor u ligt de scriptie ‘Alternatief piping model?’. Het onderzoek voor deze scriptie is uitgevoerd bij Arcadis binnen de adviesgroep Waterveiligheid van de divisie Water en Milieu. Deze scriptie is geschreven in het kader van ons afstuderen van de opleiding Land- en Watermanagement aan de hogeschool Van Hall Larenstein en in opdracht van Arcadis. Van februari 2018 tot en met juni 2018 zijn wij bezig geweest met het onderzoeken van een alternatief pipingmodel en het schrijven van de scriptie.

Samen met onze stagebegeleider, Rimmer Koopmans, hebben we de onderzoeksvraag voor deze scriptie bedacht. Hij stond tijdens het onderzoek altijd voor ons klaar en we hebben vaak met hem op effectieve wijze kunnen sparren over ons onderzoek. Bij dezen willen we hem dan ook graag bedanken voor de fijne begeleiding en ondersteuning tijdens dit traject.

Daarnaast willen we onze begeleider vanuit onze opleiding, Harrie van Rosmalen, bedanken voor de fijne begeleiding. Ook hij stond altijd voor ons klaar en heeft ons geholpen deze scriptie tot een goed einde te brengen.

Tevens willen we onze collega's bij Arcadis bedanken voor de fijne samenwerking en hun belangstelling voor dit onderzoek. We konden altijd met vragen bij hun terecht en zijn hen daarvoor dankbaar.

Het onderzoek dat we hebben uitgevoerd was complex en uitdagend, maar we hebben er enorm van genoten. We zijn tevreden met het eindresultaat en wensen u dan ook veel leesplezier toe.

Niels Bouwman en Renko de Romph

Arnhem, 7 juni 2018

INHOUDSOPGAVE

VOORWOORD	I
LIJST VAN TABELLEN	VI
LIJST VAN FIGUREN	VII
SAMENVATTING	IX
1. INLEIDING	1
1.1 Aanleiding	1
1.2 Probleemstelling	2
1.3 Doelstelling	2
1.4 Onderzoeksvragen	2
1.5 Relevantie	3
1.6 Doelgroep	3
1.7 Globale werkwijze	3
1.8 Leeswijzer	4
2. LITERATUURSTUDIE	5
2.1 Faalmechanisme piping	5
2.2 Beschrijving rekenmodellen en rekenregels	7
2.2.1 Sellmeijer model	8
2.2.2 Shields-Darcy model	11
2.2.3 Eindige elementen model D-Geo Flow	15
2.3 Vergelijking analytische rekenmodellen	16
2.3.1 Grondwaterstroming	16
2.3.2 Stroming in het pipingkanaal	16
2.3.3 Erosiecriteria	17
2.3.4 Kalibratie	17
2.3.5 Validatie	18
3. CASUSSEN	21
3.1 Onderzoeksgebied	21
3.1.1 Noordelijke Maasvallei	21
3.1.2 Pannerdens Kanaal	22
3.2 Schematisaties	23

4. ANALYSES	25
4.1 Motivatie	25
4.2 Analyses	25
4.2.1 Doelstelling 1: Heden en toekomst	25
4.2.2 Doelstelling 2: Invloed veiligheidsfactoren	25
4.2.3 Doelstelling 3: Numerieke berekening D-Geo Flow	26
4.2.4 Doelstelling 4: Gevoeligheidsanalyse invoerparameters	26
4.3 Resultaten	26
4.3.1 Doelstelling 1: Heden en toekomst	26
4.3.2 Doelstelling 2: Invloed veiligheidsfactoren	28
4.3.3 Doelstelling 3: Numerieke berekening D-Geo Flow	29
4.3.4 Doelstelling 4: Gevoeligheidsanalyse invoerparameters	29
5. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	33
5.1 Conclusies	33
5.2 Discussie	34
5.2.1 Interpretatie van de resultaten	34
5.2.2 Limitaties van het onderzoek	35
5.3 Aanbevelingen	35
BEGRIPPENLIJST	37
LITERATUURLIJST	40
COLOFON	42

A	REFLECTIE	A-1
A.1	Literatuuronderzoek	A-1
A.2	Onderzoeksmethodologie	A-1
A.3	Onderzoeksuitkomsten	A-2
A.4	Proces	A-2
B	OVERZICHT PARAMETERS REKENMODELLEN	B-3
C	OVERZICHT GRONDONDERZOEK	C-2
D	SCHEMATISATIES ONDERZOEKLOCATIES	D-1
D.1	Thorn	D-1
D.2	Buggenum	D-1
D.3	Well	D-1
D.4	Loo	D-1
E	INVOERWAARDEN REKENMODELLEN	E-1
E.1	Percentielwaarde van de zandfractie	E-1
E.2	Doorlatendheid	E-1
E.3	Kwelweglengte	E-1
E.4	Waterstanden	E-2
E.5	Maaiveldhoogte	E-2
E.6	Veiligheidsfactor	E-2
E.7	Schematiseringsfactor	E-2
F	KORRELVERDELINGEN ONDERZOEKLOCATIES	F-1
F.1	Korrelverdelingen Thorn	F-2
F.2	Korrelverdelingen Buggenum	F-2
F.3	Korrelverdelingen Well	F-3
F.4	Korrelverdelingen Loo	F-3
F.5	Voorbeeld bepaling d15, d50 en d70	F-4
G	D-GEO FLOW MODEL BUGGENUM	G-7
H	RESULTATEN GEVOELIGHEIDSANALYSES	H-2
I	PROJECTPLAN	I-2
J	WERKBESTANDEN	J-1

LIJST VAN TABELLEN

Tabel 4-1: Toegepaste veiligheidsfactoren	26
Tabel 4-2: Verschillen tussen de invoerwaarden van het analytische en numerieke model.....	26
Tabel 4-3: Toetsresultaten zichtjaar 2015	27
Tabel 4-4: Toetsresultaten hoogwater januari 2018.....	27
Tabel 4-5: Toetsresultaten zichtjaar 2050	28
Tabel 4-6: Toetsresultaten zichtjaar 2075	28
Tabel 4-7: Invloed veiligheidsfactoren	28
Tabel 4-8: Toetsresultaten analytische en numerieke berekeningen locatie Buggenum.....	29
Tabel B-1: Invoerparameters die voorkomen in beide rekenmodellen.....	B-3
Tabel B-2: Invoerparameters die voorkomen in het Sellmeijer model	B-4
Tabel B-3: Invoerparameters die voorkomen in het Shields-Darcy model.....	B-5
Tabel E-1: Invoerwaarden model Sellmeijer 2011 locatie Thorn	E-3
Tabel E-2: Invoerwaarden model Sellmeijer 1999locatie Thorn	E-3
Tabel E-3: Invoerwaarden model Shields-Darcy 2016 locatie Thorn.....	E-3
Tabel E-4: Invoerwaarden model Sellmeijer 2011 locatie Buggenum	E-4
Tabel E-5: Invoerwaarden model Sellmeijer 1999 locatie Buggenum	E-4
Tabel E-6: Invoerwaarden model Shields-Darcy 2016 locatie Buggenum.....	E-4
Tabel E-7: Invoerwaarden model Sellmeijer 2011 locatie Well	E-5
Tabel E-8: Invoerwaarden model Sellmeijer 1999 locatie Well	E-5
Tabel E-9: Invoerwaarden model Shields-Darcy 2016 locatie Well	E-5
Tabel E-10: Invoerwaarden model Sellmeijer 2011 locatie Loo	E-6
Tabel E-11: Invoerwaarden model Sellmeijer 1999 locatie Loo	E-6
Tabel E-12: Invoerwaarden model Shields-Darcy 2016 locatie Loo	E-6
Tabel F-1: Overzicht percentielwaarden locatie Thorn.....	F-2
Tabel F-2: Overzicht percentielwaarden locatie Buggenum.....	F-2
Tabel F-3: Overzicht percentielwaarden locatie Well	F-3
Tabel F-4: Overzicht percentielwaarden locatie Loo	F-3
Tabel F-5: Zeefresultaten voor rekenvoorbeeld bepaling d70	F-4

LIJST VAN FIGUREN

Figuur 1-1: Toetsen van grof naar scherp	1
Figuur 1-2: Beoordelen op piping in de gedetailleerde toets	2
Figuur 1-3: Onderzoeksmodel	3
Figuur 2-1: Definitieschets piping	5
Figuur 2-2: Verschillende fasen bij het ontstaan van piping	6
Figuur 2-3: Water- en zandmeevoerende wellen	7
Figuur 2-4: Uitgangspunten rekenmodel van Sellmeijer	8
Figuur 2-5: Basisconfiguratie rekenmodel Sellmeijer	9
Figuur 2-6: Schematisering horizontale en verticale stroming kritieke gradiënten	12
Figuur 2-7: Shields diagram voor laminaire en turbulente stroming	13
Figuur 2-8: Schaafeffecten in verschillende modellen	18
Figuur 3-1: Onderzoeklocaties Noordelijke Maasvallei	21
Figuur 3-2: Foto's onderzoeklocaties	22
Figuur 3-3: Onderzoeklocaties Pannerdens Kanaal	23
Figuur 3-4: Strategische boor- en sondeerlocaties	23
Figuur 3-5: Schematisatie locatie Thorn	24
Figuur 3-6: Schematisatie locatie Buggenum	24
Figuur 3-7: Schematisatie locatie Well	24
Figuur 3-8: Schematisatie locatie Loo	24
Figuur 4-1: Korrelverdelingsdiagram met twee zeefkrommes	30
Figuur 4-2: Resultaten gevoeligheidsanalyse locatie Buggenum	31
Figuur C-1: Boor- en sondeerlocaties locatie Thorn	C-3
Figuur C-2: Boor- en sondeerlocaties locatie Buggenum	C-4
Figuur C-3: Boor- en sondeerlocaties locatie Well	C-5
Figuur D-4: Schematisatie locatie Thorn	5-2
Figuur D-5: Schematisatie locatie Buggenum	5-2
Figuur D-6: Schematisatie locatie Well	5-3
Figuur D-7: Schematisatie locatie Loo	5-3
Figuur F-8: Korrelverdelingsdiagram	F-5
Figuur G-9: D-Geo Flow model Buggenum	G-7
Figuur H-10: Resultaten gevoeligheidsanalyse locatie Thorn	H-3
Figuur H-11: Resultaten gevoeligheidsanalyse locatie Buggenum	H-4
Figuur H-12: Resultaten gevoeligheidsanalyse locatie Well	H-5
Figuur H-13: Resultaten gevoeligheidsanalyse locatie Loo	H-6

SAMENVATTING

Beheerders van primaire waterkeringen moeten tenminste eens in de twaalf jaar beoordelen of hun keringen voldoen aan de wettelijke veiligheidseisen. De manier waarop deze beoordeling moet worden uitgevoerd, is vastgelegd in een wettelijk instrumentarium. Onderdeel van deze beoordeling is het beoordelen van piping bij dijken. In het WBI wordt hiervoor de in 2011 aangepaste rekenregel van Sellmeijer gebruikt. Er is echter discussie over de toepasbaarheid van de rekenregel van Sellmeijer. De landelijke opinie is dat met de aangepaste rekenregel van Sellmeijer te conservatief gerekend wordt met als gevolg dat waterkeringen ten onrechte worden afgekeurd of te robuust worden ontworpen. In een onlangs verschenen publicatie van Hoffmans & Van Rijn (2017) wordt een alternatief pipingmodel beschreven, het Shields-Darcy model. Dit model verschilt fundamenteel van het Sellmeijer model in relatie tot de structuur van de vergelijking waarmee terugschrijdende erosie wordt gecontroleerd. Aangezien de waterkeringbeheerders kampen met grote onzekerheden over de werkelijke pipinggevoeligheid van hun waterkeringen, en toepassing van de aangepaste rekenregel van Sellmeijer leidt tot afkeuring van veel waterkeringen, is er interesse voor het recent ontwikkelde Shields-Darcy model. Het is echter onduidelijk of dit pipingmodel toepasbaar is in de praktijk. In dit onderzoek is de praktische toepasbaarheid van het Shields-Darcy model onderzocht.

Om de praktische toepasbaarheid van het Shields-Darcy model te achterhalen is een kwantitatief meervoudig casestudieonderzoek uitgevoerd, waarbij vier onderzoeklocaties zijn doorgerekend met zowel het Shields-Darcy model als met het aangepaste model van Sellmeijer. Daarnaast is één locatie doorgerekend met behulp van een D-Geo Flow model, waarin de rekenregel van Sellmeijer is geïmplementeerd. Verder is de gevoeligheid van beide analytische rekenmodellen voor verschillende invoerparameters bepaald.

De twee rekenmodellen zijn gekalibreerd en gevalideerd met testen op kleine, middelgrote en grote schaal. Beide rekenmodellen leveren voor dijken in “laboratoriumomstandigheden” bevredigende resultaten op, maar onder veldcondities met natuurlijk afgezet zand treden grote verschillen op. Dit komt naar voren in het uitgevoerde meervoudige casestudieonderzoek. Het kritieke verval berekend met het Shields-Darcy model, is een factor tweeënhalf groter dan het kritieke verval berekend met het Sellmeijer model en een factor anderhalf groter dan het kritieke verval berekend met het numerieke D-Geo Flow model. Concreet betekent dit dat met toepassing van het Sellmeijer model drie van de vier onderzoeklocaties worden afgekeurd op het faalmechanisme piping, terwijl met toepassing van het Shields-Darcy model maar één locatie wordt afgekeurd.

Uit onderzoek van Hoffmans & Van Rijn (2017) blijkt dat het Shields-Darcy model bevredigende resultaten oplevert voor de kleinschalige laboratoriumexperimenten en proeven met grotere schaal. Maar bij extrapolatie naar natuurlijke omstandigheden in het veld zijn de schaaleffecten te beperkt. Voor situaties zoals die voorkomen in de praktijk, nadert de Darcy term in het model, die de weerstand in het watervoerend pakket karakteriseert, de nul. Vertaald naar het onderhavig onderzoek betekent dit dat de dikte en doorlatendheid van het watervoerend pakket volgens de berekeningen bijna geen invloed hebben boven een bepaalde waarde. Dit is echter niet natuurgetrouw, want doorlatendheid van grond bepaalt in hoofdzaak de grondwaterstroming en is dus sterk gecorreleerd aan het meevoeren van zandkorrels ofwel piping. Het berekeningsresultaat van het kritieke verval hangt in de Shields-Darcy model (bijna) volledig af van de stroming in het pipingkanaal en de parameters die het begin van bewegen van de korrels in het pipingkanaal beschrijven. Terwijl de gevoeligheidsanalyse heeft uitgewezen dat de d_{15} wellicht een te grote invloed heeft in het rekenmodel. Dit maakt dat het Shields-Darcy model momenteel nog niet toepasbaar is in de praktijk.

Om toepassing van het Shields-Darcy model in de praktijk in de toekomst mogelijk te maken wordt aanbevolen om onderzoek te doen naar de schaaleffecten in het Shields-Darcy model. In het huidige model worden de parameters namelijk nauwelijks beïnvloed door het vergroten van de schaal. Daarnaast wordt aanbevolen om de invloed van de d_{15} nader te onderzoeken. Deze parameter heeft in het huidige model wellicht een te grote invloed. In de aangepaste rekenregel van Sellmeijer (2011) is de invloed van de d_{70} ook gereduceerd, nadat was vast komen te staan dat de rekenresultaten onvoldoende met de praktijk overeenkwamen. Verder dient voor het Shields-Darcy model de modelonzekerheid te worden vastgesteld en te worden verwerkt in de veiligheidsfactor y_{pipe} . Een meer algemene aanbeveling is om een pipinggevoelige locatie door te rekenen met beide rekenmodellen, waar zandmeevoerende wellen zijn geconstateerd tijdens het hoogwater van 1993, 1995, 2011 of 2018. Hierdoor kan gecontroleerd worden of de rekenmodellen dicht bij de werkelijkheid zitten. Eén van de kanttekeningen daarbij is dat de modellen niet volledig gevalideerd kunnen worden aan de hand van een waargenomen zandmeevoerende wel, aangezien niet gecontroleerd kan worden of de wel alleen duidt op heave of een ver gevorderd stadium van terugschrijdende erosie. Volledige validatie is alleen mogelijk met een voorbeeld van een volledig bezwaken dijk.

1. INLEIDING

Dit hoofdstuk bevat een introductie van het onderwerp. In dit hoofdstuk staat beschreven wat de aanleiding is geweest van dit onderzoek, wat de probleem- en doelstelling is en welke onderzoeksvragen hierbij horen, wat de relevantie is van dit onderzoek, voor wie dit onderzoek is uitgevoerd en voor wie dit rapport is geschreven en hoe dit onderzoek is uitgevoerd.

1.1 Aanleiding

In Nederland worden veel laaggelegen gebieden beschermd door waterkeringen, zoals dijken en dammen. Beheerders van deze waterkeringen moeten tenminste eens in de twaalf jaar beoordelen of hun keringen voldoen aan de wettelijke veiligheidseisen. Dit is voorgeschreven in de Waterwet. De manier waarop deze beoordeling moet worden uitgevoerd, is vastgelegd in een wettelijk beoordelingsinstrumentarium (WBI). Dit instrumentarium wordt iedere beoordelingsronde, in opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Milieu, door Rijkswaterstaat geactualiseerd. Dat gebeurt op basis van nieuwe kennis, inzichten uit onderzoek en ervaringen met het vorige instrumentarium. Voor de huidige beoordelingsronde, die loopt van 2017 tot 2023, is de actualisatie ingrijpender dan vorige keren. Reden hiervoor is de nieuwe veiligheidsnormering die per 1 januari 2017 is ingevoerd. Deze normering gaat uit van een overstromingsrisicobenadering, waarbij niet alleen wordt gekeken naar de kans op een overstroming, maar ook naar de gevolgen daarvan. Het instrumentarium voor de komende beoordelingsronde, het WBI 2017, is volledig gebaseerd op de nieuwe normering.

Onderdeel van de beoordeling is het beoordelen van piping bij dijken. Bij een hoge buitenwaterstand kan water onder een dijk door gaan sijpelen. Na verloop van tijd kan dit water zandkorrels uit de ondergrond gaan meevoeren door een gat of scheur in de slecht doorlatende deklaag binnendijs. Als dat gebeurt, ontstaat er een buisvormig kanaal (pipe), dat steeds verder groeit en de stabiliteit van de dijk vermindert. Uiteindelijk kan dit leiden tot het bezwijken van de dijk. Dit faalmechanisme wordt piping genoemd. Voor een uitgebreide beschrijving van het faalmechanisme, zie paragraaf 2.1.

De beoordeling op piping bestaat uit een eenvoudige toets, gedetailleerde toets op vak- en trajectniveau en de toets op maat. In de eenvoudige toets kan met beslisregels worden aangegeven of de kans op een overstroming door piping verwaarloosbaar klein is. In de gedetailleerde toets wordt het mechanisme met generieke landdekkende modellen beoordeeld. In de toets op maat kan de kans op overstroom door piping met locatie specifieke analyses worden beoordeeld. Uitgangspunt van de beoordeling is het beoordelen van grof naar scherp, dus eenvoudig waar het kan en gedetailleerd waar het moet. Figuur 1-1 geeft een visuele weergave van het getrapte toetsschema.

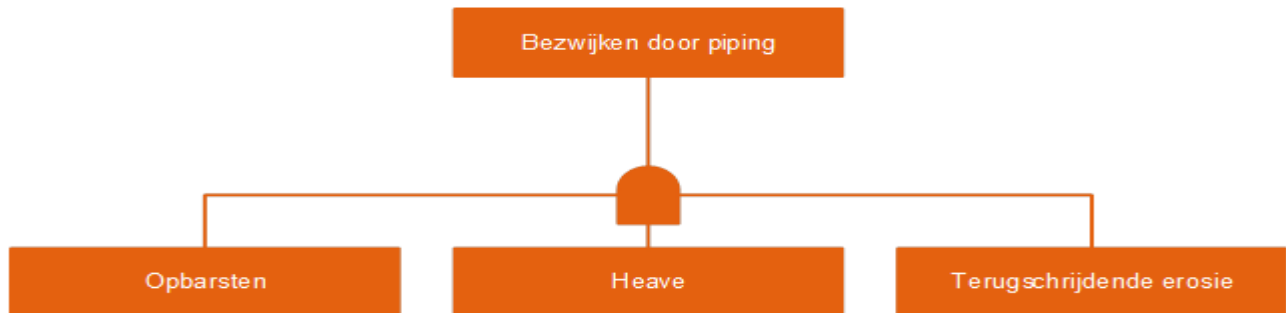


Figuur 1-1: Toetsen van grof naar scherp

In de gedetailleerde toets worden de mechanismen opbarsten, heave en terugschrijdende erosie beoordeeld (zie Figuur 1-2). Met behulp van de rekenregel van Sellmeijer, het heave criterium en de opbarstveiligheid wordt per vak en per traject een toets uitgevoerd. Met de rekenregel van Sellmeijer wordt gekeken wat het verval over de kering is waarbij de zandkorrels nog net in evenwicht zijn. Als dit verval – het kritieke verval – groter is dan het optredende verval, dan voldoet de dijk.

Er is echter discussie over toepasbaarheid van de rekenregel van Sellmeijer. De landelijke opinie is dat met de aangepaste rekenregel van Sellmeijer te conservatief gerekend wordt met als gevolg dat waterkeringen ten

onrechte worden afgekeurd of te robuust worden ontworpen. Daarnaast is er de afgelopen jaren meer bekend geworden over het faalmechanisme piping. Hierdoor zitten waterkeringbeheerders met grote onzekerheden over de pipinggevoeligheid van hun waterkeringen. Uit de praktijk komt dan ook de vraag om meer inzicht in de werkelijke pipinggevoeligheid van waterkeringen te bieden.



Figuur 1-2: Beoordelen op piping in de gedetailleerde toets

In een onlangs verschenen publicatie van Hoffmans & Van Rijn (2017) wordt een alternatief pipingmodel beschreven, het Shields-Darcy model. Dit artikel beschrijft een piping model dat fundamenteel verschilt van het Sellmeijer model in relatie tot de structuur van de vergelijking waarmee het kritieke hydraulische verval, waarbij terugschrijdende erosie optreedt, wordt berekend.

Aangezien de waterkeringbeheerders kampen met grote onzekerheden over de werkelijke pipinggevoeligheid van hun waterkeringen, en toepassing van de aangepaste rekenregel van Sellmeijer leidt tot afkeuring van veel waterkeringen, is er interesse voor het recent ontwikkelde Shields-Darcy model. Het is echter onduidelijk of dit pipingmodel toepasbaar is in de praktijk. In dit onderzoek is de praktische toepasbaarheid van het Shields-Darcy model onderzocht.

1.2 Probleemstelling

Het is onvoldoende duidelijk wat de toegevoegde waarde van het Shields-Darcy model is – ten opzichte van het Sellmeijer model – wanneer dit model zou worden toegepast in een concrete praktijksituatie.

1.3 Doelstelling

Doel van dit onderzoek is het verkrijgen van meer kennis en inzicht van het Shields-Darcy model als het gaat om de toepassing in een concrete praktijksituatie.

1.4 Onderzoeksvragen

Vanuit de probleemstelling is de onderstaande onderzoeksvraag geformuleerd:

Welk nieuw inzicht geeft het Shields-Darcy model – ten opzichte van het Sellmeijer model – wanneer dit model wordt toegepast bij het beoordelen van primaire waterkeringen op het faalmechanisme piping?

Om de hoofdvraag te beantwoorden zijn de onderstaande deelvragen opgesteld:

1. Wat zijn de theoretische verschillen tussen het Shields-Darcy model en het Sellmeijer model?
2. Wat zijn de verschillen in uitkomsten wanneer een aantal locaties worden doorgerekend met beide rekenmodellen op basis van dezelfde ondergrondgegevens?
3. Wat is de invloed van de invoervariabelen op de uitvoervariabelen van het Shields-Darcy model en het Sellmeijer model?
4. Wat is het verschil in grondwaterstroming tussen het Shields-Darcy model en D-Geo Flow?
5. Welk inzicht geven de metingen – behorend bij het hoogwater van januari 2018 – bij het vergelijken van het Sellmeijer model en het Shields-Darcy model?

1.5 Relevantie

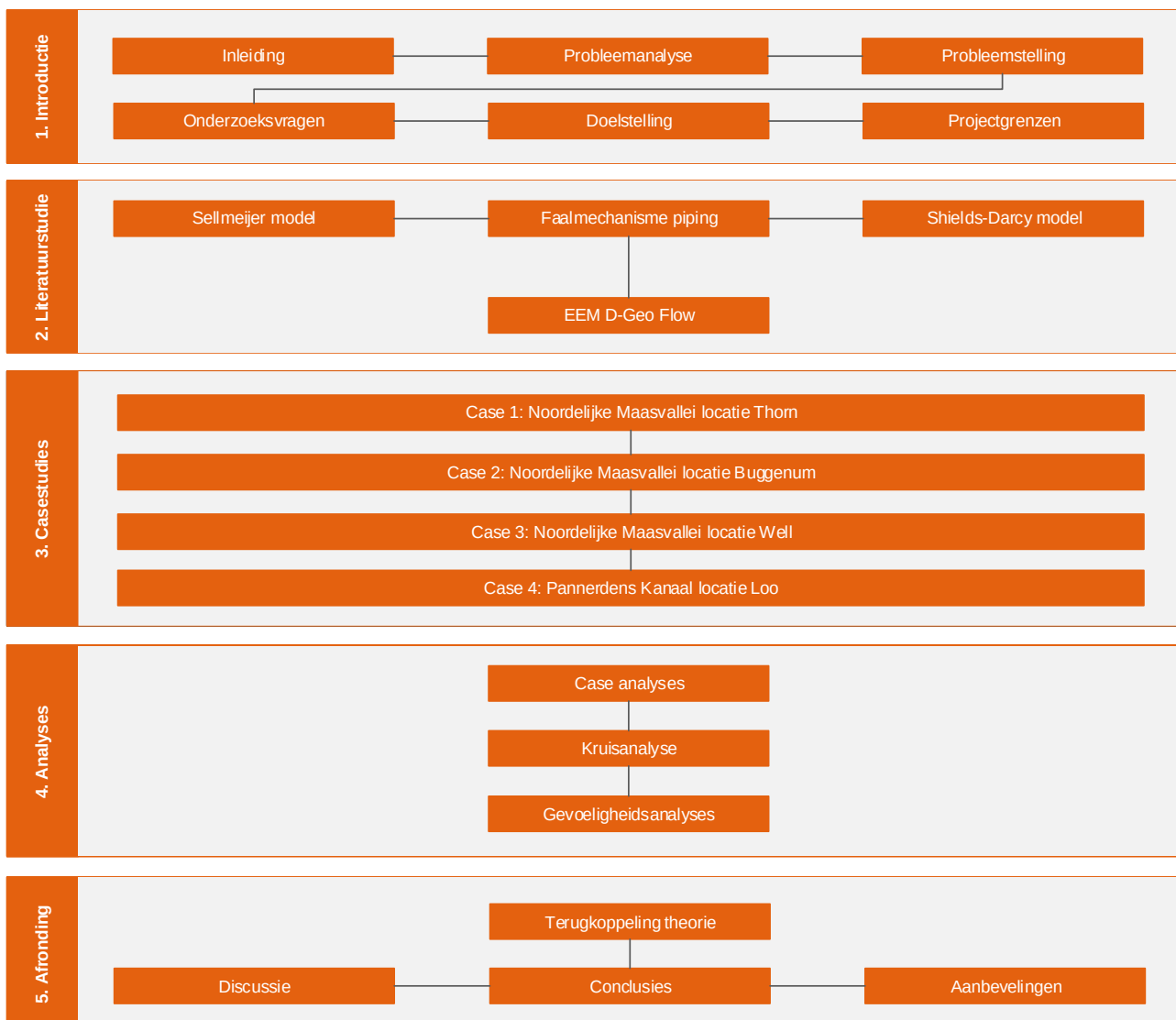
Dit onderzoek heeft zowel een wetenschappelijke als een maatschappelijke relevantie. Ondanks jarenlang onderzoek is er nog steeds geen uniforme formule waarmee het pipingproces overal in Nederland correct kan worden berekend. Daarnaast worden veel waterkeringen met de aangepaste rekenregel van Sellmeijer ten onrechte afgekeurd of te robuust ontworpen. De kennis die met dit onderzoek wordt verworven kan bijdragen aan het ontwikkelen van een pipingmodel dat het pipingproces correct voorspeld. Hierdoor worden waterkeringen minder robuust ontworpen en zijn er minder eindige grondstoffen nodig bij het versterken van keringen. Bijkomend voordeel is dat er minder machines nodig zullen zijn bij de versterking van waterkeringen en kan de CO₂-uitstoot gereduceerd worden. Hiermee kan dit onderzoek bijdragen aan een duurzamer Nederland.

1.6 Doelgroep

Dit onderzoek is in de eerste plaats geschreven voor Arcadis alsmede voor de docenten en studenten van de opleiding Land- en Watermanagement van de hogeschool Van Hall Larenstein. In de tweede plaats is dit rapport geschreven voor eenieder die geïnteresseerd is in het onderzoeksonderwerp.

1.7 Globale werkwijze

Het onderzoek is in onderstaand figuur grafisch weergegeven. Dit figuur geeft de verschillende fasen binnen het onderzoek weer en laat het verband zien tussen de verschillende rapportonderdelen.



Figuur 1-3: Onderzoeksmodel

Fase 1: Introductie

In de eerste fase van het onderzoek is het projectplan opgesteld. Hierin staat beschreven hoe het project zou worden uitgevoerd. Hierin zijn de volgende onderdelen aan bod gekomen: inleiding, onderzoeksopbouw, projectactiviteiten, kwaliteit, projectorganisatie, planning, projectgrenzen en risicoanalyse. Het projectplan is als apart rapport opgenomen in Bijlage 0.

Fase 2: Literatuurstudie

De tweede fase betreft de literatuurstudie. Hierin staan de bestaande theorieën en ideeën beschreven die betrekking hebben op het onderwerp van het onderzoek. In deze fase zijn de belangrijkste begrippen uit de probleemstelling en de onderzoeksvragen onderzocht, beschreven en afgebakend. Dit betreft de volgende begrippen: faalmechanisme piping, analytisch Sellmeijer model, analytisch Shields-Darcy model en het numerieke model D-Geo Flow.

Fase 3: Casestudies

In de derde fase van het onderzoek zijn de casestudies uitgevoerd. Om te achterhalen wat de praktische toepasbaarheid is van het Shields-Darcy model, is het model tezamen met het Sellmeijer model toegepast in een concrete praktijksituatie. In dit onderzoek is gekozen voor een meervoudige casestudie, waarbij in totaal 4 locaties worden bestudeerd. Binnen de cases zijn allereerst alle beschikbare gegevens bestudeerd. Aan de hand van de beschikbare gegevens zijn de invoerwaarden van de rekenmodellen vastgesteld.

Fase 4: Analyses

In de vierde fase zijn voor iedere locatie analytische berekeningen gemaakt met beide rekenmodellen. Daarnaast is er voor de locatie Buggenum een numerieke berekening gemaakt met een eindige elementen model (EEM) D-Geo Flow om de verschillen in grondwaterstroming tussen de analytische en numerieke berekeningen te belichten. Ten slotte zijn er in deze fase gevoeligheidsanalyses uitgevoerd om de gevoeligheid van de analytische rekenmodellen vast te stellen.

Fase 5: Afronding

De laatste fase betreft de afronding van het onderzoek. In deze fase is allereerst de onderzoeksvraag beantwoord in de conclusie. In de discussie is vervolgens ingegaan op de resultaten van het onderzoek en zijn de beperkingen van het onderzoek besproken. Ter afronding van het onderzoek zijn tenslotte aanbevelingen gegeven ten aanzien van het vraagstuk.

1.8 Leeswijzer

Dit rapport is als volgt ingedeeld:

Hoofdstuk	Inhoud
2 Literatuurstudie	• Beschrijving faalmechanisme piping • Theorie analytisch model van Sellmeijer • Theorie analytisch model van Shields-Darcy • Theorie eindige elementen rekenplatform D-Geo Flow • Vergelijking analytische rekenmodellen
3 Casus	• Introductie van de casus • Beschrijving van het onderzoeksgebied
4 Analyses	• Motivatie uitgevoerde analyses • Beschrijving uitgevoerde analyses • Resultaten uitgevoerde analyses
5 Conclusies en aanbevelingen	• Conclusies • Discussie • Aanbevelingen

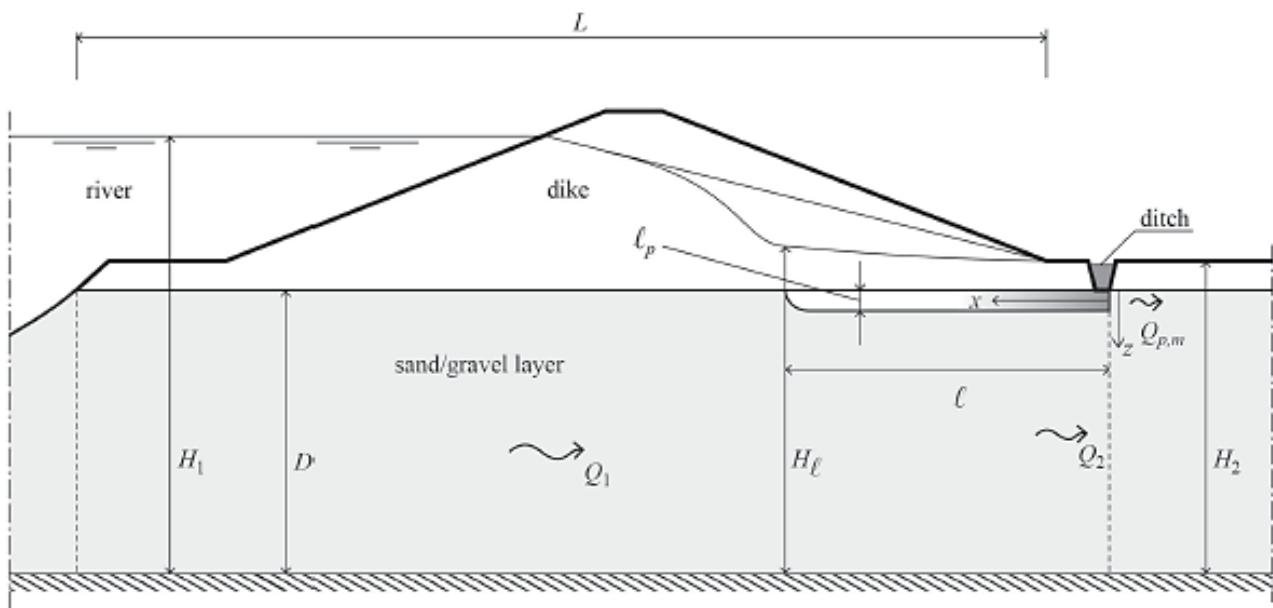
2. LITERATUURSTUDIE

In dit hoofdstuk staan de bestaande theorieën en ideeën beschreven die betrekking hebben op het onderwerp van het onderzoek. In dit hoofdstuk worden de belangrijkste begrippen uit de probleemstelling en de onderzoeksvragen beschreven en afgebakend. Dit betreft de volgende begrippen: faalmechanisme piping, analytisch Sellmeijer model, analytisch Shields-Darcy model en het numerieke model D-Geo Flow.

