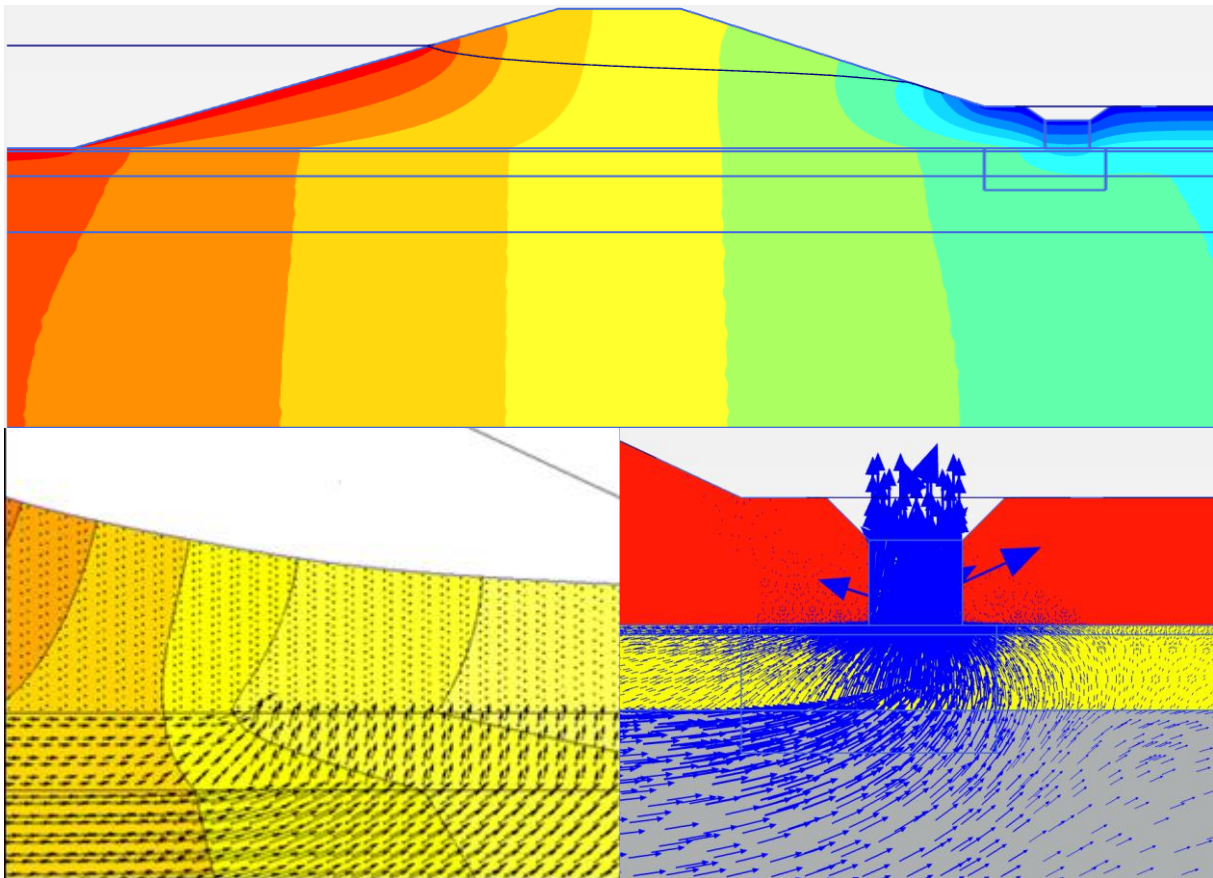


Piping in een tweelagensysteem

Afstudeeronderzoek naar het faalmechanisme piping in een situatie met of zonder een cohesieve deklaag, een dun zandpakket en een grindpakket



Door:

F.H.G.A. Gerritsen en T.J. de Wit

Colofon

Piping in een tweelagensysteem

Afstudeeronderzoek naar het faalmechanisme piping in een situatie met of zonder een cohesieve deklaag, een dun zandpakket en een grindpakket

Auteurs	F.H.G.A. Gerritsen en T.J. de Wit
Aanleiding	Afstudeeronderzoek
Opdrachtgever	Royal Haskoning DHV, te Nijmegen
Opleidingsinstituut	Hogeschool van Hall Larenstein, te Velp
Studierichting	Land en Watermanagement

T.J. de Wit	
Adres	Middellaan 5a
Postcode	6881RP Velp
Telefoon	06-20478955
Email	tomdewit1992@gmail.com

F.H.G.A. Gerritsen	
Adres	Babberichseweg 22
Postcode	6905JV Oud-Zevenaar
Telefoon	06-20325251
Email	frank25111990@hotmail.com

Begeleiding

Van Hall Larenstein	H. van Rosmalen
Telefoon	026-3695734
Email	harrie.vanrosmalen@wur.nl

Royal Haskoning DHV	M. Sanders
Telefoon	06-83235949
Email	monique.sanders@rhdhv.com

Status	Definitief
--------	------------

6 juni 2013	te Nijmegen
-------------	-------------

Voorwoord

Wij zijn Frank Gerritsen en Tom de Wit. Deze rapportage is geschreven in het kader van ons afstuderen voor de opleiding Land en Watermanagement aan Hogeschool Van Hall Larenstein. Wij studeren af na de voltooiing van de major grond-, weg- en waterbouw en de minor grond-, weg- en waterbouw.

In 18 weken tijd hebben wij onderzoek verricht naar het faalmechanisme piping in een tweelagensysteem. Het onderzoek is uitgevoerd in opdracht van Royal Haskoning DHV te Nijmegen. Naast literatuuronderzoek is er ook onderzoek uitgevoerd door middel van interviews bij het kennisinstituut Deltares te Delft en de Universiteit te Gent. Graag willen wij alle personen bedanken die hebben meegewerkt aan dit onderzoek door middel van een interview:

- V. van Beek, Deltares, betrokken bij SBW-piping en proeven bij de IJkdijk, Delft, 18-2-2013
- Bezuijen, Deltares/Universiteit Gent, betrokken geweest bij het SBW-piping onderzoek van V. van Beek en nu bij het promotie onderzoek van K. van den Boer, Gent, 18-3-2013
- K. van den Boer, Universiteit Gent, promotie onderzoek naar start van de pipe, Gent, 18-3-2013
- J. Blinde, Deltares, betrokken bij VNK en SBW-piping, Delft, 25-3-13
- U. Förster, Deltares, projectleider SBW-piping, Delft, 25-3-13

Onze stagebegeleider binnen Royal Haskoning DHV is Monique Sanders en onze begeleider vanuit Hogeschool Van Hall Larenstein is Harrie van Rosmalen. Wij willen beiden in het bijzonder bedanken. Ook willen wij van deze gelegenheid gebruik maken om de afdeling infrastructuur en heel Royal Haskoning DHV te bedanken voor de steun bij het onderzoek en een leuke en leerzame afstudeerperiode.

Frank Gerritsen en Tom de Wit

Samenvatting

In dit onderzoek is gekeken naar het risico op het faalmechanisme piping in een tweelagensysteem (situatie met of zonder een cohesieve deklaag, een dun zandpakket en een grindpakket). Het onderzoek is uitgevoerd naar aanleiding van dijkverbeteringen aan de Maas in Limburg door waterschap Peel en Maasvallei en waterschap Roer en Overmaas. Deze dijkverbeteringen zijn het gevolg van een vijfjaarlijkse toetsing aan alle dijken in Nederland.

Het voornaamste doel van het onderzoek is om het risico op piping in een tweelagensysteem te bepalen. Dit is gerealiseerd door middel van literatuuronderzoek en interviews met experts. Het risico op piping is ook bepaald in vijf verschillende situaties met en zonder deklaag. Er is een situatie zonder deklaag en vier situaties met elke een andere benadering voor het modelleren van de deklaag opgesteld. Elke situatie is doorgerekend met drie variaties in grondopbouw. Namelijk: 10 m zand, 3 m zand en 7 m grind en 1 m zand en 9 m grind.

De in totaal vijftien situaties zijn doorgerekend met de EEM computerprogramma's MSeep en PlaxFlow en analytisch conform de methodes Sellmeijer en Bligh. MSeep is een computerprogramma van Deltares en beschikt over een EEM stromingsmodel en een pipingmodule (op basis van Sellmeijer). PlaxFlow is een module van Plaxis waarin alleen het grondwaterstromingsbeeld kan worden berekend. Voor MSeep en PlaxFlow is de invloed van de invoerparameters bepaald. Van de twee modellen zijn ook de stroomsnelheid en de stijghoogte vergeleken. Voor het doorrekenen van de situaties is er gebruik gemaakt van boorgegevens langs de Maas in Limburg. Er is geen gebruik gemaakt van stijghoogtegegevens door de tegenvallende resultaten van deze meetdata. Hierdoor is het ook niet mogelijk geweest om het risico op piping specifiek op één situatie in Limburg te bepalen.

Geconcludeerd kan worden dat het risico op piping toeneemt als er grind aanwezig is in de ondergrond. Bij dunne zandlaag (waargenomen bij 1 m afnemend bij 3 m) is mogelijk dat er naast piping een ander faalmechanisme maatgevend kan zijn. Dit mechanisme, deep seated piping genoemd, beschrijft het eroderen van zand door sterke verticale stroming in de zandlaag. Indien sprake is van deep seated piping zijn de huidige modellen niet meer geldig.

De analytische berekening met Sellmeijer (handberekening) geeft voor een tweelagensysteem een conservatiever resultaat dan MSeep. In een homogeen pakket bestaande uit zand (eenlaagssysteem) is de handberekening ongunstiger en MSeep conservatiever.

Een deklaag zorgt voor een concentratie van de stroming richting het uittreepunt (ventielwerking). Dit leidt tot een verlaging van de kritieke waterstand. Verder wordt er bij een deklaagsituatie weerstand ondervonden in het opbarstkanaal. Deze weerstand zorgt voor een verhoging van de kritieke waterstand. Bij de 0,3d regel wordt alleen rekening gehouden met de weerstand en niet met deze ventielwerking. Omdat in de gebruikte situaties geen combinatie is gemaakt van ventielwerking en de weerstand in het uittreepunt, kan de invloed van de deklaag niet exact worden bepaald. De ventielwerking en de weerstand zouden elkaar op kunnen heffen. De modellering in MSeep is gevoelig voor de aanwezigheid van een deklaag. Bij aanwezigheid van een deklaag in de praktijk, moet ook een deklaag in het model worden toegevoegd.

In de vergelijking van resultaten uit PlaxFlow en MSeep zijn geen duidelijke verbanden gevonden, waardoor met PlaxFlow niet het risico op piping kan worden bepaald. Op de aangewezen punten is geen verschil aanwezig tussen de modellen (betreffend het grondwaterstromingsbeeld).

De doelgroep van dit rapport bestaat uit werknemers van Royal Haskoning DHV. Dit rapport is ook bestemd voor beoordeling en archivering door Hogeschool van Hall Larenstein. Deze scriptie kan ook gebruikt worden voor nader onderzoek.

Inhoud

1 Inleiding	1
2 Piping	6
2.1 Fases piping	6
2.2 Pipinggevoelige bodems.....	8
3 Rekenregels	10
3.1 Opbarsten.....	10
3.2 Bligh 1910.....	11
3.5 Sellmeijer 1989, 2006	12
3.6 Sellmeijer 2011	14
4 Gegevensanalyse casus	16
4.1 Boringen	16
4.2 Stijghoogtes	18
5 Methode	19
5.1 Basismodel.....	19
5.2 Situaties	21
5.3 Modellen en methodes	23
6 Resultaatanalyse.....	30
6.1 Stijghoogteverloop	31
6.2 Stroming	33
6.3 Invloed deklaag.....	36
6.4 Bepaling piping risico met PlaxFlow	38
7 Conclusies en aanbevelingen	40
7.1 Conclusies.....	40
7.2 Aanbevelingen.....	43
7.3 Reflectie.....	45
Bronvermelding.....	47
Lijst van figuren en tabellen	49

Bijlagenbundel

1 Begrippenlijst.....	1
2 Symbolenlijst	3
3 Boorgegevens	4
4 Bodemprofielen.....	6
5 Stijghoogtegegevens	7
6 Invoerparameters.....	8
7 Modelparameters.....	12
7.1 Gevoeligheid modelparameters.....	12
7.2 Model vergelijking	14
8 Interviews	17
9 Stijghoogteverloop	27
9.1 Stijghoogteverloop met pipe, per situatie (MSeep).....	28
9.2 Stijghoogteverloop met pipe, per bodemopbouw (MSeep).....	29
9.3 Stijghoogteverloop zonder pipe, per situatie (PlaxFlow).....	30
9.4 Stijghoogteverloop zonder pipe, per bodemopbouw (PlaxFlow).....	31
9.5 Verhangen van stijghoogtelijnen.....	32
10 Stroming	33
10.1 Stroombeelden voor situatie ‘zonder deklaag’ (PlaxFlow).....	34
10.2 Stromingsbeelden ‘open slootbodem’ en ‘open slootbodem met zand’ (PlaxFlow).....	35
10.3 Verhanglijnen met pipe (MSeep)	37
10.4 Verhanglijnen zonder pipe (PlaxFlow).....	39
10.5 Stroombeeld MSeep.....	41
11 Kritieke waterstanden	42

1 Inleiding

'Venlo/Sittard, 15 april 2010

Alvast 85 miljoen voor dijkverbetering in Limburg

Het ministerie van Verkeer en Waterstaat stelt 85 miljoen euro beschikbaar voor het uitvoeren van de dijkverbetering in het Maasdal door waterschap Peel en Maasvallei en waterschap Roer en Overmaas. Het streven van de Limburgse partijen is om op korte termijn met de voorbereidingen te starten, zodat het Maasdal uiterlijk in 2020 op een beschermingsniveau van 1/250 is beveiligd.¹

1.1 Kader en aanleiding

Dit rapport is geschreven in het kader van ons afstudeeronderzoek voor Royal Haskoning DHV te Nijmegen. Wij studeren af na de eerste twee jaar van de opleiding Land en Watermanagement, de major grond-, weg- en waterbouw en de minor grond-, weg- en waterbouw te hebben afgerond aan Hogeschool Van Hall Larenstein.