2.1 Faalmechanisme piping

Piping is een van de mechanismen waardoor dijken kunnen bezwijken. Andere bezwijkmechanismen zijn bijvoorbeeld overloop en overslag (door onvoldoende hoogte), macro-stabiliteit, micro-stabiliteit en zettingsvloeiing.

Piping is gedefinieerd als het ontstaan van holle ruimte onder een waterkering (dijk, dam of kunstwerk), ten gevolge van een geconcentreerde kwelstroom waarbij gronddeeltjes worden meegevoerd (Förster, Van den Ham, Calle, & Kruse, 2012). Het begin van bewegen van gronddeeltjes hangt af van zowel de belasting als de erosiebestendigheid. De belasting wordt gevormd door een stijghoogteverschil over een slecht doorlatende laag, wat het verschil is tussen het stromingsniveau in rivieren (H_1) en het maaiveld aan de landzijde (H_2) (zie Figuur 2-1). De kwelweglengte, de permeabiliteit en de verdeling van de gronddeeltjes in de zandlaag zijn bepalend voor de erosieweerstand.

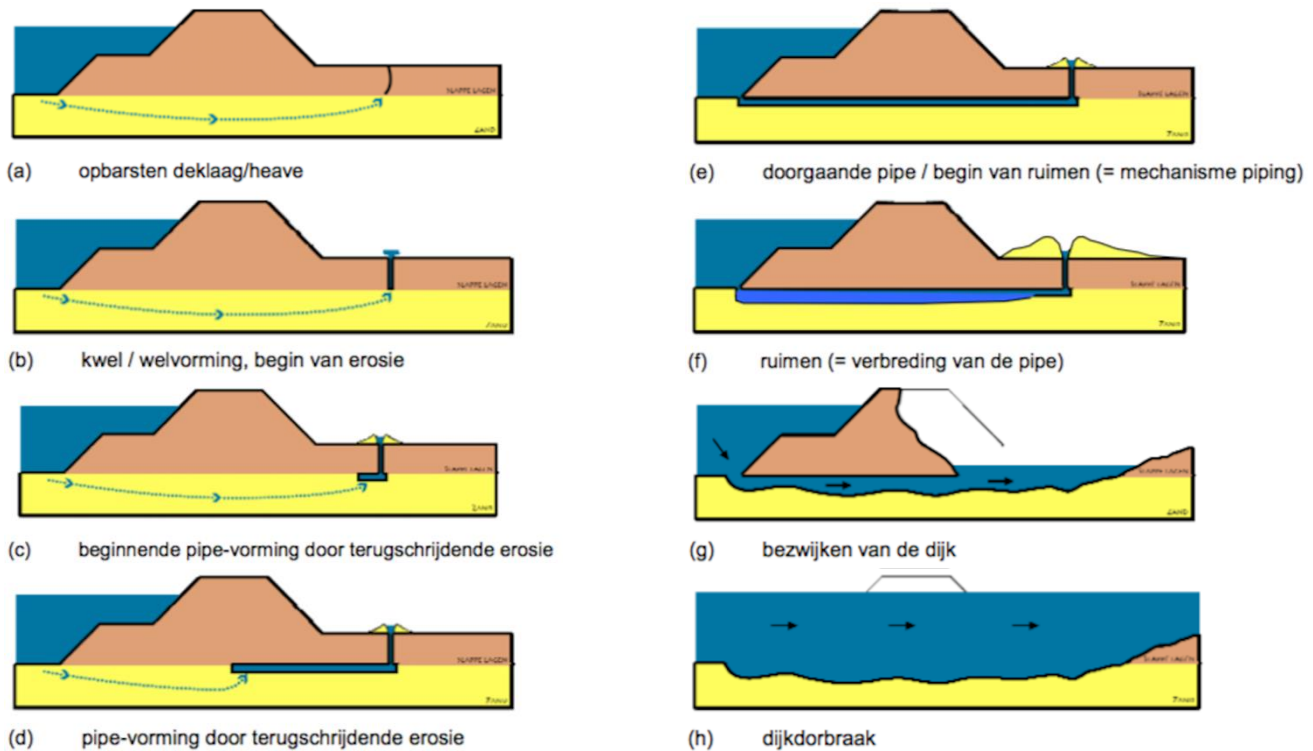


Figuur 2-1: Definitieschets piping

(Hoffmans G. , 2016)

Een voorwaarde voor het optreden van piping is kwelstroming onder de waterkering door. Het kwelwater treedt aan de binnenzijde van de constructie uit. Het debiet dat onder de waterkering doorstroomt is afhankelijk van de dikte en de doorlatendheid van de watervoerende zandlaag en het verval tussen de binnen- en buitenzijde van de waterkering.

Het erosieproces, dat veel voorkomt bij veel in Nederland aanwezige dijken, is geschetst in Figuur 2-2. De hierin geschetste bodemopbouw is typisch voor veel in Nederland voorkomende dijken. De bodemopbouw, zoals geschetst in dit figuur, bestaat uit een deklaag van klei of veen, gevolgd door een zandpakket. De deklaag is cohesief en zowel in horizontale als verticale richting relatief ondoorlatend. De onderliggende zandlaag is relatief goed doorlatend. In deze laag zal doorgaans horizontale grondwaterstroming optreden. Deze laag wordt daarom ook de watervoerende zandlaag of het watervoerend pakket genoemd.



Figuur 2-2: Verschillende fasen bij het ontstaan van piping
(Förster, Van den Ham, Calle, & Kruse, 2012)

Bij een voldoende hoge buitenwaterstand kunnen achtereenvolgens de in het navolgende beschreven fasen optreden (Förster, Van den Ham, Calle, & Kruse, 2012).

Opdrijven van de deklaag

Wanneer de watervoerende zandlaag in verbinding staat met het buitenwater, zal bij een toenemende buitenwaterstand de horizontale grondwaterstroming in de zandlaag op gang komen, waardoor de waterspanningen in de zandlaag zullen toenemen. De stijghoogte van het grondwater in de watervoerende laag is doorgaans lager dan de buitenwaterstand, maar kan wel hoger zijn dan de grondwaterspiegel in de deklaag of zelfs hoger dan het maaiveld.

Wanneer de stijghoogte van het grondwater in de watervoerende zandlaag hoger is dan de grondwaterspiegel in de deklaag of zelfs hoger dan het maaiveld, ontstaat er een wateroverdruk in de zandlaag ten opzichte van de deklaag. Wanneer de waterspanningen ter plaatse van de afdekkende, slecht doorlatende laag aan de binnenzijde groter wordt dan het gewicht van die laag, zal deze gaan opdrijven.

Opbarsten van de deklaag en het ontstaan van wellen

Wanneer de overdruk groot genoeg is, zal het grondwater in de zandlaag een uitweg naar boven forceren. Door het opdrijven van de deklaag kunnen scheurtjes in de afdekkende laag ontstaan. Aangezien de weerstand in de scheurtjes lager is dan in de omringende deklaag, zal het kwelwater zich door de scheurtjes een weg zoeken naar het maaiveld. Dit wordt opbarsten van de deklaag genoemd (Figuur 2-2a). Na verloop van tijd ontstaat in de deklaag een kanaal door het schuren van zand langs de wand van de scheurtjes, het zogenaamde opbarstkanaal, en ontstaan er wellen op het maaiveld of op de waterbodem (Figuur 2-2b)

Eroderen van de zandlaag

Door uittredend kwelwater worden zanddeeltjes uit de zandlaag naar het opbarstkanaal getransporteerd. Het opbarstkanaal wordt daardoor opgevuld met zand dat zich in een geïndividueerde toestand bevindt. De stromingsweerstand in het opbarstkanaal neemt daardoor toe. Dit mechanisme wordt heave genoemd, wat in de volksmond drijfzand wordt genoemd en met name optreedt bij verticaal uittredend grondwater. Op dit punt zijn er twee mogelijkheden:

- a. Door de toegenomen weerstand neemt de stroomsnelheid ter plaatse van het uittredepunt in de zandlaag zodanig af dat het erosieproces stopt en de wel “schoon” water gaat produceren (Figuur 2-3, links);
- b. De stroomsnelheid neemt onvoldoende af, waardoor de aanvoer van zand naar het opbarstkanaal blijft voortduren. Als het verval over de waterkering voldoende hoog blijft, is de stroming krachtig genoeg en wordt steeds meer zand uit de zandlaag in de omgeving van het opbarstkanaal geërodeerd. Dit geërodeerde zand wordt door de kwelstroom via het opbarstkanaal naar het maaiveld meegevoerd en rondom de uitstroomopening van de wel afgezet. Daar ontstaat dan een zandkrater (Figuur 2-3, rechts). De diameter van het opbarstkanaal kan sterk variëren afhankelijk van de stroomsnelheid en de erodeerbaarheid van het materiaal in de deklaag. In de zandlaag ontstaan holle ruimten ter plaatse van het opbarstkanaal, die zich bij een aanhoudende buitenwaterstand bovenin de zandlaag in de vorm van kanaaltjes (pipes) richting het buitenwater uitbreiden. Dit mechanisme wordt terugschrijdende erosie genoemd (Figuur 2-2c/d).



Figuur 2-3: Water- en zandmeevoerende wellen

Links watervoerende wel (De Bruin, 2013), Rechts zandmeevoerende wel (waterschap Rivierenland, 2018)

Het ontstaan van doorgaande pipes

Bij een voldoende groot verval over de waterkering blijven de pipingkanaaltjes groeien, tot ze het buitenwater bereiken. Wanneer dit gebeurt ontstaat er een open verbinding tussen het buitenwater en het uittredepunt (opbarstkanaal), waardoor de waterkering onderloops is geworden (Figuur 2-2e).

Verbreden van het doorgaand pipingkanaal richting binnenzijde

Zodra het pipingkanaaltje contact maakt met het buitenwater, treedt het ruimproces op. Bij het ‘ruimen’ wordt door een drukgolf, die met de stroom meeloopt, het pipingkanaaltje vanaf bovenstroomse naar de benedenstroomse kant versneld geërodeerd (Figuur 2-2f).

Bezwijken van de waterkering

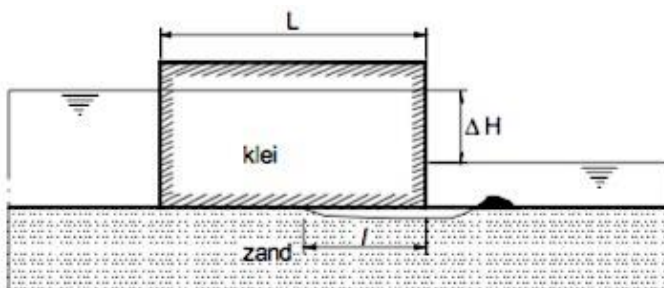
Uiteindelijk zal dit, naar alle waarschijnlijkheid, leiden tot holle ruimten onder de waterkering. Wanneer deze te groot worden treedt verzakking en breuk op en zal het dijklichaam bezwijken (Figuur 2-2g). Bij voldoende hoogwater zal een bres in de dijk ontstaan en tot dijkdoorbraak leiden (Figuur 2-2h).

2.2 Beschrijving rekenmodellen en rekenregels

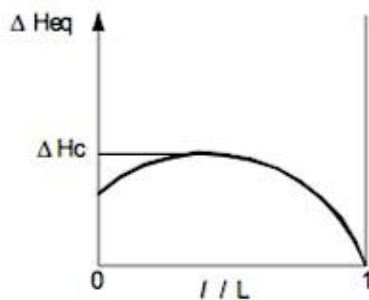
Het faalmechanisme piping kan door verschillende rekenmodellen en rekenregels worden beschreven. Binnen het huidige beoordelingsinstrumentarium wordt voor het rekenen aan het faalmechanisme terugschrijdende erosie gebruik gemaakt van de aangepaste rekenregel van Sellmeijer uit 2011. Een alternatief rekenmodel, waarmee eveneens gerekend kan worden aan terugschrijdende erosie, is het Shields-Darcy model. Om complexe situaties te kunnen beoordelen is het eindige elementen model D-Geo Flow ontwikkeld. Dit model bevat een pipingmodule, gebaseerd op het Sellmeijer model, om bij een gegeven waterstandsverloop te kunnen beoordelen of piping op kan treden. In de volgende paragrafen worden deze rekenmodellen nader toegelicht.

2.2.1 Sellmeijer model

Door Sellmeijer (1988) is een mathematisch rekenmodel voor terugschrijdende erosie ontwikkeld. Dit rekenmodel is gebaseerd op een combinatie van stroming door een watervoerende zandlaag (met homogene doorlatendheden en een constante dikte die zich uitstrekt tot ver voorbij het uittredepunt), stroming door het pipingkanaal en het krachterevenwicht op de korrel. Het rekenmodel is gebaseerd op een configuratie van de ondergrond zoals weergegeven in Figuur 2-4a. Onder invloed van het verval over de waterkering vindt grondwaterstroming plaats in de zandlaag onder de waterkering. Aangenomen wordt dat zich een pipingkanaal ontwikkeld heeft met de lengte l . Sellmeijer modelleert dit pipingkanaal als een spleet onder de constructie. In het pipingkanaal vindt laminaire stroming plaats richting het opbarstkanaal. Op de zandkorrels, die op de rand van het pipingkanaal en de zandlaag liggen, worden krachten uitgeoefend door uittredende grondwaterstroming en door de stroming van het water in het pipingkanaal.



(a)



(b)

Figuur 2-4: Uitgangspunten rekenmodel van Sellmeijer

(a) Basisconfiguratie rekenmodel van Sellmeijer

(b) Evenwichtsverval ΔH_{eq} als functie van l/L , kritiek verval ΔH_c volgens de theorie

(Förster, Van den Ham, Calle, & Kruse, 2012)

Het oorspronkelijke wiskundige model van Sellmeijer (1988) bestaat uit een koppeling van:

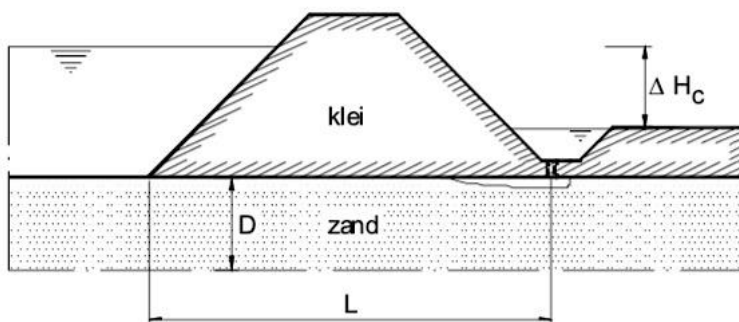
1. De potentiaalvergelijking voor de beschrijving van grondwaterstroming in de zandlaag;
2. Een vergelijking voor laminaire stroming van het water door de spleet onder de constructie;
3. Een evenwichtsvergelijking van de werkende krachten op een korrel op een bodem van het pipingkanaal.

Met behulp van deze vergelijkingen wordt berekend wat het maximale verval over de constructie is, waarbij de zandkorrels nog net in evenwicht zijn. Dit verval is afhankelijk van de verhouding l/L tussen de lengte l van het pipingkanaal en de lengte L van de constructie, de doorlatendheid van het watervoerende zandpakket, de sleepkrachtcoëfficiënt en de diameter en rolweerstand van de zandkorrels in het pipinggevoelige bovenste gedeelte van het watervoerend pakket.

Dit grensevenwicht werd door Sellmeijer (1988) beschreven door het zogenaamde vier-krachtenmodel. Sellmeijer veronderstelde dat de kracht op een korrel op de bodem van het pipingkanaal in de richting van het kanaal bestaat uit twee horizontale krachten (sleepkracht en horizontale stromingsdruk) en twee verticale krachten (verticale stromingsdruk en eigengewicht korrel). Deze veronderstelling is alleen juist als de korrel

goed ingebed is tussen de andere korrels. Voor een grote korrel die uitsteekt in de pipe, waaromheen de andere korrels al zijn afgevoerd, is dit niet meer het geval. Het vier-krachtenmodel is daarom in 2006 aangepast naar een twee-krachtenmodel. In dit model worden bij de definitie van het grensevenwicht de horizontale en de verticale stromingsdruk niet meer meegenomen.

Bij het berekenen van het maximale verval over de constructie wordt een stationaire toestand beschouwd. Het verval waarbij de zandkorrels net in evenwicht zijn, is afhankelijk van de lengte van het pipingkanaal en is als functie van L/L uitgezet in Figuur 2-4b. Volgens de theorie van Sellmeijer zou bij een verhouding $L/L \approx 0,5$ het verval het grootst zijn. Met dit rekenmodel is door Sellmeijer een groot aantal numerieke berekeningen gemaakt van het kritieke verval, voor verschillende combinaties van parameters die een rol spelen. Vervolgens is door nauwkeurige curve-fitting op deze berekeningsresultaten een benaderende analytische formule afgeleid. In een vervolgonderzoek (Sellmeijer, Calle, & Slip, 1989) is een soortgelijke rekenexercitie uitgevoerd voor een ondergrondconfiguratie die in Figuur 2-5 is weergegeven. Aan de hand van een modelproef op grote schaal in de Deltagoot van Deltares is deze formule gevalideerd (Silvis, 1991).



Figuur 2-5: Basisconfiguratie rekenmodel Sellmeijer

(Förster, Van den Ham, Calle, & Kruse, 2012)

Het model en de rekenregel van Sellmeijer zijn in 2011 opnieuw gekalibreerd op basis van nieuwe gegevens van experimenten. De invloed van zandparameters is door middel van een multivariate analyse op de resultaten van kleine- en medium-schaalexperimenten onderzocht en gekwantificeerd. Deze analyse geeft een empirische relatie tussen de verschillende zandeigenschappen en het verval dat leidt tot een doorgaand pipingkanaal. Mede op basis van deze multivariate analyse is een aangepaste rekenregel van Sellmeijer afgeleid (Knoef, Sellmeijer, Lopez, & Luijendijk, 2009).

De oorspronkelijke regel van Sellmeijer (1988) is gebaseerd op een stromingsberekening en een uitwerking van het krachtenevenwicht. In deze regel is de fysica van het pipingproces meegenomen. In de aangepaste rekenregel van Sellmeijer is dat gedeeltelijk nog het geval. Waarschijnlijk is de fysische beschrijving voor deze parameters onvolledig (Förster, Van den Ham, Calle, & Kruse, 2012). Op dit moment is er nog geen betere fysische beschrijving en is het verband tussen die parameters en het kritieke verval alleen empirisch vastgesteld op basis van proeven en de multivariate analyses. De op deze manier gevonden verbanden zijn alleen geldig binnen de range waarbinnen de proeven zijn uitgevoerd.

De regel is afgeleid en gevalideerd voor Nederlandse zanden met een korreldiameter d_{70} tussen de 150 en 500 μm , waarbij de relatieve dichtheden groter zijn dan 50% en de uniformiteit varieert tussen 1,5 en 2,5. In deze aangepaste rekenregel, die gebaseerd is op het tweekrachtenmodel, is de relatieve dichtheid als extra parameter toegevoegd en is de invloed van de d_{70} verminderd. Ondanks dat de fysica ervan nog niet goed begrepen is, is dit volgens de uitgevoerde metingen de juiste plaats.

De huidige rekenregel van Sellmeijer is een nauwkeurige curve-fit gebaseerd op duizenden pipingberekeningen die gemaakt zijn met behulp van MSEEP. De herziene rekenregel is weergegeven in onderstaande vergelijkingen (1 t/m 4).

$$\Delta H_c = L \cdot F_{\text{resistance}} \cdot F_{\text{scale}} \cdot F_{\text{geometry}} \quad (1)$$

$$F_{resistance} = \frac{\gamma'_p}{\gamma_w} \{ \eta \tan(\theta) \} \left(\frac{RD}{RD_m} \right)^{0,35} \quad (2)$$

$$F_{scale} = \frac{d_{70m}}{\sqrt[3]{\kappa L}} \left(\frac{d_{70}}{d_{70m}} \right)^{0,4} \quad (3)$$

$$F_{geometry}^{MSeep} = F(G)^{standarddike} = 0,91 \cdot \left(\frac{D}{L} \right)^{\frac{0,28}{2,8} - 1 + 0,04} \quad (4)$$

In Bijlage B staat een uitgebreide beschrijving van de invoerparameters die voorkomen in de in 2011 aangepaste rekenregel van Sellmeijer. In deze rekenregel kunnen drie factoren worden onderscheiden: een resistance, een scale en een geometry factor. De resistance factor beschrijft het grensevenwicht van zandkorrels op de bodem van het pipingkanaal. De tweede factor reflecteert de verhouding tussen de processchaal van het mechanisme dat voor korreltransport zorgt en de processchaal van de grondwaterstroming die dit transportmechanisme aandrijft. De laatste term beschrijft de invloed van de vorm van de ondergrond op de grondwaterstroming. Deze is afhankelijk van de verhouding tussen dikte en lengte van aanwezige zandlagen. De geometry factor is situatieafhankelijk en kan worden bepaald met het grondwaterstromingsmodel MSEEP. Voor een standaard dijkconfiguratie met een homogene zandlaag onder het ondoorlatende dijklichaam wordt de factor benaderd door:

$$F(G)^{standarddike} = 0,91 \cdot \left(\frac{D}{L} \right)^{\frac{0,28}{2,8} - 1 + 0,04} \quad (5)$$

Voor het berekenen van een realistisch kritieke verval is de toepassing van een meer-lagensysteem in MSEEP betrouwbaarder dan een een-laag systeem in een analytische berekening. De intrinsieke doorlatendheid van de pipinggevoelige bovenste zandlaag kan worden afgeleid uit schattingen van karakteristieke waarde van de specifieke doorlatendheid van de pipinggevoelige bovenste zandlaag.

De relatie is:

$$\kappa = \frac{\nu}{g} k = 1,35 \cdot 10^{-7} k \quad (6)$$

Waarin ν de kinematische viscositeit is – welke voor grondwater van 10° Celsius ongeveer $1,33 \cdot 10^{-6} m^2/s$ bedraagt – en g de versnelling van de zwaartekracht ($9,81 m/s^2$).

0,3d-regel

In situaties met een deklaag van bijvoorbeeld klei en/of veen op een pipinggevoelige zandlaag, waarbij na opbarsten van de deklaag een verticale kwelweg ontstaat ter grootte van de dikte van de deklaag, wordt voor de bepaling van de waterkerende hoogte bij toepassing van de rekenregel van Sellmeijer het verval over de waterkering gereduceerd met een factor 0,3d (0,3 maal de dikte van de deklaag). Dit wordt toegepast vanwege de weerstand die veroorzaakt wordt door de gefluidiseerde zandkorrels in het opbarstkanaal, zoals uitgelegd in paragraaf 2.1 (eroderen van de zandlaag).

In laboratoriumproeven is het potentiaalverval gemeten over een kolom zand in een ronde pijp die door verticale grondwaterstroming in fluïdisatie is gebracht (Sellmeijer, 1981). Uit de proeven blijkt dat het verval over de gefluidiseerde zandkolom ongeveer 0,6 keer de hoogte van de zandkolom bedraagt. Voor het pipingmechanisme is het potentiaalverval tussen buitenwater en uittredepunt in de zandlaag onder het opbarstkanaal maatgevend. Dit verval is gelijk aan het totale verval over de waterkering minus het verval over het opbarstkanaal. Indien rekening wordt gehouden met een veiligheidsfactor van 2, dan is het potentiaalverval over het opbarstkanaal ongeveer 0,3 keer de dikte. De controleregel voor het mechanisme piping luidt uiteindelijk als volgt:

$$(\Delta H - 0,3d) \leq \Delta H_c \quad (7)$$

Veiligheidsfilosofie toetsregel Sellmeijer

Voor het Sellmeijer model moeten veiligheidsfactoren worden afgeleid ten behoeve van het uitvoeren van toetsingen en het ontwerpen van dijkversterkingen. Dit betreft de veiligheidsfactor γ_{pipe} en de schematiseringsfactor γ_b . Deze veiligheidsfactoren worden toegepast om alle onzekerheden omtrent de toetsing mee te nemen in het beoordelen van de waterkeringen. Door het toepassen van de veiligheidsfactoren, luidt het criterium voor de toetsing op piping als volgt:

$$(\Delta H - 0,3d) \leq \frac{\Delta H_c}{\gamma_{pip}\gamma_b} \quad (8)$$

Voor het bepalen van de veiligheidsfactor bij piping wordt de modelonzekerheid, het vereiste veiligheidsniveau, de lengte van de dijkkring en de toegestane kansbijdrage door piping aan het falen van de waterkering meegenomen. Aangezien het vereiste veiligheidsniveau en de lengte van de dijkkring kunnen verschillen, kan de veiligheidsfactor per dijkkring verschillen. De toetsregel kan daarnaast gebruikt worden om de kans op optreden van het mechanisme te vergelijken met de toelaatbare kans. De veiligheidsfactor wordt afgeleid op basis van de beoogde toelaatbare kans op optreden van het mechanisme. Voor de wijze waarop de veiligheidsfactor wordt afgeleid, wordt verwezen naar “SBW Hervalidatie piping” (Deltares, 2010).

Naast het gebruik van een veiligheidsfactor dient er rekening gehouden te worden met de onzekerheid in de ondergrond. Voordat met een toetsing kan worden begonnen dient de ondergrond van de waterkering eerst grondmechanisch te worden geschematiseerd. De kwaliteit van deze schematisatie bepaalt de grootte van de zogenaamde schematiseringsfactor, die medebepalend is voor het toetsresultaat.

De schematiseringsfactor heeft een range van 1,0 tot 1,3. Hoe meer zekerheid over de ondergrond, door aanvullend grondonderzoek, hoe meer uitspraken gedaan kunnen worden over de scenario's en hoe kleiner de schematiseringsfactor. Wanneer veel onzekerheid is over de ondergrond, dient een hoge factor te worden toegepast.

2.2.2 Shields-Darcy model

Een ander rekenmodel waarmee het kritieke verval over de waterkering kan worden berekend is het Shields-Darcy model. Dit rekenmodel verschilt fundamenteel van het Sellmeijer model als het gaat om de structuur van de formule die gebruikt wordt om de kritieke hydraulische gradiënt te berekenen. Door de kritieke hydraulische gradiënt te vermenigvuldigen met de aanwezige kwelweglengte, kan (net zoals bij het Sellmeijer model) het kritieke verval worden berekend waarbij de zandkorrels nog net in evenwicht zijn.

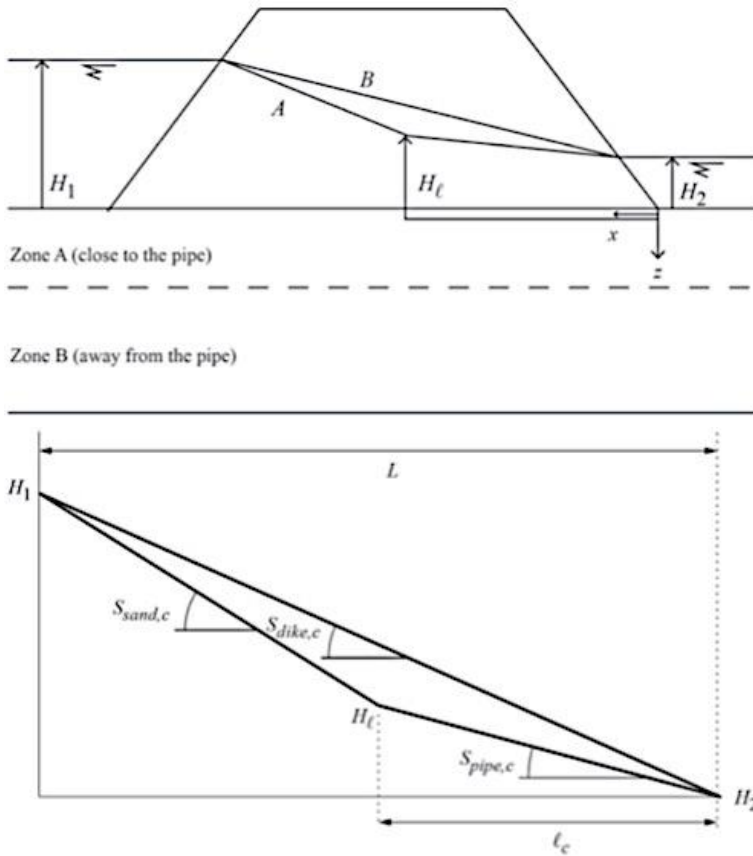
In dit model is de laminaire grondwaterstroming in de zandlaag beschreven aan de hand van de wet van Darcy en de laminaire stroming in het pipingkanaal en de beginnende beweging van de zandkorrels zijn beschreven op basis van de vergelijkingen van Hagen-Poiseuille, Darcy-Weisbach en Shields. Het schuifspannings-concept van Grass is gebruikt om de effecten van niet-uniforme zandmengsels op piping op te nemen. (Hoffmans G. , 2016)

Weerstand van het grondwater

Het Shields-Darcy model benadert de 2D grondwaterstroming naar het pipingkanaal voor een homogene en isotrope zandlaag. De grondwaterstroming is geschematiseerd door twee zones te definiëren. Een zone A in de buurt van het pipingkanaal (waar een dip is in de hydraulische gradiënt) en een zone B op een diepte waarvan verondersteld wordt dat de grondwaterstroming richting het pipingkanaal geen invloed meer heeft op de hydraulische gradiënt (Figuur 2-6).

De dikte van zone A en B wordt niet rechtstreeks gedefinieerd, maar het concept van verdeelde stromingen is gebruikt bij het afleiden van vergelijkingen. In het Shields-Darcy model wordt verondersteld dat de hydraulische gradiënt ($S_{dike,c}$) onder te verdelen is in twee gradiënten, namelijk de hydraulische gradiënt in het pipingkanaal ($S_{pipe,c}$) en de hydraulische gradiënt tussen de rivier en het begin van de pipe ($S_{sand,c}$). Met de gradiënt $S_{dike,c}$ kan het kritieke verval berekend worden met behulp van de onderstaande vergelijking.

$$\Delta H_c = S_{dike,c} \cdot L \quad (9)$$



Figuur 2-6: Schematisering horizontale en verticale stroming kritieke gradiënten

(Hoffmans & Van Rijn, Hydraulic approach for predicting piping in dikes, 2017)

De kritieke hydraulische gradiënt ($S_{dike,c}$), waarbij de zandkorrels nog net in evenwicht zijn, kan berekend worden met de volgende vergelijking.

$$S_{dike,c} = S_{pipe,c} + \left(1 - \frac{l_c}{L}\right) (S_{sand,c} - S_{pipe,c}) \quad (10)$$

Hierin is $S_{dike,c}$ de hydraulische gradiënt tussen het intredepunt aan de rivierzijde en het uitredepunt in het achterland, l_c de lengte van de pipe en L de aanwezige kwelweglengte. Zodra het werkelijke verval (ΔH) groter wordt dan het kritieke verval (ΔH_c), komen de zandkorrels in beweging en zal het pipingkanaal

In het Shields-Darcy model wordt het faalmechanisme piping beschreven aan de hand van twee weerstanden, namelijk de kwelweerstand in het zandpakket van zone A en de weerstand in het pipingkanaal. Met toepassing van de wet van Darcy kan de grondwaterstroming voor de kritieke toestand als volgt worden beschreven, zie Hoffmans (2016) voor meer informatie met betrekking tot het modelleren van de grondwaterstroming:

$$Q_1 - Q_2 = Q_{1,A} = \frac{S_{sand,c}}{\Omega_{s,A}} = Q_{p,m,c} = \frac{S_{pipe,c}}{\Omega_{p,c}} \quad (11)$$

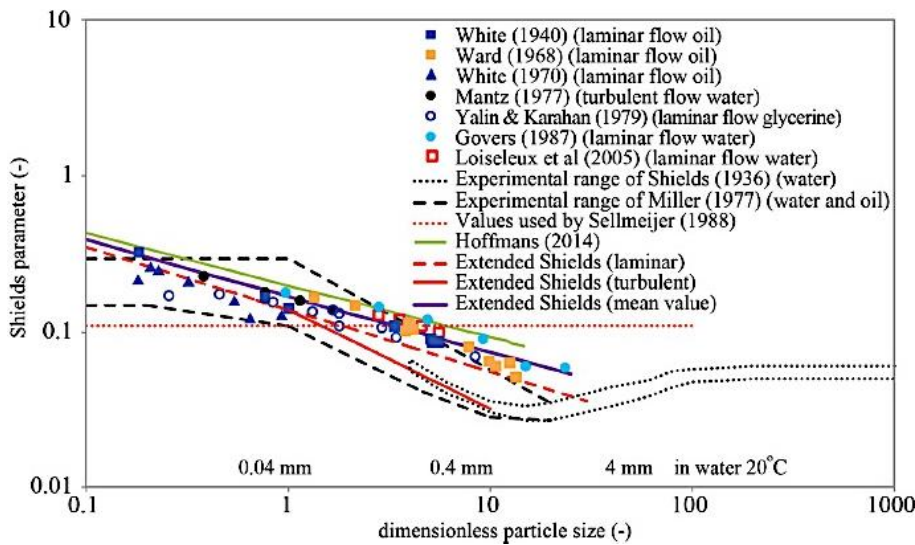
Hierin is Q_1 het debiet van het grondwater aan de rivierzijde en Q_2 het debiet van het grondwater aan de landzijde in zone B, $Q_{1,A}$ het debiet van het grondwater aan de rivierzijde in zone A, $Q_{p,m,c}$ de kritieke pipe afvoer aan de landzijde, $\Omega_{p,c}$ de kritieke pipe weerstand, $\Omega_{s,A}$ de kwelweerstand in zone A. Hierin wordt verondersteld dat al het grondwater in zone A richting de pipe stroomt, ervan uit gaande dat er geen water uit zone A stroomt. De kwelweerstand van het zandpakket is omgekeerd evenredig aan de transmissiviteit, oftewel kD_{ref} (doorlatendheid en dikte zandpakket zone A). Dit houdt in dat een toename van kD_{ref} leidt tot een afname van de weerstand in het zandpakket $\Omega_{s,A}$ en vice versa. Indien de weerstand in het zandpakket dermate afneemt dat $S_{sand,c}$ een ondergrens bereikt, is $S_{dike,c} = S_{sand,c} = S_{pipe,c}$. In dit geval is $S_{dike,c}$ volledig afhankelijk van de materiaaleigenschappen en niet van de geometrie van het zandpakket.