Het afstudeeronderzoek is ontstaan naar aanleiding van dijkverbeteringen aan de Maas in Limburg in opdracht van waterschap Peel en Maasvallei en waterschap Roer en Overmaas. Deze dijkverbeteringen zijn het gevolg van een vijfjaarlijkse toetsing aan alle dijken in Nederland. Bij de voorbereidingen van het uitvoeren van deze dijkverbeteringen zijn vragen ontstaan met betrekking tot piping. Hieruit deze afstudeeropdracht is ontstaan.

1.2 Probleembeschrijving en analyse

Het faalmechanisme piping leidt nationaal en internationaal tot grote problemen². In Nederland zijn er, voornamelijk tijdens de overstromingen van 1995 en 1998, zandmeevoerende wellen waargenomen. Veel doorbraken zijn teruggedleid naar het faalmechanisme piping en het faalmechanisme piping blijkt vaak het meest bij te dragen aan de overstromingskans³. Piping is geen nieuw fenomeen en is bijvoorbeeld in Nederland in 1926 aangetroffen en gedocumenteerd:

'Het gezelschap van ambtenaren van waterstaat en waterschap keerde na deze instructies naar het wachtlokaal terug, doch nauwelijks had men de plek den rug toegekeerd, of de achtergebleven dijkwacht kwam aanhollen onder het roepen van "hij gaat! Hij gaat!" Ons omdraaiend zagen wij een modderfontein van manshoogte op de plek van den waargenomen wel. Het bleek, dat hier geen voorziening zou baten en dus werd in allerijl de brandklok geluid en werden de mensen in het achterland door estafettes per rijwiel gewaarschuwd.⁴

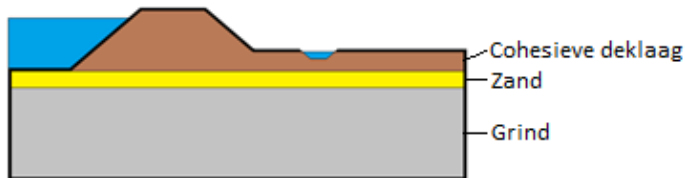
De specifieke opbouw van de grondlagen in Limburg zorgt voor vragen met betrekking tot dijksterkte. De waterkering is opgebouwd uit een cohesieve deklaag met daaronder een zand- en grindlaag, zoals weergegeven in Figuur 1. De aanwezigheid van deze grindlaag onder de zandlaag resulteert in een sterk watervoerende laag met daardoor maar een gering stijghoogteverschil buitendijks en binnendijks.

¹ www.overmaas.nl, februari 2013

² Koelewijn, A.R. ,(2010),*Proeven met ijkdijk tonen gevaar van piping*

³ Stefess, H. ,(2009),*Project VNK 2 toetst dijringen op veiligheid*

⁴ Dam, P. van,(1981),*Dijkdoorbraak Zalk januari (1926)*



Figuur 1: Situatie schets.

De grootste oorzaak van de ontstane vragen met betrekking tot piping, is dat er weinig onderzoek is uitgevoerd naar het faalmechanisme piping bij dijken waarbij meerdere grondlagen aanwezig zijn en specifiek grind in de ondergrond aanwezig is. Door middel van dit onderzoek dient er inzicht te komen in de waterhuishouding en pipinggevoeligheid van het tweelagensysteem van grind en zand.

Er zijn peilbuizen geplaatst op verschillende locaties rondom de dijken in Limburg. Deze peilbuizen zijn vlak voor een periode met hoog water geplaatst. Verder zijn er nog boorgegevens beschikbaar langs de hele Maas in Limburg. Deze boorgegevens zijn beschikbaar via dinoloket en grondonderzoeksrapporten.

1.3 Hoofdvraag en deelvragen

De hoofdvraag van dit afstudeeronderzoek luidt:

Wat is het risico op piping in een tweelagensysteem met een bodemopbouw bestaande uit grind met daarop een dunne zandlaag en een cohesieve deklaag?

De hoofdvraag zal beantwoord worden aan de hand van de volgende deelvragen:

1. Hoe verloopt de stijghoogte in een éénlaagssysteem en een tweelagensysteem?
2. Op welk moment en hoe ontstaat de 'pipe' en hoe verloopt deze in een éénlaagssysteem en een tweelagensysteem?
3. In hoeverre is de aangepaste formule van Sellmeijer (2011) en het aangepaste MSeep-model (2011) doorontwikkeld en bruikbaar voor het onderzoek?
4. Wat is het risico op het faalmechanisme piping specifiek op de situatie in de casus?
5. Hoe kan met de beschikbare meetdata een betrouwbaar en algemeen toepasbaar model worden gevormd en gevalideerd?

In de loop van het onderzoek zijn er door nieuw inzicht wijzigingen en toevoegingen aangebracht aan de deelvragen. De volgende deelvragen zijn toegevoegd:

6. Wat is het stromingsbeeld van een éénlaagssysteem en een tweelagensysteem?
7. Wat is de invloed van de deklaag in een éénlaagssysteem en een tweelagensysteem?
8. Hoe kan in PlaxFlow het risico op piping worden bepaald?

Door de complexiteit van het onderzoek is er gekozen om de volgende deelvraag te laten vallen en zo het onderzoek verder af te bakenen. Deze deelvraag was onderdeel van het oorspronkelijke projectplan:

- Wat is de invloed van het intreepunt en uitreepunt op piping in een éénlaagssysteem en een tweelagensysteem?

Het intreepunt wordt buiten beschouwing gelaten en er zal gefocust worden op het uitreepunt.

Het doel van dit onderzoek is om antwoord te geven op de hierboven opgestelde hoofdvraag en de daarbij horende deelvragen.

1.4 Afbakening en randvoorwaarden

Het onderzoek richt zich op een algemeen tweelagensysteem bestaande uit een zand- en grindlaag met of zonder daarboven een cohesieve deklaag. De casus van dit onderzoek is het dijkverbeteringsproject in Limburg. Er is gewerkt met meetdata van de casus maar het resultaat van het onderzoek is toepasbaar in vergelijkbare situaties.

Er zijn specifieke eisen gesteld vanuit Hogeschool Van Hall Larenstein deze zijn terug te vinden in de studiehandleiding van de opleiding.

In dit afstudeeronderzoek is ingegaan op de waterspanningen ten gevolge van grondwaterstroming. Belastingen door sneeuw en ijs zijn niet beschouwd, omdat deze niet maatgevend zijn.

In de scriptie zijn alleen grondconstructies in de vorm van dijklichamen beschreven die wel of niet waterkerend zijn. Kunstwerken of andere constructies, taludbekledingen en kwelschermen zijn niet behandeld.

Variatie in de horizontale korrelgrootte verdeling (D_{70} -waarde) is niet meegenomen. Een verticale variatie in korrelgrootte wordt wel gemaakt maar de verticale lagen zelf zijn homogeen beschouwd. Er is dus alleen sprake van variatie in de macro-heterogeniteit en geen variatie in de micro-heterogeniteit.

Het faalmechanisme Heave zal is niet meegenomen in dit onderzoek omdat Heave alleen van toepassing is op constructies en damwanden. Hierdoor kunnen sterke verticale stromingen niet direct worden berekend met Heave.

De invloed van het intreepunt is buitenbeschouwing gelaten. Dit houdt in dat er geen weerstand wordt meegenomen in dit punt.

Er is een zekere diepte van de zandlaag en de grindlaag aangenomen. Er is van uitgegaan dat er zich aan de onderkant van de watervoerende grondlaag een ondoorlatende laag bevindt die geen invloed heeft op de situatie.

Alle modellen en methodes gaan uit van een laminaire grondwaterstroming. Het is mogelijk dat er bij snelle stromingen in het grindpakket turbulentie ontstaat⁵.

Een gebrek van alle modellen en methodes is dat deze alleen rekening houden met piping en niet met andere situaties die ook invloed kunnen hebben op het piping proces. Deze andere situaties, zoals een sterke verticale stroming rond het uittreepunt zijn onderzocht in het onderzoek.

⁵ V. van Beek, Deltares, te Delft, betrokken bij SBW-piping en proeven bij de IJkdijk, informatie verkregen door middel van een interview, 18-02-2013

1.5 Aanpak

In deze paragraaf is er een globale methodebeschrijving weergegeven. In hoofdstuk 5 is een gedetailleerdere methodebeschrijving weergegeven. Om te zorgen dat het onderzoek goed verloopt wordt er regelmatig overleg gepleegd met begeleiders en opdrachtgever. Tevens is er een fasering gemaakt. Het onderzoek is in de volgende fasen onderverdeeld:

Fase 1 projectplan: In de eerste fase van het onderzoek is het projectplan opgesteld. De volgende zaken zijn hierin aan bod gekomen: aanleiding, probleemstelling, onderzoeksvraag, deelvragen, werkwijze, beoogde producten, planning en risicoanalyse. Het projectplan is als een apart rapport bijgevoegd.

Fase 2 literatuuronderzoek: In het literatuuronderzoek zijn een aantal onderwerpen grondig onderzocht, geanalyseerd en vervolgens beschreven. Er is literatuuronderzoek uitgevoerd door middel van interviews en het bestuderen van rapportages en artikelen. De volgende specialisten zijn geïnterviewd:

- V. van Beek, Deltares, betrokken bij SBW-piping en proeven bij de IJkdijk⁶, Delft, 18-2-2013
- A. Bezuijen, Deltares/Universiteit Gent, betrokken geweest bij het SBW-piping onderzoek van V. van Beek en nu bij het promotie onderzoek van K. van den Boer, Gent, 18-3-2013
- K. van den Boer, Universiteit Gent, promotie onderzoek naar start van de pipe, Gent, 18-3-2013
- J. Blinde, Deltares, betrokken bij VNK en SBW-piping, Delft, 25-3-13
- U. Förster, Deltares, projectleider SBW-piping, Delft, 25-3-13

In 2011 is er onderzoek uitgevoerd naar de invloed van de heterogeniteit in verticale richting^{7,8}. In hoofdstuk 7 is verwezen naar de conclusies van dit onderzoek. In China is onderzoek uitgevoerd met grovere lagen⁹. Over dit onderzoek is nog weinig bekend.

Fase 3 gegevensverwerking: Er zijn gegevens in de vorm van meetdata aanwezig die belangrijk zijn bij het opstellen van het model en validatie. De meetdata komen uit de casus, het gebied in Limburg, waar het probleem van de eerder beschreven gelaagdheid van de ondergrond zich voordoet. Er is een aantal gegevens beschikbaar:

- Stijghoogte metingen
- Boorstaten/sonderingen

Fase 4 modelvorming: In de modelvorming fase zijn er modellen opgesteld. Met deze modellen is het pipingrisico onderzocht. De resultaten uit de berekeningen zijn geanalyseerd.

Fase 5 afronding: In de laatste fase zijn de conclusies en aanbevelingen opgesteld over het gehele onderzoek. De volgende communicatieve doelstellingen zijn opgesteld:

- Rapportage¹⁰
- Presentatie Royal Haskoning DHV
- Presentatie Hogeschool Van Hall Larenstein
- Optioneel: artikel in het vakblad Geotechniek of het vakblad Land + Water

⁶ Vries, G. de, et al.,(2010),*IJkdijk Full Scale Underseepage Erosion (Piping) Test: Evaluation of Innovative Sensor Technolog*

⁷ Beek, V.M. van,(2011),*SBW Piping: 3A onderzoeksplan Macro-heterogeniteit in verticale richting*

⁸ Beek, V.M. van, e.a.,(2011),*SBW Piping 3B Onderzoeksrapport Macro-heterogeniteit in verticale richting (def)*

⁹ 14 Ding, L. et al.,(2007),*(Chinese versie) Experimental studies on piping development in three-stratum dike foundations*

¹⁰ Hogeweg, R.,(2004),*Een goed rapport*

1.6 Opzet

In het begin van het rapport is het faalmechanisme piping kort besproken. Dit is gedaan in hoofdstuk 2. Eerst is een inleiding gegeven over piping waarna de verschillende fasen van het faalmechanisme aan bod komen. In hoofdstuk 3 zijn de rekenregels die betrekking hebben op piping besproken. Deze zijn: opbarsten, Bligh, Sellmeijer 1989, -2006 en -2011. In hoofdstuk 4 zijn de gegevens van de casus dijkverbetering Limburg besproken. De gegevens zijn onderverdeeld in boorgegevens en stijghoogtegegevens. Hierna zijn in hoofdstuk 5 de opgestelde situaties, modellen, methodes en invoerparameters toegelicht. De situaties zijn gebruikt om de hoofdvraag en de deelvragen te beantwoorden. De situaties zijn doorgerekend met de Eindige Elementen Modellen MSeep en PlaxFlow en de methodes Sellmeijer en Bligh. Hierna is in hoofdstuk 6 een overzicht gegeven van de resultaten en observaties. Afsluitend zijn de conclusies en aanbevelingen besproken in hoofdstuk 7. In dit hoofdstuk is verwezen naar conclusies uit eerder onderzoek naar de invloed van heterogeniteit¹¹. In hoofdstuk 7 is er ook een reflectie over dit onderzoek geschreven.