Begin van bewegen van de zandkorrels

Bij terugschrijdende erosie zijn twee typen erosie relevant voor het groeien van een pipe: erosie van het uiteinde van de pipe, waardoor de pipe in lengte toeneemt, ook wel primaire erosie genoemd, en erosie van de bodem en wanden van de pipe, waardoor deze dieper en wijder wordt, oftewel secundaire erosie (Hanses, 1985). Het Shields-Darcy model gaat uit van secundaire erosie. Wanneer de werkelijke gradiënt in de pipe groter is dan de kritieke gradiënt ($S_{pipe} > S_{pipe,c}$), wordt de pipe langer, breder en dieper. In het Shields-Darcy model wordt de kritieke Shields parameter voor laminaire stroming toegepast om de kritieke schuifspanning τ_c te berekenen.

$$\tau_c = \Psi_{lam,c}(\rho_s - \rho)gd_{50} \quad (12)$$

De kritieke Shields parameter is bepaald door middel van experimenten met laminaire en turbulente stroming. Uit de experimenten bleek de Shields parameter een functie te zijn van het Reynolds getal. In twee experimenten die uitgevoerd zijn door White (1940) met zand van 0,21 mm en 0,90 mm in volledig laminair regime (Reynoldsgetal $R < 1000$) in een kleinschalige goot met een sediment bed over de gehele lengte van de goot, varieerde de waarde Ψ_c van 0,15 tot 0,30. De resultaten van White staan in het uitgebreide Shields diagram (Figuur 2-7), tezamen met resultaten uit andere onderzoeken naar de kritieke Shields parameter.



Figuur 2-7: Shields diagram voor laminaire en turbulente stroming

(Van Rijn, 2014)

Hierin is de gemeten kritieke Shields parameter uitgezet als functie van de dimensioneloze D_* parameter (Van Rijn, 2014) met ν als de kinematische viscositeit:

$$D_* = d_{50} \left(\frac{(\rho_s - \rho)g}{\nu^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (13)$$

Figuur 2-7 toont aan dat de kritische Shields parameter afhankelijk is van de korreldiameter. Hoffmans (2014) heeft op basis van onderzoek van Govers (1987), Pilotti & Menduni (2001) en Loiseleux et al (2005) een relatie voorgesteld voor $\Psi_{lam,c}$ en D_* in de range van $0,15 \text{ mm} < d_{50} < 0,75 \text{ mm}$, voor algemene beweging van de zandkorrels (zie groene lijn in Figuur 2-7):

$$\Psi_c = 0,2(D_*)^{-1/3} \text{ voor } 2 \leq D_* \leq 15 \quad \text{algemene beweging} \quad (14)$$

Als er geen terugschrijdende erosie mag optreden, moet een ondergrens van de kritieke Shields parameter worden gekozen. Van Rijn (2014) definieerde (zie gestreepte rode lijn Figuur 2-7):

$$\Psi_c = 0,14(D_*)^{-0,4} \text{ voor } D_* \leq 30 \quad \text{geen beweging} \quad (15)$$

Shields-Darcy

De totstandkoming van $S_{pipe,c}$ wordt hier toegelicht. In het Shields-Darcy model zijn drie wetten fundamenteel voor het bepalen van de stroming in de pipe. Dit zijn:

1. De wet van Hagen-Poiseuille, die geldt voor laminaire stroming van een vloeistof door een cilindrische buis en de hydraulische gradiënt (S) beschrijft als:

$$S = \frac{2\nu U_p}{g R_h^2} \quad (16)$$

2. Darcy-Weisbach, waarmee de schuifspanningen (τ_0) van de wanden in het pipingkanaal berekend kan worden met:

$$\tau_0 = 2(R)^{-1} \rho U_p^2 = \frac{2\rho U_p^2}{R_h} \quad (17)$$

3. Shields relatie, waarmee de gemiddelde schuifspanningen berekend kunnen worden van zowel de wanden als van de bodem in pipingkanalen met:

$$\tau_0 = \Psi_{lam}(\rho_s - \rho)gd_{50} \quad (18)$$

Bovenstaande wetten zijn gebruikt voor het tot stand komen van vergelijking 19. Voor rechtvaardiging van deze vergelijking wordt verwezen naar Hoffmans (2016).

$$S_{pipe,c} = \frac{\sqrt{g}(\Psi_{lam,c}(\rho_s/\rho - 1)d_{15})^{3/2}}{\nu\sqrt{\alpha_R}} \quad (19)$$

Waarbij d_{15} de korreldiameter is waarbij 15% van de sedimentdeeltjes kleiner is, g de versnelling van de zwaartekracht, ν de kinematische viscositeit, ρ de dichtheid van water, ρ_s de dichtheid van zand en $\Psi_{lam,c}$ de kritieke Shields parameter. Hierbij dient opgemerkt te worden dat Hoffmans & Van Rijn (2017) voorgesteld hebben om de d_{15} te gebruiken in plaats van de d_{50} bij uniforme zandfracties, waarbij de verhouding tussen $d_{90}/d_{10} < 4$, aangezien de kleinere zandkorrels eerder eroderen dan de grotere zandkorrels (Grass, 1970). Uit onderzoek van Van Rijn (2007) blijkt dat bij niet-uniforme zandfracties, waarbij de verhouding tussen $d_{90}/d_{10} > 4$, een d_{50} of zelfs een d_{70} gebruik dient te worden in plaats van een d_{15} , aangezien de erosie van kleinere zandkorrels wordt verstoord door de grotere zandkorrels. Beide onderzoeken zijn gebaseerd op turbulente stroming.

$S_{pipe,c}$ staat voor het erosie criterium voor erosie in het pipingkanaal, waarvoor de volgende opmerkingen kunnen worden gemaakt:

- Wanneer de rivierwaterstand stijgt en als S_{pipe} de kritieke waarde overstijgt, dan ontwikkelen er zich pipingkanalen;
- Als S_{pipe} kleiner wordt dan de kritieke waarde stopt het terugschrijdende erosieproces;
- Stijgt de rivierwaterstand vervolgens weer, waardoor S_{pipe} zijn kritieke waarde overstijgt, dan start het terugschrijdende erosieproces opnieuw.

De totstandkoming van de tweede term, oftewel $(1 - l_c/L)(S_{sand,c} - S_{pipe,c})$, van vergelijking 9 wordt hieronder nader toegelicht.

Uit studies van Hoffmans (2016) en Hoffmans & Van Rijn (2017) blijkt dat de d_{50} gebruikt kan worden in de continuïteitsvergelijking van Darcy. Op basis van vergelijking 10 is vergelijking 20 afgeleid. Door de effectieve grondwaterafvoer aan de rivierzijde gelijk te stellen aan de kritieke grondwaterafvoer van de pipe aan de landzijde, kan $S_{sand,c} - S_{pipe,c}$ herschreven worden als:

$$S_{sand,c} - S_{pipe,c} = \frac{d_{50}\nu}{l_R KD} \quad (20)$$

Hierdoor kan $S_{dike,c}$ als volgt worden beschreven:

$$S_{dike,c} = S_{pipe,c} + \left(1 - \frac{l_c}{L}\right) \frac{d_{50}v}{l_R KD} \quad (21)$$

In vergelijking 10 vertegenwoordigd $S_{pipe,c}$ de Shields term en $(1 - l_c/L)(S_{sand,c} - S_{pipe,c})$ de Darcy term. Hierbij dient opgemerkt te worden dat in situaties met een dik ($D > 5$ m) watervoerend pakket en grof zand de KD waarde groter is en daardoor de weerstand kleiner wordt. Hierdoor wordt de Darcy term aanzienlijk minder en hangt de kritieke gradiënt van de dijk bijna volledig af van de materiaaleigenschappen (Shields term) en niet van de geometrie van de zandlaag (Darcy term). Echter bij een dun ($D < 5$ m) watervoerend pakket en fijn zand, neemt de weerstand toe en wordt de Darcy term groter.

De hydraulische gradiënt zoals weergegeven Figuur 2-6 suggereert een relatie van het type zoals vergelijking 22. Voor rechtvaardiging van deze relatie zie Hoffmans (2016).

$$\frac{l_c}{L} = \exp\left(-\left(\frac{\alpha_f D}{L}\right)^2 S_{pipe,c}\right) \quad (22)$$

Voor prototypevoorwaarden is de exacte waarde van de kritieke lengte van het pipingkanaal l_c niet van belang, omdat de term $(d_{50}v)/(l_R KD)$ ongeveer gelijk is aan nul. Het kan echter wel inzicht geven in de hoeveelheid zand dat door de pipe zal worden getransporteerd voordat de kritieke waarde wordt overschreden.

Vergelijking 19, 20 en 22 bevatten samen 3 onbekenden. Namelijk α_R (Reynolds coëfficiënt), l_R , (Lengte schaal) α_f (Grondwater coëfficiënt). Alle kalibratie coëfficiënten zijn gekalibreerd en gevalideerd door 60 kleinschalige en middelgrote schaalproeven. Bij deze proeven is gebruik gemaakt van verschillende zandmengsels (d_{50} varieerde van 0,15 mm tot 0,75 mm en de verhouding tussen d_{90} en d_{15} varieerde van 2 tot 9). De onbekende parameters zijn correct benaderd met een techniek die onafhankelijk is van de kalibratie (zie Hoffmans (2016) en Hoffmans & Van Rijn (2017) voor meer informatie).

In Bijlage B staat een uitgebreide beschrijving van de invoerparameters die voorkomen in het rekenregel van Shields-Darcy. Voor meer informatie over de totstandkoming van de kalibratieparameters wordt verwezen naar het artikel 'Hydraulic approach for predicting piping in dikes' van Hoffmans & Van Rijn (2017).

2.2.3 Eindige elementen model D-Geo Flow

Door verschillende wijzigingen in de veiligheidsbeoordeling voor piping in de afgelopen jaren, zoals het meenemen van het lengte-effect, de overgang naar de overstromingskansenbenadering, het vervallen van de regel van Bligh en aanpassingen in het Sellmeijer model (zoals beschreven in hoofdstuk 2.2.1), voldoen veel dijken niet meer aan de eisen. Door deze ontwikkelingen is de noodzaak ontstaan voor meer geavanceerde pipingberekeningen. Om dergelijke complexe situaties te kunnen beoordelen is D-Geo Flow ontwikkeld. D-Geo Flow bevat een pipingmodule, gebaseerd op het model van Sellmeijer, waarmee bij een gegeven waterstandsverloop beoordeeld kan worden of piping kan optreden. Dit numerieke grondwaterstromingsmodel is geschikt voor meer complexe ondergrondconfiguraties met meerdere lagen en anisotrope stroming. Het meenemen van gelaagdheid en anisotropie kan leiden tot een aanzienlijke vergroting van het kritieke verval.

Het model gaat, net als Sellmeijer, uit van drie componenten. Dat zijn: grondwaterstroming door de ondergrond, stroming in de pipe en het evenwicht van de zandkorrels in de pipe. De grondwaterstroming wordt bepaald door de wet van Darcy. De stroming in de pipe wordt berekend door de formule van Poiseuille. In die formule wordt de stroming in een cirkelvormig kanaal berekend, waarbij wordt uitgegaan van een laminaire stroming en een niet-samendrukbare vloeistof. Voor het bepalen van het evenwicht van de zandkorrels wordt de pipelengte handmatig ingevoerd. Hierbij wordt de pipelengte opgesplitst in meerdere elementen. Ieder element wordt afzonderlijk berekend (Deltares, 2018). Het modelleren van een D-Geo Flow model verloopt grofweg in vier stappen:

- Het opzetten van de geometrie en het toewijzen van materiaaleigenschappen met de bijbehorende parameters;
- Het kalibreren van het model in een stationaire situatie;
- Het kalibreren van het model in een niet-stationaire situatie; en
- Het simuleren van een hoogwater afvoergolf.

2.3 Vergelijking analytische rekenmodellen

Het Sellmeijer model en het Shields-Darcy model hebben veel overeenkomsten. Beide modellen proberen te voorspellen wat het kritieke verval is door het analyseren van de grondwaterstroming richting het pipingkanaal, de stroming door het pipingkanaal en de erosiecriteria voor het begin van bewegen van de zandkorrels. Daarnaast gaan beide modellen uit van 2D en laminaire grondwaterstroming in de pipes. In de onderstaande paragrafen worden de verschillen in benaderingswijzen toegelicht.

2.3.1 Grondwaterstroming

Sellmeijer heeft in 1988 een analytische rekenregel opgesteld voor 2D grondwaterstromingen in een watervoerend pakket met een oneindige diepte. In 1989 werd de rekenregel herzien en werd dit veranderd naar een homogene en een isotrope ondergrond met een eindige diepte. De rekenregel van Sellmeijer is later geïmplementeerd in het programma MSEP. MSEP is een numeriek model dat de stroming in meerdere ondergrondlagen kan berekenen. Met behulp van duizenden berekeningen in MSEP is, door middel van onderlinge kalibratie, de rekenregel van Sellmeijer 2011 tot stand gekomen. In die rekenregel is de geometrie factor een van de componenten die uiteindelijk het kritieke verval berekent. In de geometrie factor zitten de resultaten van MSEP verwerkt.

In het Shields-Darcy model wordt, evenals in het aangepaste model van Sellmeijer, uitgegaan van 2D grondwaterstromingen in een homogene en isotrope ondergrond. Het verschil in de benaderingswijze ligt echter in het definiëren van het watervoerend pakket. In het Shields-Darcy model wordt verondersteld dat het watervoerend pakket is op te splitsen in twee zones (Figuur 2-6). Een zone A, waarin de grondwaterstroming invloed heeft op de ontwikkeling van de pipe en al het grondwater naar de pipe toestroomt. Een zone B, waarin de grondwaterstroming geen invloed meer heeft op de ontwikkeling van de pipe (Van Beek & Hoffmans, 2017).

2.3.2 Stroming in het pipingkanaal

Zowel in het Sellmeijer model als in het Shields-Darcy model wordt uitgegaan van laminaire en onsamendrukbare stroming in de pipe. Sellmeijer zet de 2D benadering voort en gaat bij het berekenen uit van pipes met een oneindige breedte. Voor deze situatie loste Sellmeijer (1988) de Navier-Stokes vergelijking op, wat resulteerde in de Hagen-Poiseuille vergelijking voor de 2D benadering (Van Beek & Hoffmans, 2017):

$$\rho g \frac{d\phi}{dx} a^3 = 12q\mu \quad (23)$$

In het Shields-Darcy model wordt uitgegaan van cilindrische pipes met een hydraulische radius, die toepasbaar is voor verschillende vormen. Hiervoor wordt de volgende vergelijking gebruikt:

$$\pi \rho g S_{pipe} N R^4 = 1/2 \mu Q \quad (24)$$

Waarin R staat voor de hydraulische radius en N voor het aantal pipingkanalen. De belasting die werkt op de zandkorrels op de bodem van het pipingkanaal (schuifspanning) wordt in beide modellen anders beschreven. Sellmeijer gebruikt een beschrijving van schuifspanning voor oneindig brede pipingkanalen (vergelijking 25) en in het Shields-Darcy model wordt de schuifspanning beschreven zoals in vergelijking 26 voor pipingkanalen met een cilindrische hydraulische radius (Van Beek & Hoffmans, 2017).

$$\tau_w = \frac{a}{2} \rho g \frac{d\phi}{dx} \quad (25)$$

$$\tau_w = R \rho g S_{pipe} \quad (26)$$

De vorm van het pipingkanaal is relevant voor het verbinden van de stroming en het stijghoogteverlies aan de schuifspanning in het pipingkanaal. Onderzoek (Van Beek, Van Essen, Vandenboer, & Bezuijn, 2015) wijst uit dat het pipingkanaal relatief ondiep is in verhouding tot de breedte. De verhoudingen bleken te liggen in de orde van 7-13 voor twee geanalyseerde zandtypen. De consequentie voor het gebruik van vergelijkingen uitgaande van een hydraulische radius in plaats van een platte brede pipe zijn tot nog toe niet onderzocht, maar de benadering van Sellmeijer lijkt een voor de hand liggende keuze in toekomstige overwegingen.

2.3.3 Erosiecriteria

Beide rekenmodellen zijn gebaseerd op secundaire erosie en gaan daarbij uit van een kritieke situatie waarin de korrels net in evenwicht zijn. Sellmeijer gaat uit van een evenwicht wanneer alle korrels in de pipe, op elke locatie, in evenwicht zijn. De grenstoestand van dit evenwicht wordt berekend door middel van de kritieke schuifspanning, gebaseerd op resultaten van (White, 1940):

$$\tau_c = \eta \frac{\pi}{6} (\rho_s - \rho) g d \tan \theta \quad (27)$$

Waarin η staat voor de coëfficiënt van White en θ voor rolweerstandshoek van de zandkorrels. In de oorspronkelijke benadering van White was de coëfficiënt η gecombineerd met een andere coëfficiënt α . Deze gecombineerde coëfficiënt is later door Sellmeijer teruggebracht naar η . Op basis van experimenten in een stroomgoot met twee zandtypen waarin White de beginnende beweging in laminaire stroming bestudeerde, heeft Sellmeijer een constante waarde van 0,25 voor de coëfficiënt van White gedefinieerd. De rolweerstandshoek θ is door Sellmeijer vastgesteld op 37° , op basis van onderzoek van White (1940). De korreldiameter werd niet beschreven door White, echter gaat Sellmeijer uit van d_{70} . Dit vanuit de redenatie dat de fijnere fracties in een zandpakket eerder getransporteerd worden door de grondwaterstroming dan de grovere fracties, die ook getransporteerd moeten worden.

In het Shields-Darcy model wordt de pipe wijder, dieper en langer als het werkelijke verval in de pipe het kritieke verval overschrijdt. Hoffmans is de eerste die het Shields diagram koppelde aan terugschrijdende erosie. In deze benaderingswijze is er een balans tussen de aandrijvende krachten en de weerstandskrachten. Dit is vergelijkbaar met White, echter worden de onbekenden samengevoegd in één parameter. Namelijk de kritieke Shields parameter.

$$\tau_c = \Psi_{lam} (\rho_s - \rho) g d_{50} \quad (28)$$

Sellmeijer gebruikt d_{70} als de representatieve korreldiameter om de kritieke wandschuifspanning te berekenen. Hij gebruikt hiervoor een constante $\eta = 0,25$ en $\tan \theta = 0,75$ tot $0,85$ (met $\theta = 37^\circ$ tot 41°), wat equivalent is aan $\Psi_c = 0,10$ tot $0,12$. Hierbij moet opgemerkt worden dat Sellmeijer een constante kritieke waarde Ψ_c gebruikt voor alle korrelgroottes, terwijl het Shields diagram laat zien dat de kritieke Shields parameter afhankelijk is van de korrelgrootte. Voor fijn zand is benadering van Sellmeijer bevredigend, maar voor grof zand is de kritieke wandschuifspanning te hoog.

Hoffmans (2014) heeft op basis van onderzoek van Govers (1987), Pilotti & Menduni (2001) en Loiseleux et al (2005) een relatie voorgesteld voor $\Psi_{lam,c}$ en D_* in de range van $0,15 \text{ mm} < d_{50} < 0,75 \text{ mm}$, voor algemene beweging van de zandkorrels (zie vergelijking 14).

Hoewel de kritieke Shields parameter wordt bepaald op basis van de d_{50} (vergelijking 28), hebben Hoffmans en Van Rijn (2017) voorgesteld om de d_{15} te gebruiken bij zandpakketten waarbij d_{90}/d_{10} onder de 4 is (zie vergelijking 29). Aangezien bij zand met deze korrelverdeling, de fijne korrels eerder in beweging komen.

$$\tau_c = \Psi_{lam} (\rho_s - \rho) g d_{15} \quad (29)$$

2.3.4 Kalibratie

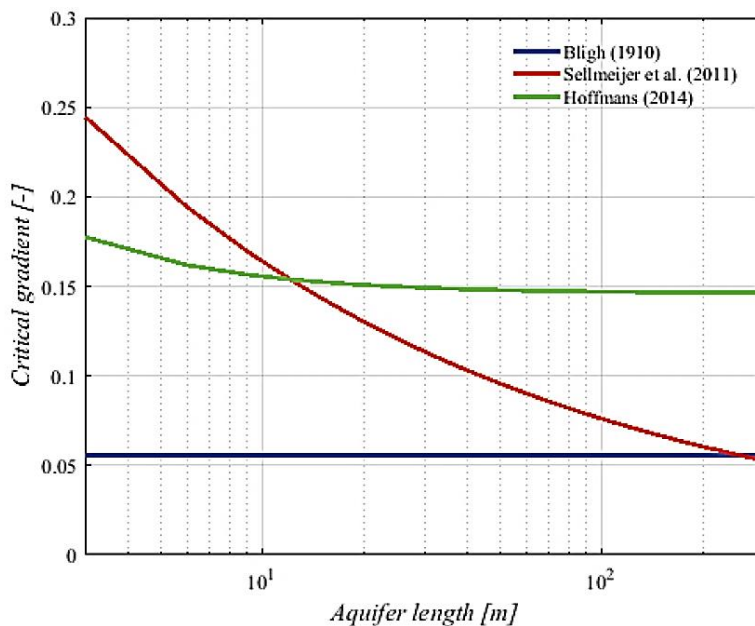
Beide modellen zijn gekalibreerd met laboratoriumproeven. Het model van Sellmeijer is in verschillende onderzoeksperioden gekalibreerd. De eerste kalibratie is verricht in de Deltagoot in 1991 (Silvis, 1991), waarbij één type zand is gebruikt. In deze experimenten is een rolweerstandshoek van 41 graden bepaald en een White coëfficiënt van $0,25$ (TAW, 1999). Na de numerieke implementatie van het Sellmeijer model in 2006, is de rolweerstandshoek van de zandkorrels vastgesteld op 37 graden (Sellmeijer, 2006). Tijdens de ontwikkeling van de rekenregel kwam men er al snel achter dat voor grover zand de rekenregel niet overeenkwam met de resultaten van de experimenten. In 2011, na een nieuwe serie van klein-, middel- en grootschalige experimenten, is het model opnieuw gekalibreerd. De invloed van zandparameters is door middel van een multivariate analyse (Knoef, Sellmeijer, Lopez, & Luijendijk, 2009) op de resultaten van kleine- en medium-schaalexperimenten onderzocht en gekwantificeerd. Deze analyse geeft een empirische relatie tussen de verschillende zandeigenschappen en het verval dat leidt tot een doorgaand pipingkanaal. Mede op basis van deze multivariate analyse is een aangepaste rekenregel van Sellmeijer afgeleid (Van Beek, Knoef, & Sellmeijer, 2011). De empirische aanpassing leidt tot het duidelijke nadeel dat het model niet toepasbaar is buiten het geteste scala van zandtypen.

Het Shields-Darcy model heeft drie onbekenden: α_R (Reynolds coëfficiënt), l_R (Lengte schaal) α_f (Grondwater coëfficiënt). De onbekenden uit de vergelijking zijn gekalibreerd met de beschikbare laboratoriumproeven uit de Nederlandse literatuur. Bij het bepalen van de kalibratieparameters moet worden nagegaan of de kalibratieparameters werkelijk constant zijn onder alle omstandigheden. Zo is de rolweerstandhoek in de rekenregel van Sellmeijer in werkelijkheid geen constante, waardoor dit leidt tot overschatting bij grove zandfracties. Het was daarom nodig om dit te corrigeren met behulp van empirische factoren. In het Shields-Darcy model zijn de lengteschaal coëfficiënt en de Reynolds coëfficiënt afhankelijk van het Reynoldsgetal. Wat weer afhangt van de stroomsnelheid en diepte van de pipe. Het beschouwen van deze parameters als constanten, terwijl dit in werkelijkheid geen constanten zijn, kan mogelijk leiden tot onjuiste resultaten. Het effect hiervan is echter niet onderzocht (Van Beek & Hoffmans, 2017).

2.3.5 Validatie

Na het aanpassen van de rekenregel van Sellmeijer op basis van de empirische factoren, gebaseerd op kleinschalige laboratoriumexperimenten, is het resultaat gekalibreerd met middel- en grootschalige experimenten (Sellmeijer, Lopez de la Cruz, Van Beek, & Knoeff, 2011). Het is gebleken dat de aangepaste rekenregel beter werkte dan de originele rekenregel, in het bijzonder voor grover zand, waarvoor de originele rekenregel ongeschikt werd bevonden. Het Shields-Darcy model is gevalideerd door de proeven van de kalibratie te herhalen. Daarnaast is het Shields-Darcy model geverifieerd met resultaten van drie Deltagoot experimenten en drie IJkdijk proeven, waaruit bleek dat het model goed werkt. Het Shields-Darcy model is tevens gevalideerd met praktijkcases, een Chinese dijk en twee Nederlandse dijken. Hierbij moet opgemerkt worden dat de invoerwaarden van de parameters van de praktijkcases grof zijn geschat en daardoor niet geschikt zijn voor precieze validatie van modellen. Daarnaast zijn veel aspecten, waarvan bekend is dat ze van invloed zijn op het optreden van piping, nog niet opgenomen in deze modellen, zoals de heterogeniteit van de ondergrond en driedimensionale grondwaterstroming, wat validatie van de modellen met praktijkcases compliceert. Praktijkcases kunnen gebruikt worden voor het vergelijken van algemene trends, maar zijn niet geschikt voor validatie op individuele basis (Van Beek & Hoffmans, 2017).

Een algemene trend die essentieel is voor extrapolatie naar de praktijk is het schaafeffect op de kritieke gradiënt. Figuur 2-8 laat het schaafeffect zien in de verschillende modellen als gevolg van een toename van de lengte van het watervoerend pakket als referentieschaal met behoud van de D/L-ratio en de zandkarakteristieken (fijn zand).



Figuur 2-8: Schaafeffecten in verschillende modellen

(Van Beek & Hoffmans, 2017)

Hierbij dient opgemerkt te worden dat met een constante D/L-ratio, dezelfde trends gevonden kunnen worden met de dikte van het watervoerend pakket als referentieschaal. De grafiek toont aan dat een afname van de kritieke gradiënt met schaalvergroting wordt verwacht, maar dat de mate waarin de kritieke gradiënt

afneemt met de schaal aanzienlijk verschilt voor de verschillende modellen. De schaaleffecten zijn veel beperkter in het Shields-Darcy model (en zelfs afwezig zodra een bepaalde watervoerende diepte wordt overschreden), vergeleken met het Sellmeijer model, dat convergeert naar de regel van Bligh voor de gekozen configuratie. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de aanbeveling voor het Shields-Darcy model om over te schakelen van 'algemeen transport' naar 'geen erosie' niet is gevolgd voor deze gevallen, omdat de D/L-ratio veel kleiner is dan 1 (Van Beek & Hoffmans, 2017).

Een mogelijke oorzaak voor het verschil in uitkomst is de opname van grondwaterstroming in diepere lagen in het Sellmeijer model, in tegenstelling tot het Shields-Darcy model, waarbij wordt verondersteld dat stroming door diepere lagen het pipingproces niet beïnvloedt. Daarnaast is de grondwaterstroming vereenvoudigd voor het Shields-Darcy model, terwijl het numeriek werd berekend voor het Sellmeijer-model met behulp van MSEP (Van Beek & Hoffmans, 2017).

3. CASUSSEN

In dit hoofdstuk worden de casussen beschreven die gebruikt zijn om de analytische rekenmodellen te vergelijken. Dit hoofdstuk bevat een introductie van het onderzoeksgebied, inclusief informatie over de onderzoeklocaties en de (ondergrond)gegevens die gebruikt zijn als invoer voor de rekenmodellen. Allereerst worden de onderzoeklocaties beschreven. Vervolgens wordt per onderzoeklocatie toegelicht welke gegevens gebruikt zijn als invoer voor de rekenmodellen. Tenslotte wordt beschreven hoe de invoergegevens zijn vastgesteld.

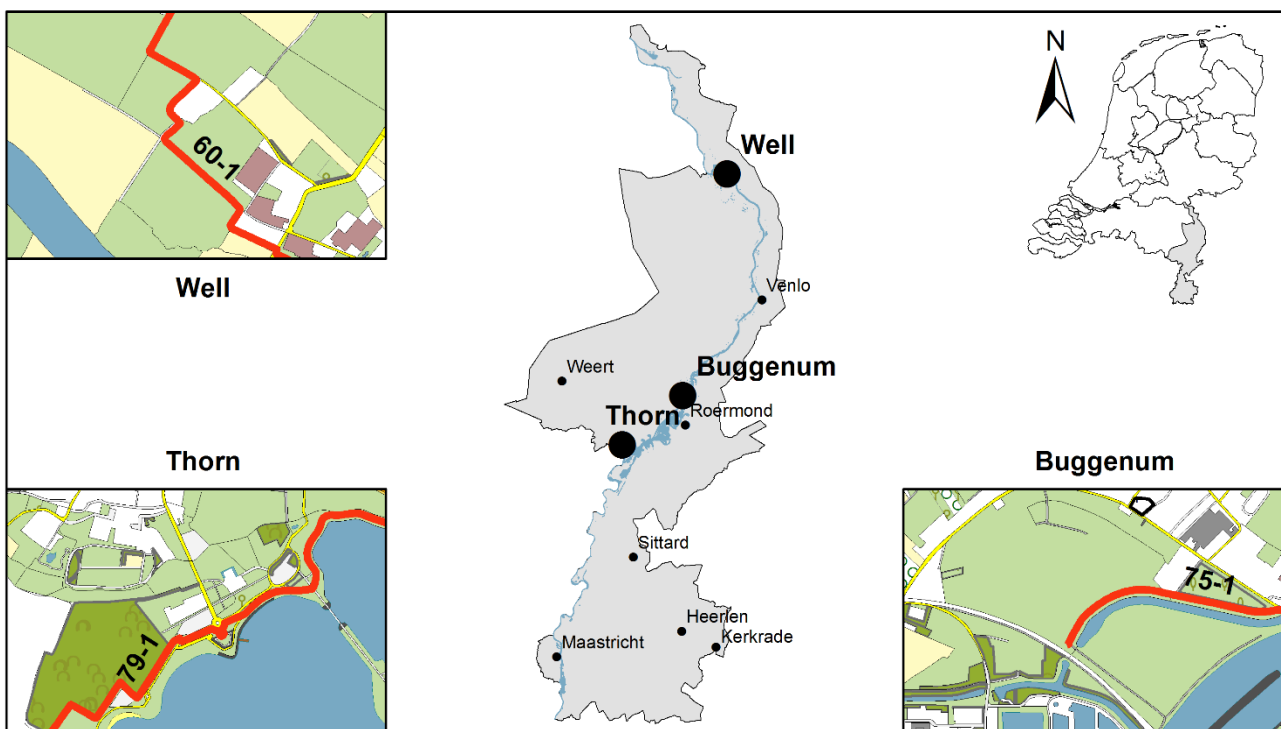
3.1 Onderzoeksgebied

Het onderzoeksgebied beslaat twee provincies: Limburg en Gelderland. De onderzoeklocaties Thorn, Buggenum en Well liggen in de provincie Limburg in de Noordelijke Maasvallei (zie Figuur 3-1). De onderzoeklocatie Loo ligt daarentegen in de provincie Gelderland, langs het Pannerdens Kanaal (zie Figuur 3-3). In het kader van Projectoverstijgende Verkenning (POV) Piping is op deze locaties grondonderzoek uitgevoerd. Bij dit grondonderzoek zijn sonderingen en hand- en mechanische boringen uitgevoerd, waarbij van geselecteerde grondmonsters de korrelverdeling is bepaald.

Daarnaast zijn er bij de locaties in de Noordelijke Maasvallei en langs het Pannerdens Kanaal bij Lobith, Pannerden en Westervoort pompproeven uitgevoerd, waarmee een betrouwbare schatting is verkregen van het doorlaatvermogen van het watervoerend pakket.

3.1.1 Noordelijke Maasvallei

Zoals de naam Noordelijke Maasvallei al aangeeft, ligt het gebied in een vallei en grenst het aan de rivier de Maas. De Maas ontspringt in Frankrijk en stroomt via België naar Nederland. De rivier de Maas is een van de grotere rivieren van Nederland met een totale lengte van 950 kilometer. De Noordelijke Maasvallei begint grofweg bij Thorn (ten zuiden van Roermond) en eindigt bij Mook (ten zuiden van Nijmegen). Aangezien het gebied in een vallei ligt, verloopt het achterland in een gradiënt aflopend richting de rivier. Hierdoor ligt het laagste punt van het achterland vaak dichtbij de binnentoe van de dijk. Wanneer de waterstanden van de rivier laag zijn, stroomt het grondwater uit de omliggende gebieden richting de Maas en bij hoge waterstanden vice versa. Dit verschilt ten opzichte van veel riviergebieden in Nederland, waarbij het achterland vaak laag ligt. Waterschap Limburg is beheerder van de waterkeringen in de Noordelijke Maasvallei.



Figuur 3-1: Onderzoeklocaties Noordelijke Maasvallei



Thorn



Buggenum



Well



Loo

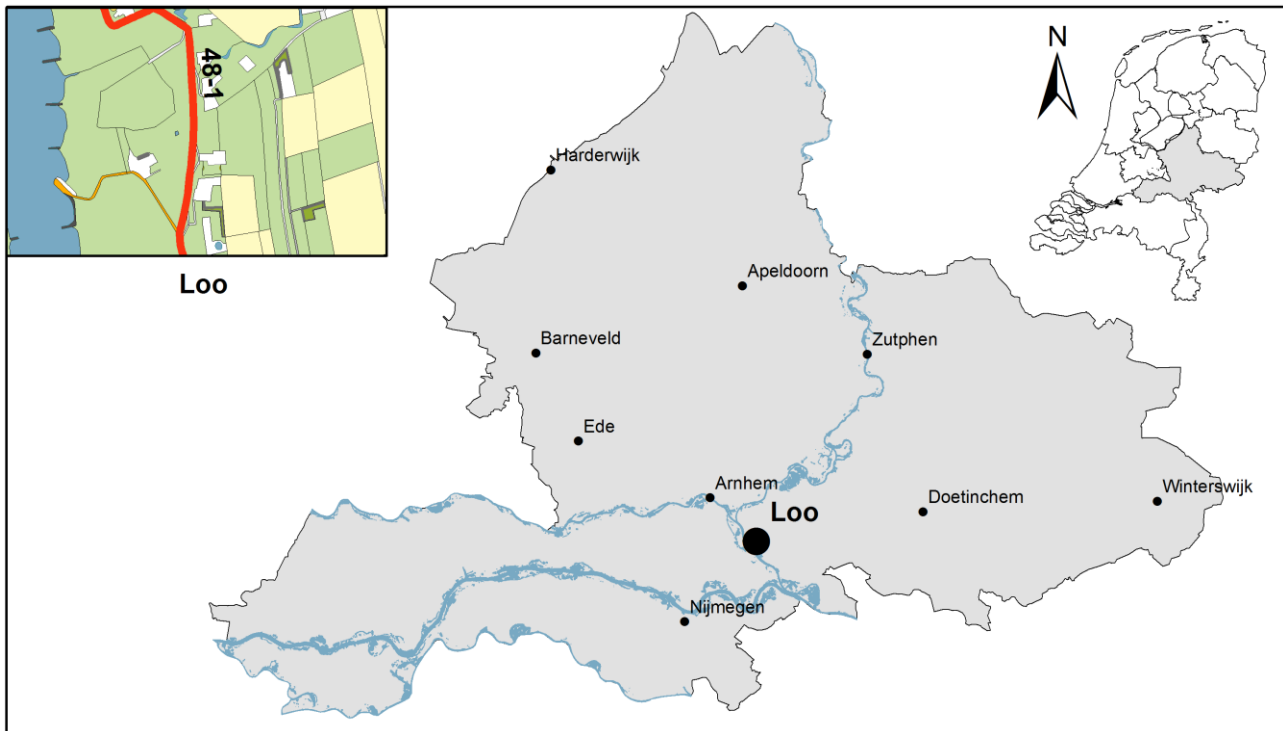
Figuur 3-2: Foto's onderzoeklocaties

De Noordelijke Maasvallei wordt gekenmerkt door grove zandlagen en grindlagen in de ondergrond. Al dan niet afgedekt met een kleilaag. Deze kleilaag is, vergeleken met andere kleilagen, relatief goed doorlatend en de doorlatendheid varieert tussen de 0,1 en 1 m/dag. Dit wordt als vrij hoog beschouwd voor een afdekkende laag. De variatie in dikte van de fijne zandlagen tussen de locaties is vrij groot. Op sommige locaties is dit zandpakket enkele meters dik, terwijl dit zandpakket verderop ontbreekt en de ondergrond voornamelijk bestaat uit grindig zand. Tevens zijn er in de grindpakketten veel verschillen in doorlatendheden, veelal veroorzaakt door de aan- of afwezigheid van zand tussen de poriën van het grind.

3.1.2 Pannerdens Kanaal

Naast de onderzoeklocaties in de Noordelijke Maasvallei, is voor het vergelijken van de rekenmodellen tevens gekozen voor een locatie langs het Pannerdens Kanaal nabij Loo (dijkkring 48-1). Het Pannerdens Kanaal is een van de aftakkingen van de Rijn en splitst zich stroomafwaarts op in de Neder-Rijn en de IJssel. Het beheer van de primaire waterkeringen, aan de oostelijke zijde, valt onder de verantwoordelijkheid van het waterschap Rijn en IJssel. De ondergrond langs het Pannerdens Kanaal wordt gekenmerkt door een slecht doorlatende deklaag met daaronder de rivierafzettingen van de Formatie van Kreftenheye afkomstig uit het Laat-Pleistoceen.

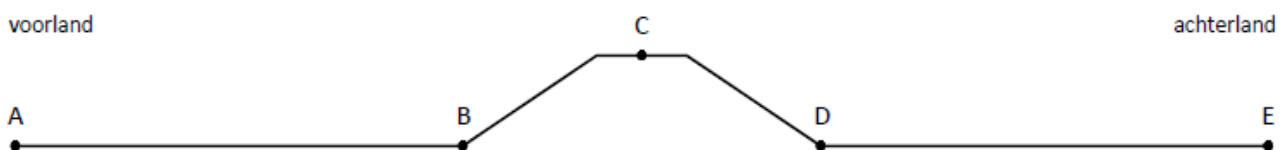
In juni 2016 heeft bij locatie Loo een grondonderzoek plaatsgevonden door middel van een proeftuin. Hierbij zijn 88 boringen uitgevoerd en zandmonsters genomen van de bovenste laag in het watervoerend pakket. Deze zandmonsters zijn gezeefd en de d_{70} waarden hiervan zijn bepaald. Uit die zeefanalyses blijkt dat locatie Loo veel fijner zand in de ondergrond heeft dan de locaties in de Noordelijke Maasvallei. Aangezien er op de locaties in de Noordelijke Maasvallei grof zand of zelfs grind wordt onderzocht, is de locatie Loo interessant om een vergelijking te maken tussen Shields-Darcy en Sellmeijer bij fijnere zandfracties.



Figuur 3-3: Onderzoeklocaties Pannerdens Kanaal

3.2 Schematisaties

Onderdeel van de POV Piping projecten was het verzamelen van ondergrondgegevens van de onderzoeklocaties. Op iedere locatie in de Noordelijke Maasvallei zijn 16 boringen uitgevoerd: 8 mechanische boringen met een diepte van ongeveer 6 meter en 8 minder diepe handboringen. Van geselecteerde boringen is de korrelverdeling bepaald. De boorlocaties zijn strategisch gekozen in het voorland, aan de buitenteen van de dijk, de binnenteen en in het achterland, respectievelijk punten A, B, D en E uit Figuur 3-4. Daarnaast zijn op iedere locatie meerdere sonderingen uitgevoerd. De maaiveldhoogte en de coördinaten van de boorlocaties zijn bekend. In Bijlage 0 zijn kaarten van de onderzoeklocaties opgenomen.

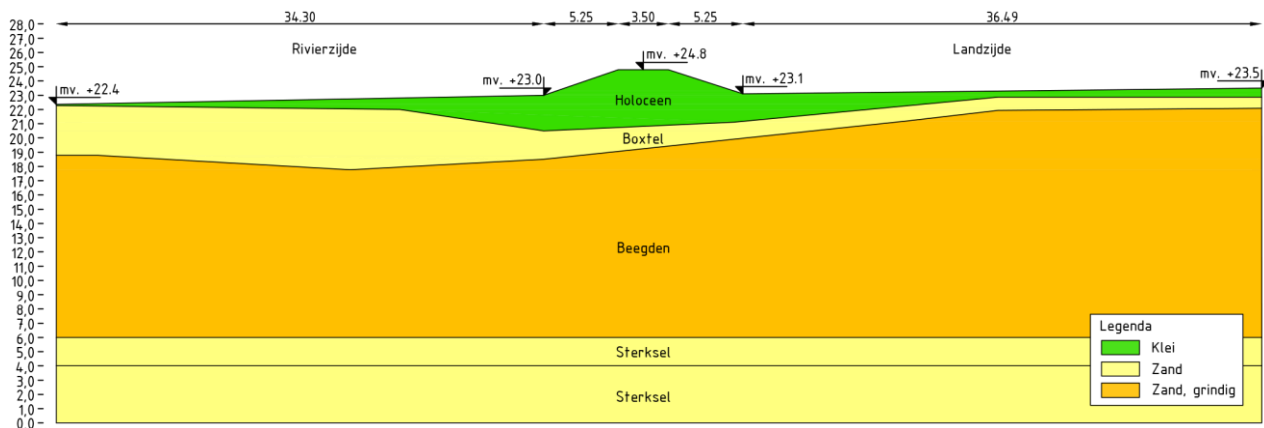


Figuur 3-4: Strategische boor- en sondeerlocaties

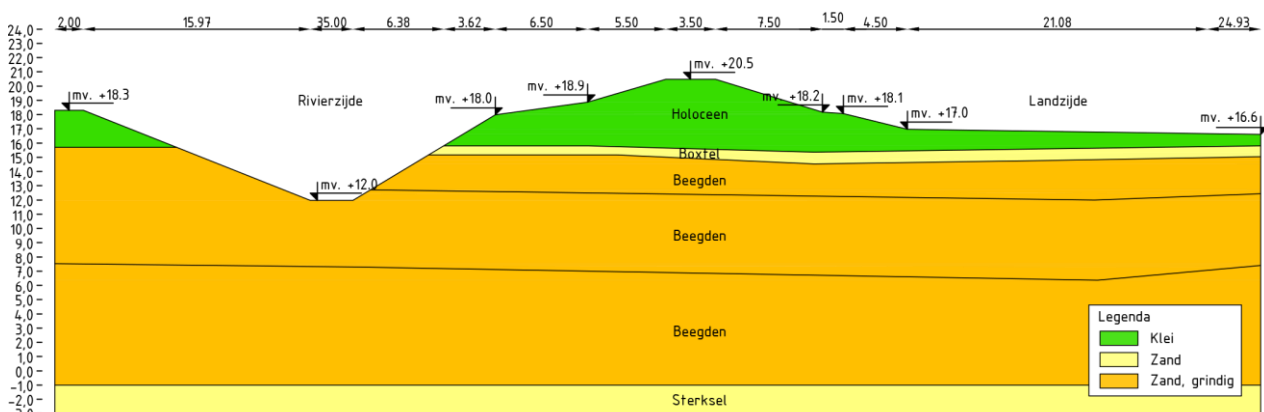
De gegevens van de POV Piping projecten zijn gebruikt om schematisaties te maken van de dijkdoorsneden van iedere locatie in de Noordelijke Maasvallei. Naast de gegevens uit de POV Piping projecten is gebruik gemaakt van het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN, 2017) om de geometrie van de dwarsdoorsneden vast te stellen. Het Actueel Hoogtebestand Nederland is een bestand met gedetailleerde en nauwkeurige hoogtegegevens voor heel Nederland. Voor het schematiseren van de dieper gelegen lagen is gebruik gemaakt van de ondergrondgegevens uit REGIS II (DINOloket, 2017). DINOloket biedt onder meer toegang tot de grootste databank van de Nederlandse ondergrond. Deze databank is een centrale plek waar geowetenschappelijke gegevens over de diepe en ondiepe ondergrond van Nederland worden verzameld en beheerd.

Aangezien er op de locatie langs het Pannerdens Kanaal nabij Loo geen boorstaten en sondeergegevens beschikbaar zijn, is de schematisatie van Loo uitgewerkt op basis van het beheerregister, POV piping en boringen en sonderingen uit DINOloket.

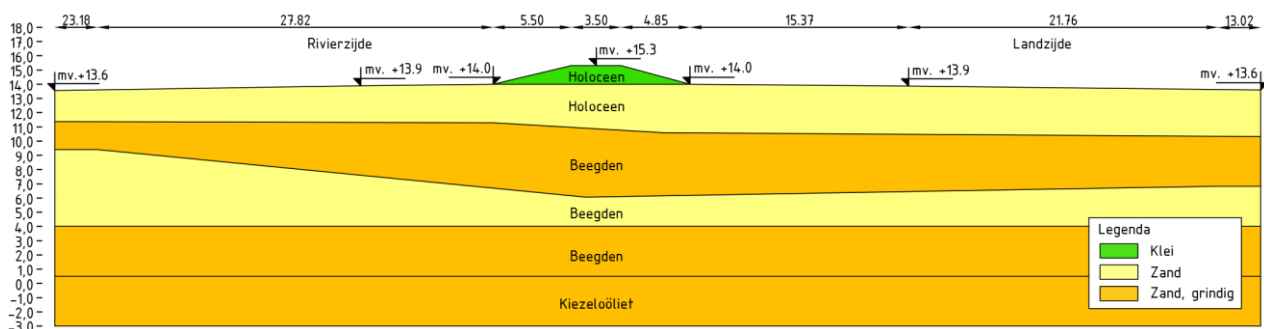
De keuzes en aannames die geleid hebben tot de schematisaties worden besproken in Bijlage D. De schematisaties zijn geïllustreerd in Figuur 3-5 t/m Figuur 3-8 en tevens opgenomen in Bijlage D.



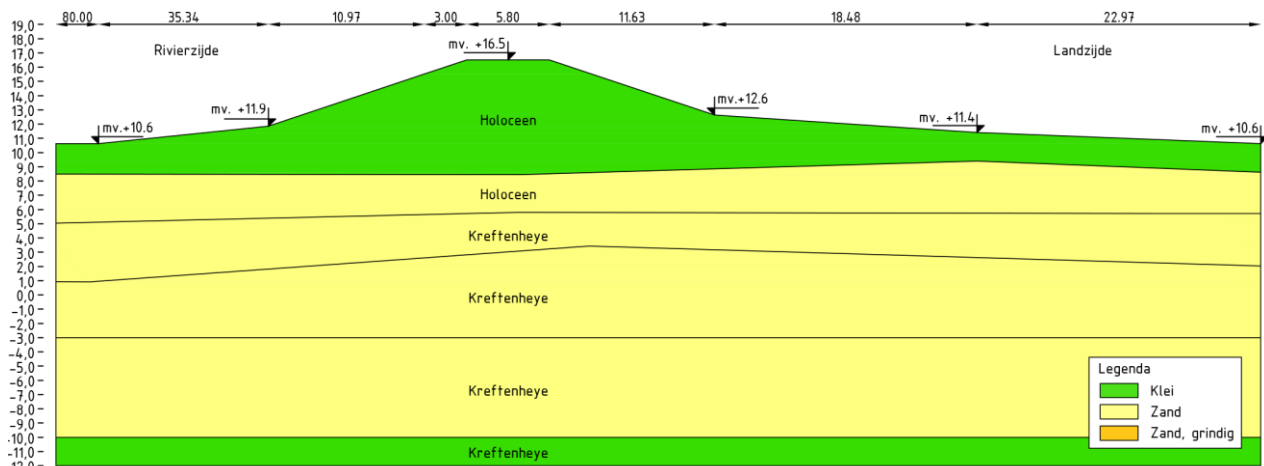
Figuur 3-5: Schematisatie locatie Thorn



Figuur 3-6: Schematisatie locatie Buggenum



Figuur 3-7: Schematisatie locatie Well



Figuur 3-8: Schematisatie locatie Loo

4. ANALYSES

In hoofdstuk 3 zijn de casussen geïntroduceerd die gebruikt zijn om meer inzicht te krijgen in de praktische toepasbaarheid van het Shields-Darcy model. In de eerste paragraaf van dit hoofdstuk, paragraaf 4.1, staat beschreven waarom de analytische en numerieke berekeningen zijn uitgevoerd. Paragraaf 4.2 bevat uitleg over de uitgevoerde berekeningen en de gevoeligheidsanalyses. In paragraaf 4.3 staan de resultaten van de uitgevoerde berekeningen en de gevoeligheidsanalyses beschreven.

4.1 Motivatie

In hoofdstuk 1 is de probleemstelling van dit onderzoek uiteengezet. Uit deze uiteenzetting blijkt dat de praktische toepasbaarheid van het Shields-Darcy model nog niet is onderzocht. Uit hoofdstuk 2 blijkt dat conform het WBI veiligheidsfactoren (veiligheidsfactor γ_{pip} en schematiseringsfactor γ_b) moeten worden toegepast om alle onzekerheden omtrent de toetsing mee te nemen in het beoordelen van de waterkeringen. In de veiligheidsfactor γ_{pip} zijn onder andere de modelonzekerheden verwerkt, die betrekking hebben op de onzekerheden in het Sellmeijer model. Aangezien deze factor geldt voor het toepassen van het Sellmeijer model, is het van belang om de invloed van deze factor vast te stellen. Daarnaast is gebleken dat de rekenregel van Sellmeijer recent is geïmplementeerd in D-Geo Flow, waarmee pipingberekeningen kunnen worden uitgevoerd voor complexe ondergrondconfiguraties met meerdere lagen en anisotrope grondwaterstroming. Aangezien in D-Geo Flow grondwaterstroming nauwkeuriger wordt berekend is het interessant om het Shields-Darcy model te vergelijken met een D-Geo Flow model. Aangezien in 2050 alle primaire waterkeringen moeten voldoen aan de nieuwe veiligheidsnormen, is het van belang om te rekenen met deze normeringen. Ten slotte is het van belang om uit te zoeken wat de gevoeligheid is van de invoerparameters van de analytische rekenmodellen. Om het bovengenoemde mee te nemen in de analyses zijn de volgende doelstellingen geformuleerd:

1. Analytische berekeningen uitvoeren op basis van huidige situatie en toekomstscenario's;
2. Vaststellen van de invloed van de veiligheidsfactoren;
3. Het vergelijken van de resultaten van de analytische en numerieke berekeningen voor locatie Buggenum;
4. Het bepalen van de parametergevoeligheid van de analytische rekenmodellen.

4.2 Analyses

De analytische berekeningen zijn uitgevoerd met behulp van de analytische rekenmodellen die gepresenteerd zijn in hoofdstuk 2. Voor de eerste en de derde doelstelling zijn de veiligheidsfactoren niet toegepast. Voor de tweede doelstelling zijn de veiligheidsfactoren toegepast, zodat de invloed hiervan inzichtelijk kan worden gemaakt. Een overzicht van de invoerwaarden per locatie is tezamen met een uitleg van de totstandkoming van de invoerwaarden opgenomen in bijlage E. In paragraaf 4.2.1, 4.2.2 en 4.2.3 staat beschreven hoe de berekeningen zijn uitgevoerd.

4.2.1 Doelstelling 1: Heden en toekomst

Zoals beschreven staat in hoofdstuk 2 moet voor het optreden van terugschrijdende erosie het kritieke verval ΔH_c over de waterkering worden overschreden. Met andere woorden, het werkelijke verval ΔH moet groter zijn dan het kritieke verval ΔH_c . Het kritieke verval is met behulp van de analytische rekenmodellen voor iedere onderzoeklocatie berekend, met en zonder toepassing van de 0,3d- en 0,6d-regel en zonder toepassing van de veiligheidsfactoren voor de hydraulische belastingen behorend bij onderstaande scenario's.

- **Heden:** berekende waterstanden op basis van Hydra-NL modellen voor het zichtjaar 2015 en de gemeten waterstanden behorend bij de hoogwatergolf van januari 2018;
- **Toekomst:** berekende waterstanden op basis van Hydra-NL modellen voor de zichtjaren 2050 en 2075.

4.2.2 Doelstelling 2: Invloed veiligheidsfactoren

Voor de tweede doelstelling is het kritieke verval wederom berekend, ditmaal met toepassing van de veiligheidsfactoren (zie Tabel 4-1) conform de veiligheidsfilosofie uit het huidige beoordelingsinstrumentarium zoals beschreven in hoofdstuk 2.2.1. De veiligheidsfactoren (γ_{pip}) zijn afkomstig uit het rapport 'Handreiking ontwerpen met overstromingskansen' versie OI2014v4 (Rijkswaterstaat, 2017). Voor de schematiseringsfactor is een constante waarde aangenomen van 1,15. Uit praktische overwegingen is voor het vergelijken van de rekenmodellen voor een constante schematiseringsfactor gekozen. Die in vergelijkbare gevallen vaker wordt gehanteerd.

Tabel 4-1: Toegepaste veiligheidsfactoren

Veiligheidsfactor	Thorn [-]	Buggenum [-]	Well [-]	Loo [-]
Veiligheidsfactor (γ_{pip})	1,52	1,29	1,47	1,33
Schematiseringsfactor (γ_b)	1,15	1,15	1,15	1,15
Veiligheidsfactor oud (γ)	1,20	1,20	1,20	1,20

4.2.3 Doelstelling 3: Numerieke berekening D-Geo Flow

Voor de derde doelstelling is met behulp van het onlangs gekalibreerde D-Geo Flow model het kritieke verval berekend van locatie Buggenum. De invoerwaarden van het D-Geo Flow model zijn vastgesteld in een eerder afstudeeronderzoek waardoor deze verschillen met die van het analytische model. Om de vergelijking toch te kunnen maken zijn de invoerwaarden van het D-Geo Flow model gebruikt in het analytische model om nogmaals een aantal berekeningen te maken. De wijzigingen van de invoerwaarden van de rekenmodellen staan in Tabel 4-2.

Tabel 4-2: Verschillen tussen de invoerwaarden van het analytische en numerieke model

	k [m/dag]	Dikte zandlaag [m]	Kwelweglengte [m]	Polderpeil [m]
Analytisch	122,4	18,5	47,0	16,60
D-Geo Flow	60,0	8,5	36,0	16,80

4.2.4 Doelstelling 4: Gevoeligheidsanalyse invoerparameters

Om de relatie tussen invoer en toetsresultaat van beide rekenmodellen te bepalen, is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Bij de gevoeligheidsanalyse is gekeken naar de verandering van het toetsresultaat bij een verandering van de beschouwde parameter. De gevoeligheid is vastgesteld door per beschouwde parameter een reeks waarden te definiëren om vervolgens per waarde het kritieke verval te berekenen. Naast de reguliere gevoeligheidsanalyse zijn er voor iedere locatie per rekenmodel tornadodiagrammen gemaakt, waardoor in een oogopslag te zien is wat de gevoelige parameters zijn en of de invloed bij een verlaging van de invoerwaarde hoger is dan bij een verhoging en vice versa. Hiervoor is de invoerwaarde per beschouwde parameter met 25% verhoogd en verlaagd om daarbij vervolgens het kritieke verval te berekenen. De volgende invoerparameters zijn beschouwd in de gevoeligheidsanalyse:

- Kwelweglengte;
- Dikte pipinggevoelige zandlaag;
- Specifieke doorlatendheid pipinggevoelige zandlaag;
- 70-percentielwaarde van de korrelverdeling;
- 50-percentielwaarde van de korrelverdeling;
- 15-percentielwaarde van de korrelverdeling.

4.3 Resultaten

In onderstaande alinea's (4.3.1 t/m 4.3.4) staan de resultaten van de analytische en numerieke analyses. Allereerst staan de resultaten behorend bij doelstelling één beschreven, gevolgd door een beschrijving van de resultaten van de tweede, derde en vierde doelstelling.

4.3.1 Doelstelling 1: Heden en toekomst

In de onderstaande tabellen (Tabel 4-3 t/m Tabel 4-6) zijn het kritieke verval en het aanwezige verval weergegeven per zichtjaar met het verwachte maatgevende hoogwater en het werkelijke hoogwater van januari 2018. De eerste twee kolommen geven het berekende kritieke verval van het Sellmeijer model en het Shields-Darcy model weer. In deze tabellen zijn de veiligheidsfactoren niet meegenomen in de berekening

van het kritieke verval. De laatste drie kolommen geven het aanwezig verval weer zonder en met de 0,3d- en de 0,6d-regel. De tabellen dienen als volgt te worden geïnterpreteerd:

- De lichte kleur geeft aan dat alleen bij het Sellmeijer model het werkelijk verval hoger is dan het kritieke verval en er piping optreedt;
- De donkere kleur geeft aan dat zowel bij het Sellmeijer model als bij het Shields-Darcy model het werkelijk verval hoger is dan het kritieke verval en er piping optreedt;
- Indien er geen kleur is weergegeven, is het werkelijk verval niet hoger dan het kritieke verval en treedt er geen piping op.

Een algemene constatering is dat het kritieke verval berekend met het Shields-Darcy model, gemiddeld een factor tweeënhalf groter is dan het kritieke verval berekend met het Sellmeijer model.

Heden

In Tabel 4-3 staan de toetsresultaten van de toetsing die is uitgevoerd op basis van de berekende waterstanden behorend bij zichtjaar 2015. Uit de tabel blijkt dat locatie Thorn voldoet volgens beide rekenmodellen. De overige locaties worden allemaal afgekeurd volgens het Sellmeijer model. Volgens het Shields-Darcy model voldoet alleen de locatie Well niet.

Tabel 4-3: Toetsresultaten zichtjaar 2015

Locatie	ΔH_c Sellmeijer [m]	ΔH_c SD [m]	ΔH [m]	ΔH -0,3d [m]	ΔH -0,6d [m]
Thorn	1,98	5,00	1,00	0,76	0,52
Buggenum	1,95	5,82	4,39	3,94	3,49
Well	0,67	1,41	1,66	1,51	1,36
Loo	3,32	8,65	4,76	4,43	4,10

In Tabel 4-4 staan de toetsresultaten van de toetsing die is uitgevoerd op basis van de waterstanden behorend bij de hoogwatergolf van januari 2018. Uit de berekeningen blijkt dat er geen piping op heeft kunnen treden aangezien het werkelijk verval op geen enkele locatie in de buurt is gekomen van het kritieke verval. Dit komt overeen met de praktijk, want in januari 2018 zijn er op deze locaties ook geen zandmeevoerende wellen waargenomen. Daarnaast zijn er in de tabel negatieve waarden weergegeven. Dit komt omdat de waterstand op sommige locaties niet boven het maaiveld van het achterland uitkwam.

Tabel 4-4: Toetsresultaten hoogwater januari 2018

Locatie	ΔH_c Sellmeijer [m]	ΔH_c SD [m]	ΔH [m]	ΔH -0,3d [m]	ΔH -0,6d [m]
Thorn	1,98	5,00	-1,45*	-1,69	-1,93
Buggenum	1,95	5,82	0,41	-0,04	-0,49
Well	0,67	1,41	-0,78*	-0,93	-1,08
Loo	3,32	8,65	2,16	1,83	1,50

Toekomst

In Tabel 4-5 en Tabel 4-6 staan de toetsresultaten van de toetsing die is uitgevoerd op basis van de berekende waterstanden behorend bij de zichtjaren 2050 en 2075. Uit de berekeningen blijkt dat locatie Thorn nog steeds ruimschoots voldoet volgens beide rekenmodellen. Door een stijging van het werkelijk verval, als gevolg van de verhoogde waterstanden, zijn de verschillen tussen het werkelijk verval en het kritieke verval op de andere locaties nog kleiner geworden.

Tabel 4-5: Toetsresultaten zichtjaar 2050

Locatie	ΔH_c Sellmeijer [m]	ΔH_c SD [m]	ΔH [m]	ΔH -0,3d [m]	ΔH -0,6d [m]
Thorn	1,98	5,00	1,16	0,92	0,68
Buggenum	1,95	5,82	4,72	4,27	3,82
Well	0,67	1,41	1,87	1,72	1,57
Loo	3,32	8,65	4,92	4,59	4,26

Tabel 4-6: Toetsresultaten zichtjaar 2075

Locatie	ΔH_c Sellmeijer [m]	ΔH_c SD [m]	ΔH [m]	ΔH -0,3d [m]	ΔH -0,6d [m]
Thorn	1,98	5,00	1,28	1,04	0,80
Buggenum	1,95	5,82	4,94	4,49	4,04
Well	0,67	1,41	2,03	1,88	1,73
Loo	3,32	8,65	4,99	4,66	4,33

4.3.2 Doelstelling 2: Invloed veiligheidsfactoren

Om de invloed van de veiligheidsfactoren vast te stellen zijn de berekeningen nogmaals uitgevoerd, ditmaal met toepassing van de veiligheidsfactoren uit Tabel 4-1. In Tabel 4-7 staan de resultaten van de berekeningen van het kritieke verval met en zonder toepassing van de veiligheidsfactoren. In deze tabel is alleen het werkelijk verval inclusief toepassing van de 0,3d-regel weergegeven voor het zichtjaar 2015. Uit de tabel is op te maken dat toepassing van de veiligheidsfactoren logischerwijs een negatief effect heeft op de uitkomst. Het kritieke verval is voor iedere locatie afgenomen, waardoor piping volgens de berekeningen eerder zal optreden. Vooral bij de locaties Thorn en Well is invloed groot, vanwege respectievelijk een veiligheidsfactor van 1,52 en 1,47.

Tabel 4-7: Invloed veiligheidsfactoren

Locatie	Sellmeijer ΔH_c [m]	Sellmeijer $\Delta H_c/(y_b \cdot y_{pipe})$ [m]	Shields-Darcy ΔH_c [m]	Shields-Darcy $\Delta H_c/(y_b \cdot y_{pipe})$ [m]	2015 ΔH -0,3d [m]
Thorn	1,98	1,13	5,00	2,86	0,76
Buggenum	1,95	1,31	5,82	3,92	3,94
Well	0,67	0,39	1,41	0,83	1,51
Loo	3,32	2,17	8,65	5,65	4,43

4.3.3 Doelstelling 3: Numerieke berekening D-Geo Flow

In Tabel 4-8 is te zien dat met behulp van het D-Geo Flow model een aanzienlijk hoger kritiek verval wordt berekend dan met de analytische rekenregel van Sellmeijer. Ter vergelijking is het kritieke verval van Shields-Darcy en het aanwezige verval van 2015 ook weergegeven.

Het verschil tussen het Sellmeijer model en het D-Geo Flow model is factor anderhalf. Dit verschil is te verklaren door het verschil in grondwaterstroming tussen het analytische en het numerieke rekenmodel. In de situatie van Buggenum, voor zichtjaar 2015, betekent dit dat rekenregel van Sellmeijer de dijk zal afkeuren, terwijl het kritieke verval berekend met D-Geo Flow net voldoende is om de dijk goed te keuren. Alhoewel de resultaten vanuit D-Geo Flow een flink stuk hoger liggen dan Sellmeijer, is het verschil ten opzichte van Shields-Darcy nog steeds een factor 1,5.

Tabel 4-8: Toetsresultaten analytische en numerieke berekeningen locatie Buggenum

Locatie	Sellmeijer ΔH_c [m]	D-Geo Flow ΔH_c [m]	Shields-Darcy ΔH_c [m]	2015 $\Delta H_{-0,3d}$ [m]
Buggenum	2,16	3,52	5,44	3,41

4.3.4 Doelstelling 4: Gevoeligheidsanalyse invoerparameters

De resultaten van de gevoeligheidsanalyse van locatie Buggenum zijn weergegeven in Figuur 4-2. In de grafieken a t/m c is de gevoeligheid van de parameters (L, D en k) weergegeven die voorkomen in beide analytische rekenmodellen. Grafiek d geeft de gevoeligheid weer van de d_{70} , die enkel in het Sellmeijer model voorkomt. In grafiek e en f is de gevoeligheid van de d_{50} en d_{15} weergegeven, die alleen in het Shields-Darcy model voorkomen. De resultaten van de gevoeligheidsanalyses van de overige locaties zijn opgenomen in bijlage 0. Grafieken g en h zijn tornadodiagrammen waarin in één oogopslag zichtbaar is welke parameters gevoelig zijn en wat de invloed is van een 25% verlaging of verhoging van de invoerwaarden. In iedere grafiek is de beschouwde parameter uitgezet tegen het kritieke verval over de waterkering.

Gevoeligheid Sellmeijer model

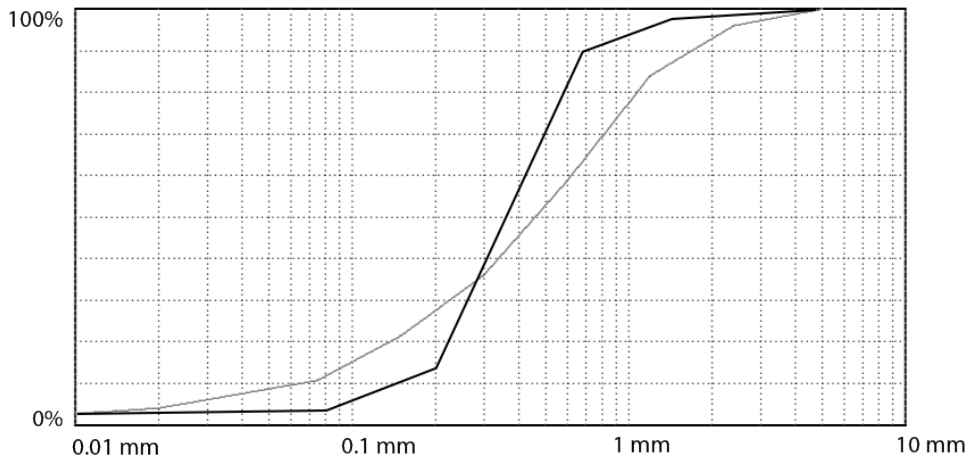
In de gevoeligheidsanalyse van Sellmeijer is de invloed van de korrelgrootte en doorlatendheid afzonderlijk van elkaar bepaald, aangezien de parameters niet aan elkaar gecorreleerd zijn in de rekenregel. De doorlatendheid hangt af van de Pleistocene lagen in de ondergrond. De d_{70} wordt bepaald in de pipinggevoelige laag om de erosiecriteria te bepalen. De d_{70} is een parameter die weerstand biedt tegen de stroming in het pakket en wordt niet gebruikt om de doorlatendheid te bepalen (Förster, Van den Ham, Calle, & Kruse, 2012).

In Figuur 4-2 is te zien dat de kwelweglengte (L) de grootste invloed heeft in de rekenregel van Sellmeijer. Dit komt onder andere doordat voor het berekenen van het kritieke verval, een sommatie van de berekende gradiënten vermenigvuldigd wordt met de kwelweglengte. Daarnaast wordt de kwelweglengte ook ingevoerd in de Geometry-factor en in de Scale-factor, waardoor de invloed van L groot wordt. De doorlatendheid (k), de zandfractie (d_{70}) en de dikte van het watervoerend pakket (D) hebben ook een redelijke invloed. Dit is vooral goed te zien in Figuur 4-2g. Bij een watervoerend pakket van $D < 35$ m heeft een verlaging een grotere invloed dan een verhoging van het watervoerend pakket. Wanneer de dikte van het watervoerend pakket groter wordt dan 35 meter, wordt de invloed op het kritieke verval nagenoeg constant.

Over het algemeen valt op te merken dat een verlaging van de invoerwaarden een grotere invloed heeft op het kritieke verval dan een verhoging. Dit is vooral goed te zien bij Figuur 4-2b,c. De invloed van de parameter neemt af totdat het de grenswaarde bereikt, waarna een verhoging van de parameter geen invloed meer heeft en het kritieke verval nagenoeg constant wordt. Met uitzondering van de kwelweglengte.