1.7 Leeswijzer

Om het leesgemak te vergroten is er naast dit rapport een apart rapport met bijlagen bijgevoegd, de bijlagenbundel. Het rapport wordt hierdoor beter leesbaar omdat de bijlagen direct naast het rapport zelf gelegd kunnen worden.

In het rapport zijn verwijzingen naar figuren en tabellen begonnen met een hoofdletter. Bijvoorbeeld: Figuur 1.

Een lijst van figuren en tabellen is terug te vinden direct na de bronvermelding.

In de bijlagenbundel is een begrippenlijst en een literatuurlijst opgenomen.

1.8 Lezerspubliek

De doelgroep van dit rapport bestaat uit werknemers van Royal Haskoning DHV. Dit rapport is ook bestemd voor beoordeling en archivering door Hogeschool van Hall Larenstein. Deze scriptie kan ook gebruikt worden voor nader onderzoek.

¹¹ Beek, V.M. van,(2011),*SBW Piping: 3A onderzoeksplan Macro-heterogeniteit in verticale richting*

2 Piping

In dit hoofdstuk zal het faalmechanisme piping worden besproken. Eerst zal een korte inleiding worden gegeven waarna de verschillende fasen van piping en piping gevoelige ondergronden worden besproken. Als leidraad voor dit hoofdstuk is het Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen uit 1999¹² en een concept versie van dit rapport uit 2011¹³ gebruikt. Dit hoofdstuk is opgesteld om algemene kennis te vergaren als basis voor de rest van het onderzoek. In hoofdstuk zal nog niet worden ingegaan op een tweelagensysteem maar alleen op een éénlaagssysteem.

Onderloopsheid, vanuit het Engels piping genoemd, is een verschijnsel dat de stabiliteit van waterkeringen kan bedreigen. Piping kan door kwelstroming worden veroorzaakt, die bij een groot verval over de kering, gronddeeltjes in erosiegevoelige grondlagen meevoert.

Piping is een verzamelbegrip voor verschillende verschijningsvormen van interne erosie. In Nederland komt, vanwege de hier aanwezige grondgesteldheid, met name terugschrijdende erosie (Engels 'backwards erosion') voor. Het optreden van deze interne terugschrijdende erosie is aan de binnenzijde van de dijk in sloten of op het maaiveld zichtbaar in vorm van zandmeevoerende wellen. Zandmeevoerende wellen zijn te beschrijven als een geconcentreerde uitstroming van grondwater, waarbij de snelheid van het opwellende water zo groot is dat er gronddeeltjes kunnen worden meegevoerd. Het fenomeen wordt als 'piping' aangeduid, omdat iedere zandmeevoerende wel het benedenstroomse begin is van een 'pipe'.

Door piping kunnen in de loop der tijd doorgaande erosie kanaaltjes onder de kering ontstaan, waardoor de kering langzaam wordt ondermijnd en uiteindelijk bezwijkt. Dit mechanisme is in experimenteel onderzoek op de IJkdijk¹⁴ gereproduceerd en wordt ook door recente waarnemingen in de Verenigde Staten bevestigd.

2.1 Fasen piping

Het faalmechanisme piping is onder te verdelen in negen fasen. Deze fasen zijn weergegeven in Figuur 2. Fase nul is niet in het figuur weergegeven omdat dit nog niet de start van het pipingproces beschrijft maar de basis.

0. Toenemen van de waterspanning en opdrijven

Piping kan plaatsvinden wanneer er onder de waterkerende constructie een cohesieve deklaag aanwezig is met daaronder een watervoerend pakket (aquifer). Wanneer de aquifer met het buitenwater in contact staat, zal bij een toenemende buitenwaterstand horizontale grondwaterstroming op gang komen. Door deze grondwaterstroming kan de stijghoogte in het achterland oplopen. Hierdoor kan er opbarsten en piping plaatsvinden.

1. Opbarsten cohesieve deklaag

Als de stijghoogte in de aquifer groter is dan het gewicht van de cohesieve deklaag is er sprake van wateroverdruk. Wanneer die overdruk groot genoeg is, zal het grondwater in de zandlaag een uitweg naar boven forceren. Door het opdrijven kunnen scheurtjes in de afdekkende laag ontstaan, waardoorheen het kwelwater zich een weg zoekt naar het maaiveld. Dit wordt opbarsten van de deklaag genoemd. Zonder het opbarsten van de deklaag kan er geen piping ontstaan omdat er immers dan geen directe verbinding is tussen de binnen- en buitendijkse zijde.

¹² Calle, E.O.F., e.a.,(1999), *Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen*

¹³ Förster U., e.a.,(2011), *Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen concept*

¹⁴ Vries, G. de, et al.,(2010),*IJkdijk Full Scale Underseepage Erosion (Piping) Test: Evaluation of Innovative Sensor Technology*

2. Welvorming

Als het grondwater een weg vindt door de cohesieve deklaag als gevolg van de wateroverdruk kan er een kwelweg ontstaan in de deklaag. Door erosie van deze kwelweg ontstaat in de cohesieve deklaag een kanaal, het zogenaamde opbarstkanaal, waardoor wellen op het maaiveld of op de waterbodem ontstaan, als achter de dijk een waterpartij (bijvoorbeeld een sloot) ligt.

3. Eroderen van de zandlaag

Door het opbarstkanaal stroomt grondwater vanuit de aquifer richting het maaiveld. Er ontstaat een wel. Door de, uit de zandlaag uittredende kwel, worden zanddeeltjes vanuit de zandlaag naar het opbarstkanaal getransporteerd. Het opbarstkanaal wordt daardoor opgevuld met zand dat zich in gefluïdiseerde toestand bevindt. De stromingsweerstand in het opbarstkanaal neemt daardoor toe. Er zijn nu twee mogelijkheden:

- Door de toegenomen weerstand neemt de stroomsnelheid ter plaatse van het uittreepunt in de zandlaag zodanig af dat het erosieproces stopt en de wel 'schoon' water gaat produceren.
- De stroomsnelheid neemt onvoldoende af, waardoor de aanvoer van zand naar het opbarstkanaal voort blijft duren. Wanneer de stroming krachtig genoeg is (als het verval over de dijk voldoende hoog is), wordt zand uit de zandlaag in de omgeving van het opbarstkanaal geërodeerd, door de kwelstroom via het opbarstkanaal naar het maaiveld meegevoerd en rondom de uitstroomopening van de wel afgezet. Daar ontstaat dan een zandkrater. De diameter van het opbarstkanaal kan sterk variëren afhankelijk van de stroomsnelheid en de erodeerbaarheid van het materiaal in de afdekkende laag. In de zandlaag ontstaat een holle ruimte ter plaatse van het opbarstkanaal, die zich later bovenin de zandlaag direct onder de deklaag in vorm van kanaaltjes (pipes) in bovenstroomse richting (richting buitenwater) uitbreidt. Dit wordt terugschrijdende erosie genoemd. Er ontstaan door vertakkingen kanaaltjes in de bovenkant van de zandlaag. Deze kanaaltjes blijven in stand omdat de deklaag cohesief is.

4. Pipevorming en verder eroderen van de zandlaag

Bij een groot genoeg verval over de kering zullen de erosiekanaaltjes blijven groeien, tot ze het buitenwater bereiken.

5. Doorgaande pipe

Als de kanaaltjes het buitenwater bereiken is er een open verbinding tussen buitenwater en uittreepunt ontstaan, waardoor er een doorgaande pipe ontstaat.

6. Verbreding van de pipe (ruimen)

Zodra het kanaaltje contact maakt met het water aan de bovenstroomse zijde van de dijk (buitenzijde), treedt het ruimproces op. Onder 'ruimen' wordt het proces verstaan waarbij het kanaaltje door een drukgolf die met de stroom meeloopt, vanaf de bovenstroomse naar de benedenstroomse kant, versneld verder gaat eroderen.

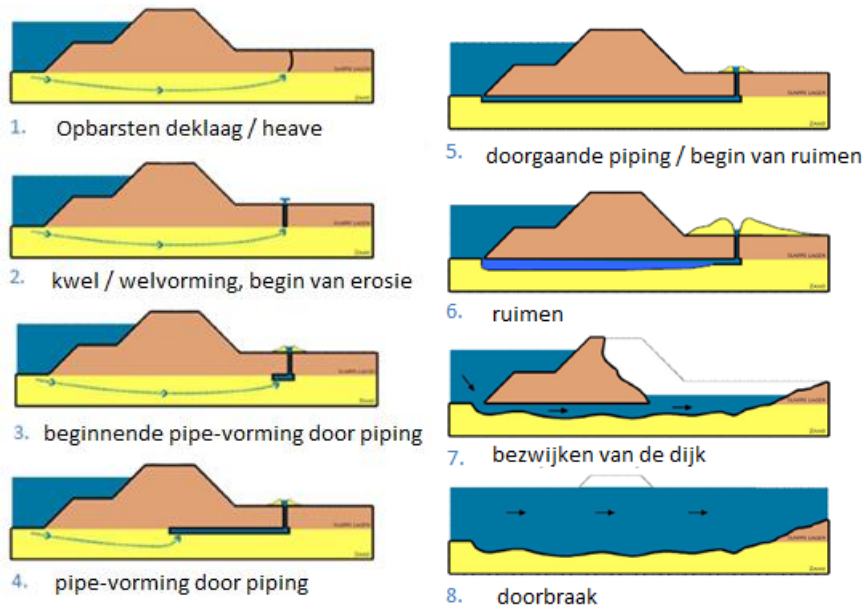
7. Bezijken van de dijk

Uiteindelijk zal dit (waarschijnlijk) leiden tot holle ruimten onder de waterkering die zo groot zijn dat bezijken, van het dijklichaam zal optreden. Bij een voldoende hoge waterstand zal dan een breuk in de dijk ontstaan en dit tot dijkdoorbraak leiden. Visuele waarnemingen van dit bezwijkproces en van de tijdsduur ervan, althans bij dijken, ontbreken echter. In kleinschalige proeven is waargenomen dat de verdere erosie van de zandlaag na het ontstaan van een doorgaande pipe zeer snel, dat wil zeggen

in de orde van minder dan een minuut, verloopt. In de full-scale proeven op de IJkdijk¹⁵ is echter gebleken dat het vormen van een doorgaand kanaal meerdere dagen kan duren.

8. Dijkdoorbraak

De dijk breekt door.



Figuur 2: De verschillende fasen van piping.¹⁶

2.2 Pipinggevoelige bodems

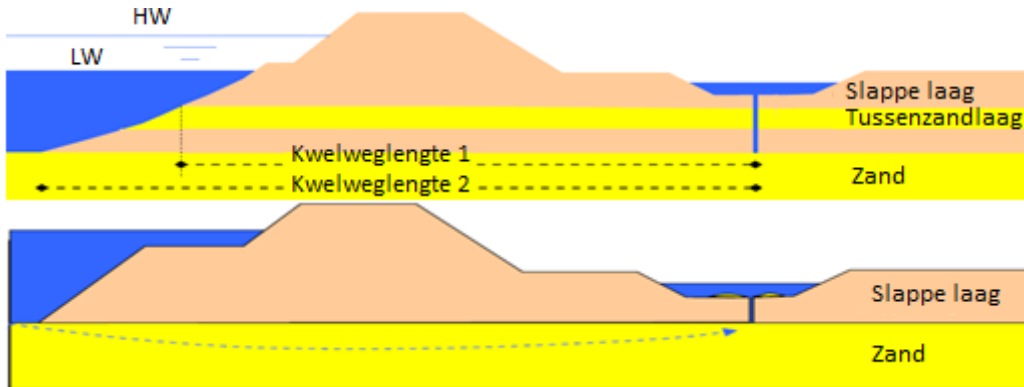
In deze paragraaf zal kort worden besproken welke laagopbouw pipinggevoelig is en welke niet. Kenmerkend voor een pipinggevoelige situatie zijn de volgende elementen:

- Horizontale grondwaterstroming door een aquifer, die bovenstrooms gevoed wordt door een waterreservoir (zee, rivier, watergang, (stuw)meer, etc.) en benedenstrooms een uitteerpunt heeft waar het grondwater vrij uit kan stromen.
- Vanaf het uitteerpunt is de zandlaag in bovenstroomse richting bedekt door een relatief ondoorlatend en samenhangend oppervlak, bijvoorbeeld de onderkant van een cohesieve grondlaag of de onderkant van een op de zandlaag rustende betonnen of gemetselde constructie, waardoor de mogelijkheid wordt geschapen dat de kanaaltjes in stand blijven.
- Een intreepunt op een zodanig korte afstand van het uitteerpunt, zodat een open verbinding kan ontstaan tussen het waterreservoir bovenstrooms en het uitteerpunt.
- Dikte van de deklaag. Als de deklaag een geringe dikte heeft, zal er sneller opbarsten optreden waarna piping kan ontstaan. Met een dikke deklaag zal het gewicht van de deklaag ervoor zorgen dat er geen opbarsten kan ontstaan en dus ook geen piping.

¹⁵ Vries, G. de, et al.,(2010),*IJkdijk Full Scale Underseepage Erosion (Piping) Test: Evaluation of Innovative Sensor Technolog*

¹⁶ Knoeff, H.,(2008),*SBW piping*, Deltares

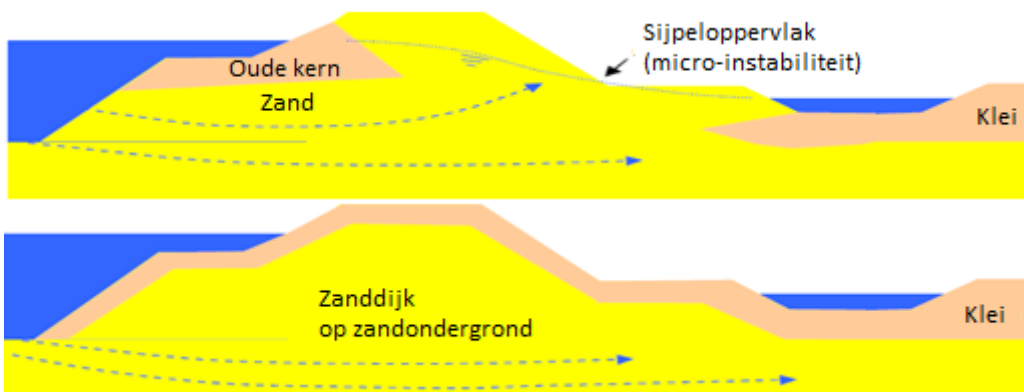
In Figuur 3, in de onderste afbeelding, is een typische bodemopbouw geschetst waarbij piping een rol kan spelen. Het uittreepunt wordt in dit geval gevormd door een opbarstkanaal, waardoor water vanuit de zandlaag in de kwelsloot kan uitstromen en zanddeeltjes mee kan voeren. Dit opbarstkanaal treedt meestal op waar de deklaag het dunst is. Dit is meestal in de kwelsloot. Als deze kwelsloot zich op een relatief dichte afstand bevindt van de binnenteen is er veel kans op piping.



Figuur 3: Pipinggevoelige bodems.

In de bovenste figuur is ook een pipinggevoelige bodemopbouw weergegeven waarbij meerdere zandlagen en cohesieve lagen in de bodem aanwezig zijn. Deze lagen zijn verbonden met het buitenwater waardoor er ook piping kan ontstaan onder de cohesieve tussenlagen. Meestal is alleen de cohesieve deklaag van belang maar toch dienen ook de tussenlagen getoetst te worden op opbarsten en piping.

Situaties die niet pipinggevoelig zijn, zijn in onderstaande figuur (Figuur 4) weergegeven. De eerste situatie die wordt beschreven is een zanddijk op een zand ondergrond. De dijk is bekleed met klei. In de tweede situatie treedt kwelwater uit aan het binnentalud van de dijk. In beide situaties kan er geen pipe ontstaan door het ontbreken van een goede cohesieve deklaag. Er zullen wel kanaaltjes ontstaan maar deze zullen snel instorten omdat het zand cohesieloos is. Dit proces van het ontstaan van kanaaltjes en het instorten van deze kanaaltjes herhaalt zich steeds, waardoor afkalving van het binnentalud plaatsvindt. Dit mechanisme heet micro-instabiliteit.



Figuur 4: Niet pipinggevoelige bodems.

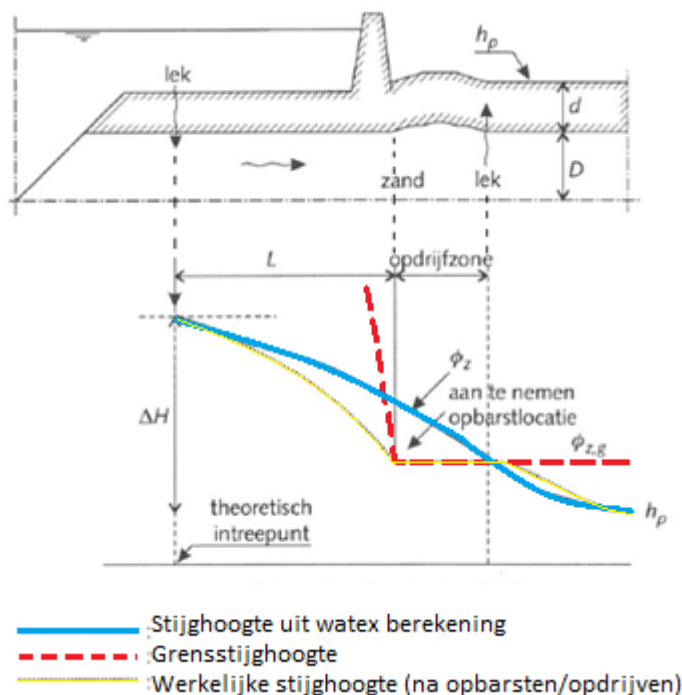
3 Rekenregels

Als leidraad voor dit hoofdstuk is het Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen uit 1999¹⁷ en een concept van de herziene versie uit 2011¹⁸ gebruikt. In dit hoofdstuk wordt dieper ingegaan op een aantal verschijnselen en vergelijkingen die te maken hebben met het faalmechanisme piping, of hier verwant aan zijn. Allereerst wordt het mechanisme opbarsten beschreven. Hierin wordt beschreven wanneer opbarsten optreedt, hoe dit in zijn werk gaat en hoe dit wordt berekend. In de volgende paragraaf wordt ingegaan op de regel van Bligh. Bligh is de voorloper van de regel van Sellmeijer. Vervolgens wordt de regel van Sellmeijer uit 1989 en 2006 beschreven en daarna de gecorrigeerde formule uit 2011.

3.1 Opbarsten

Voordat er piping kan ontstaan, moet de cohesieve deklaag eerst opbarsten. Bij een hoge waterstand van de rivier neemt de waterdruk in de aquifer toe doordat er waterstromen op gang komen. In dergelijke situatie kan de waterdruk tegen de onderkant van de cohesieve deklaag dusdanig groot worden, dat deze opwaartse druk groter is dan de neerwaartse druk (het gewicht van de deklaag). In dat geval barst de deklaag op. De grensstijghoogte geeft aan bij welke stijghoogte in de aquifer nog net evenwicht aanwezig is met de deklaag.

In Figuur 5 zijn de stijghoogte, grensstijghoogte en opdrijfzone weergegeven voor een willekeurige situatie. Tussen twee grenzen bevindt zich de opdrijfzone. Aangenomen wordt dat er in de opdrijfzone, door scheurvorming, kanalen ontstaan waardoor kwel vanuit de zandlaag kan uittreden bij het maaiveld. Hierdoor kunnen zandmeevoerende wellen ontstaan. Het is van belang om na te gaan of bij de maatgevende buitenwaterstand de grensstijghoogte in de aquifer wordt bereikt.



Figuur 5: Stijghoogte, grensstijghoogte en opdrijfzone voor een willekeurige situatie.

¹⁷ Calle, E.O.F., e.a., (1999), *Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen*

¹⁸ Förster U., (2011), *Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen concept*

Als de neerwaartse druk groter, of gelijk, is dan de opwaartse druk, treedt er geen opbarsten op. Bij het opbarstcriterium wordt gebruik gemaakt van de volgende evenwichtsbeschouwing:

Formule 1:

$$\begin{array}{rcl} \text{Opwaartse druk} & \leq & \text{Neerwaartse druk} \\ \gamma_w \cdot \phi_{od} & \leq & (\gamma_p \cdot d) + (\gamma_w \cdot h_{wsb}) \end{array}$$

De stijghoogte in de zandlaag is afhankelijk van de buitenwaterstand en de geohydrologische Configuratie en eigenschappen van de ondergrond. Met name het al dan niet aanwezig zijn van voorland, dikte en de doorlatendheid van de afdekkende laag in voorland en achterland en de doorlatendheid en dikte van de zandlaag zijn bepalend voor de mate van demping van de buitenwaterstand. De stijghoogte in de zandlaag kan in principe met elk geschikt rekenmodel voor grondwaterstroming worden berekend. In Figuur 5 is met het programma WATEX de plaats afhankelijke stijghoogte in de zandlaag berekend.

3.2 Bligh 1910

Tot nu toe wordt de eenvoudige rekenregel van Bligh nog steeds gebruikt als ‘quick scan’ voor pipingcontrole. Uit het recente SBW onderzoek is echter gebleken dat Bligh niet altijd even conservatief is dan werd gedacht. Met de aangepaste formulering van Sellmeijer (2011) wordt een grotere benodigde kwelweglengte gevonden dan de conform de regel van Bligh. In dit onderzoek zal de rekenregel van Bligh worden meegenomen ter vergelijking en bevestiging van bovenstaande conclusie.

Met de regel van Bligh wordt het maximaal toelaatbaar verval berekend door de kwelweglengte te delen door de creepfactor die samenhangt met de korreldiameter (zie Tabel 1). Door weerstand in het opbarstkanaal mag het optredende verval gereduceerd worden met 30% van de lengte van het opbarstkanaal. De formule van Bligh is weergegeven in Formule 2.

Formule 2:

$$(\Delta H - 0,3d) \leq \Delta H_c = \frac{L}{C_{creep}}$$

Grondsoort	Mediane korreldiameter (μm) ¹⁹	C _{creep} (Bligh)	C _{w,creep} (Lane)
uiterst fijn zand, silt	< 105	-	8,5
Zeer fijn zand	105 - 150	18	-
Zeer fijn zand (mica)	-	18	7
Matig fijn zand (kwarts)	150 - 210	15	7
Matig grof zand	210 - 300	-	6
Zeer/uiterst grof zand	300 - 2000	12	5
Fijn grind	2000 - 5600	9	4
Matig grof grind	5600 - 16000	-	3,5
Zeer grof grind	> 16000	4	3

Tabel 1: Grondsoorten met bijbehorende mediane korreldiameter en creep-factoren.²⁰

¹⁹ indicaties conform NEN 5104 (september 1989)

²⁰ Förster U. ,(2011), *Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen concept*

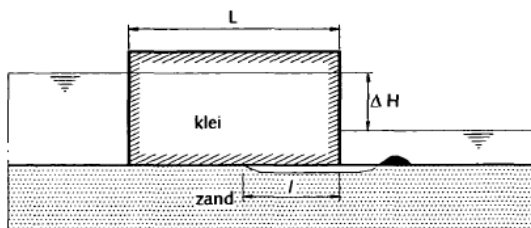
3.5 Sellmeijer 1989, 2006

Het rekenmodellen van Sellmeijer uit 1989 en 2006²¹ zijn in deze paragraaf behandeld. De formules geven hetzelfde resultaat, maar zijn in een andere vorm geschreven.

Door Sellmeijer is in het kader van TAW onderzoek een mathematisch rekenmodel voor pipingcontrole ontwikkeld, op basis van waarnemingen van het verschijnsel. Uitgangspunt voor het mathematische model is de configuratie die in Figuur 6 is geschetst. Aangenomen wordt dat zich een pipe ontwikkeld heeft met de lengte l . Sellmeijer modelleert deze pipe als spleet onder de constructie. In de pipe vindt laminaire stroming richting het opbarstkanaal plaats. Op de zandkorrels op de rand tussen pipe en zandlaag worden krachten uitgeoefend door de uittredende grondwaterstroming en door de stroming van het water in de pipe. Het wiskundige model bestaat uit een koppeling van:

- De stijghoogtevergelijking voor de beschrijving van grondwaterstroming in de zandlaag.
- Een vergelijking voor laminaire stroming van het water door de pipe.
- Een evenwichtsvergelijking van aanstroom- en sleepkrachten door de stroming in de pipe op de zandkorrels en de rolweerstand van deze korrels.

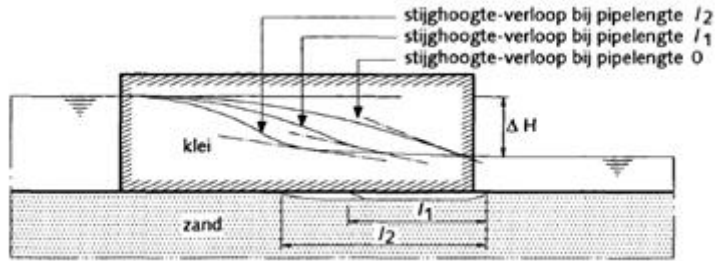
Met behulp van deze vergelijkingen wordt berekend wat het maximale verval over de constructie is, waarbij de zandkorrels nog net in evenwicht zijn. Dit verval is afhankelijk van de verhouding l/L tussen de lengte van de pipe, de lengte van de constructie, de doorlatendheid van het zand, de sleepkrachtcoëfficiënt en de diameter en de rolweerstand van de zandkorrels. Het blijkt dat in de schematisatie die weergegeven is in Figuur 6, bij een verhouding $l/L \approx 0.5$, het verval waarbij net evenwicht gevonden wordt het grootst is. Dit maximale verval wordt het kritieke verval genoemd.



Figuur 6: Basis schematisatie rekenmodel van Sellmeijer 1989.