Gevoeligheid Shields-Darcy model

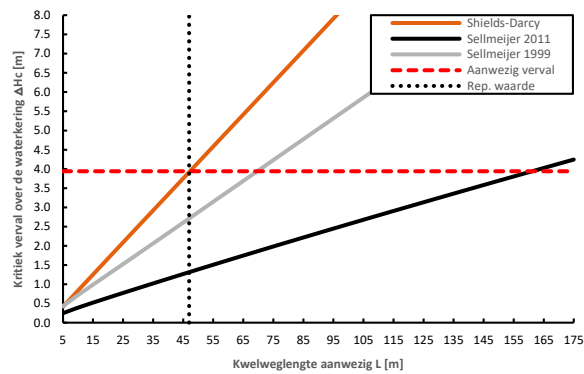
In de gevoeligheidsanalyse van Shields-Darcy zijn de parameters d_{15} en d_{50} afzonderlijk beschouwd. De grootte van de korrels in een bepaalde grond kan worden weergegeven in een zogenaamd korrelverdelingsdiagram, zie Figuur 4-1. In een dergelijk diagram wordt aangegeven welk deel (uitgedrukt in gewichtsprocenten) kleiner is dan een bepaalde diameter. Een steile kromme (zie donkere lijn) hoort bij een gelijkmatige grondsoort. Als een kromme flauw is (zie lichte lijn) betekent dit dat de grond veel korrels van verschillende diameters bevat. In Figuur 4-1 is te zien dat er geen vast verband is tussen de d_{15} en de d_{50} . In de gevoeligheidsanalyse zijn deze parameters daarom ook apart beschouwd.



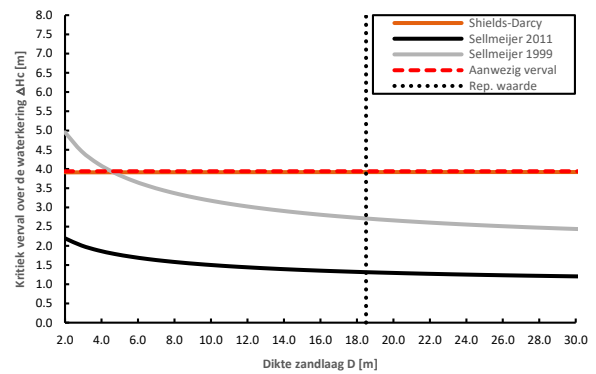
Figuur 4-1: Korrelverdelingsdiagram met twee zeefkrommes

In Figuur 4-2f is te zien dat de d_{15} de grootste invloed heeft in de rekenregel van Shields-Darcy, gevolgd door de kwelweglengte en de d_{50} . De andere parameters hebben relatief weinig tot geen invloed. In Figuur 4-2e,f is te zien dat de d_{50} en de d_{15} een tegengesteld effect hebben. Dit betekent dat een verhoging van de d_{50} resulteert in een verlaging van het kritieke verval, terwijl een verhoging van de d_{15} leidt tot een verhoging van het kritieke verval. Dit is te verklaren volgens de theorie van Grass (1970) die stelt dat de fijne fracties eerder zullen uitspoelen bij zand met d_{90}/d_{10} onder de 4. Een verhoging van de d_{50} leidt tot een grotere dimensieloze D , wat resulteert in kleinere kritieke Shields parameter en wandschuifspanning. De invloed van de d_{15} is dermate groot dat een 10% toename van deze parameter leidt tot een 10% toename van het kritieke verval. Hiervoor is een nauwkeurige vaststelling van de d_{15} en d_{50} benodigd. Figuur 4-2e geeft een vertekend beeld, omdat met een toenemende d_{50} de d_{15} constant is gehouden en vice versa.

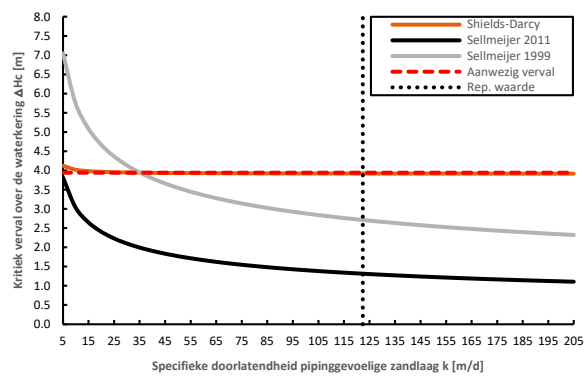
Het valt op dat de kwelweglengte een grotere invloed heeft bij Shields-Darcy dan bij Sellmeijer. Dit komt omdat de L weliswaar wordt meegenomen in de Darcy gradiënt, maar zoals beschreven in de theorie wordt deze gradiënt in praktijksituaties nagenoeg nul. Hierdoor leidt een 25% toename van de kwelweglengte tot een 25% toename van het kritieke verval. Daarnaast dient opgemerkt te worden dat bij het Shields-Darcy model de doorlatendheid en dikte van het watervoerend pakket geen invloed hebben op de uitkomst van het kritieke verval. Dit komt doordat de Darcy-gradiënt nagenoeg nul wordt, waarmee de theorie wordt bevestigd.



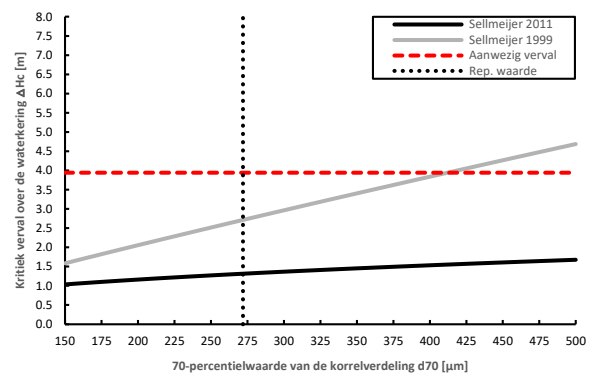
(a)



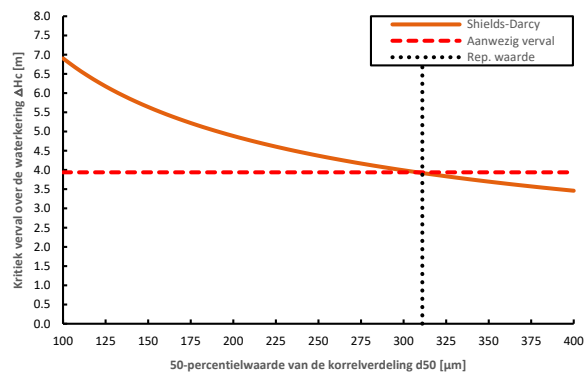
(b)



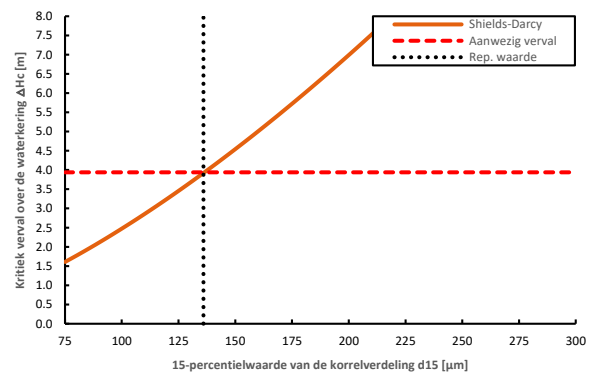
(c)



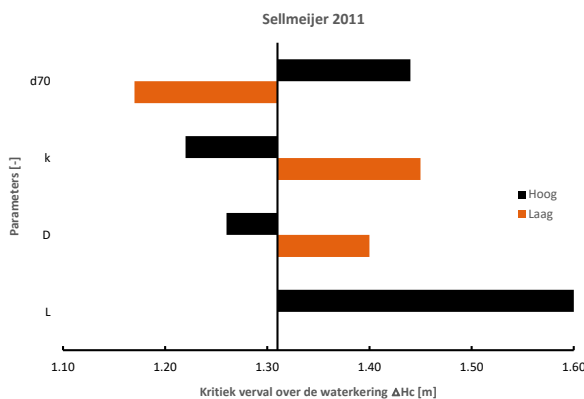
(d)



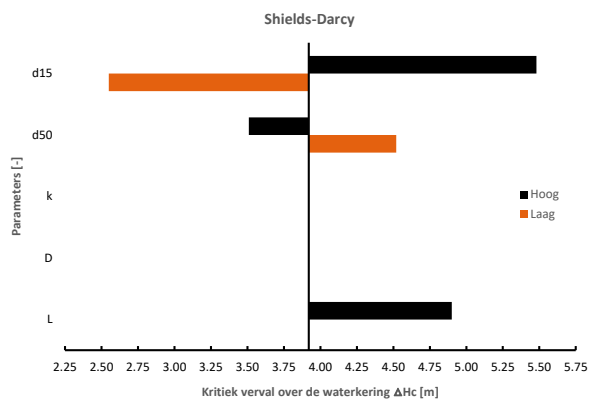
(e)



(f)



(g)



(h)

Figuur 4-2: Resultaten gevoeligheidsanalyse locatie Buggenum

5. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

In dit hoofdstuk staan de conclusies beschreven die getrokken zijn uit de resultaten van het kwantitatieve meervoudige casestudieonderzoek. Daarnaast komen discussiepunten en aanbevelingen aan bod. In de conclusie worden de hoofd- en deelvragen beantwoord. In de discussie wordt ingegaan op de betekenis van de conclusies voor BV Nederland en worden de beperkingen van het Shields-Darcy model besproken. In de aanbevelingen worden adviezen voor vervolgonderzoek gegeven.

5.1 Conclusies

In dit onderzoek is gezocht naar een antwoord op de vraag 'Welk nieuw inzicht geeft het Shields-Darcy model, ten opzichte van het Sellmeijer model, wanneer dit model wordt toegepast bij het beoordelen van primaire waterkeringen op het faalmechanisme piping?' Hiervoor is een kwantitatief meervoudig casestudieonderzoek uitgevoerd.

De rekenmodellen lijken veel op elkaar, aangezien beide gebaseerd zijn op erosiecriteria die worden aangedreven door tweedimensionale isotrope grondwaterstroming en laminaire stroming in het pipingkanaal. Hoewel de modellen vergelijkbaar zijn, zijn de resultaten van de modellen erg verschillend, vooral voor natuurlijk afgezette zanden in het veld. In het Shields-Darcy model wordt de grondwaterstroming vereenvoudigd door twee zones aan te nemen, een zone dichtbij het pipingkanaal en een dieper gelegen zone. Hoffmans & Van Rhijn veronderstellen dat de stroming door de dieper gelegen zone geen invloed heeft op de ontwikkeling van het pipingkanaal. In de rekenregel van Sellmeijer model is de grondwaterstroming richting het pipingkanaal geënt op een groot aantal numerieke berekeningen met het eindige elementen model MSEEP. Recentelijk is het Sellmeijer model ook geïmplementeerd in D-Geo Flow, een eindig elementen grondwaterstromingsmodel waarmee terugschrijdende erosie kan worden berekend voor complexe ondergrondconfiguraties met meerdere lagen en anisotrope stroming.

In beide rekenmodellen regelen erosiecriteria de ontwikkeling van het pipingkanaal. Het Sellmeijer model is gebaseerd op het grensevenwicht van korrels op de bodem van het pipingkanaal volgens de benadering van White (1940), met constante waarden voor de rolweerstandshoek en de coëfficiënt van White. Deze constante waarde en coëfficiënt zijn echter gebaseerd op slechts 2 experimenten. Daarnaast zijn de schuifspanningen in het pipingkanaal niet afhankelijk van de korreldiameter. In het Sellmeijer model is de d_{70} gekozen als representatieve korreldiameter. In het Shields-Darcy model is het Shields diagram gebruikt voor het beschrijven van het begin van bewegen van korrels in het pipingkanaal. De kritieke schuifspanning wordt in dit model beschreven aan de hand van de kritieke Shields parameter die afhankelijk is van de korreldiameter. Hoewel de kritieke Shields parameters berekend wordt op basis van de d_{50} , hebben Hoffmans & Van Rijn voorgesteld om de d_{15} te gebruiken voor het berekenen van de kritieke schuifspanning, om rekening te houden met gradering in het zand. Dit is gebaseerd op onderzoek van Grass (1970), die stelt dat de fijnere korrels eerder in beweging komen voor zand met d_{90}/d_{10} onder de vier.

De twee rekenmodellen zijn gekalibreerd en gevalideerd met testen op kleine, middelgrote en grote schaal. Beide rekenmodellen leveren in laboratoriumomstandigheden bevredigende resultaten op, maar onder veldcondities met natuurlijk afgezette zand treden grote verschillen op. Dit komt naar voren in het uitgevoerde meervoudige casestudieonderzoek. Er zijn vier onderzoeklocaties doorgerekend met beide rekenmodellen. Het kritieke verval berekend met het Shields-Darcy model, is gemiddeld een factor tweeëneenhalf groter dan het kritieke verval berekend met het Sellmeijer model. Concreet betekent dit dat met toepassing van het Sellmeijer model drie van de vier onderzoeklocaties worden afgekeurd op het faalmechanisme piping, terwijl met toepassing van het Shields-Darcy model maar één locatie wordt afgekeurd. Ook zijn de verschillen groot tussen het analytische Shields-Darcy model en het numerieke D-Geo Flow model. Het kritieke verval berekend met het Shields-Darcy model is een factor anderhalf groter dan het kritieke verval berekend met D-Geo Flow. Deze verschillen houden waarschijnlijk verband met de wijze waarop de grondwaterstroming wordt berekend. De resultaten van de gevoeligheidsanalyse onderbouwen dit. Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt namelijk dat de dikte en doorlatendheid van het watervoerend pakket, boven een bepaalde grens geen invloed hebben in het Shields-Darcy model, terwijl deze in het Sellmeijer model duidelijk wél van invloed zijn. Verder blijkt uit de gevoeligheidsanalyse dat de kwelweglengte en de 15- en 50-percentielwaarde van de korrelverdeling invloedrijke parameters zijn. Vooral van de korrelverdeling kan in de praktijk lastig een waarde worden vastgesteld die overeenkomt met de werkelijkheid (natuurgetrouw).

Bij het beoordelen van primaire waterkeringen op het faalmechanisme piping dienen, conform het WBI, voorschriften gevolgd te worden. De toets op piping is gebaseerd op het model van Sellmeijer, waarvoor in 2011 een aangepaste rekenregel is afgeleid. Bij het berekenen van het maximaal toelaatbare verval dienen de partiële veiligheidsfactoren y_{pipe} (veiligheidsfactor) en y_b (schematiseringsfactor) te worden toegepast. In de veiligheidsfactor is onder andere de modelonzekerheid van het Sellmeijer model verwerkt. De modelonzekerheid van het Shields-Darcy model is nog niet vastgesteld en kan verschillen met die van het Sellmeijer model. Hierdoor is de veiligheidsfactor uit het WBI niet toepasbaar voor pipingberekeningen die worden uitgevoerd met het Shields-Darcy model. De schematiseringsfactor heeft betrekking op de onzekerheden in de schematisatie van de ondergrond, die voor beide rekenmodellen gelijk zijn. Daarnaast wordt in het WBI voorgeschreven om in situaties met een afdekkende laag op een pipinggevoelige zandlaag, het werkelijk verval over de waterkering te reduceren met een factor 0,3d (0,3 maal de dikte van de deklaag). Dit wordt toegepast vanwege de weerstand die veroorzaakt wordt door de gefluidiseerde zandkorrels in het opbarstkanaal. Aangezien dit in laboratoriumproeven is aangetoond (Sellmeijer, 1981), kan deze reductie voor beide rekenmodellen worden toegepast.

Uit eerder onderzoek (Hoffmans & Van Rijn, 2017) is gebleken dat het Shields-Darcy model zich onderscheidt van andere pipingmodellen als het gaat om de benadering van de grondwaterstroming, de stroming in het pipingkanaal en de erosiecriteria. Uit dit onderzoek blijkt dat het Shields-Darcy model bevredigende resultaten oplevert voor de kleinschalige laboratoriumexperimenten en proeven met grotere schaal. Maar bij extrapolatie naar natuurlijke omstandigheden in het veld de schaaleffecten te beperkt zijn. Voor situatie zoals die voorkomen in de praktijk, nadert de Darcy term in het model, die de weerstand in het watervoerend pakket karakteriseert, de nul. Een en ander blijkt uit onderhavig onderzoek. Het wordt bevestigd dat de dikte en doorlatendheid van het watervoerend pakket bijna geen invloed hebben in praktijksituaties. Dit is niet natuurgetrouw. De berekening van het kritieke verval hangt volledig af van de stroming in het pipingkanaal en de parameters die het begin van bewegen van de korrels in het pipingkanaal beschrijven. Terwijl de gevoeligheidsanalyse heeft uitgewezen dat de d_{15} wellicht een te grote invloed heeft in het rekenmodel. Dit maakt dat het Shields-Darcy model momenteel nog niet toepasbaar is in de praktijk. Daarnaast zijn er nog een aantal praktische zaken die uitgezocht moeten worden voordat beoordeling van primaire waterkeringen ermee kan plaats vinden. Zo dient voor het Shields-Darcy model de modelonzekerheid te worden vastgesteld en verwerkt in de veiligheidsfactor y_{pipe} .

In het Sellmeijer model worden constante waarden aangehouden voor de rolweerstandshoek en de coëfficiënt van White voor het berekenen van de kritieke schuifspanning in de pipe. Het toepassen van de Shields benadering lijkt echter een logische keuze voor het bepalen van de gradiënt in de pipe, aangezien het berekenen van de kritieke schuifspanning afhankelijk is van de korreldiameter.

Belangrijke aspecten zoals driedimensionale grondwaterstroming, heterogeniteit en tijdsafhankelijkheid zijn momenteel niet opgenomen in het Shields-Darcy model. Dit is ook niet opgenomen in de analytische Sellmeijer rekenregel, maar wel geïmplementeerd in D-Geo Flow. Laatstgenoemde biedt daardoor al veel meer mogelijkheden dan de standaard beoordelingsregels.

5.2 Discussie

5.2.1 Interpretatie van de resultaten

Voor dit onderzoek is gebruik gemaakt van een grote hoeveelheid grondonderzoek in de vorm van boorstaten, sonderingen, pompproefgegevens en korrelverdelingsdiagrammen. Bij het vaststellen van de invoerwaarden van de rekenmodellen komt het, naast kennis van statistiek, aan op het inzicht van de geotechnisch specialist. Hierdoor kunnen de invoerwaarden van de rekenmodellen per geotechnisch specialist verschillen. Om de praktische toepasbaarheid van het Shields-Darcy model te onderzoeken is het van belang realistische invoerwaarden te gebruiken. De invoerwaarden zijn daarom ook vastgesteld conform de voorschriften die daaromtrent zijn opgenomen in het WBI (bijvoorbeeld 5% ondergrens hanteren). Daarnaast is een overzicht van alle invoerwaarden opgenomen in bijlage D. Op basis hiervan kan gesteld worden dat bij een herhaling van dit onderzoek, de resultaten hetzelfde zouden zijn en dat daarmee de resultaten van dit onderzoek valide zijn.

Op basis van het literatuuronderzoek werd verwacht dat toepassing van het Shields-Darcy model zou leiden tot gunstiger resultaten. De resultaten van dit onderzoek zijn geheel in lijn met deze verwachting. Echter zijn de verschillen tussen de analytische rekenmodellen op sommige locaties groter dan vooraf werd verwacht. Een mogelijke verklaring voor dit resultaat kan wellicht terug te leiden zijn naar de schaaleffecten van het

Shields-Darcy model. De schaafeffecten zijn veel beperkter in het Shields-Darcy model en zelfs afwezig als een zekere lengte of dikte van het watervoerend pakket is overschreden. Een andere mogelijke verklaring voor de grote verschillen kan wellicht te vinden zijn in de invloed van de d_{15} . Uit de gevoeligheidsanalyse is gebleken dat de d_{15} een grote invloed heeft in het Shields-Darcy model. In de aangepaste rekenregel van Sellmeijer (2011) is de invloed van de d_{70} verminderd. Op basis van kleinschalige laboratoriumproeven is inzicht verkregen in de invloed van verschillende zandkarakteristieken op de processen van kanaalvorming die uiteindelijk tot bezwijken van een waterkering leiden. In deze proeven is de relatie met de korrelgrootte d_{70} , niet teruggevonden. De invloed van de d_{70} is in de Sellmeijer rekenregel daarom gereduceerd middels de schalingsfactor F_{scale} door toevoeging van de gemiddelde d_{70m} . Waar in het Sellmeijer model de invloed van zandgrofheid is afgezwakt is de invloed van de d_{15} in het Shields-Darcy onverminderd groot. Dit maakt het model extra gevoelig voor variatie in d_{15} , aangezien de Darcy term in praktijksituaties de nul nadert. Het kritieke verval hangt volledig af van de stroming in het pipingkanaal en de parameters die het begin van bewegen van de korrels in het pipingkanaal beschrijven. Deze grote invloed van d_{15} vormt een contradictie met het feit dat dit in de praktijk een lastig vast te stellen invoerparameter is.

Meer in het algemeen geldt dit ook voor de kwelweglengte, de dikte van de deklaag en de dikte en doorlatendheid van het watervoerend pakket. Deze invoerparameters zijn belangrijk voor het beoordelen van primaire waterkeringen op het faalmechanisme piping, maar zijn in de praktijk lastig vast te stellen. In de praktijk zal toepassing van Sellmeijer en Shields-Darcy leiden tot dezelfde problemen.

5.2.2 Limitaties van het onderzoek

Het hoogwater van 2018 was voor deze casus niet voldoende hoog om het kritieke verval te overschrijden. Hierdoor kon niet gevalideerd worden of de modellen overeenkomen met de waarnemingen in het veld. Voor zover bekend, zijn op alle vier de locaties geen zandmeevoerende wellen geconstateerd tijdens het hoogwater van 2018. Dit betekent dat beide rekenmodellen een toetsresultaat geven dat overeenkomt met de waarnemingen bij het hoogwater van 2018.

In de rekenregel van Sellmeijer zit een geometrie factor (F_3) verwerkt die alleen toegepast kan worden voor standaard dijkgeometrieën (één zandlaag met of zonder deklaag). Bij niet-standaard geometrieën dient de pipingmodule van MSEEP te worden toegepast voor de kalibratie van F_3 . In dit onderzoek is uit praktische overwegingen uitgegaan van standaard dijkgeometrieën. Hierdoor kunnen de resultaten van het Sellmeijer model een vertekend beeld geven.

Uit praktische overwegingen is in dit onderzoek een constante waarde (1,15) aangenomen voor de schematiseringsfactor. Deze factor dient volgens het WBI berekend te worden en zal in werkelijkheid voor iedere locatie verschillen. Voor de vergelijking van de rekenmodellen heeft dit geen gevolgen.

In dit onderzoek is slechts één numeriek D-Geo Flow model gebruikt om een vergelijking te maken met het analytische Shields-Darcy model. Hierdoor kunnen geen harde conclusies worden verbonden aan de verschillen in uitkomsten. D-Geo Flow berekende in het geval van de locatie Buggenum een kritiek verval dat tussen Shields-Darcy en Sellmeijer in lag. Of dit op de andere locaties ook zo is, is helaas niet met zekerheid te stellen zonder een D-Geo Flow berekening. Het ligt echter wel in lijn der verwachting.

Er is niet beoordeeld op het heave- en opbarstcriterium. Hierdoor kan slechts voorwaardelijk (veronderstelling dat opbarsten en heave reeds plaats hebben gevonden) een uitspraak worden gedaan over het wel of niet optreden van terugschrijdende erosie.

5.3 Aanbevelingen

Een eerste aanbeveling is om een pipinggevoelige locatie door te rekenen met beide rekenmodellen, waar zandmeevoerende wellen zijn geconstateerd tijdens het hoogwater van 1993, 1995, 2011 of 2018. Hierdoor kan gecontroleerd worden of de rekenmodellen dicht bij de werkelijkheid zitten. Eén van de kanttekeningen daarbij is dat de modellen niet volledig gevalideerd kunnen worden aan de hand van een waargenomen zandmeevoerende wel, aangezien niet gecontroleerd kan worden of de wel duidt op heave of terugschrijdende erosie. Volledige validatie is alleen mogelijk met een voorbeeld van een volledig bezwiken dijk.

Daarnaast wordt aanbevolen om de invloed van de d_{15} nader te onderzoeken. Deze parameter heeft in het huidige model wellicht een te grote invloed. In de aangepaste rekenregel van Sellmeijer (2011) is de invloed van de d_{70} ook gereduceerd. Wellicht kan dit voor het Shields-Darcy model ook worden onderzocht in kleinschalige laboratoriumproeven.

Tevens wordt aanbevolen om, voor de rekenregel van Sellmeijer, alle locaties door te rekenen in MSEEP. Hierdoor zullen de uitkomsten wellicht anders zijn dan de standaardconfiguratie, waardoor de verschillen tussen de modellen misschien minder fors zullen zijn.

Voor het Sellmeijer model zijn eindige elementen modellen (EEM) beschikbaar, zoals MSEEP en D-Geo Flow. Hierdoor kan de heterogeniteit, anisotropie en tijdsafhankelijkheid worden meegenomen. Voor het Shields-Darcy model is echter nog geen EEM ontwikkeld. In een vervolgonderzoek zou een EEM ontwikkeld kunnen worden, om ook voor het Shields-Darcy model de heterogeniteit, anisotropie en tijdsafhankelijkheid mee te kunnen nemen bij het berekenen van het kritisch verval.

Verder is voor het Sellmeijer model een veiligheidsfactor (y_{pipe}) ontwikkeld voor de beoordeling van de primaire waterkeringen. In die veiligheidsfactor zit een modelonzekerheid verwerkt, welke nog niet is vastgesteld voor het Shields-Darcy model. Het wordt aanbevolen om een veiligheidsfactor voor het Shields-Darcy model te bepalen, om de beoordeling conform het WBI 2017 te faciliteren.

Naast de eerdergenoemde aanbevelingen, zijn er tevens aanbevelingen gedaan in het rapport “Hydraulic approach for predicting piping in dikes” (Hoffmans & Van Rijn, Hydraulic approach for predicting piping in dikes, 2017). In dat rapport wordt aanbevolen om onderzoek te doen naar de schaaffecten in het Shields-Darcy model. In het huidige model worden de parameters niet beïnvloed door het vergroten van de schaal. In dat rapport wordt aanbevolen de stroomlijnen van een ondergrond met verschillende zandlagen te onderzoeken, om deze hypothese te bevestigen. Dat de schaaffecten niet juist zijn is in dit onderzoek bevestigd.

BEGRIPPENLIJST

Begrip	Definitie
Aanwezig verval	Het potentiaalverschil tussen de waterstand van de rivier en de grondwaterstand in het polderpeil (meestal het maaiveld).
Analytisch	Berekening door middel van een formule/vergelijking. Hierin zit geen tijdsafhankelijkheid verwerkt.
Anisotroop	Eigenschappen in een materiaal die niet in iedere richting hetzelfde is.
Cohesie	Samenhang van de ondergrond. Klei is cohesief, zand niet.
Curve-fitting	Het ontwikkelen van een kromme of mathematische vergelijking die het best past bij een gegeven dataset.
Debiet	Hoeveelheid stroming uitgedrukt in m^3/s of m^3/d
Doorlatendheid	De mate waarin het grondwater door het zandpakket kan stromen. Vaak uitgedrukt in m/s of m/dag .
Eindige Elementen Model	Methode die is ontwikkeld omdat analytische rekenmodellen te weinig mogelijkheden bieden of te complex zijn in sommige situaties. Denk hierbij aan de gelaagdheid van de bodem.
Empirie	Een ondervinding of bevinding op basis van waarnemingen of metingen.
Erosie	Het wegspoelen van zandkorrels vanwege instabiele grondlagen en stroming in het zandpakket.
Fluïdiseren	Zandkorrels die in het opbarstkanaal borrelen door de onderliggende waterdruk, maar door de weerstand in het kanaal en de zwaartekracht niet worden uitgespoeld.
Grensevenwicht	Het moment waarop de korrels, bij een bepaalde waterstand, net niet in beweging komen.
Heave	Het fluïdiseren van zandkorrels in het opbarstkanaal. Door dit fenomeen wordt de weerstand groter en is er meer kritiek verval benodigd voor het verder ontwikkelen van het pipingkanaal.
Heterogeen	Afwisselende grondlagen, waarin de korrelgrootte en doorlatendheid kan variëren.
Homogeen	Een grondlaag die in alle richtingen gelijk is. Waaronder de korrelgrootte.
Intredepunt	Het punt in de rivierzijde waar water de grond in stroomt richting de landzijde.
Intrinsieke doorlatendheid	De doorlatendheid die afhankelijk is van de geometrische eigenschappen van het korrelskelet. Onafhankelijk van de viscositeit van het water.

Begrip	Definitie
Isotroop	De materiaaleigenschappen hangen niet af van de richting en is overal gelijk.
Kalibreren	Het ijken van een vergelijking zodat deze overeenkomt met gemeten resultaten.
Karakteristieke waarde	De onder- of bovengrens van een parameter, afhankelijk van de invloed op de einduitkomst. Hierdoor worden onzekerheden gerelateerd aan de invoerwaarden meegenomen.
Kinematische viscositeit	De fysische materiaaleigenschap van vloeistoffen en gassen. Het geeft weer wat de mate van weerstand is tegen vervorming. Viscositeit is ook bekend als de stroperigheid van een vloeistof
Kritiek verval	Het berekende potentiaalverschil tussen de rivier en het achterland. Overschrijding van dit punt zorgt voor de ontwikkeling van het pipingkanaal.
Kritieke (hydraulische) gradiënt	Het berekende verhang tussen de rivier en het achterland. Dit is het kritieke verval gedeeld door de aanwezige kwelweglengte.
Kwelweglengte	De afstand die het water moet afleggen tussen het in- en uittredepunt.
Laminair	Een constante stroming waarin elk laagje water dezelfde snelheid heeft.
Numeriek	Een berekening die wordt uitgevoerd d.m.v. iteratie, vaak verricht door computers. Hierdoor kan tijdsafhankelijkheid worden meegenomen.
Opbarstkanaal	Een scheur in de deklaag waardoor zand uit het zandpakket kan worden uitgespoeld.
Permeabiliteit	Een materiaaleigenschap die weergeeft in welke mate een vaste stof een andere stof doorlaat. Dit verschilt per materiaal.
Piping	Het proces waarbij een bepaalde waterdruk zorgt voor het opbarsten van de deklaag, waarna zand wordt afgevoerd vanuit de ondergrond. Hierdoor vindt terugschrijdende erosie plaats, waardoor zand vanuit het achterland richting de rivierzijde erodeert.
Ruimen	Het ontstaan van een doorgaande verbinding tussen de rivierzijde en het achterland. Hierdoor wordt het pipingkanaal ruimer. Zodra dit proces is ontstaan, is er geen weg terug en is de kans op bezwijken van de waterkering erg groot.
Schuifspanning	De spanning die benodigd is om een materiaalsoort te vervormen (schuiven), zonder het volume te veranderen.
Secundaire erosie	Het eroderen van de wanden en bodem van het pipingkanaal.
Sondering	Een methode om de weerstand van de ondergrond te meten. Bij deze methode wordt een buis de grond in geduwd en kan de weerstand worden gemeten. Hierdoor kunnen de grondlagen worden geclassificeerd.

Begrip	Definitie
Stationair	Een proces of berekening die niet afhankelijk is van de tijd.
Stijghoogte	Het potentiële peil van het grondwater. Dit is de hoogte van het water in een peilbuis. De stijghoogte kan boven het maaiveld uitkomen, in dat geval wordt het kwelwater genoemd.
Terugschrijdende erosie	Erosieproces waarbij zandkorrels vanuit het achterland, onder de dijk door, eroderen tot de rivierzijde is bereikt.
Transmissiviteit	De mate waarin een vloeistof door een granulaire laag kan stromen. Dit is de doorlatendheid vermenigvuldigd met de dikte van de laag. Uitgedrukt in m^2/d .
Turbulent	Een niet constante stroming, waardoor wervelingen en verschil in stroming ontstaat.
Uittredepunt	Het punt in het achterland waar kwelwater en eventueel zand uitstroomt. Dit gebeurt op locaties waar de deklaag dunner is en opbarsten heeft opgetreden.
Uniformiteit	Gelijke waarden voor een materiaalsoort. Ook wel eenvormigheid genoemd.
Valideren	De juistheid of geldigheid van een rekenregel of model controleren en aantonen.
Wandschuifspanning	Vervorming in de wanden van het pipingkanaal, waarbij het volume hetzelfde blijft.
Watervoerend pakket	Het zandpakket onder de deklaag waar het grondwater doorheen stroomt en goed doorlatend is.
(Zandmeevoerende) Wellen	Het opborrelen van water in het uittredepunt. Bij een hoog potentiaalverschil kan zand mee worden gevoerd.
Wettelijk Beoordelings-instrumentarium	Toetsingsmethode die wordt gehanteerd voor het beoordelen van de waterkeringen op alle faalmechanismen.

LITERATUURLIJST

- AHN. (2017, Mei 4). *Actueel Hoogtebestand Nederland*. Opgehaald van <https://ahn.arcgisonline.nl/ahnviewer/>
- De Bruin, H. (2013). *Pipingproces in stripvorm*. Delft.
- Deltares. (2010). *SBW Hervalidatie piping*. Delft: Deltares.
- Deltares. (2018). *D-Geo Flow - User manual*. Delft.
- DINOloket. (2017, Mei 4). *Ondergrondmodellen*. Opgehaald van DINOloket: <https://www.dinoloket.nl/ondergrondmodellen>
- ENW. (2012). *Technisch Rapport Grondmechanisch Schematiseren bij Dijken*.
- Förster, U., Van den Ham, G., Calle, E., & Kruse, G. (2012). *Zandmeevoerende Wellen*. Deltares.
- Govers, G. (1987). *Initiation of motion in overland flow*.
- Grass, A. (1970). *Initial instability of fine bed sand*.
- Hanses, U. (1985). *Zur Mechanik der Entwicklung von Erosionskanalen in geschichtetem Untergrund unter Stauanlagen*. Berlin: Dissertation Grundbauinstitut der Technischen Universitat.
- Hoffmans, G. (2014). *An overview of piping models*.
- Hoffmans, G. (2016). *Shields-Darcy model, Alternative piping model?* Deltares, Delft.
- Hoffmans, G., & Van Rijn, L. (2017). *Hydraulic approach for predicting piping in dikes*. Taylor&Francis.
- Knoef, H., Sellmeijer, H., Lopez, J., & Luijendijk, S. (2009). *SBW Piping - Hervalidatie piping*. Delft.
- Loiseleux, T., Grondet, P., Rabaud, M., & Doppler, D. (2005). *Onset of erosion and avalanche for an inclined granular bed sheared by a continuous laminar flow*.
- Lopez de la Cruz, X. (2010). *Kalibratie van de veiligheidsfactoren*. Deltares.
- Pilotti, M., & Menduni, G. (2001). *Beginning of sediment transport of incoherent grains in shallow shear flows*.
- Rijkswaterstaat. (2017). *Handreiking ontwerpen met overstromingskansen*.
- Sellmeijer, J. (1981). *Piping due to Flow towards Ditches and Holes*. Delft.
- Sellmeijer, J. (1988). *On the mechanism of piping under impervious structures*. Technische Universiteit Delft, Delft.
- Sellmeijer, J. (2006). *Numerical computation of seepage erosion below dams (piping)*. Gouda.
- Sellmeijer, J., Calle, E., & Slip, J. (1989). *Influence of aquifer thickness on piping below dikes and dams*. Technische Universiteit Delft, Delft.
- Sellmeijer, J., Lopez de la Cruz, J., Van Beek, V., & Knoeff, J. (2011). *Fine-tuning of the piping model through small-scale, medium-scale and IJkdijk experiments*.
- Silvis, F. (1991). *Verificatie Piping Model - Proeven in de Deltagoot*. Delft.
- TAW. (1999). *Technisch rapport Zandmeevoerende wellen*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, Delft.
- Van Beek, V., & Hoffmans, G. (2017). *Evaluation of Dutch backward erosion piping models and a future perspective*. Delft: Deltares.
- Van Beek, V., Knoef, J., & Sellmeijer, J. (2011). *Observations on the process of backward piping by underseepage in cohesionless soils in small-, medium and full-scale experiments*.
- Van Beek, V., Van Essen, H., Vandenboer, K., & Bezuijen, A. (2015). *Developments in modelling of backward erosion piping*.
- Van der Lust, P. (2017). *Piping in the Maasvallei - A possibility of far-fetched scenario*. Delft University of Technology, Delft.
- van Esch, J., Sellmeijer, J., & Stolle, D. (2012). *Modelling transient Groundwater Flow and Piping under Dikes and Dams*. Delft: Deltares.

Van Rijn, L. (2007). *Unified view of sediment transport by currents and waves*.

Van Rijn, L. (2014). *Review of piping processes and models, report prepared for Deltares*.

White, C. (1940). The equilibrium of grains on the bed of a stream. *Proceedings Royal Society*, 322-338.

COLOFON

TITEL

ALTERNATIEF PIPINGMODEL?

ONDERTITEL

ONDERZOEK NAAR DE PRAKTISCHE TOEPASBAARHEID VAN HET SHIELDS-DARCY MODEL BIJ DE BEOORDELING VAN PIPING

ILLUSTRATIE OMSLAG

Waterschap Rivierenland

PERSONALIA AUTEURS

Niels Bouwman

Hogeschool Van Hall Larenstein
Land- en Watermanagement
niels.bouwman@hvhl.nl
+31 (6)24 33 43 40

Renko de Romph

Hogeschool Van Hall Larenstein
Land- en Watermanagement
renko.deromph@hvhl.nl
+31 (6)34 00 06 65

ONDERWIJSINSTELLING

Hogeschool Van Hall Larenstein

Postbus 9001
6880 GB Velp
Nederland
+31 (0)26 369 56 95

www.hvhl.com

AFSTUDEERBEDRIJF

Arcadis Nederland B.V.

Postbus 264
6800 AG Arnhem
Nederland
+31 (0)88 4261 261

www.arcadis.com

DATUM

7 juni 2018

BIJLAGEN

7 juni 2018
Definitief



**van hall
larenstein**
university of applied sciences

INHOUDSOPGAVE

A	REFLECTIE	A-1
B	OVERZICHT PARAMETERS REKENMODELLEN	B-3
C	OVERZICHT GRONDONDERZOEK	C-2
D	SCHEMATISATIES ONDERZOEKLOCATIES	D-1
E	INVOERWAARDEN REKENMODELLEN	E-1
F	KORRELVERDELINGEN ONDERZOEKLOCATIES	F-1
G	D-GEO FLOW MODEL BUGGENUM	G-7
H	RESULTATEN GEVOELIGHEIDSANALYSES	H-2
I	PROJECTPLAN	I-2
J	WERKBESTANDEN	J-1

A REFLECTIE

In de reflectie wordt teruggeblikt op het onderzoek en het bijbehorende proces. Het doel van deze reflectie is om na te gaan wat leerpunten zijn om beter te kunnen handelen in een toekomstige, soortgelijke situatie. Deze reflectie heeft een vierdelige opzet, bestaande uit een reflectie op het literatuuronderzoek (theoretisch kader), de gehanteerde onderzoeksmethodologie, de onderzoeksuitkomsten en het proces.

A.1 Literatuuronderzoek

In het theoretisch kader zijn de kernbegrippen uit de probleemstelling en onderliggende onderzoeksvragen beschreven. Dit betrof de begrippen: faalmechanisme piping, analytisch Sellmeijer model, analytisch Shields-Darcy model en het numerieke D-Geo Flow model. Over het faalmechanisme piping, het Sellmeijer model en D-Geo Flow was voldoende informatie beschikbaar. De informatie over het Shields-Darcy model was echter beperkt. De theorie achter het rekenmodel is beschreven aan de hand van een tweetal beknopte publicaties van Hoffmans & Van Beek (2017) en Hoffmans & Van Rijn (2017). Het gehele werk van Gijs Hoffmans is namelijk nog niet gepubliceerd. Hierdoor was de theorie soms moeilijk te begrijpen. Omdat ons na het lezen van de publicaties een aantal zaken nog niet helder waren, hebben we afgesproken met Gijs Hoffmans, de opsteller van het rekenmodel. Hij heeft ons uitleg gegeven over de aannames en theorieën die ten grondslag liggen aan het afleiden van de rekenregels voor het rekenmodel.

Het theoretisch kader heeft voldoende handvatten geboden om het onderzoek uit te voeren. Het was ook niet nodig om meer literatuuronderzoek te doen. Vooral de inzichten uit de publicatie van Hoffmans & Van Beek (2017) hebben veel bijgedragen aan het onderzoek. Hierin staan de verschillen tussen beide rekenmodellen namelijk helder beschreven. Echter, we hadden de theorie achter het Shields-Darcy model beter kunnen beschrijven als het hele werk van Gijs Hoffmans al was gepubliceerd.

A.2 Onderzoeksmethodologie

In dit onderzoek is een meervoudige casestudie uitgevoerd. Hierin zijn vier locaties doorgerekend met het model van Sellmeijer en het Shields-Darcy model. Daarnaast is per locatie een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd om de gevoeligheid van de invoerwaarden van de rekenmodellen vast te stellen. Met de onderzoeksmethode, zoals beschreven in paragraaf 1.7, hebben we een gedegen antwoord kunnen vinden op de probleemstelling en de onderliggende onderzoeksvragen. Desalniettemin kunnen we op een aantal zaken reflecteren.

Allereerst kunnen we reflecteren op de vaststelling van de invoerwaarden van de rekenmodellen. Hiervoor is in dit onderzoek gebruik gemaakt van een grote hoeveelheid grondonderzoek in de vorm van boorstaten, sonderingen, pompproefgegevens en korrelverdelingsdiagrammen. Van de locaties Well en Loo waren echter geen (geschikte) pompproefgegevens beschikbaar. De pompproefgegevens van Well waren helaas onbruikbaar en van Loo waren geen pompproefgegevens beschikbaar. Van nabijgelegen plaatsen (Buggenum en Westervoort) waren wel pompproefgegevens beschikbaar. In dit onderzoek zijn de pompproeven van Buggenum en Westervoort representatief gesteld voor respectievelijk de locaties Well en Loo. Hierdoor kunnen geen harde uitspraken worden gedaan over het al dan niet optreden van terugschrijdende erosie.

In dit onderzoek zijn we erachter gekomen dat het vaststellen van de 15-, 50- en 70-percentielwaarde van de pipinggevoelige zandlaag, de dikte en doorlatendheid van het watervoerend pakket, de kwelweglengte en de dikte van de deklaag een lastig en tijdrovend proces is. We zijn hier ook langer mee bezig geweest dan van tevoren werd verwacht.

Verder hebben we in dit onderzoek rekening gehouden met een 'what if' scenario. Aangezien de rekenregel van Sellmeijer reeds is geïmplementeerd in het EEM D-Geo Flow, leek het ons interessant om het Shields-Darcy model, naast de vergelijking met het analytische model van Sellmeijer, te vergelijken met een numeriek D-Geo Flow model. Van de locatie Buggenum was bij aanvang van het onderzoek al een "werkend" D-Geo Flow model beschikbaar. Dit model zou alleen nog gekalibreerd worden met metingen behorend bij de hoogwatergolf van januari 2018. Deze rekenexercitie zou echter niet door ons uitgevoerd worden, maar door een collega. Indien deze rekenexercitie niet op tijd zou zijn uitgevoerd, zouden we de vergelijking tussen het analytische Shields-Darcy model en het numerieke D-Geo Flow model maken op basis van het originele D-Geo Flow model van Buggenum. De kalibratie is echter op tijd uitgevoerd, waardoor de vergelijking is gemaakt op basis van het gekalibreerde D-Geo Flow model.

A.3 Onderzoeksuitkomsten

Het onderzoek geeft een volledig beeld van de praktische toepasbaarheid van het Shields-Darcy model. De onderzoeksuitkomsten bieden dan ook voldoende inzichten om relevante aanbevelingen te doen ten aanzien van vervolgonderzoek.

Op basis van het literatuuronderzoek werd verwacht dat toepassing van het Shields-Darcy model zou leiden tot gunstiger resultaten. De resultaten van dit onderzoek zijn geheel in lijn met deze verwachting. Echter zijn de verschillen tussen de analytische rekenmodellen op sommige locaties groter dan vooraf werd verwacht. Vooral verrassend was het verschil in uitkomst tussen het analytische Shields-Darcy model en het numerieke D-Geo Flow model van Buggenum.

Dit verschil was volgens ons te verklaren door de beperkte schaafeffecten van het Shields-Darcy model bij extrapolatie naar natuurlijke omstandigheden in het veld. Voor situaties zoals die voorkomen in de praktijk, nadert de Darcy term in het model, die de weerstand in het watervoerend pakket karakteriseert, de nul.

Toen we de oorzaak hiervan probeerden te achterhalen kwamen we erachter dat de dikte van invloedzone A in praktijksituaties slechts enkele centimeters betrof bij een watervoerend pakket van enkele meters. Ondanks dat de schaafeffecten beperkt bleken te zijn, zorgde dit enigszins voor verbazing. We hebben hierover dan ook contact gehad met Gijs Hoffmans, de opsteller van dit pipingmodel. Hij bevestigde dat de schaafeffecten van het pipingmodel beperkt zijn en dat de constatering juist was. Hierdoor twijfelden we niet langer en hebben we duidelijke aanbevelingen kunnen doen ten aanzien van vervolgonderzoek.

A.4 Proces

We zijn zeer tevreden over de wijze waarop het afstuderen is verlopen. We hebben ons zoveel mogelijk gehouden aan het projectplan en continu actielijsten bijgehouden. We hebben het project op de rit gehouden door iedere week de voortgang te bekijken en tijdig afspraken te maken met interne en externe begeleiders en andere betrokkenen.

Daarnaast hebben we op een aantal vaste momenten de voortgang besproken met zowel onze interne als externe begeleider. Op deze momenten bespraken we onze tussenproducten en keken we door naar de volgende onderzoeksfase. De tussentijdse feedback heeft ervoor gezorgd dat we de kwaliteit van ons onderzoek hoog konden houden, doordat het meerdere malen gecontroleerd is door onze interne en externe begeleiders.

B OVERZICHT PARAMETERS REKENMODELLEN

In deze bijlage worden de invoerparameters van de verschillende rekenmodellen toegelicht. Het doel van deze bijlage is het creëren van overzicht van de invoerparameters van de rekenmodellen. In de tabellen wordt onderscheid gemaakt in invoerparameters die in beide modellen voorkomen of die afzonderlijk voorkomen.

Tabel B-1: Invoerparameters die voorkomen in beide rekenmodellen

Parameter	Toelichting	Eenheid
ΔH	Maatgevende verval over de kering. Het maatgevende verval is gelijk aan het verschil tussen de maatgevende buitenwaterstand – maatgevende hoge waterstand (MHW) bij rivieren – en de waterstand aan de binnenzijde van de waterkering ter plaatse van het uittreepunt, indien een vrije waterspiegel aanwezig. Indien ter plaatse van het uittreepunt of de opbarstlocatie geen vrije waterstand heerst, kan gerekend worden met het maaiveldniveau, rekening houdend met eventuele maaiveldddaling	[m]
Δ	Relatieve dichtheid (dichtheid van de maximale dichtheid). De relatieve dichtheid kan worden berekend met: $\frac{\gamma'_p}{\gamma_w} \left(\frac{kN/m^3}{kN/m^3} \right) \text{ en } \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(\frac{kg/m^3}{kg/m^3} \right) - 1.$	[-]
K	Karakteristieke waarde specifieke doorlatendheid van de pipinggevoelige bovenste zandlaag. Deze waarde kan op verschillende manieren worden geschat of gemeten. De doorlatendheid is te berekenen aan de hand van zeefanalyses van het zand in de zandlaag. Daarnaast is de doorlatendheid ook te schatten aan de hand van in situ proeven (pompproef, fallinghead-proeven, monopoolmetingen, etc.) of uit REGIS II bestanden over diepere boringen. (Förster, Van den Ham, Calle, & Kruse, 2012)	[m/s]
D	Dikte van de watervoerende zandlaag. De dikte van de zandlaag kan worden vastgesteld op basis van sonderingen en boringen. Wanneer een onregelmatig verloop van de ondergrondconfiguratie in het tracé wordt verwacht is geofysisch onderzoek aan te bevelen. Hiermee kan nauwkeuriger de dikte van de zandlaag worden bepaald.	[m]
L	De kwelweglengte is in beginsel de afstand tussen het intreepunt voor grondwaterstroming door de zandlaag aan de buitenzijde van de kering en het uittreepunt aan de binnenzijde. Soms zijn die punten op natuurlijke wijze aan te duiden, veelal echter ook niet. In het geval dat aan de binnenzijde een opbarstgevoelige afdeklaag aanwezig is wordt het dichtst bij de waterkering gelegen mogelijke opbarstpunt als uittreepunt gekozen. De keuze van het intreepunt is afhankelijk van het al dan niet aanwezig zijn van voorland aan de buitenzijde van de kering. Voorland kan, althans deels, in de berekening van de kwelweglengte worden meegenomen. In feite moet, wanneer er voorland is, een theoretisch of denkbeeldig intreepunt worden bepaald. Hierbij speelt de erosiegevoeligheid van het voorland een belangrijke rol. Met name bij aanwezigheid van niet-waterkerende objecten, zoals bomen, kan het intredepunt t.g.v. erosie in de richting van de waterkering verschuiven, met als gevolg een verkorte kwelweglengte.	[m]
ν	Kinematische viscositeit van het grondwater is afhankelijk van de temperatuur van het grondwater. Voor een grondwatertemperatuur van 10° Celsius is de kinematische viscositeit 1,33 E-06 m/s ² . (Förster, Van den Ham, Calle, & Kruse, 2012)	[m ² /s]
g	De valversnelling van de zwaartekracht. Het is de versnelling waarmee voorwerpen naar de aarde vallen in vrije val, dus als er geen andere krachten op werken dan de zwaartekracht. De valversnelling van de aan het oppervlak van de aarde is 9,81 m/s ² .	[m/s ²]

Tabel B-2: Invoerparameters die voorkomen in het Sellmeijer model

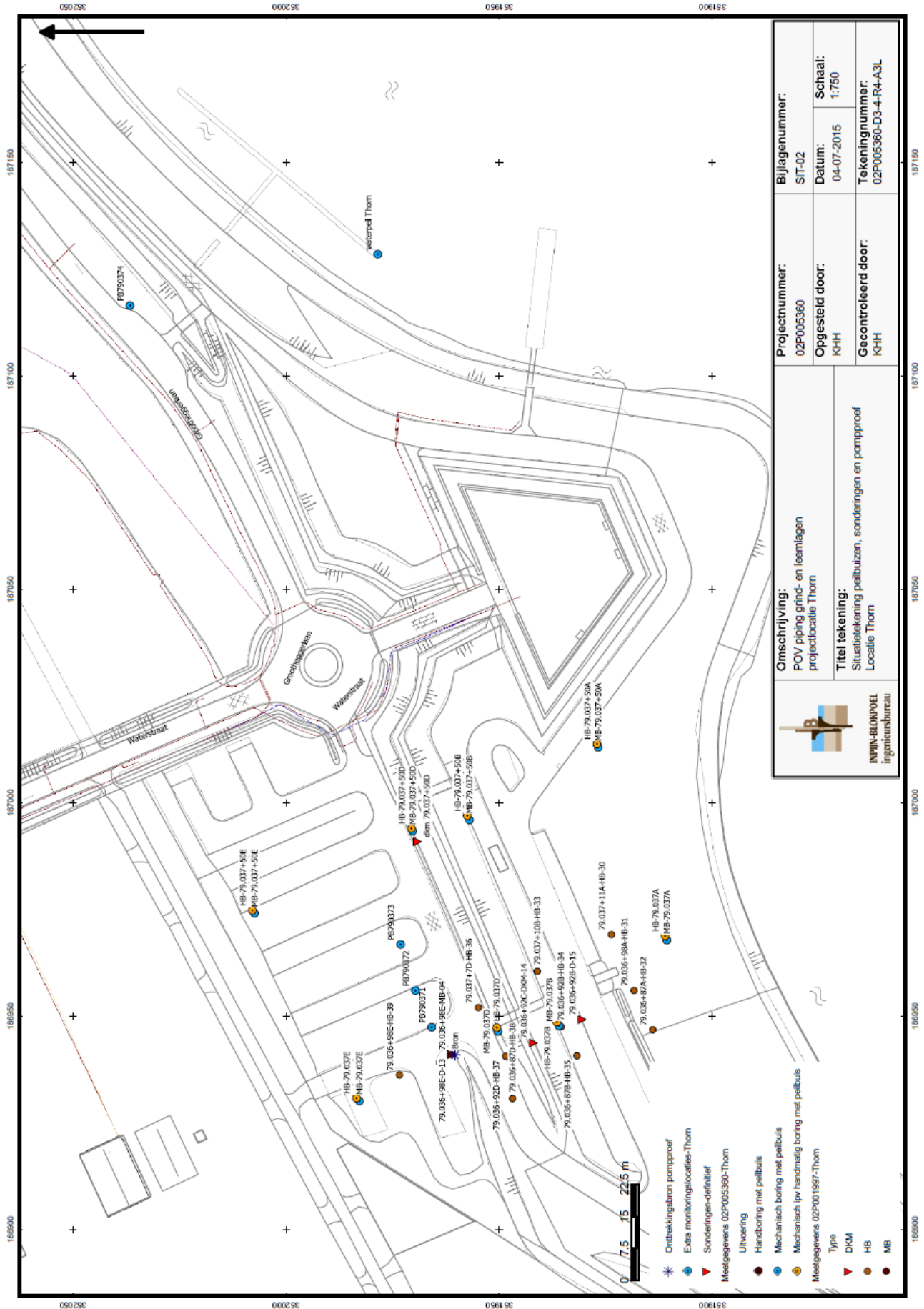
Parameter	Toelichting	Eenheid
γ'_p	(Schijnbaar) volumegewicht van de zandkorrels onder water. Voor het bepalen van het volumiek gewicht van de zandkorrels onder water zijn monsterwegingen nodig. Voor deze parameter is een nominale waarde* vastgesteld van 16 kN/m ³ . (Förster, Van den Ham, Calle, & Kruse, 2012)	[kN/m ³]
γ_w	Volumegewicht van water. Voor deze parameter is een nominale waarde* vastgesteld van 10 kN/m ³ . (Förster, Van den Ham, Calle, & Kruse, 2012)	[kN/m ³]
θ	Rolweerstandshoek van de zandkorrels. Voor deze parameter is een nominale waarde* vastgesteld van 37°. (Förster, Van den Ham, Calle, & Kruse, 2012)	[°]
η	Voor de sleepkrachtfactor is een nominale waarde* vastgesteld van 0,25. Dit is een dimensieloze parameter. (Förster, Van den Ham, Calle, & Kruse, 2012)	[-]
κ	Intrinsieke doorlatendheid van de pipinggevoelige bovenste zandlaag. De intrinsieke doorlatendheid kan worden afgeleid uit schattingen van karakteristieke waarde van de specifieke doorlatendheid van de pipinggevoelige bovenste zandlaag.	[m ²]
d_{70}	70-percentielwaarde van de korrelverdeling. Dit is de waarde waarbij 70% van de korrels uit de zandlaag kleiner is. Deze waarde wordt bepaald met metingen waarbij de zeeffracties worden bepaald. De erosie vindt plaats aan de bovenkant van de zandlaag, daarom moeten voor de bepaling van de d70 monsters uit de bovenkant van de zandlaag genomen worden.	[m]
d_{70m}	Gemiddelde d70 in de kleine schaalproeven.	[m]
RD	Relatieve dichtheid. Deze term is opgenomen in de sterktefactor. De relatieve dichtheid is echter alleen gevalideerd bij dichtheden groter dan 50%. De invloed van de relatieve dichtheid blijkt weinig invloed te hebben op het kritieke verval. Daarom wordt deze niet meegenomen in de toetsregel. Een ander argument om de relatieve dichtheid niet mee te nemen in de toetsing, heeft te maken met het feit dat het lastig is om dit in de praktijk te bepalen. (Förster, Van den Ham, Calle, & Kruse, 2012)	[-]
RD_m	Gemiddelde relatieve dichtheid die is bepaald in kleine schaalproeven. Uit deze schaalproeven is een waarde van 0,725 uitgekomen.	[-]
*	De nominaal vastgestelde waarden in deze tabel kunnen niet op eenvoudige wijze van geval tot geval worden bepaald. Bovendien wordt door deze vaststelling de modelfout in het oorspronkelijke model van Sellmeijer afgedekt.	

Tabel B-3: Invoerparameters die voorkomen in het Shields-Darcy model

Parameter	Toelichting	Eenheid
$S_{dike,c}$	Het kritieke gradiënt vanaf het intredepunt tot aan het uitredepunt. Het kritieke gradiënt wordt berekend door het kritieke gradiënt van het zandpakket en de pipe bij elkaar op te tellen	[m]
$S_{pipe,c}$	Het kritieke gradiënt tussen het begin van de pipe en het uitredepunt. Bij overschrijding van het kritieke gradiënt gaan de korrels in de pipe eroderen in de richting van het uitredepunt, waardoor de pipe in lengte- en radiale richting toeneemt.	[m]
$S_{sand,c}$	Het kritieke gradiënt van het zandpakket dat vanaf het intredepunt tot aan de pipe loopt. Als het kritieke gradiënt wordt overschreden dan ontwikkelt de pipe zich. Als de pipe blijft ontwikkelen dan wordt het kritieke gradiënt van het zandpakket kleiner.	[m]
$\Psi_{lam,c}$	Kritieke Shields parameter voor laminaire stroming. De Shields parameter is te bepalen met de dimensieloze diameter. De Shields parameter geeft de erosiecriteria weer. Hierdoor kan bepaald worden wat de weerstand is van het zand. (Hoffmans & Van Rijn, 2017)	[-]
ρ_s	Dichtheid van het sediment. Voor zand is dit meestal 1600 kg/m ³ . De dichtheid van het sediment en het water wordt vaak gecombineerd tot 1 parameter, genaamd Delta.	[kg/m ³]
ρ	Dichtheid van water. Voor zoet water is dit 1000 kg/m ³ . Voor zout water is de dichtheid ongeveer 1025 kg/m ³ . Echter hangt dit af van het zoutgehalte	[kg/m ³]
l_c	Kritieke pipe lengte wordt berekend om het totale kritieke verval te kunnen bepalen. De kritieke pipe lengte wordt bepaald door middel van de dikte van het watervoerend pakket en de kwelweglengte. Daarnaast wordt een kalibratie parameter gebruikt die nader wordt toegelicht. (Hoffmans & Van Rijn, 2017)	[m]
D_*	De dimensieloze diameter. Deze is afhankelijk van de d_{50} en de delta. De dimensieloze diameter wordt berekend om de Shields parameter te bepalen. De invloed hiervan is aangetoond door Mantz (1977).	[-]
d_{50}	De gemiddelde korreldiameter. Deze wordt bepaald door middel van zeefkrommes. Hiervoor zijn zandmonsters nodig van o.a. boringen. De d_{50} kan echter verschillen in alle richtingen, waardoor de spreiding groot kan zijn op relatief korte afstanden. Het nauwkeurig bepalen van deze parameter is in de praktijk vaak lastig.	[m]
d_{15}	15-percentielwaarde van de korrelverdeling. Dit houdt in dat 15% van de korrels uit het zandmonster kleiner is dan de bijbehorende diameter, die wordt bepaald tijdens de zeefproeven.	[m]
α_f	Grondwater coëfficiënt dat is bepaald door middel van kalibratie met 60 kleinschalige proeven en daarna is gevalideerd door middel van 60 middelgrote proeven. Uit deze proeven is gebleken dat voor deze dimensieloze parameter de waarde 5 een representatief getal is.	[-]
α_R	Reynolds coëfficiënt dat is bepaald door middel van kalibratie met 60 kleinschalige proeven en daarna is gevalideerd door middel van 60 middelgrote proeven. Uit deze proeven is gebleken dat voor deze dimensieloze parameter de waarde 6 een representatief getal is.	[-]
l_R	Lengte-schaal coëfficiënt dat is bepaald door middel van kalibratie met 60 kleinschalige proeven en daarna is gevalideerd door middel van 60 middelgrote proeven. Uit deze proeven is gebleken dat voor deze parameter de waarde $18 \cdot 10^{-6}$ m een representatief getal is.	[m]

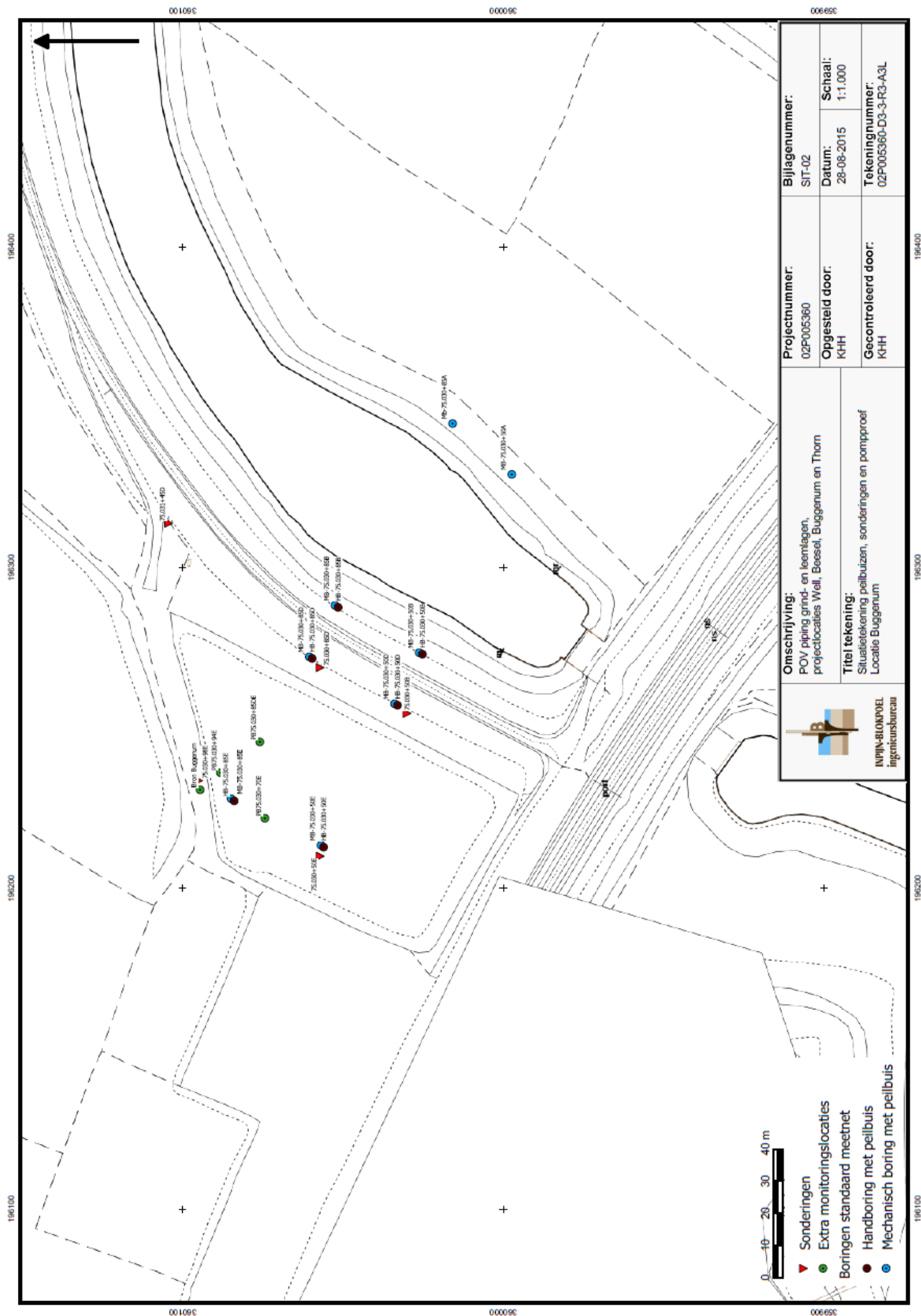
C OVERZICHT GRONDONDERZOEK

In de onderstaande pagina's en afbeeldingen zijn de boringen en sonderingen per locaties weergegeven die gebruikt zijn bij het vaststellen van de invoerwaarden van de rekenmodellen. De boringen zijn uitgevoerd in meetraaien van het voorland richting het achterland. Tevens zijn in de ontstane boorgaten peilbuizen geplaatst, in combinatie met een onttrekkingsbron, voor de bepaling van het doorlaatvermogen van het watervoerend pakket.



Figuur C-1: Boor- en sondeerlocaties locatie Thorm

Datum: 7 juni 2018



Figuur C-2: Boor- en sondeerlocaties locatie Buggenum



D SCHEMATISATIES ONDERZOEKLOCATIES

D.1 Thorn

Thorn is de meest zuidelijke onderzoeklocatie en ligt daarmee, ten opzichte van NAP, hoger dan de andere locaties. Dit dorp ligt vlakbij de Belgische grens aan het meer de Grote Hegge, die in directe verbinding staat met de Maas. Kenmerkend voor deze locatie is de relatief lage dijk (ca. 2,0 m) en het relatief korte voorland. Het beschouwde dijktraject ligt in dijkkring 79-1 (zie Figuur 3-1).

De ondergrond kan worden beschreven als een Holocene deklaag gelegen op een watervoerend pakket, bestaande uit de rivierafzettingen van de Formatie van Beegden en Sterksel. In het achterland ligt onder de deklaag nog een dunne windafzetting van de Formatie van Boxtel, bestaande uit fijn tot matig grof zand. De rivierafzettingen van de Formatie van Beegden en Sterksel bestaan voornamelijk uit grindig zand.

De opbouw van de ondergrond, zoals op basis van de uitgevoerde boringen en sonderingen en de ondergrondgegevens uit REGIS II kan worden afgeleid, is schematisch weergegeven in Figuur D-4.

D.2 Buggenum

De tweede locatie in de Noordelijke Maasvallei is Buggenum. Buggenum ligt stroomafwaarts vanaf Thorn en grenst aan een zijtak van de Maas. Bij deze zijtak is net als bij Thorn nauwelijks tot geen voorland aanwezig. De dijk bij Buggenum is aanzienlijk hoger dan bij Thorn (ca. 3,5 m). Locatie Buggenum grenst aan dijkkring 75-1 (zie Figuur 3-1).

De ondergrond kan worden beschreven als een Holocene deklaag gelegen op een windafzetting van de Formatie van Boxtel met daaronder het watervoerend pakket, bestaande uit de rivierafzettingen van de Formatie van Beegden en Sterksel. Aan de onderzijde worden de watervoerende lagen begrensd door matig tot slecht doorlatende afzettingen van de Formatie van Stramproy.

De opbouw van de ondergrond, zoals op basis van de uitgevoerde boringen en sonderingen en de ondergrondgegevens uit REGIS II kan worden afgeleid, is schematisch weergegeven in Figuur D-5.

D.3 Well

De derde locatie is Well en ligt in het noorden van de Noordelijke Maasvallei. Op deze locatie is een grote variatie in de ondergrond aanwezig in zowel zand- als grindlagen, maar ook in dikte van deze lagen en de doorlatendheid ervan. Vanwege de grote variatie in de ondergrond is er in de omgeving aanvullend grondonderzoek gedaan bij Well en bij Kamp, een dorp nabij Well. Hierdoor zijn van deze locatie veel gegevens beschikbaar. Kenmerkend voor deze locatie is de relatief lage dijk (ca. 1,3 m) en het tekort aan kwelweglengte. Well ligt aan dijkkring 60-1 (zie Figuur 3-3).