De interpretatie van deze uitkomst is als volgt. Bij een verval over de constructie dat kleiner is dan het kritieke verval zal door erosie een pipe ontstaan, die net zolang doorgroeit tot de met dit verval corresponderende pipelengte is bereikt. De stromingsgradiënten zijn dan zodanig afgezwakt dat de zandkorrels op de rand van de spleet weerstand kunnen bieden aan de aanstroomkrachten. Dit is weergegeven in Figuur 7. Wordt het verval opgevoerd, dan zal de spleet weer gaan groeien, tot een nieuw evenwicht wordt bereikt. Het erosieproces stopt, zolang het verval niet groter is dan het kritieke verval. Wordt het verval wel groter dan zal de spleet door blijven groeien, omdat het verval waarbij evenwicht mogelijk is kleiner is dan het aanwezige verval. De spleet groeit dan uit tot een open kanaaltje tussen boven- en benedenstroomse kant van de constructie en piping is daarmee een feit. Uit observaties van proeven op kleine schaal blijkt dat het aangroeien van de spleet voorbij het kritieke punt zeer snel gaat.

²¹ Sellmeijer, J.B.,(1988), *On the mechanism of piping under impervious structures*



Figuur 7: Afzakken stromingsgradiënten bij ontstaan pipe.

Het grensevenwicht wordt berekend op basis van het vier-krachtenmodel. De kracht op een korrel op de bodem van het erosiekanaal in richting van het kanaal bestaat volgens dit model uit twee horizontale krachten (sleepkracht en horizontale stromingsdruk) en twee verticale krachten (verticale stromingsdruk en het eigengewicht van de korrel). De veronderstelling van een vierkrachtenevenwicht is alleen juist, als de korrel goed ingebed is tussen de andere korrels. Voor een grote, in de pipe uitstekende korrel, waaromheen de andere korrels al afgevoerd zijn, is dit niet meer het geval. Het vier-krachtenmodel is daarom in 2006 veranderd tot een twee-krachtenmodel zodat deze geïmplementeerd kon worden in het programma MSeep. Deze verandering zorgt echter niet voor een ander resultaat.

In het twee-krachtenmodel worden bij de berekening van het grensevenwicht de horizontale en de verticale stromingsdruk niet meer meegenomen. Bij de uitstekende korrel spelen deze blijkbaar geen rol, omdat er geen omringend materiaal meer aanwezig is. In Formule 4 is de formule van Sellmeijer (2006) weergegeven. In de formules van Sellmeijer wordt gerekend met de intrinsieke doorlatendheid. Bij de berekening van de intrinsieke doorlatendheid, wordt de doorlatendheid (k) vermenigvuldigd met een deling van de kinematische viscositeit met de zwaartekracht, zie Formule 3.

Formule 3:
$$K_{intr} = k \cdot \frac{v}{g}$$

Omdat de kinematische viscositeit een vaste waarde is, voor grondwater van 10 °C, levert dit een waarde op van $1,35 \cdot 10^{-7}$. K_{intr} is dus $k \cdot 1,35 \cdot 10^{-7}$.

Formule 4:
$$\frac{\Delta H_c}{L} = G \cdot R \cdot S \cdot F$$

$$G = \left(\frac{D}{L}\right) \left(\frac{D}{L}\right)^{\frac{0,28}{2,8} - 1} \quad (\text{geometrie factor})$$

$$R = \frac{\gamma'_p}{\gamma_w} \tan \theta \quad (\text{rol equilibrium})$$

$$S = \eta \frac{d70}{\sqrt[3]{k_{intr} L}} \quad (\text{zandeigenschappen})$$

$$F = 0,68 - 0,1 \ln(S) \quad (4 \text{ krachten factor})$$

$$\text{Pipingcriterium: } (\Delta H - 0,3d) \leq \frac{1}{\gamma_n} \Delta H_c$$

3.6 Sellmeijer 2011

Het model en de rekenregel van Sellmeijer zijn in 2011 opnieuw gekalibreerd met nieuwe experimentele data²². De oorspronkelijke regel van Sellmeijer is gebaseerd op een stromingsberekening en een uitwerking van het krachterevenwicht. In deze regel is, voor zover mogelijk bij de toenmalige stand van de kennis, de fysica van het pipingproces meegenomen. In de herziende rekenregel is dat gedeeltelijk nog het geval. Waarschijnlijk is de fysische beschrijving in de regel van Sellmeijer voor enkele parameters onvolledig²³. Op dit moment is er nog geen betere fysische beschrijving voorhanden en is het verband tussen die parameters en het kritieke verval alleen empirisch vastgesteld op basis van proeven²⁴ en de multivariate analyses. De zo gevonden verbanden zijn alleen geldig in de range waarbinnen de proeven zijn uitgevoerd.

De regel is afgeleid en gevalideerd²⁵ voor Nederlandse zanden met een d70-waarde tussen de 150 en 500 µm. Voor d70-waardes boven de 500 µm lijkt het aangepaste model een betere schatting te geven van het kritiek verval dan het oude model. Voor fijnere zanden is het verschil tussen oude en nieuwe model minder sterk. Tot nader inzicht is het aangepaste model een veilige benadering voor het schatten van het kritiek verval.

In deze aangepaste rekenregel, welke gebaseerd is op het twee-krachtenmodel, is de invloed van de d70 verminderd. De invloed van de korreldiameter op het kritieke verval is in de rekenregel gereduceerd in de schalingsfactor F_{scale} . Er wordt rekening gehouden met het lengte-effect. Dit is de kans dat in een dijkkring een zwakke schakel zit, waardoor er piping op kan treden. Ook is er rekening gehouden met relatieve dichtheid, korrelvorm en uniformiteitscoëfficiënt. Deze parameters zijn echter van dusdanig kleine invloed dat deze niet zijn meegenomen in de herziende formule. Wel is de invloed van de doorlatendheid vergroot. Ook is er een nieuwe parameter toegevoegd. De gemiddelde d70 ($d70_m$). De invloed van de d70-waarde is nog steeds erg belangrijk, maar deze is nu meer 'gemiddeld' omdat er grote onzekerheden zijn met betrekking tot de bodemopbouw. Bij het pipingcriterium wordt er een nieuwe veiligheids factor toegepast. De zogenaamde schematiseringsfactor (γ_b). De formule is ook geïmplementeerd in MSeep. De herziende formule van Sellmeijer uit 2011 is weergegeven in Formule 5.

Formule 5:

$$\Delta H_c = L \cdot F_R \cdot F_s \cdot F_G$$

$$F_R = \frac{\gamma'_p}{\gamma_w} \{ \eta \tan(\theta) \} \quad (\text{rol equilibrium})$$

$$F_s = \frac{d70}{\sqrt[3]{k_{intr} L}} \left(\frac{d70}{d70_m} \right)^{0.4} \quad (\text{zandeigenschappen})$$

$$F_G = \frac{M_{seep}}{F(G)} = \frac{\text{standaarddijk}}{0,91} \left(\frac{D}{L} \right)^{\left(\frac{0,28}{\left(\frac{D}{L} \right)^{2,8} - 1} \right) + 0,04} \quad (\text{geometrie factor})$$

$$\text{Pipingcriterium: } (\Delta H - 0,3d) \leq \frac{\Delta H_c}{\gamma_n \cdot \gamma_b}$$

²² Beek, V.M. van, e.a.,(2012),*Validation of Sellmeijer's model for backward piping under dikes on multiple sand layers*

²³ Beek, V.M. van, e.a.,(2012),*SBW Piping: 2B. Bureaustudies fysische onderbouwing aangepaste rekenregeld, tijdsafhankelijkheid en heterogeniteit*

²⁴ Beek, V.M. van, e.a.,(2011),*Observations on the process of backward erosion piping in small-, medium- and fullscale experiments*

²⁵ Sellmeijer, J.B. et al.,(2011),*Fine-tuning of the backward erosion piping model through small-scale, medium-scale and Ikdijk experiments*

De eerste factor beschrijft het grensevenwicht van zandkorrels op de bodem van de pipe. De tweede term reflecteert de verhouding tussen de processchaal van het mechanisme dat voor korreltransport zorgt en de processchaal van de grondwaterstroming die dit transportmechanisme aandrijft. Voor schaalproeven is dit een belangrijke verhouding. De laatste term beschrijft de invloed van de vorm van de geometrie van de ondergrond op de grondwaterstroming. Deze is afhankelijk van de verhouding tussen dikte en lengte van de aanwezige zandlagen. In geval van een meerlagensysteem is deze factor ook afhankelijk van het doorlatendheidscontrast tussen de zandlagen. De geometrie factor is situatieafhankelijk en moet worden bepaald met het eindige elementen model MSeep.

4 Gegevensanalyse casus

In dit hoofdstuk zullen de gegevens van de casus dijkverbetering Limburg worden besproken. In de eerste paragraaf zullen de boringen besproken worden waarna de stijghoogtes aan bod komen. Het doel van dit hoofdstuk is om voor de gehele casus representatieve meetdata te vergaren die in de modelfase gebruikt kunnen worden.

4.1 Boringen

Bij deze scriptie zal er gewerkt worden met gegevens van boringen langs de Maas in de provincie Limburg.

4.1.1 Verwerking gegevens

Er zijn van zeven locaties boorgegevens beschikbaar. In hoofdstuk 3 zijn de locaties van de verwerkte boorgegevens weergegeven. Hierin zijn ook de uitwerkingen van alle boringen terug te vinden. In Tabel 2 is een voorbeeld weergegeven van verwerkte zandmonsters uit Venlo. De volgende elementen zijn meegenomen: de locatie, het boornummer, de dikte, de d_{10} , de d_{50} , de d_{60} , de d_{70} , de d_{60}/d_{10} van de zandfractie en opmerkingen. In het kopje opmerkingen staat het soort laag, van de desbetreffende boring, beschreven.

nr.	locatie	Boor nr.	Dikte (m)	d_{10} (mm)	d_{50} (mm)	d_{60} (mm)	d_{70} (mm)	d_{60}/d_{10} (mm)	opmerking
10	Venlo	mm43	0.2	0.002	0.23	0.255	0.32	2.1	mengmonster, matig fijn, kleilig
11	Venlo	mm44	0.4	0.004	0.24	0.27	0.32	2.1	mengmonster, matig fijn, siltig
12	Venlo	mm39	0.45	0.125	0.4	0.45	0.48	1.7	mengmonster, onder deklaag, matig fijn, siltig
13	Venlo	mm47	1.2	0.004	0.255	0.31	0.38	2.3	mengmonster, onder deklaag, matig fijn
14	Venlo	mm48	0.7	0.16	1.4	2.8	3.9	2.2	mengmonster, matig grof, sterk grindig
Gemiddelde			0.562	0.0337	0.281	0.321	0.375	2.08	

Tabel 2: Voorbeeld verwerkte zandmonsters uit Venlo.

4.1.2 Analyse gegevens

Van elke locatie zijn, van het zand, boringen met een d_{70} -waarden groter dan 1 mm niet meegenomen in de bepaling van het gemiddelde (zie rode markering in tabel). Dit is gedaan om een zo realistisch mogelijk gemiddelde van alleen de zandfractie mee te nemen. Zand groter dan 1 mm heeft de aanduiding zeer/uiteerst grof zand²⁶. Voor dit onderzoek is alleen de fijnere zandfractie van 1 of kleiner dan 1 mm gebruikt. Bij de bepaling van de gemiddelde grindfracties zijn alle waarden meegenomen met een d_{70} groter dan 2 mm.

Als de gemiddelden van alle locaties wordt bekeken, is te zien dat de korrelgroottes uit elkaar lopen (zie Tabel 3). Aanvankelijk werd gedacht dat er in het noorden van het casusgebied fijnere fracties aanwezig zijn. Na analyse van de gegevens blijkt er geen oplopende lijn te zijn qua korrelgroottes van Noord naar Zuid. Er wordt dus gesteld dat er geen patroon in de korrelgroottes op grote schaal wordt gezien. Er zijn wel degelijk verschillen waarneembaar maar deze zijn lokaal. Nu dit bekend is kunnen er korrelgroottes worden aangenomen die maatgevend zijn voor het gehele gebied.

²⁶ indicaties conform NEN 5104, september 1989

locatie	soort	d ₁₀ (mm)	d ₅₀ (mm)	d ₆₀ (mm)	d ₇₀ (mm)	d ₆₀ /d ₁₀ (mm)
Mook	zand	0.12	0.26	0.33	0.38	2.03
Mook	grind	0.25	1.98	3.00	4.10	2.10
Bergen	zand	0.21	0.51	0.63	0.80	2.08
Venlo	zand	0.03	0.28	0.32	0.38	2.08
Roermond	zand	0.05	0.17	0.20	0.21	-
Roermond	grind	0.08	1.77	10.00	17.00	-
Thorn	zand	0.26	0.36	0.42	0.49	2.36
Thorn	grind	0.99	25.90	31.80	40.50	3.96
Geulle aan de Maas	zand	0.01	0.28	0.31	0.40	-
Maastricht	zand	0.01	0.04	0.05	0.57	1.84
Maastricht	grind	0.19	9.85	14.81	21.03	5.58

Tabel 3: Monsterlocaties met bijbehorende gemiddelde korrelgroottes, van Noord naar Zuid.

Voor de zandfractie zal er een d₁₀-, d₅₀-, d₆₀- en d₇₀-waarde aangenomen worden die gemiddeld ongunstig is voor het faalmechanisme piping. Dit resulteert in een kleinere korrelgrote omdat deze korrels makkelijker worden meegevoerd dan een grote korrel. Er wordt gekozen voor een monster uit Mook. Dit monster is opgesplitst in twee monsters en is weergegeven in Tabel 4. Het monster is gekozen omdat deze een voor het onderzoek representatieve laagopbouw heeft. Deze laag bevindt zich onder een cohesieve deklaag en boven een grindpakket. Ook komt dit monster in de buurt van de laagste gemiddelde d-waarden uit Mook en Venlo.