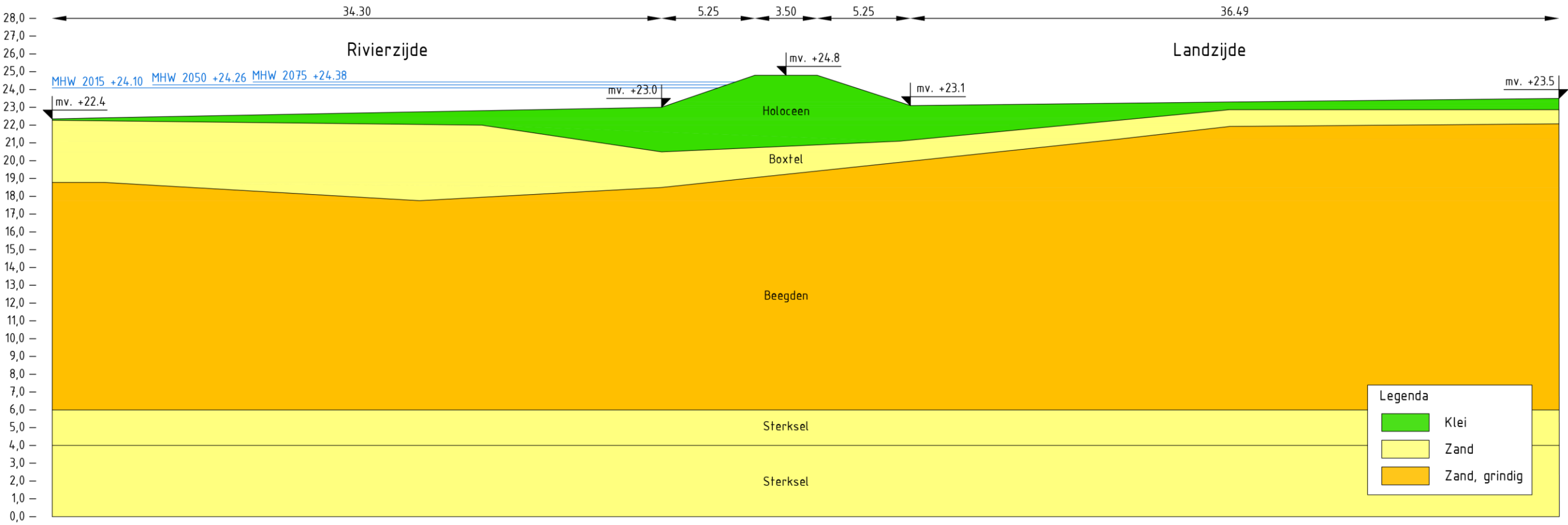
De ondergrond kan worden beschreven als een Holocene deklaag bestaande uit sterk siltig zand met her en der relatief dunne kleilaagjes, gelegen op een watervoerend pakket, bestaande uit de rivierafzettingen van de Formatie van Beegden en Sterksel. Aan de onderzijde worden de watervoerende lagen begrensd door matig tot slecht doorlatende afzettingen van de Formatie van Kiezeloëliet.

De opbouw van de ondergrond, zoals op basis van de uitgevoerde boringen en sonderingen en de ondergrondgegevens uit REGIS II kan worden afgeleid, is schematisch weergegeven in Figuur D-6.

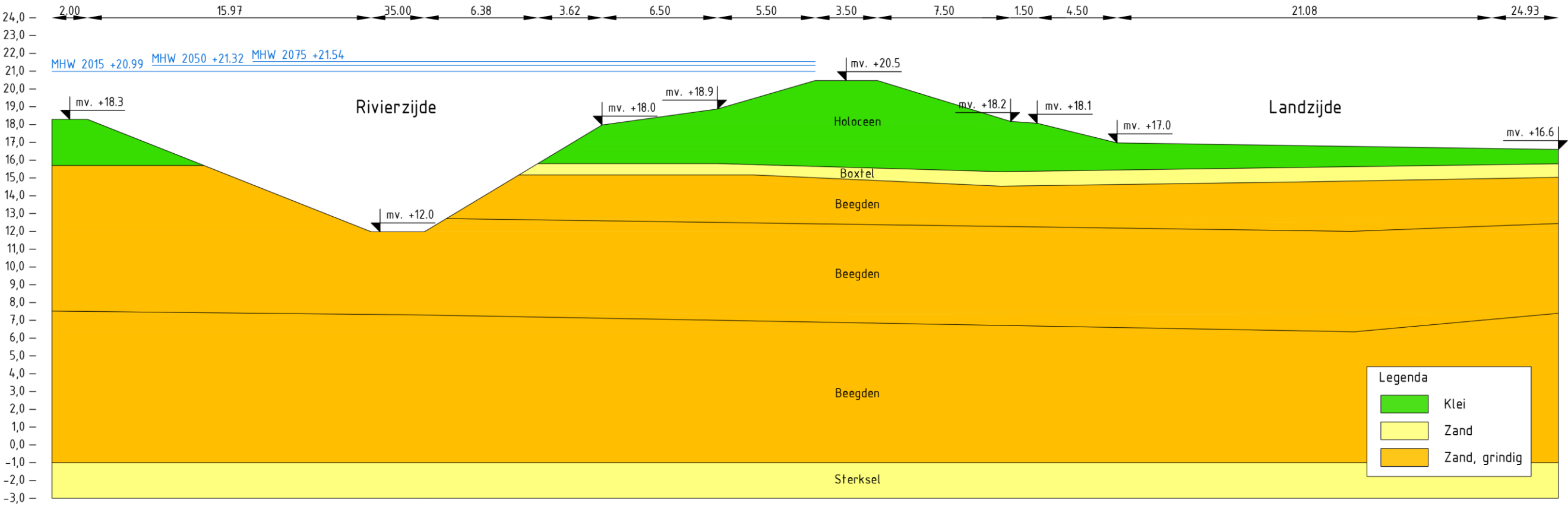
D.4 Loo

De locatie Loo bestaat, zoals eerder aangegeven, uit fijnere zandfracties dan de locaties in de Noordelijke Maasvallei. De formatie van Beegden komt hier niet voor. De ondergrond bestaat hier voornamelijk uit holocene afzettingen, waarbij een watervoerend pakket wordt afgesloten door een deklaag. Deze deklaag bestaat uit slecht waterdoorlatende klei. Het waterstandsverschil is hier groter dan de overige locaties. Hierdoor is de dijk aanzienlijk hoger met als gevolg dat de kwelweglengte ook groter is. Het achterland ligt hier aanzienlijk lager dan in de Noordelijke Maasvallei. Locatie Loo ligt aan dijkkring 48-1 (zie Figuur 3-3).

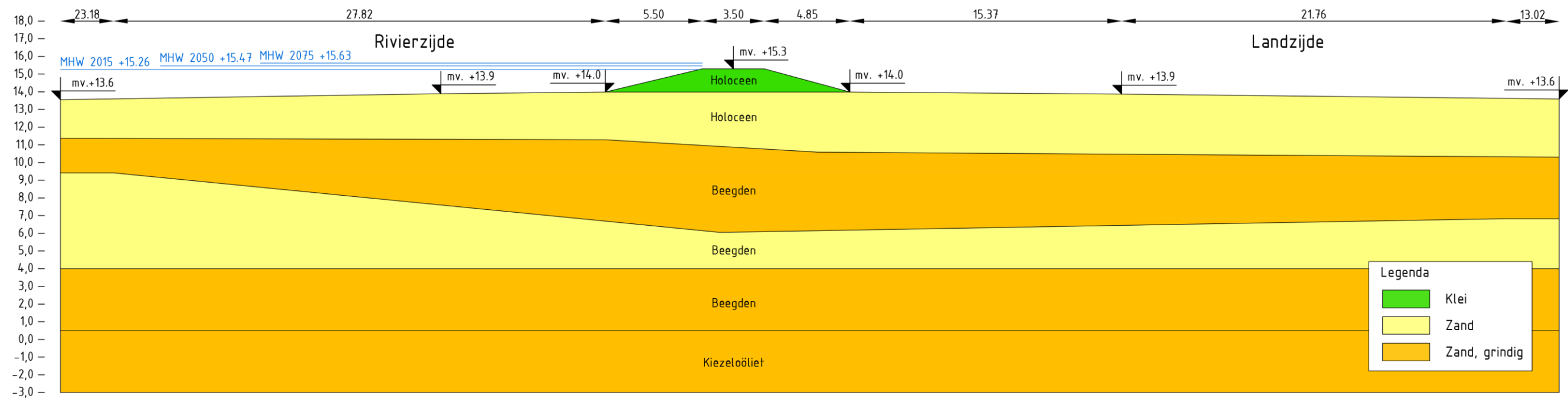
De opbouw van de ondergrond, zoals op basis van de uitgevoerde boringen en sonderingen en de ondergrondgegevens uit REGIS II kan worden afgeleid, is schematisch weergegeven in Figuur D-7.



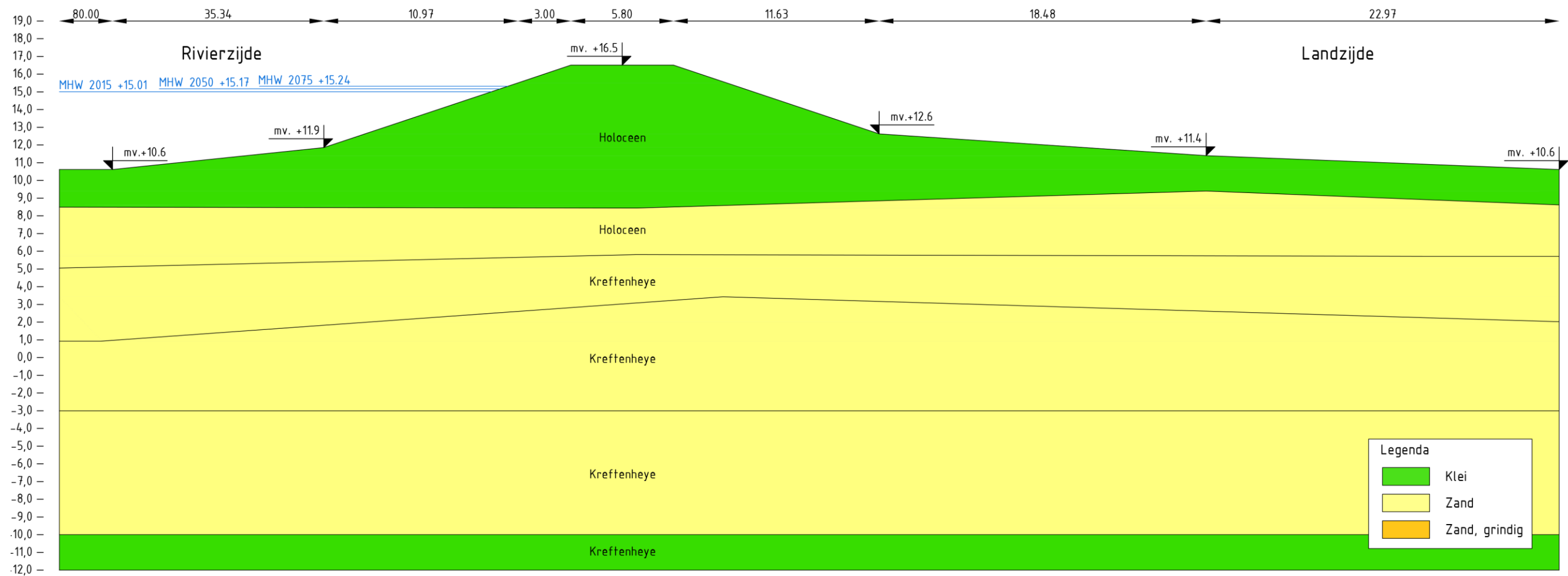
Figuur D-4: Schematisatie locatie Thorn



Figuur D-5: Schematisatie locatie Buggenum



Figuur D-6: Schematisatie locatie Well



Figuur D-7: Schematisatie locatie Loo

E INVOERWAARDEN REKENMODELLEN

In deze bijlage wordt de totstandkoming van de invoerwaarden nader toegelicht en worden de gebruikte invoerwaarden per locatie gepresenteerd in tabellen. De totstandkoming wordt in de kopjes hieronder nader uitgelegd.

E.1 Percentielwaarde van de zandfractie

Voor het vaststellen van de gegevens is gebruik gemaakt van grondonderzoeken die beschikbaar zijn gesteld vanuit Arcadis. De boringen die daarvoor zijn uitgevoerd, zijn gebruikt voor het genereren van korrelverdelingen. Met behulp van de gewichtpercentages is een Excel bestand opgesteld. In dit Excel bestand zijn de percentielwaarden berekend die benodigd zijn voor het invullen van de rekenregels. Dit betreft de D_{70} voor Sellmeijer en de d_{15} en d_{50} voor Shields-Darcy. Daarnaast zijn de d_{10} en d_{90} bepaald om uit te rekenen of er voldaan wordt aan de voorwaarde voor het toepassen van het Shields-Darcy model. De voorwaarde voor het toepassen van het Shields-Darcy model is dat de d_{90}/d_{10} van de zandfractie kleiner moet zijn dan 4. Aangezien de d_{15} en de d_{70} een positieve invloed hebben op de berekening van het kritieke verval, is voor deze invoerparameters een laag karakteristieke waarde berekend. Aangezien de d_{50} een negatieve invloed heeft op de berekening van het kritieke verval, is voor deze invoerparameter een hoog karakteristieke waarde berekend. Hiermee wordt recht gedaan aan de veiligheidsfilosofie zoals staat voorgeschreven in het WBI 2017.

De berekening behorend bij het bepalen van de percentielwaarde staat beschreven in Bijlage F. Bij het berekenen van het kritieke verval wordt gebruik gemaakt van een gemiddelde en van een karakteristieke percentielwaarde. Het bepalen van een karakteristieke waarde wordt uitgevoerd op basis van berekeningen, afkomstig uit het Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen 2012.

E.2 Doorlatendheid

In de Noordelijke Maasvallei is onderzoek verricht naar de doorlatendheid aan de hand van pompproeven. Bij locatie Well is de pompproef echter mislukt, er kwamen namelijk zeer onrealistische waarden uit. In dit onderzoek zijn de resultaten van de pompproef van Buggenum gebruikt voor het vaststellen van de doorlatendheid bij Well, aangezien de ondergrond, op basis van Dinoloket, op de locaties redelijk overeenkomt.

Bij de proeftuin Loo zijn geen pompproeven uitgevoerd, echter in Westervoort en Pannerden wel. Aangezien de ondergrond van Westervoort zeer vergelijkbaar is met die van Loo, zijn de resultaten van deze pompproeven representatief gesteld voor het vaststellen van de doorlatendheid bij Loo.

Voor de pompproeven zijn peilbuizen en een onttrekkingsbron aangebracht. Tijdens de proeven worden de stijghoogtes gemeten bij de peilbuizen en uitgezet tegenover het onttrokken debiet. Met behulp van analytische berekeningen en numerieke rekenmodellen is de kD -waarden van het watervoerend pakket bepaald. Aangezien de dikte van het watervoerend pakket bekend is door de boringen, kan de k -waarde worden bepaald. Bij een aantal locaties is een bandbreedte gegeven van de k -waarde. In dit onderzoek wordt de hoogste waarde gebruikt bij het uitvoeren van de analyses, aangezien er bij hogere doorlatendheden eerder kans is op terugschrijdende erosie en dus een grotere kans op piping. Door de hoogste waarde te gebruiken, wordt een redelijk conservatieve waarde toegepast. Echter geeft dit een lagere, en dus veiligere uitkomst van het toelaatbaar verval.

E.3 Kwelweglengte

De kwelweglengtes zijn bepaald aan de hand van de ondergrondschematisaties. Hierin is het in- en uittredepunt geschat en is de lengte tussen deze punten opgemeten. De schematisaties zijn bepaald aan de hand van eerder uitgevoerde boringen en sonderingen. De schematisaties zijn te vinden in hoofdstuk 0 en tevens te vinden in bijlage D. Bij locatie Loo is er tevens gebruik gemaakt van het beheerregister, om de lengte van het voorland te bepalen. Bij de locaties in de Noordelijke Maasvallei is er echter nog geen beheerregister beschikbaar en is het intredepunt van het voorland geschat op basis van de dikte van de deklaag.

E.4 Waterstanden

De waterstanden zijn bepaald met behulp van Hydra-NL. Dit is een probabilistisch programma waarin de eerder gemeten waterstanden en de toekomstige waterstanden zijn ingevoerd en is conform het WBI 2017. De uitkomsten hiervan zijn gegeven ten opzichte van NAP. Voor dit onderzoek zijn de (zicht)jaren 2015, 2050 en 2075 gebruikt voor het bepalen van de waterstanden.

E.5 Maaiveldhoogte

De maaiveldhoogtes van het achterland zijn geschat door middel van AHN2-viewer. Dit is een online kaart waarin de hoogten zijn weergegeven ten opzichte van NAP. Dit is openbaar en vrij toegankelijk via internet. Het laagste punt van het achterland is gekozen als representatieve waarde. Aangezien het achterland in de Maasvallei oploopt, ligt het laagste punt meestal nabij de binnenteen van de dijk.

E.6 Veiligheidsfactor

De veiligheidsfactor behorend bij de onderzoeklocaties is per dijkkring vastgesteld in het Ontwerp Instrumentarium 2014 versie 4 (OI2014v4). Dit is een rapportage opgesteld door Rijkswaterstaat waarin, met behulp van berekeningen, de veiligheidsfactor voor het deelfaalmecanisme piping is berekend. In bijlage A van het OI2014 staat de veiligheidsfactor per dijkkring weergegeven.

E.7 Schematiseringsfactor

Per dijkkring worden segmenten gecreëerd met de mogelijke ondergrondscenario's en de procentuele kans dat dit scenario voorkomt. Aan de hand van deze scenario's wordt een schematiseringsfactor opgesteld die onzekerheden omtrent de ondergrond zoveel mogelijk indekt. Hoe meer onzekerheid over de ondergrond, hoe hoger de schematiseringsfactor. Door aanvullend grondonderzoek te verrichten wordt de onzekerheid minder en wordt de schematiseringsfactor dus ook kleiner. Het bepalen van de scenario's gaat met behulp van het WTI-SOS en bijgaand het programma D-Soilmodel. Hierin zijn de ondergrondgegevens afkomstig uit Dinoloket verwerkt. De range varieert tussen de 1 en 1,3. Aangezien het opstellen van de schematiseringsfactor zeer complex is en redelijke kennis benodigd, is in dit onderzoek een factor 1,15 aangehouden. Dit heeft geen invloed op de vergelijking van de modellen, omdat de factor in beide modellen wordt toegepast

Tabel E-1: Invoerwaarden model Sellmeijer 2011 locatie Thorn

Parameter		Invoerwaarde	Eenheid
H₂₀₁₅	Buitenwaterstand 2015	24,10	NAP [m]
H₂₀₁₈	Buitenwaterstand hoogwater januari 2018	21,65	NAP [m]
H₂₀₅₀	Buitenwaterstand 2050	24,26	NAP [m]
H₂₀₇₅	Buitenwaterstand 2075	24,38	NAP [m]
H_p	Polderpeil	23,10	NAP [m]
L_{;aanwezig}	Aanwezige kwelweglengte	33,00	[m]
D	Dikte zandlaag	19,00	[m]
d₇₀	70-percentielwaarde van de korrelverdeling	3,90E-04	[m]
d_{70m}	Gemiddelde d ₇₀ in de kleine schaalproeven	2,08E-04	[m]
k	Specifieke doorlatendheid pipinggevoelige zandlaag	72,20	[m/d]
d	Dikte deklaag	0,80	[m]
θ	Rolweerstand van de zandkorrels	37	[°]
γ_p	Schijnbaar volumiek gewicht zandkorrels onder water	16	[kN/m ³]
η	Coëfficiënt van White	0,25	[-]

Tabel E-2: Invoerwaarden model Sellmeijer 1999locatie Thorn

Parameter		Invoerwaarde	Eenheid
γ_p	Schijnbaar volumiek gewicht zandkorrels onder water	17	[kN/m ³]
θ	Rolweerstand van de zandkorrels	41	[°]

Tabel E-3: Invoerwaarden model Shields-Darcy 2016 locatie Thorn

Parameter		Invoerwaarde	Eenheid
d₅₀	50-percentielwaarde van de korrelverdeling	3,87E-04	[m]
d₁₅	15-percentielwaarde van de korrelverdeling	1,67E-04	[m]
ν	Kinematische viscositeit	1,10E-06	[m ² /s]
α_R	Reynolds coëfficiënt	6	[-]
l_R	Lengteschaal	1,80E-05	[m]
α_F	Grondwater coëfficiënt	5	[-]

Tabel E-4: Invoerwaarden model Sellmeijer 2011 locatie Buggenum

Parameter		Invoerwaarde	Eenheid
H₂₀₁₅	Buitenwaterstand 2015	20,99	NAP [m]
H₂₀₁₈	Buitenwaterstand hoogwater januari 2018	17,01	NAP [m]
H₂₀₅₀	Buitenwaterstand 2050	21,32	NAP [m]
H₂₀₇₅	Buitenwaterstand 2075	21,54	NAP [m]
H_p	Polderpeil	16,60	NAP [m]
L_{;aanwezig}	Aanwezige kwelweglengte	47,00	[m]
D	Dikte zandlaag	18,50	[m]
d₇₀	70-percentielwaarde van de korrelverdeling	2,72E-04	[m]
d_{70m}	Gemiddelde d ₇₀ in de kleine schaalproeven	2,08E-04	[m]
k	Specifieke doorlatendheid pipinggevoelige zandlaag	122,40	[m/d]
d	Dikte deklaag	1,50	[m]
θ	Rolweerstand van de zandkorrels	37	[°]
γ_p	Schijnbaar volumiek gewicht zandkorrels onder water	16	[kN/m ³]
η	Coëfficiënt van White	0,25	[-]

Tabel E-5: Invoerwaarden model Sellmeijer 1999 locatie Buggenum

Parameter		Invoerwaarde	Eenheid
γ_p	Schijnbaar volumiek gewicht zandkorrels onder water	17	[kN/m ³]
θ	Rolweerstand van de zandkorrels	41	[°]

Tabel E-6: Invoerwaarden model Shields-Darcy 2016 locatie Buggenum

Parameter		Invoerwaarde	Eenheid
d₅₀	50-percentielwaarde van de korrelverdeling	3,11E-04	[m]
d₁₅	15-percentielwaarde van de korrelverdeling	1,36E-04	[m]
ν	Kinematische viscositeit	1,10E-06	[m ² /s]
α_R	Reynolds coëfficiënt	6	[-]
l_R	Lengteschaal	1,80E-05	[m]
α_F	Grondwater coëfficiënt	5	[-]

Tabel E-7: Invoerwaarden model Sellmeijer 2011 locatie Well

Parameter		Invoerwaarde	Eenheid
H₂₀₁₅	Buitenwaterstand 2015	15,26	NAP [m]
H₂₀₁₈	Buitenwaterstand hoogwater januari 2018	12,82	NAP [m]
H₂₀₅₀	Buitenwaterstand 2050	15,47	NAP [m]
H₂₀₇₅	Buitenwaterstand 2075	15,63	NAP [m]
H_p	Polderpeil	13,60	NAP [m]
L_{;aanwezig}	Aanwezige kwelweglengte	12	[m]
D	Dikte zandlaag	15,50	[m]
d₇₀	70-percentielwaarde van de korrelverdeling	2,74E-04	[m]
d_{70m}	Gemiddelde d ₇₀ in de kleine schaalproeven	2,08E-04	[m]
k	Specifieke doorlatendheid pipinggevoelige zandlaag	122,40	[m/d]
d	Dikte deklaag	0,50	[m]
θ	Rolweerstand van de zandkorrels	37	[°]
γ_p	Schijnbaar volumiek gewicht zandkorrels onder water	16	[kN/m ³]
η	Coëfficiënt van White	0,25	[-]

Tabel E-8: Invoerwaarden model Sellmeijer 1999 locatie Well

Parameter		Invoerwaarde	Eenheid
γ_p	Schijnbaar volumiek gewicht zandkorrels onder water	17	[kN/m ³]
θ	Rolweerstand van de zandkorrels	41	[°]

Tabel E-9: Invoerwaarden model Shields-Darcy 2016 locatie Well

Parameter		Invoerwaarde	Eenheid
d₅₀	50-percentielwaarde van de korrelverdeling	2,85E-04	[m]
d₁₅	15-percentielwaarde van de korrelverdeling	1,27E-04	[m]
ν	Kinematische viscositeit	1,10E-06	[m ² /s]
α_R	Reynolds coëfficiënt	6	[-]
l_R	Lengteschaal	1,80E-05	[m]
α_F	Grondwater coëfficiënt	5	[-]

Tabel E-10: Invoerwaarden model Sellmeijer 2011 locatie Loo

Parameter		Invoerwaarde	Eenheid
H₂₀₁₅	Buitenwaterstand 2015	15,01	NAP [m]
H₂₀₁₈	Buitenwaterstand hoogwater januari 2018	12,41	NAP [m]
H₂₀₅₀	Buitenwaterstand 2050	15,17	NAP [m]
H₂₀₇₅	Buitenwaterstand 2075	15,24	NAP [m]
H_p	Polderpeil	10,25	NAP [m]
L_{;aanwezig}	Aanwezige kwelweglengte	80,00	[m]
D	Dikte zandlaag	18	[m]
d₇₀	70-percentielwaarde van de korrelverdeling	2,01E-04	[m]
d_{70m}	Gemiddelde d ₇₀ in de kleine schaalproeven	2,08E-04	[m]
k	Specifieke doorlatendheid pipinggevoelige zandlaag	72	[m/d]
d	Dikte deklaag	1,10	[m]
θ	Rolweerstand van de zandkorrels	37	[°]
γ_p	Schijnbaar volumiek gewicht zandkorrels onder water	16	[kN/m ³]
η	Coëfficiënt van White	0,25	[-]

Tabel E-11: Invoerwaarden model Sellmeijer 1999 locatie Loo

Parameter		Invoerwaarde	Eenheid
γ_p	Schijnbaar volumiek gewicht zandkorrels onder water	17	[kN/m ³]
θ	Rolweerstand van de zandkorrels	41	[°]

Tabel E-12: Invoerwaarden model Shields-Darcy 2016 locatie Loo

Parameter		Invoerwaarde	Eenheid
d₅₀	50-percentielwaarde van de korrelverdeling	2,27E-04	[m]
d₁₅	15-percentielwaarde van de korrelverdeling	1,12E-04	[m]
ν	Kinematische viscositeit	1,10E-06	[m ² /s]
α_R	Reynolds coëfficiënt	6	[-]
l_R	Lengteschaal	1,80E-05	[m]
α_F	Grondwater coëfficiënt	5	[-]

F KORRELVERDELINGEN ONDERZOEKLOCATIES

In deze bijlage zijn de percentielwaarden per locatie weergegeven. De d_{15} en de d_{50} worden toegepast in het Shields-Darcy model en de d_{70} in het Sellmeijer model. De d_{10} en d_{90} zijn toegepast voor de controleregel volgens het concept van Grass. In Tabel F-1 t/m Tabel F-4 bevat informatie over de waarnemingsreeks van de korrelverdelingen. De karakteristieke waarde voor de d_{15} , d_{50} en de d_{70} zijn berekend met behulp van formule 1.27 uit het 'Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen' (Förster, Van den Ham, Calle, & Kruse, 2012). Voor uitleg over de bepaling van de percentielwaarde wordt verwezen naar bijlage F.5.

F.1 Korrelverdelingen Thorn

Tabel F-1: Overzicht percentielwaarden locatie Thorn

Locatie	d10	d15	d50	d60	d70	d90
[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Gemiddelde	0.172	0.195	0.336	0.384	0.432	0.715
STDEV	0.021	0.025	0.046	0.043	0.038	0.159
Variatie	0.12	0.13	0.14	0.11	0.09	0.22
Student T	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86	1.86
Aantal	9	9	9	9	9	9
Minimum	0.141	0.156	0.242	0.293	0.356	0.484
Maximum	0.207	0.233	0.381	0.426	0.472	0.880
Laag karakteristiek (formule 1.27 uit ORZW, bijlage B)	0.148	0.167	0.285	0.336	0.390	0.538
Hoog karakteristiek (formule 1.27 uit ORZW, bijlage B)	0,387					

F.2 Korrelverdelingen Buggenum

Tabel F-2: Overzicht percentielwaarden locatie Buggenum

	d10	d15	d50	d60	d70	d90
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Gemiddelde	0.147	0.164	0.260	0.289	0.333	0.447
STDEV	0.023	0.025	0.047	0.056	0.057	0.029
Variatie	0.15	0.15	0.18	0.19	0.17	0.06
Student T	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83
Aantal	10	10	10	10	10	10
Minimum	0.125	0.138	0.205	0.222	0.238	0.388
Maximum	0.189	0.211	0.341	0.377	0.412	0.492
Laag karakteristiek (formule 1.27 uit ORZW, bijlage B)	0.122	0.136	0.209	0.229	0.272	0.416
Hoog karakteristiek (formule 1.27 uit ORZW, bijlage B)	0,311					

F.3 Korrelverdelingen Well

Tabel F-3: Overzicht percentielwaarden locatie Well

	d10	d15	d50	d60	d70	d90
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Gemiddelde	0.129	0.153	0.248	0.289	0.333	0.461
STDEV	0.018	0.026	0.037	0.048	0.059	0.024
Variatie	0.14	0.17	0.15	0.17	0.18	0.05
Student T	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77
Aantal	14	14	14	14	14	14
Minimum	0.098	0.116	0.195	0.216	0.238	0.405
Maximum	0.151	0.218	0.302	0.348	0.393	0.497
Laag karakteristiek (formule 1.27 uit ORZW, bijlage B)	0.112	0.127	0.210	0.241	0.274	0.436
Hoog karakteristiek (formule 1.27 uit ORZW, bijlage B)	0,285					

F.4 Korrelverdelingen Loo

Tabel F-4: Overzicht percentielwaarden locatie Loo

	d10	d15	d50	d60	d70	d90
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Gemiddelde	0.112	0.127	0.199	0.221	0.248	0.339
STDEV	0.017	0.017	0.031	0.039	0.053	0.090
Variatie	0.15	0.13	0.16	0.18	0.21	0.27
Student T	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68
Aantal	44	44	44	44	44	44
Minimum	0.084	0.094	0.161	0.180	0.198	0.234
Maximum	0.159	0.187	0.336	0.373	0.409	0.482
Laag karakteristiek (formule 1.27 uit ORZW, bijlage B)	0.098	0.112	0.172	0.187	0.201	0.260
Hoog karakteristiek (formule 1.27 uit ORZW, bijlage B)	0,227					

F.5 Voorbeeld bepaling d₁₅, d₅₀ en d₇₀

In deze bevat een voorbeeld bepaling van de d₁₅, d₅₀ en d₇₀. Deze zijn bepaald uit de zandfractie, waarbij lineair geïnterpoleerd is tussen de waarnemingen. Het korrelverdelingsdiagram behorend bij deze zeefresultaten is weergegeven in Figuur F-8. Deze percentielwaarden (d₁₅, d₅₀ en d₇₀) van de zeefresultaten in de onderstaande tabel bedragen respectievelijk 156 µm, 242 µm en 356 µm, uitgaande van:

- Grindfractie = 1,83 %;
- Siltfractie = 1,73 %.