Nr.	locatie	Boor nr.	Dikte (m)	d ₁₀ (mm)	d ₅₀ (mm)	d ₆₀ (mm)	d ₇₀ (mm)	d ₆₀ /d ₁₀ (zandfractie)	opmerking
2	Mook	mm02	0.6	0.04	0.25	0.3	0.35	2.4	zand onder deklaag
3	Mook	mm03	0.4	0.18	0.255	0.3	0.35	1.7	zand boven grind

Tabel 4: Het monster dat wordt aangenomen voor de zandfractie van de casus.

Omdat de zandlaag is onderverdeeld in twee monsters moet er een keuze worden gemaakt in de te gebruiken waarden. De waarden waarmee gewerkt gaat worden zijn groen gemarkeerd. De d₁₀-waarde van 0,18 mm wordt gebruikt omdat deze realistischer wordt beschouwd dan de d₁₀-waarde van 0,04 mm, deze duidt meer op klei. Voor de d₇₀-waarde is 0,35mm toegepast. Voor de gemiddelde d₇₀-waarde wordt de gemiddelde waarde gebruikt van alle zandmonsters, deze bedraagt 0,44 mm (zie gemiddelde d₇₀-waarde zand bijlage 3). Deze gemiddelde d₇₀-waarde wordt gebruikt in de formule van Sellmeijer uit 2011.

Voor de grindfractie wordt er een d₁₀-, d₅₀-, d₆₀- en d₇₀-waarde aangenomen die representatief is voor de casus. Er wordt hier geen gebruik van een ongunstige grote korrelverdeling omdat er voor het grindpakket gezocht wordt naar een representatieve, dus geen ongunstige, waarde. In Tabel 3 zijn voor elke locatie de gemiddelde korrelgroottes weergegeven. Van alle locaties is hierna weer een gemiddelde genomen. In Tabel 5 is de korrelverdeling weergegeven die meegenomen gaat worden in het vervolg van het onderzoek. Voor de gemiddelde d₇₀-waarde wordt er uitgegaan van de d₇₀-waarde. Deze zal dus ook 26,18 mm bedragen.

Dikte(m)	d ₁₀ (mm)	d ₅₀ (mm)	d ₆₀ (mm)	d ₇₀ (mm)	d ₆₀ /d ₁₀ (zandfractie)
1,33	0,42	12,50	18,87	26,18	4,77

Tabel 5: De korrelverdeling die wordt aangenomen voor de grindfractie van de casus.

4.2 Stijghoogtes

Er zijn veel peilbuizen en waterspanningsmeters geplaatst door zowel waterschap Peel en Maasvallei als Roer en Overmaas. In bijlage 5 zijn enkele resultaten van de metingen weergegeven. Deze peilbuizen en waterspanningsmeters zijn geplaatst vóór een periode met hoog water in de Limburgse Maas. Ze zijn zowel in het voorland, de dijk zelf en het achterland geplaatst. De meeste peilbuizen zijn geplaatst met de voet in het grindpakket. Dit is gedaan omdat er bij het aantreffen van een harde grindlaag niet verder geboord kan worden met een handboor.

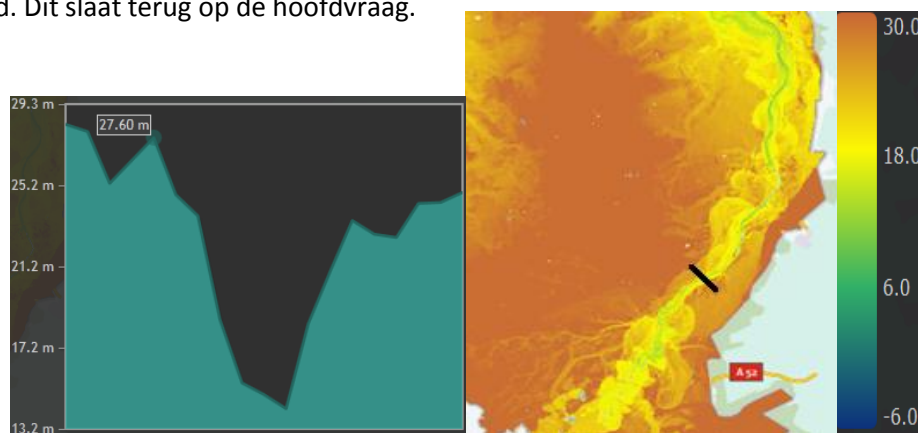
Na analyse van de gegevens is gebleken dat er veel peilbuizen en waterspanningsmeters geen of heel weinig meetdata hebben opgeleverd (zie bijlage 5). Hieruit is af te leiden dat de grondwaterstand in het achterland lager is dan de onderkant van de deklaag. Door het grove grindpakket is er veel berging aanwezig.

Omdat de grondwaterstand niet tot de bovenkant van het grindpakket reikt, betekent dat dat bij een hoge waterstand in de Maas de lege ruimtes in het grindpakket eerst moet gaan vullen. Hierna kan er pas waterdruk onder de deklaag gaan ontwikkelen. Dit kan verklaren waarom er bij tijdelijk hoog water niet direct een reactie te zien is van de stijghoogte in het achterland.

In bijlage 5 is een grafiek weergegeven waarin de resultaten van de vier peilbuizen zijn weergegeven. Deze stijghoogtegegevens vertonen de meest bruikbare gegevens van alle verkregen metingen. Te zien is dat peilbuis HB2 een sterk verhoogde stijghoogte meet. Voor deze verhoging kon geen verklaring worden gevonden. Ook niet in het bijhorende rapport, uitgevoerd door Fugro GeoServices B.V.

Wat opvalt in de resultaten is de hogere stijghoogte aanwezig in het achterland in vergelijking met het voorland (HB 3 en HB 4). Dit is te verklaren door de hoogte van het achterland. Deze situatie is weergegeven in Figuur 8. Door dit hoge achterland stroomt er grondwater vanaf het achterland richting de Maas. Deze invloed van het achterland is hoog genoeg om de stijghoogte in het achterland hoger uit te laten komen dan de waterstand van de Maas zelf.

Door de tegenvallende stijghoogteresultaten is het niet mogelijk om het risico op het faalmechanisme piping specifiek op de situatie in de casus te bepalen. Hierdoor kan de deelvraag: *Wat is het risico op het faalmechanisme piping specifiek op de situatie in de casus?* Niet volledig beantwoord worden. Er kan wel nog een algemeen beeld geschetst worden van het risico op piping in een tweelagensysteem met en zonder een cohesieve deklaag met representatieve waarden voor het casusgebied. Dit slaat terug op de hoofdvraag.



Figuur 8: Hoog achterland, legenda meters t.o.v. NAP.²⁷

²⁷ www.ahn.geodan.nl

5 Methode

In dit hoofdstuk zijn het basismodel, variaties op het basismodel (bestaande uit 5 situaties), de modellen en de methoden besproken.

Het basismodel en de 5 situaties zijn doorgerekend met de EEM computerprogramma's MSeep en PlaxFlow. MSeep is een computerprogramma van Deltares waarin met een EEM grondwaterstromingsmodel het stromingsbeeld in en onder de waterkering kan worden berekend. Daarnaast is in het programma een pipingtoets geïmplementeerd conform de methode Sellmeijer. Plaxflow is een module van Plaxis waarin alleen het grondwaterstromingsbeeld kan worden berekend. Naast de computerprogramma's is analytisch op piping getoetst conform de methodes Sellmeijer en Bligh.

Het basis model is weergegeven in paragraaf 5.1. De volgende variaties op het basismodel zijn vergeleken en geanalyseerd:

1. Situatie zonder deklaag.
2. Situatie met deklaag (opbarstkanaal).
3. Situatie met deklaag (open slootbodem).
4. Situatie met deklaag (open slootbodem met zand).
5. Situatie zonder deklaag (opgehoogde waterstand).

Voor alle vijf de situaties zijn de volgende variaties uitgevoerd:

- Bodemopbouw bestaande uit een 10 m dik zandpakket.
- Bodemopbouw bestaande uit een 3 m zand met daaronder 7 meter grind.
- Bodemopbouw bestaande uit een 1 m zand met daaronder 9 m grind.

Op deze manier is er inzicht verkregen in het risico op piping met een ondergrond van grind met daarboven een (dunne)zandlaag en een cohesieve deklaag.

Alle situaties zijn doorgerekend met MSeep en PlaxFlow en analytisch met Sellmeijer en Bligh. De resultaten van deze berekeningen zijn vergeleken en geanalyseerd. De resultaten van de vergelijkingen en analyse zijn te vinden in hoofdstuk 6.

5.1 Basismodel

In deze paragraaf is het basismodel of uitgangssituatie besproken. In hoofdstuk 4 is besproken welke korrelgroottes gebruikt zijn. In dit hoofdstuk zijn de overige parameters bepaald. Tussen de situaties verschillen alleen de volgende parameters:

- De laagdiktes van de zand- en grindlaag.

Om de invloed van het zand en grind op het faalmechanisme piping goed te kunnen onderzoeken worden er verschillende laagdiktes gebruikt van het zand het grind.

- Wel of geen deklaag.

Om de invloed van de deklaag goed te kunnen bepalen zijn er twee situaties zonder deklaag en twee met deklaag. In een situatie zonder deklaag zal de deklaag worden gesimuleerd door het ophogen van de waterstand.

- De manier van deklaag benadering.

Er zijn in de analyse 3 benadering toegepast om een uittredepunt te creëren namelijk; geen deklaag, een opening in de deklaag van slecht enkele centimeters en een opening in de deklaag met een breedte gelijk aan de slootbodem.

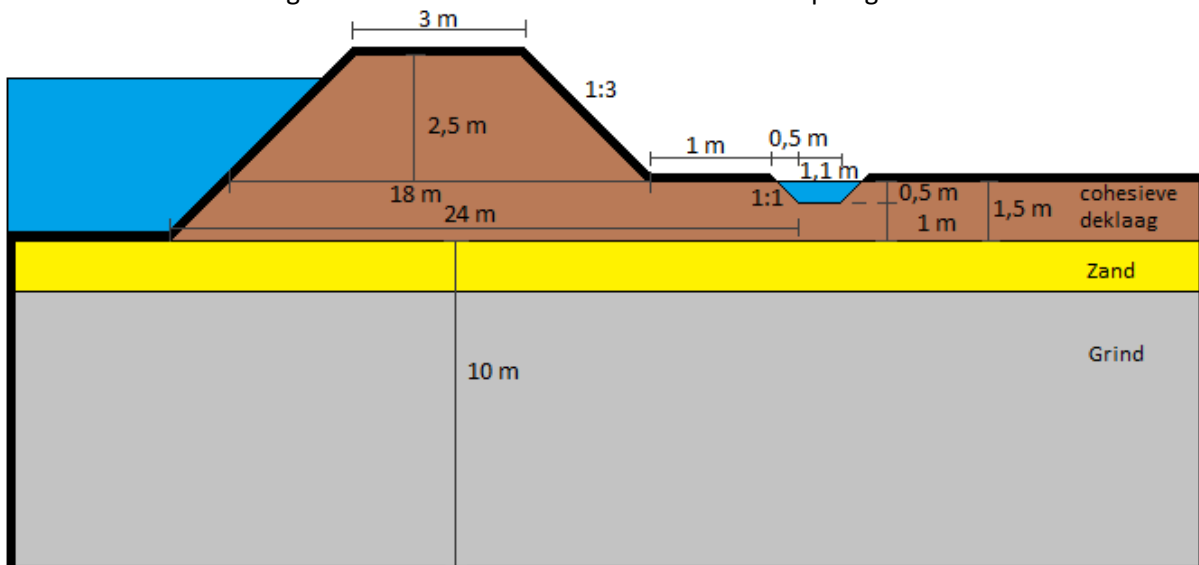
In Figuur 9 is een schematisch overzicht weergegeven van het basismodel. Er is gekozen voor een kwelsloot om een duidelijk uittreepunt te creëren. De bodembreedte is zodanig gekozen dat opbarsten kan optreden.

De grondwaterstand binnendijs ligt 1,5 m boven maaiveld. Voor het maaiveld wordt de bovenkant van de zandlaag aangenomen. De waterstand buitendijs zal worden bepaald aan de hand van het kritiek verval dat wordt bepaald in het model MSeep. Het kritiek verval zal voor iedere situatie en iedere grond opbouw opnieuw moeten worden bepaald. Deze waterstand wordt vervolgens in iedere methode en ieder model gebruikt.

Het uittreepunt bevindt zich in de linker onderkant van de kwelsloot waar de cohesieve deklaag 1 meter dik is. Dit resulteert in een kwelweglengte van 24 meter. Dit uittreepunt bevindt zich in een situatie zonder deklaag op dezelfde situatie. Voor de laagdikte van de aquifer is er gekozen voor een totale dikte van 10 meter. Deze dikte volgt uit onderzoek naar verschillende boorprofielen langs de Maas in Limburg. Uit de boorprofielen blijkt dat de gemiddelde dikte van de bovenste zand- en grindlaag over de Maas in Limburg gemiddeld circa 10 meter bedraagt. In bijlage 4 zijn van acht locaties langs de Maas boorprofielen weergegeven. Er is van uitgegaan dat er zich aan de onderkant van de onderste grondlaag een ondoorlatende laag bevindt.