Tabel F-5: Zeefresultaten voor rekenvoorbeeld bepaling d₇₀

Maaswijdte zeef (mm)	2	1	0,5	0,25	0,18	0,125	0,063
Cumulatief monster %	98,17	96,79	90,95	53,16	23,95	6,20	1,73
Op zeef %	1,83	1,38	5,84	37,79	29,21	17,75	4,47
Zandfractie %		1,43	6,06	39,18	30,29	18,41	4,64
Zandfractie cumulatief %		1,43	7,49	46,67	76,96	95,36	100,00

Berekening d₁₅:

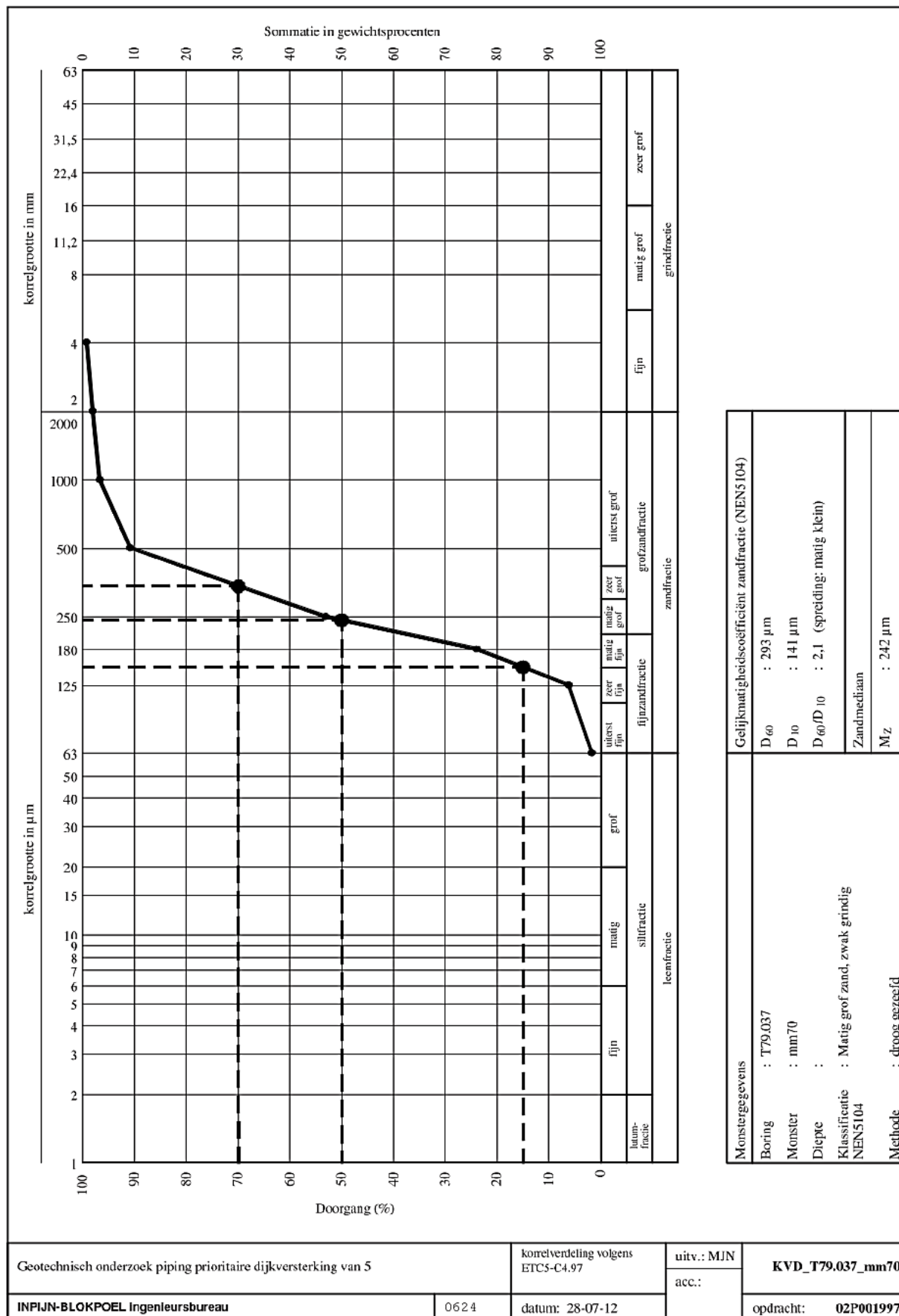
- Van gehele fractie naar zandfractie = $29,21 / (100\% - 1,83\% - 1,73\%) = 30,29$ (op zeef 0,180 mm)
- Van gehele fractie naar zandfractie = $17,75 / (100\% - 1,83\% - 1,73\%) = 18,41$ (op zeef 0,125 mm)
- $1,43 + 6,06 + 39,18 + 30,29 = 76,96$
- $1,43 + 6,06 + 39,18 + 30,29 + 18,41 = 95,36$
- $85 - 76,96 = 8,04$
- $8,04 / 18,41 = 0,437$
- $d_{15} = 0,180 \text{ mm} - 0,437 \times (0,180 - 0,125) = 0,156 \text{ mm} = 156 \text{ µm}$

Berekening d₅₀:

- Van gehele fractie naar zandfractie = $37,79 / (100\% - 1,83\% - 1,73\%) = 39,79$ (op zeef 0,25 mm)
- Van gehele fractie naar zandfractie = $29,21 / (100\% - 1,83\% - 1,73\%) = 30,29$ (op zeef 0,18 mm)
- $1,43 + 6,06 + 39,18 = 46,67$
- $1,43 + 6,06 + 39,18 + 30,29 = 76,96$
- $50 - 46,67 = 3,33$
- $3,33 / 30,29 = 0,11$
- $d_{50} = 0,25 \text{ mm} - 0,11 \times (0,25 - 0,18) = 0,242 \text{ mm} = 242 \text{ µm}$

Berekening d₇₀:

- Van gehele fractie naar zandfractie = $5,84 / (100\% - 1,83\% - 1,73\%) = 6,06$ (op zeef 0,50 mm)
- Van gehele fractie naar zandfractie = $37,79 / (100\% - 1,83\% - 1,73\%) = 39,18$ (op zeef 0,25 mm)
- $1,43 + 6,06 = 7,49$
- $1,43 + 6,06 + 39,18 = 46,67$
- $30 - 7,49 = 22,51$
- $22,51 / 39,18 = 0,575$
- $d_{70} = 0,5 \text{ mm} - 0,575 \times (0,5 - 0,25) = 0,356 \text{ mm} = 356 \text{ µm}$



Figuur F-8: Korrelverdelingsdiagram

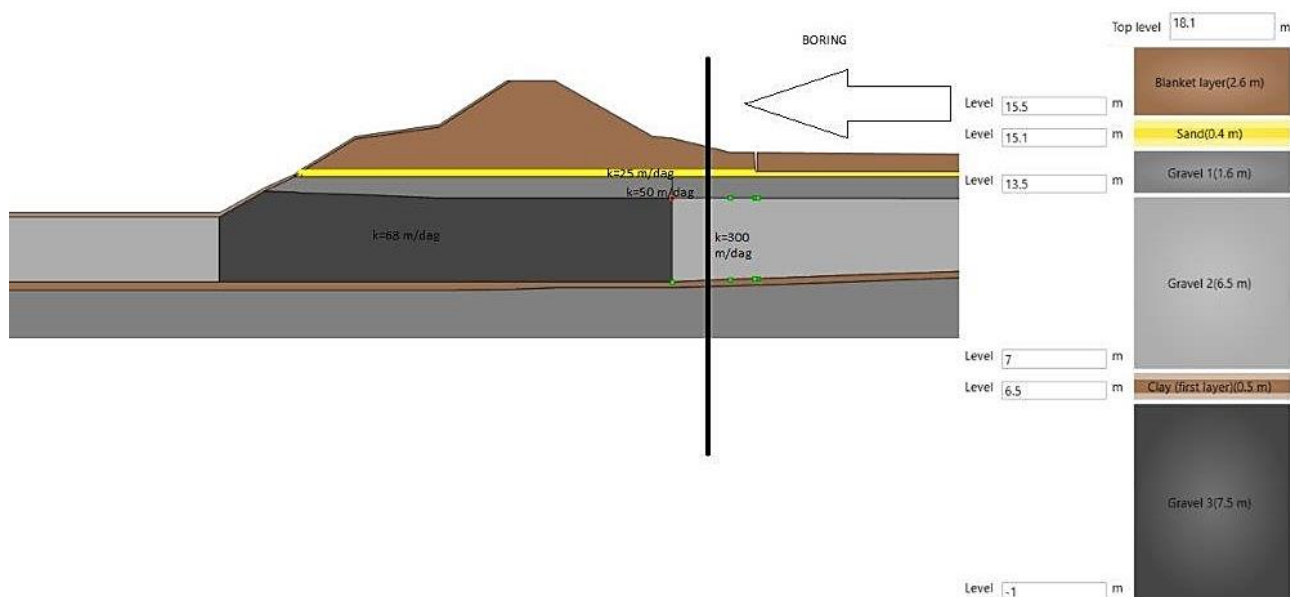
G D-GEO FLOW MODEL BUGGENUM

In deze bijlage staat het D-Geo Flow model van Buggenum beschreven. In een eerder afstudeeronderzoek is onderzocht of er piping op kan treden bij de dijken in de Noordelijke Maasvallei. Uit recent onderzoek blijkt dat piping in de Noordelijke Maasvallei wel degelijk kan optreden. Dit is geconcludeerd op basis van berekeningen die zijn uitgevoerd met behulp van D-Geo Flow. Door middel van veldmetingen is het grondwatermodel voor één doorsnede in dijkkring 75 te Buggenum gekalibreerd. Dit model is echter gekalibreerd op basis van een fictieve hoogwatergolf, aangezien er in de meetperiode 2015-2017 geen hoogwater heeft plaatsgevonden. Met de metingen behorend bij het recentelijk opgetreden hoogwater (januari 2018) is dit model wederom gekalibreerd.

De kalibratie van het D-Geo Flow model is verlopen in drie stappen:

1. Eerst is de hoogwatergolf uit januari 2018 ingevoerd in het bestaande Plaxflow model om zo een beeld te krijgen van de nauwkeurigheid waarmee het model kan voorspellen zonder gekalibreerd te zijn op een hoogwatergolf;
2. De data van de diepe binnendijkse peilbuismeting is vervolgens toegevoegd en het model is opnieuw gekalibreerd met behulp van de beschikbare metingen. De kalibratie is voornamelijk gerealiseerd door de doorlatendheid van de afzonderlijke grondlagen te variëren.
3. De parameters van het gekalibreerde grondwater model zijn toegepast in D-Geo Flow om zo een kritiek verval bepalen.

Het resultaat van het gekalibreerde D-Geo Flow model van Buggenum is weergegeven in Figuur G-9.



Figuur G-9: D-Geo Flow model Buggenum

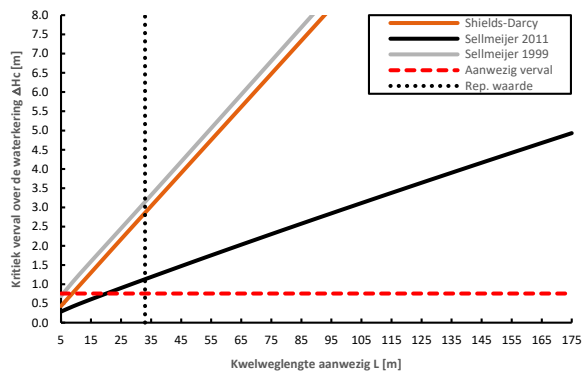
H RESULTATEN GEVOELIGHEIDSANALYSES

Deze bijlage bevat de resultaten van de gevoeligheidsanalyses. In Figuur H-10 t/m Figuur H-13 staan de resultaten van de gevoeligheidsanalyses van respectievelijk locatie Thorn, Buggenum, Wel en Loo.

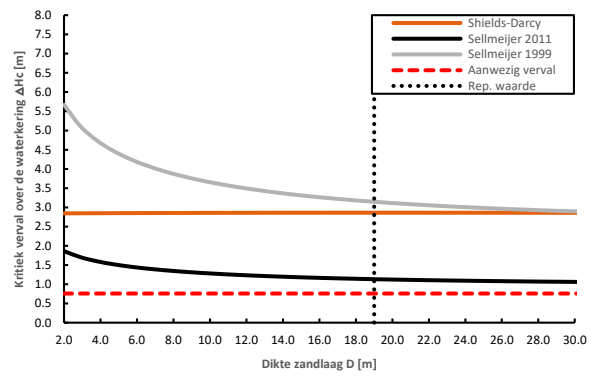
In de gevoeligheidsanalyse is gekeken naar de verandering van het toetsresultaat bij een verandering van de beschouwde parameter. De gevoeligheid is vastgesteld door per beschouwde parameter een reeks waarden te definiëren om vervolgens per waarde het kritieke verval te berekenen. De resultaten hiervan zijn gepresenteerd in de grafieken a t/m f van Figuur H-10 t/m Figuur H-13. Naast de reguliere gevoeligheidsanalyse zijn voor iedere locatie per rekenmodel tornadodiagrammen gemaakt, waardoor in een oogopslag te zien is wat de gevoelige parameters zijn. Hiervoor is de invoerwaarde per beschouwde parameter met 25% verhoogd en verlaagd om daarbij vervolgens het kritieke verval te berekenen.

Door de resultaten te plotten in een tornadodiagram is in een oogopslag zichtbaar welke parameters gevoelig zijn en of de invloed bij een verlaging van de invoerwaarde hoger is dan bij een verhoging en vice versa. De resultaten zijn weergegeven in de diagrammen g en h van Figuur H-10 t/m Figuur H-13. De volgende invoerparameters zijn beschouwd in de gevoeligheidsanalyse:

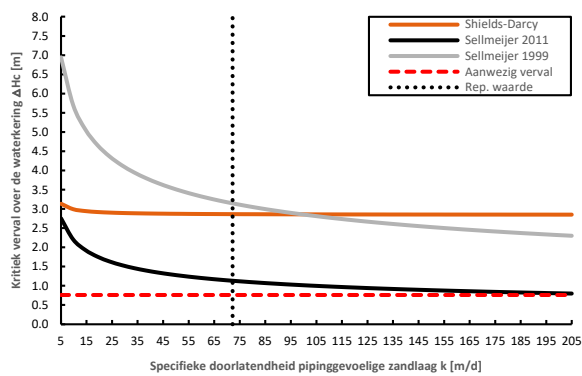
- Kwelweglengte;
- Dikte pipinggevoelige zandlaag;
- Specifieke doorlatendheid pipinggevoelige zandlaag;
- 70-percentielwaarde van de korrelverdeling;
- 50-percentielwaarde van de korrelverdeling;
- 15-percentielwaarde van de korrelverdeling.



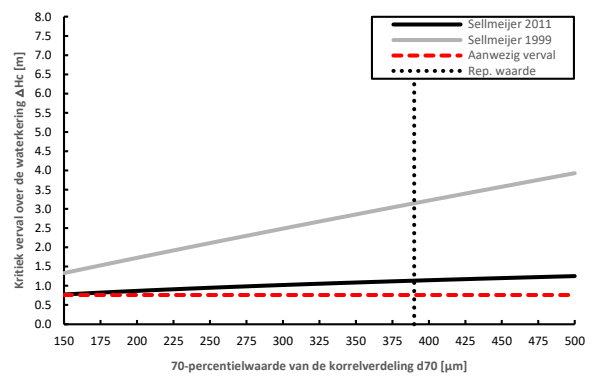
(a)



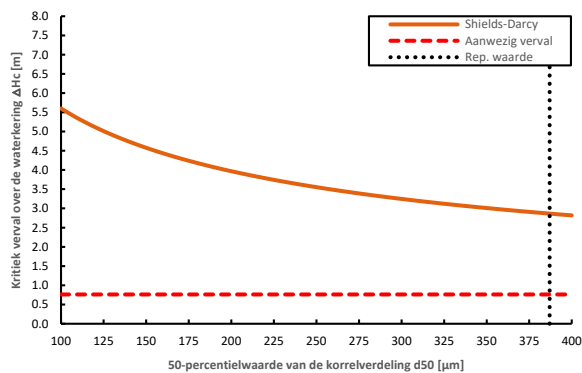
(b)



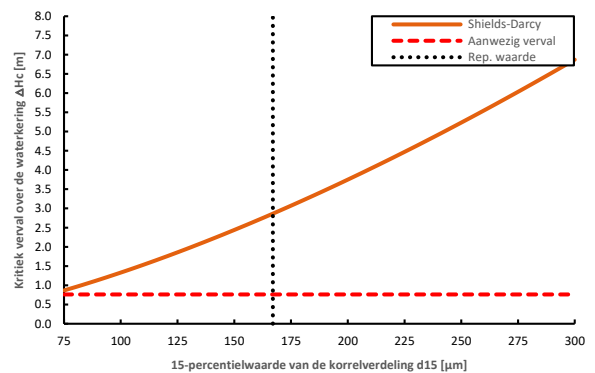
(c)



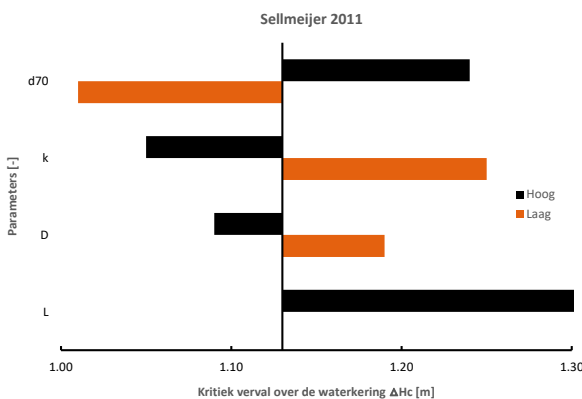
(d)



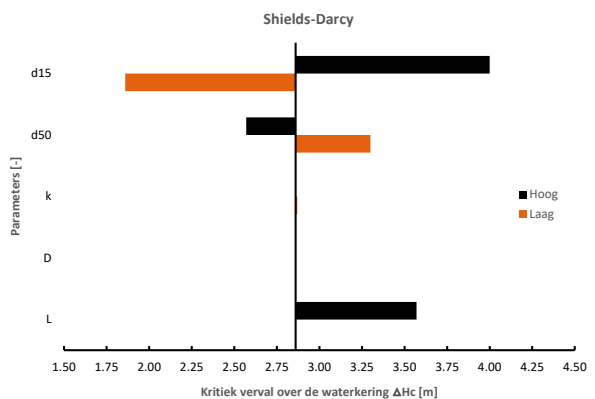
(e)



(f)

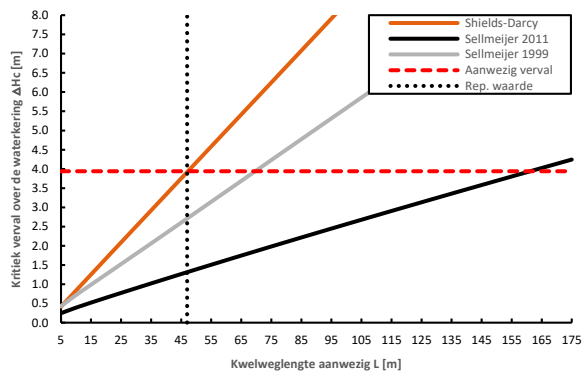


(g)

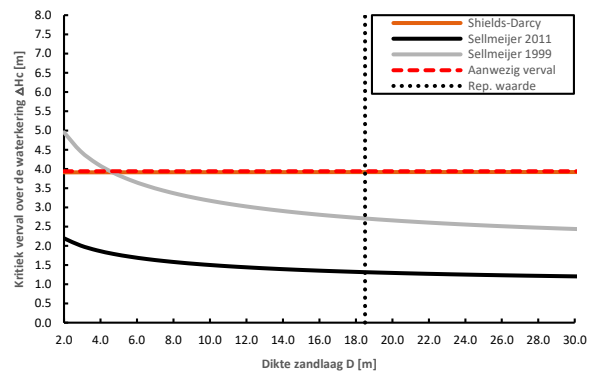


(h)

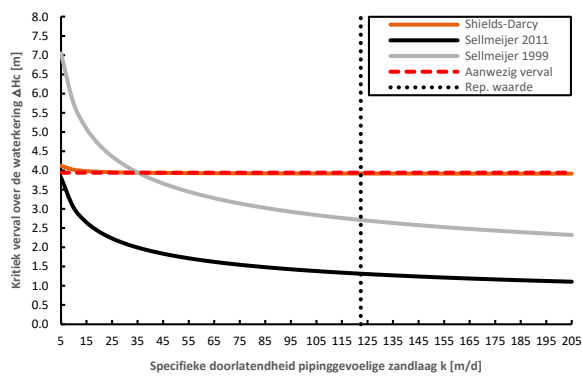
Figuur H-10: Resultaten gevoeligheidsanalyse locatie Thorn



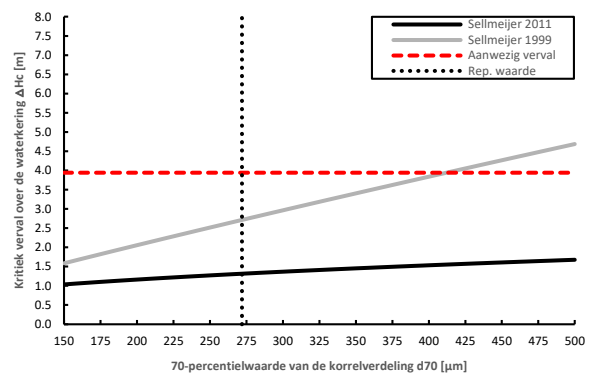
(a)



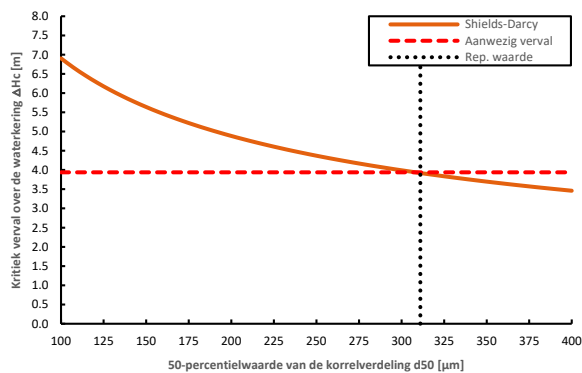
(b)



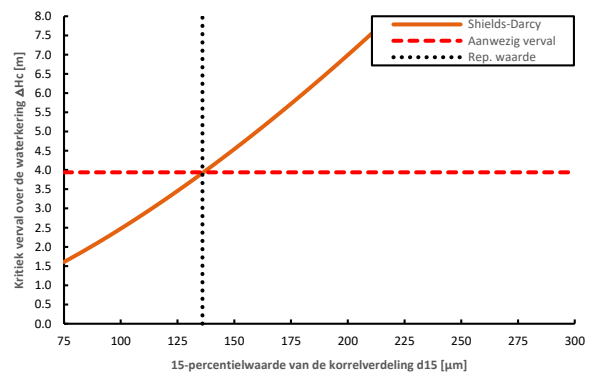
(c)



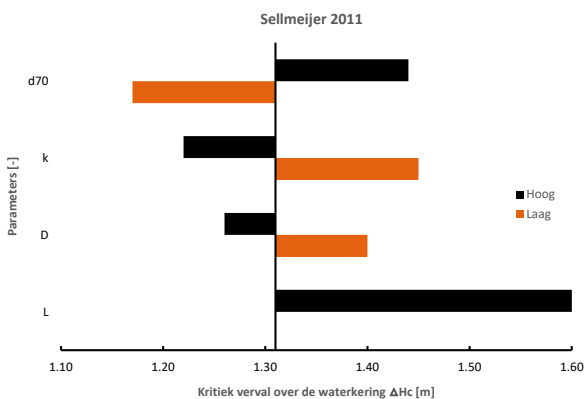
(d)



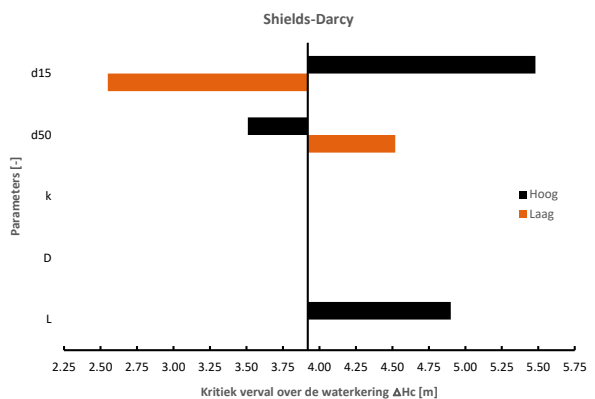
(e)



(f)

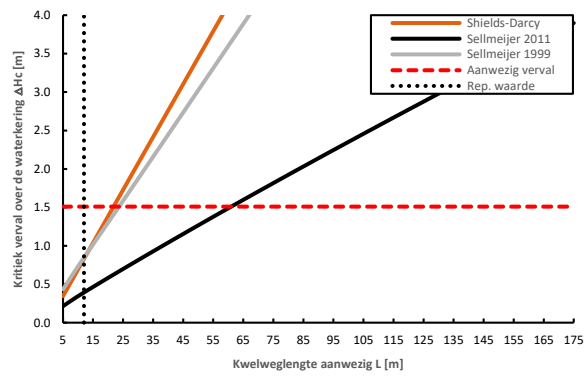


(g)

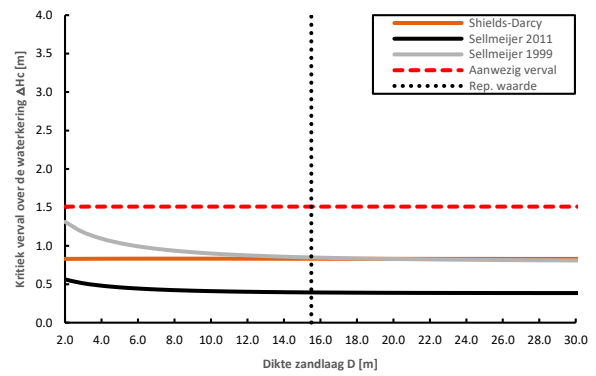


(h)

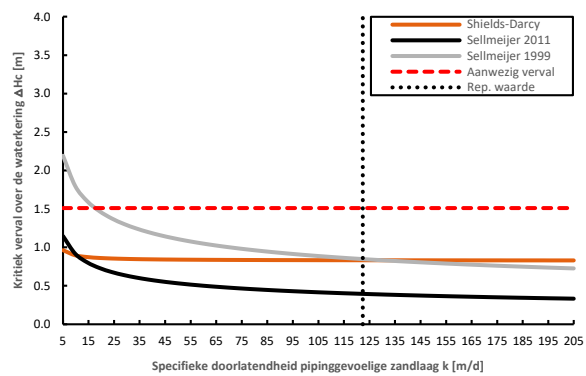
Figuur H-11: Resultaten gevoeligheidsanalyse locatie Buggenum



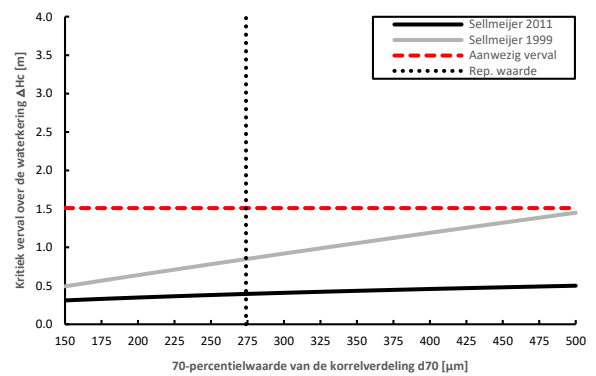
(a)



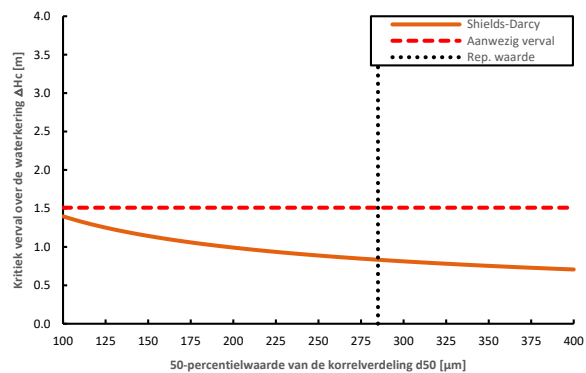
(b)



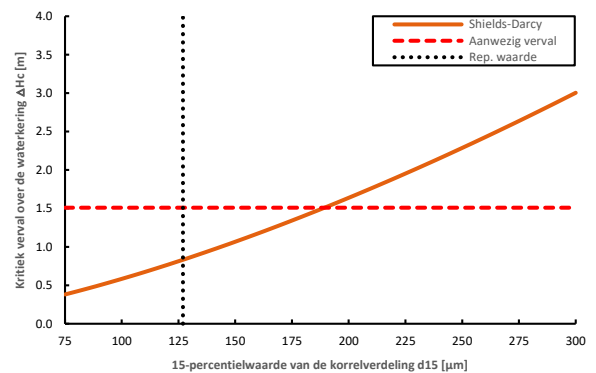
(c)



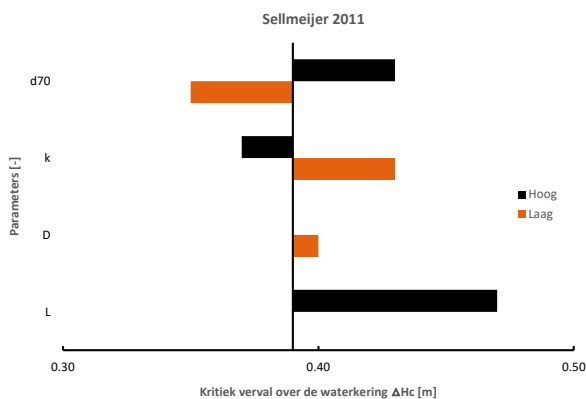
(d)



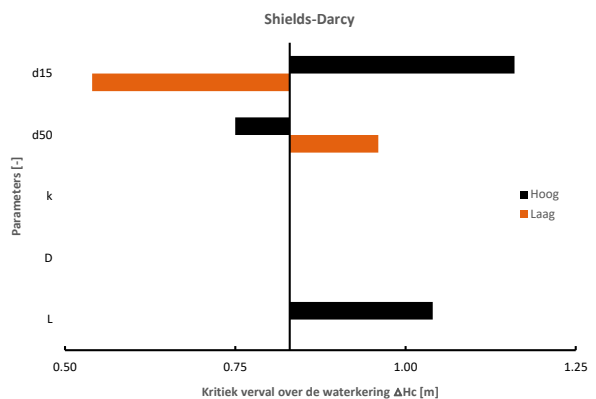
(e)



(f)

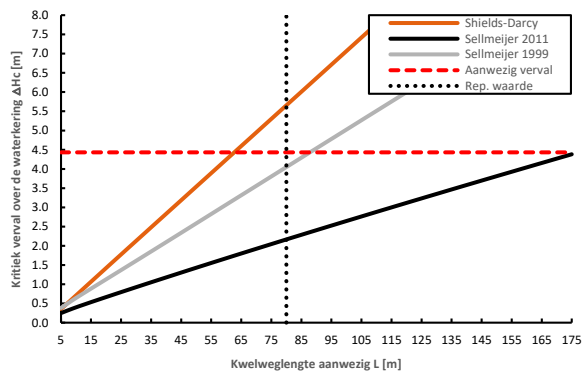


(g)

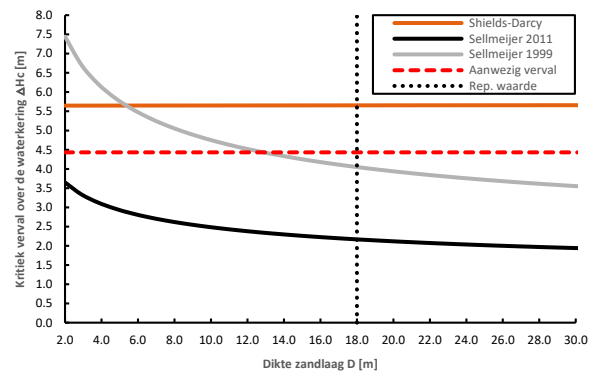


(h)

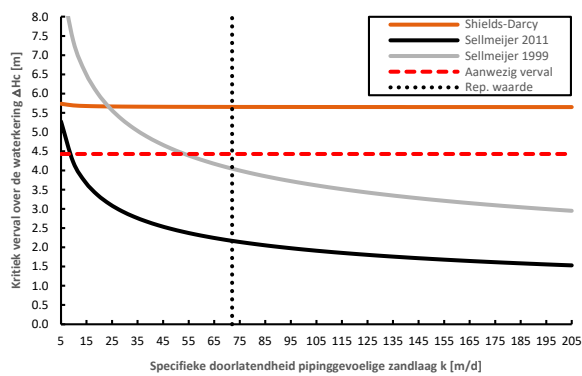
Figuur H-12: Resultaten gevoeligheidsanalyse locatie Well



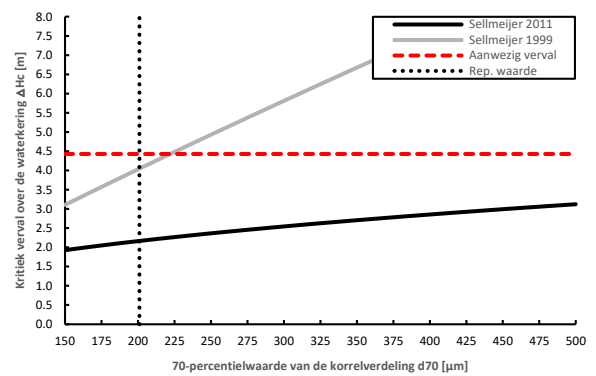
(a)



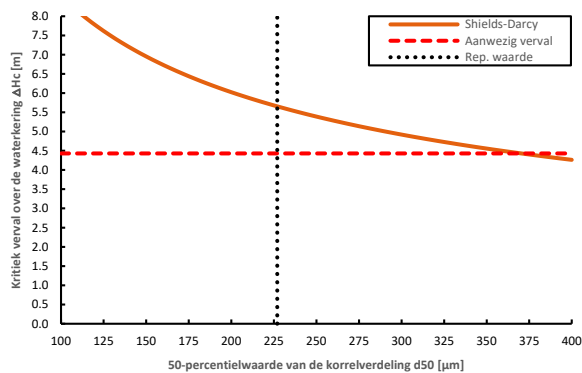
(b)



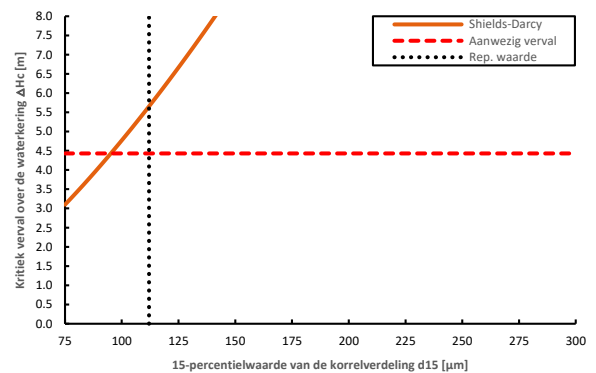
(c)



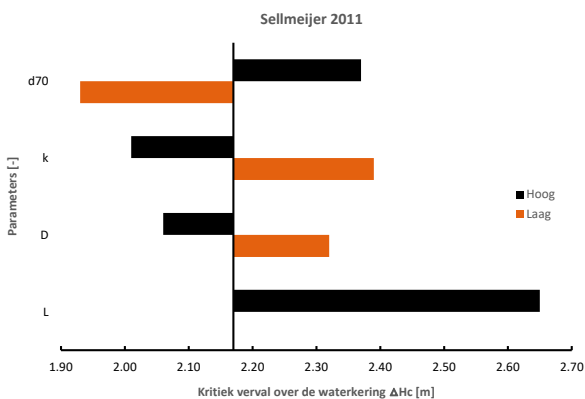
(d)



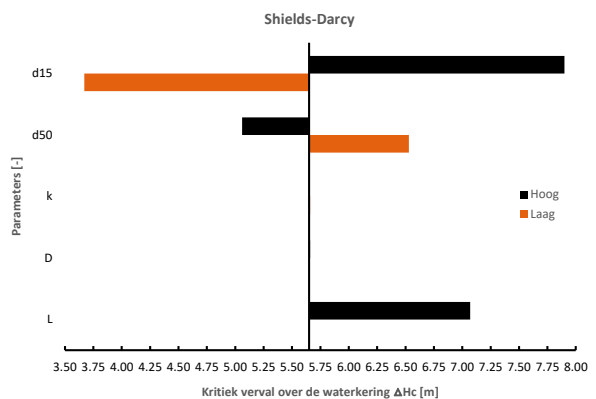
(e)



(f)



(g)



(h)

Figuur H-13: Resultaten gevoeligheidsanalyse locatie Loo

I PROJECTPLAN

J **WERKBESTANDEN**

In deze bijlagen zijn de Excelbestanden opgenomen die gebruikt zijn in de kwantitatieve meervoudige casestudie. De Excelbestanden bevatten de volgende informatie:

J.1 Analytisch rekenmodel Thorn:	Resultaten Sellmeijer model Thorn Resultaten Shields-Darcy model Thorn Resultaten gevoeligheidsanalyse Thorn
J.2 Analytisch rekenmodel Buggenum:	Resultaten Sellmeijer model Buggenum Resultaten Shields-Darcy model Buggenum Resultaten gevoeligheidsanalyse Buggenum
J.3 Analytisch rekenmodel Well:	Resultaten Sellmeijer model Well Resultaten Shields-Darcy model Well Resultaten gevoeligheidsanalyse Well
J.4 Analytisch rekenmodel Loo:	Resultaten Sellmeijer model Loo Resultaten Shields-Darcy model Loo Resultaten gevoeligheidsanalyse Loo
J.5 Zeefanalyses zandmonsters:	Berekeningen d_{15} , d_{50} en d_{70}

WACHTWOORD EXCEL SHEETS:

2018