Het intrepunt bevindt zich bij de linker teen van het dijklichaam. Om de situatie te versimpelen wordt er geen weerstand meegenomen in het intrepunt.

De dijkhoogte bedraagt 4 meter (vanaf het maaiveld). Omdat de kritieke waterstand in MSeep soms hoger wordt berekend dan de hoogte van de dijk is de dijk in sommige situaties op 5,5 meter gedimensioneerd. De invloed hiervan is klein. Een uitwerking hiervan is te vinden in bijlage 7. Voor de kruinbreedte is 3 m aangehouden²⁸. Extra informatie is te vinden in paragraaf 5.3.



Figuur 9: Schematisch overzicht van de uitgangssituatie.

In bijlage 6 zijn alle invoer parameters weergegeven. Voor veel waarden is de bijbehorende norm aangehouden.

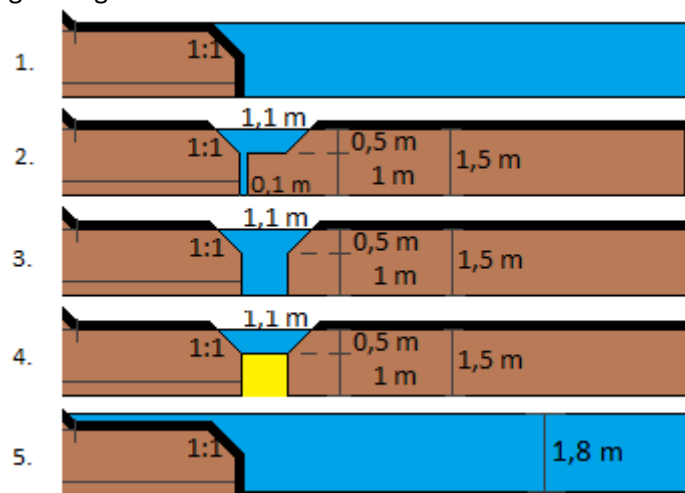
²⁸ Smidt, J.T. de,(1994),*Handreiking Constructief ontwerpen*

5.2 Situaties

In deze paragraaf is de uitgangssituatie uit paragraaf 5.1 als basis beschouwd. Er zijn in totaal vijf situaties aangenomen welke in Figuur 10 zijn weergegeven. In het figuur is alleen het achterland weergegeven omdat het voorland en de dijk zelf niet wijzigen. De situaties zijn zo opgesteld zodat er op alle deelvragen antwoord kan worden gegeven. De resultaten zijn terug te vinden in hoofdstuk 6.

De situaties delen allemaal een zelfde doel, namelijk: het risico op piping bepalen. Dit is gedaan door het stijghoogteverloop, het stromingsbeeld en het kritiek verval in de aanwezige zand- en grindlagen in beeld te brengen.

De verschillende situaties met deklaag hebben als doel inzicht te verschaffen in de manier van het modelleren van de deklaag. In het model MSeep is het namelijk alleen mogelijk om een pipe te modelleren als het uittreepunt van deze pipe zich aan het maaiveld bevindt. Ook is er gekeken naar de invloed van de deklaag op de stroming, het stijghoogte-verloop, het stromingsbeeld en de piping gevoeligheid.



Figuur 10: Schematische weergave van de vijf situaties.

5.2.1 Zonder deklaag

In deze situatie wordt er verwezen naar de eerste situatie uit Figuur 10. Het is een situatie zonder deklaag met een binnendijkse waterstand van 1,5 meter boven het zandpakket.

Doel

- Het doel van deze situatie is om met een zo eenvoudig mogelijk model het risico op piping te bepalen.

5.2.2 Met deklaag (opbarstkanaal)

In deze situatie wordt er verwezen naar de tweede situatie uit Figuur 10 en is een deklaag meegenomen. Het uittreepunt is gemodelleerd door een dun opbarstkanaal (0,1 meter) te modelleren aan het begin van de kwelsloot. Deze wordt aan het begin van de kwelsloot geplaatst omdat zich hier het uittreepunt bevindt. Er is een dun kanaal gemodelleerd om het uittreepunt zo klein mogelijk te houden. Dit is in werkelijkheid ook het geval.

Doel

- De invloed bepalen van een geconcentreerde grondwaterstroming ter plaatse van het uittreepunt, door het toepassen van een zeer smal opbarstkanaal. Dit wordt ook wel een ventiel werking genoemd.
- Onderzoeken of het dunne kanaal (0,1 meter) genoeg weerstand geeft om de deklaag te simuleren.

5.2.3 Met deklaag (open slootbodem)

In deze situatie wordt er verwezen naar de derde situatie uit Figuur 10 en is weer een deklaag meegenomen. De deklaag is onder de sloot volledig open gemaakt om niet alle stroming te centreren in een punt maar te spreiden over de onderkant van de sloot bodem. In werkelijkheid is er namelijk niet één opbarstkanaal aanwezig maar meerdere kleine kanaaltjes.

Doel

- Het stromingsgedrag onder de slootbodem, in de bovenkant van het zandpakket, onderzoeken.
- Onderzoeken hoeveel weerstand er bij het uittreepunt aanwezig is in vergelijking met één dun opbarstkanaal.

5.2.4 Met deklaag (open slootbodem met zand)

In deze situatie wordt er verwezen naar de vierde situatie uit Figuur 10 en is weer een deklaag meegenomen. In deze situatie is de deklaag onder de slootbodem vervangen door zand. Hierdoor ondervindt het uitstromende water een weerstand. Hiermee is de weerstand gesimuleerd die normaal aanwezig is in de deklaag door het dunne kanaal en de aanwezigheid van zand in dit kanaal, als de deklaag eenmaal is opgebarsten. Omdat er in deze situatie geen directe verbinding is met het maaiveld op de plek van het uittreepunt is deze situatie niet doorgerekend in MSeep. Deze situatie is dus alleen met PlaxFlow onderzocht.

Doel

- Het stromingsgedrag onder de slootbodem, één meter onder het zandpakket, onderzoeken.
- Het stromingsgedrag onder het maaiveld, in de bovenkant van het zandpakket, onderzoeken.
- Onderzoeken hoeveel weerstand er bij het uittreepunt aanwezig is in vergelijking met de andere situaties met deklaag.

5.2.5 Zonder deklaag (opgehoogde waterstand)

In deze situatie wordt er verwezen naar de laatste situatie uit Figuur 10 en is geen deklaag meegenomen. Om dezelfde waterdruk in het zandpakket te modelleren als de situatie met deklaag, is de waterstand verhoogd met 0,3 meter. Deze 0,3 meter volgt uit de "0,3d regel"²⁹. Deze regel stelt dat de deklaag als weerstand kan worden meegenomen in de pipingregel door het werkelijk verval met $0,3 \cdot \text{dikte deklaag}$ te verminderen. Over de deklaag treedt, volgens de regel, een verval op van $0,3 \cdot \text{dikte deklaag}$. Dit komt neer op een verhoging van de binnendijkse waterstand met 0,3 meter (namelijk: verval = buitendijkse waterstand – binnendijkse waterstand). In de basis situatie wordt er uitgegaan van een deklaag van 1 meter onder de slootbodem.

²⁹ Förster U. ,(2011), *Zandmeevoerende Wellen concept*

Doel

- Het stromingsgedrag onder de slootbodem, in de bovenkant van het zandpakket, onderzoeken.
- Onderzoeken hoeveel weerstand er bij het uittreepunt aanwezig is in vergelijking met de andere situaties met deklaag.
- Onderzoeken of het kritiek verval overeenkomt met dat van situatie één, nadat de '0,3d regel' daar is toegepast.

5.3 Modellen en methodes

In deze paragraaf zijn de Eindige Elementen Modellen MSeep en PlaxFlow en de methodes Sellmeijer en Bligh besproken. Van ieder model/methode volgt eerst een algemene beschrijving waarna het doel, de invoerparameters en de betrouwbaarheid zijn besproken. In bijlage 7 zijn de modelparameters weergegeven en zijn de modellen MSeep en PlaxFlow met elkaar vergeleken.

Een gebrek van alle modellen en methodes is dat deze alleen rekening houden met het faalmechanisme piping en niet met andere mechanismen die ook invloed kunnen hebben op het piping proces, zoals opbarsten. Verder kan in een situatie met een relatief dunne zandlaag met daaronder een grindlaag een ander mechanisme zich voordoen dan het faalmechanisme piping. In deze situatie is er namelijk sprake van een sterke verticale stroming ter hoogte van het uittreepunt. Hier is de rekenregel van Sellmeijer misschien zelfs helemaal niet geldig. Deze sterke verticale stroming, ook wel 'deep seated piping' genoemd, is nog maar in zeer beperkte mate onderzocht. Dit blijkt ook uit interviews met specialisten van Deltares. De interviews zijn weergegeven in bijlage 8.

Een ander aandachtspunt is dat de modellen en methodes alleen toepasbaar zijn bij laminaire stroming. Door hoge stroomsnelheden in de grindlaag zou er turbulente stroming kunnen ontstaan³⁰.

Zowel in de formule van Sellmeijer als die van Bligh is het kritiek verval van iedere situatie uitgerekend. In het MSeep-model wordt de kritieke waterstand bepaald. De kritieke waterstand bedraagt de waterstand t.o.v. een bepaald referentieniveau (in ons geval het maaiveld), terwijl het kritiek verval het verschil tussen de waterstand buiten- en binnendijks of maaiveld binnendijks beschrijft (zie de figuur in bijlage 1). Om de resultaten uit de formule van Sellmeijer met de resultaten uit het MSeep-model te kunnen vergelijken is het kritiek verval omgezet naar een kritieke waterstand. Dit is gedaan door de binnendijkse waterstand bij ieder kritiek verval op te tellen. In situatie 1 t/m 4 is dit 1,5 meter en in situatie 5 is dit 1,8 meter.

5.3.1 Bligh 1910

Een algemene beschrijving van deze methode is terug te vinden in hoofdstuk 3.

Doel

De methode Bligh is toegepast om snel inzicht te verkrijgen in de hoogte van het kritiek verval en daarmee de kritieke waterstand. Een ander doel is inzicht te krijgen in de betrouwbaarheid van deze methode door de uitkomsten te vergelijken met de uitkomsten uit de formule van Sellmeijer en het MSeep-model.

³⁰ Vera van Beek, Deltares, te Delft, betrokken bij SBW-piping en proeven bij de IJkdijk, informatie verkregen door middel van een interview, 18-02-2013

Invoerparameters

De formule van Bligh gaat uit van de korrelgrootte onder de cohesieve deklaag, deze wordt vertaald naar de C_{creep} -factor en de kwelweglengte. De C_{creep} -factor van 15 wordt gebruikt in de formule van Bligh. Deze past bij een d_{50} van 250 μm , zie Tabel 1. De d_{50} van 250 μm valt precies tussen een C_{creep} -factor van 12 en 15. Door niet uit te gaan van de precieze tussen liggende waarde 13,5 maar van 15 is er een marge aanwezig van 1,5. Dit is een veilige ontwerpbenadering die wordt gesteund door de aanwezigheid van d_{50} -waarden kleiner dan 250 μm (o.a.: 230, 170 en 40 μm). De overige parameters zijn te vinden in bijlage 6.

Betrouwbaarheid

Bij de toepassing van de rekenregel van Bligh wordt er van uitgegaan dat er conservatieve resultaten worden verkregen in vergelijking met de formule van Sellmeijer. Uit SBW onderzoek³¹ is echter gebleken dat de rekenregel niet altijd conservatiever is in vergelijking met de aangepaste formulering van Sellmeijer (2011). Deze onzekerheid maakt de rekenregel van Bligh onbetrouwbaar. Toch wordt deze rekenregel nog toegepast als eerste inschatting.

5.3.2 Sellmeijer 2006 en 2011

Een algemene beschrijving van deze methodes zijn terug te vinden in hoofdstuk 3. Het rekenmodel van Sellmeijer uit 1989, 2006 en 2011 zullen in deze paragraaf worden behandeld. De formules uit 1989 en 2006 geven hetzelfde resultaat, maar zijn in een andere vorm geschreven. In bijlage 6 is een overzicht van de invoerparameters weergegeven.

Doel

De formule van Sellmeijer wordt toegepast om inzicht te verkrijgen in de hoogte van het kritiek verval en daarmee de kritieke waterstand. Een ander doel is de betrouwbaarheid van de formule in beeld te brengen en oordelen of de formule van Sellmeijer uit 2011 toegepast kan worden.

Invoerparameters

In bijlage 6 is een overzicht van alle invoerparameters weergegeven. In de formule van Sellmeijer is gerekend met de d_{70} - en d_{70m} -waarden van de zandlaag. Deze waardes volgen uit de gegevensanalyse en zijn terug te vinden in hoofdstuk 4. De doorlatendheid is bepaald aan de hand van Formule 6³². Deze formule is alleen geldig bij een zandfractie groter dan 16 μm .

Formule 6:

$$k = (C_0 - 1,83 \cdot 10^3 \cdot \ln(U)) d_{10}^2$$

$$U = d_{60} / d_{10}$$

Omdat er met de formule van Sellmeijer alleen een éénlaagssysteem beschouwd kan worden, wordt de doorlatendheid in een tweelagensysteem bepaald doormiddel van een gewogen gemiddelde van de doorlatendheid en de laagdikte van het zandpakket en het grindpakket. Dit wordt gedaan aan de hand van Formule 7.

Formule 7:

$$k_{gem} = \frac{(D_{zand} \cdot k_{zand}) + (D_{grind} \cdot k_{grind})}{(D_{zand} + D_{grind})}$$

In de formule van Sellmeijer is er gerekend met de d_{70} - en d_{70m} -waarden van de zandlaag. Door de doorlatendheid van de grindlaag mee te nemen en de korrelgroottes van de zandlaag te gebruiken wordt geprobeerd de situatie zo goed mogelijk na te bootsen.

³¹ Förster U., (2011), *Zandmeevoerende Wellen concept*

³² Rooijen, H den, (1992), *Literatuuronderzoek doorlatendheid- korrelkarakteristieken*

Betrouwbaarheid

Voor de betrouwbaarheid van de twee Sellmeijer formules is veel gebruik gemaakt van interviews. Eerst is de betrouwbaarheid van beide formules besproken waarna ze apart zijn toegelicht.

Het tweelagensysteem wordt beschouwd door middel van een gewogen gemiddelde. Dit wordt gezien als een veilige benadering.

De gevoeligheid van de invoerparameters maken de formules al redelijk onbetrouwbaar. Het komt vaak voor dat er geen goede gegevens beschikbaar zijn. Kleine variaties in bijvoorbeeld de d_{70} -waarde kunnen grote afwijkingen in het kritiek verval tot gevolg hebben.

Sellmeijer uit 2006 en 1989

Met de formule van Sellmeijer uit 2006 is al veel ervaring. Deze formule is namelijk dezelfde formule als uit 1989 maar dan in een andere vorm geschreven om deze te kunnen verwerken in MSeep. Veel dijken zijn aan de hand van deze formule getoetst. Dit maakt de formule van Sellmeijer uit 1989/2006 goed toepasbaar in dit rapport.

Sellmeijer uit 2011

De formule van Sellmeijer uit 2011 wordt in de praktijk nog niet toegepast. De regel is net als het Technisch Rapport Zand Meevoerende Wellen 2011 nog in concept vorm. Waarschijnlijk wordt de regel nog aangepast. De grootste reden hiervoor is dat de invoering van de formule uit 2011 veel consequenties zal hebben voor het dijkontwerp^{33, 34}. Veel bestaande dijken zullen niet meer voldoen met deze regel wat grote financiële gevolgen heeft.

De formule uit 2011 is alleen getest in ideale situaties en niet uitvoerig met meerdere lagen. Komende jaren zal er onderzoek uitgevoerd worden naar heterogeniteit in zowel horizontale als verticale richting. Ook zullen er nog proeven uitgevoerd gaan worden met grondgesteldheden uit het veld (bijlage 8).

Om bovenstaande redenen is besloten de formule van Sellmeijer uit 2011 niet toe te passen in dit onderzoek. In het vervolg van het rapport is er alleen nog ingegaan op de formule van Sellmeijer uit 1989/2006.

5.3.3 PlaxFlow

In deze paragraaf is het PlaxFlow-model beschreven. In bijlage 6 is een overzicht van de invoerparameters weergegeven. De invloed van de parameters is opgenomen in bijlage 7. In deze bijlage is ook het PlaxFlow-model vergeleken met het MSeep-model betreffende de stroomsnelheid en de stijghoogte. De conclusie van deze vergelijking is de volgende:

Er is geen verschil aanwezig tussen de modellen MSeep en PlaxFlow betreffend het grondwaterstromingsbeeld op de aangewezen punten.

In PlaxFlow is het niet mogelijk om piping berekeningen te maken door het ontbreken van een piping module. In hoofdstuk 6 is geprobeerd om aan de hand van de resultaten uit MSeep en PlaxFlow een verband te vinden waardoor er in PlaxFlow piping risico's bepaald kunnen worden.

³³ Arcadis,(2012), *Consequentie analyse aangepaste pipingregel*

³⁴ Bos, M. ,(2009),*SBW Hervalidatie Piping, Kwalificeren en herijken beheerdersoordeel*

PlaxFlow is een onderdeel van de EEM Plaxis 2D. PlaxFlow heeft de volgende mogelijkheden/eigenschappen³⁵:

- Bevat modules voor het uitvoeren van grondwaterstromingsanalyses en consolidatieberekeningen.
- Numerieke grondwaterstromingsanalyse, gebaseerd op een Eindige Elementen Methode.
- Bepaling van de stijghoogte in een watervoerende zandlaag onder een dijk of kunstwerk en een erachter gelegen slecht doorlatende deklaag ten behoeve van opbarstcontrole.
- Bepaling van het stijghoogtepatroon in een watervoerende zandlaag onder een dijk of kunstwerk met kwelschermen ten behoeve van het bepalen van het verticale verhang in verband met heave controle.
- Simuleren van 2-dimensionale stationaire en tijdsafhankelijke stroming in volledig en gedeeltelijk verzadigde grond.

Doel

- Het PlaxFlow-model is gebruikt om betrouwbaar inzicht te geven in het stijghoogteverloop en het stromingsbeeld. Dit kan in PlaxFlow alleen gedaan worden in een situatie waarbij er geen pipe is gevormd onder de dijk door het ontbreken van een piping module.
- Een ander doel is de situatie rond het uittreepunt goed in beeld te brengen.
- Er is geprobeerd om aan de hand van de resultaten uit MSeep en PlaxFlow een verband te vinden tussen de twee modellen zodat in PlaxFlow piping risico's bepaald kunnen worden.

Invoerparameters

In bijlage 6 is een overzicht van alle invoerparameters weergegeven.

Normaal gesproken wordt er in PlaxFlow gewerkt met een maximaal toelaatbare buitendijkse waterstand, de zogenaamde ontwerpwaterstand. In het PlaxFlow-model is voor de ontwerpwaterstand de kritieke waterstand aangehouden. Deze kritieke waterstand volgt uit het MSeep-model. Deze waterstand geeft de hoogte van de waterstand buitendijks waarbij er nog net geen doorgaande pipe ontstaat maar er al wel een pipe aanwezig is.

Omdat er in PlaxFlow geen pipe gemodelleerd kan worden is deze situatie, met net geen doorgaande pipe, niet na te bootsen in het PlaxFlow-model. Hierdoor kan er niet worden aangenomen dat stroomsnelheden en stijghoogtes, rond het uittreepunt, van toepassing zijn op een situatie met een gevormde pipe. Ook is deze ontwerpwaterstand niet de buitendijkse waterstand waarbij de pipe begint te ontstaan. Door de buitendijkse waterstand op deze manier te modelleren kan er wel gezocht worden naar een verband tussen de MSeep en PlaxFlow modellen.

Betrouwbaarheid

Zoals hierboven beschreven is kan het ontstaan van de pipe niet worden afgeleid uit de resultaten. Er kan alleen wat gezegd worden over het punt waarop, in het MSeep-model, net geen doorgaande pipe ontstaat.

Uit PlaxFlow worden, per afstand (x), meer waardes verkregen dan uit MSeep waardoor beter gekeken kan worden naar het uittreepunt. Het uittreepunt is namelijk erg gevoelig in de x-richting, zie bijlage 7.1. Dit maakt de PlaxFlow resultaten betrouwbaarder en zijn de stroomsnelheden en stijghoogtes voor het grootste deel dan ook in PlaxFlow bepaald.

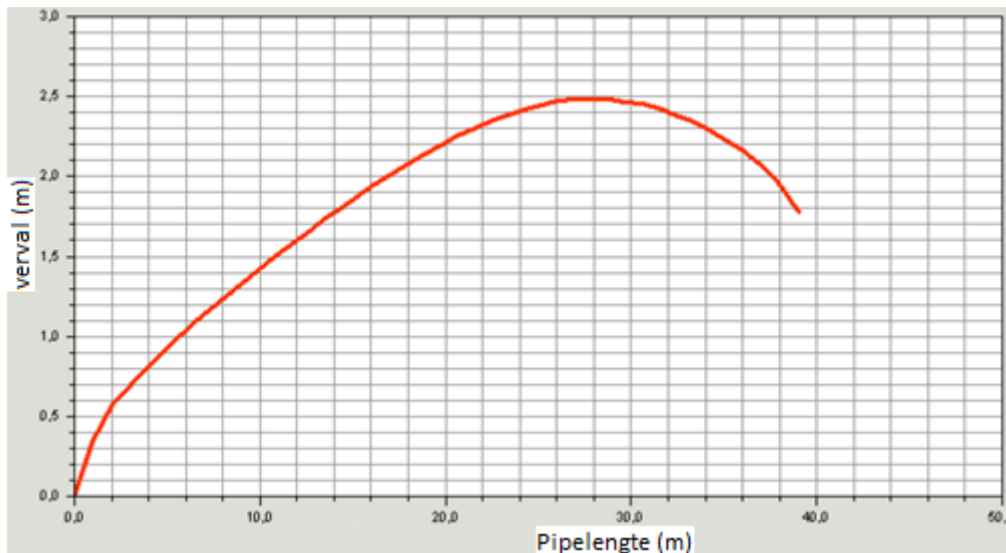
³⁵ Förster U. ,(2011),*Zandmeevoerende Wellen concept*

5.3.4 MSeep 2006 en 2011

In deze paragraaf is het MSeep-model beschreven. In bijlage 6 is een overzicht van de invoerparameters weergegeven. De invloed van de parameters is opgenomen in bijlage 7. In deze bijlage is ook het MSeep-model vergeleken met het PlaxFlow-model betreffende de stroomsnelheid en de stijghoogte.

In het model MSeep is het alleen mogelijk om een pipe te modelleren als het uittreepunt van deze pipe zich aan het maaiveld bevindt. Hierdoor is het niet mogelijk om een piping berekening uit te voeren met een afgesloten deklaag. Om deze reden zijn situatie twee en drie opgesteld.

In MSeep is het mogelijk om de kritieke waterstand en de kritieke pipelengte te bepalen voor zowel een éénlaagsysteem als een tweelagensysteem. MSeep berekent de kritieke waterstand aan de hand van Figuur 11^{36, 37}. In het figuur is te zien dat het verval wordt bepaald voor een bepaalde lengte van de pipe. De korrels in de pipe van de gegeven lengte zijn dus nog net in evenwicht bij het gevonden verval. Het kritieke verval is de hoogste waarde van het verval in de grafiek. Uit deze waarde volgt de kritieke waterstand welke wordt opgegeven na de calculatie. De lengte die hoort bij dit kritiek verval is de kritieke lengte van de pipe. Dit betekent dat als de pipe iets langer wordt er progressieve groei ontstaat en er een doorgaande pipe wordt gevormd.



Figuur 11: Het verval uitgezet tegen de pipelengte.

Bij een kritieke waterstand, of een waterstand onder dit punt, kan er dus al een pipe zijn ontstaan. Deze pipe is al ontstaan maar vormt nog geen gevaar omdat er nog geen progressieve groei is ontstaan en er dus geen doorgaande pipe gevormd zou worden. In het veld is er in deze situatie al wel een zandmeevoerende wel, zie Figuur 12, aanwezig maar deze hoeft geen bezwijken van de waterkering tot gevolg te hebben.

³⁶ Deltares, (2005), *Dijkontwerp tegen Sijperosie met MSeep Versie 7*

³⁷ Sellmeijer, J.B., (2006), *Numerical computatie of seepage erosion below dams (piping)*

MSeep heeft de volgende mogelijkheden/eigenschappen³⁸:

- Simuleren van 2-dimensionale vlakke stationaire en tijdsafhankelijke grondwaterstroming in volledig verzadigde grond, inclusief freatische randen
- Numerieke grondwaterstromingsanalyse, gebaseerd op een Eindige Elementen Methode
- bepaling van de stijghoogte in een watervoerende zandlaag onder een dijk of kunstwerk en een erachter gelegen slecht doorlatende deklaag ten behoeve van opbarstcontrole
- bepaling van het stijghoogtepatroon in een watervoerende zandlaag onder een dijk of kunstwerk met kwelschermen ten behoeve van het bepalen van het verticale verhang in verband met heave controle
- stationaire stroming



Figuur 12: Zandmeevoerende wel.³⁹

Doel

Er is gebruik gemaakt van het MSeep-model om de kritieke waterstand te berekenen voor de opgestelde situaties. Het MSeep-model is ook gebruikt om inzicht te geven in het stijghoogteverloop en het stromingsbeeld. Dit kan in MSeep gedaan worden in een situatie waarbij er geen pipe is gevormd maar ook waar de kritieke pipelengte onder de waterkering aanwezig is. Het stijghoogteverloop en het stromingsbeeld is alleen voor het model inclusief kritieke pipelengte bepaald in MSeep. Omdat er uit het PlaxFlow-model meer resultaten kunnen worden verkregen en de resultaten beter zijn weer te geven, is het stijghoogteverloop en het stromingsbeeld zonder pipe bepaald in PlaxFlow.

Invoerparameters

In bijlage 6 is een overzicht van alle invoerparameters weergegeven.

Betrouwbaarheid

Uit de vergelijking met PlaxFlow (bijlage 7.2) blijkt dat het stijghoogte verloop en het stromingsbeeld vergelijkbare resultaten opleveren. Toch zijn de resultaten uit MSeep minder nauwkeurig rond kritieke punten. Rond het uittreepunt heeft een kleine verplaatsing in de x-richting bijvoorbeeld al grote gevolgen voor het stijghoogteverloop en het stromingsbeeld.

MSeep 2006

Met het programma MSeep uit 2006 is al veel ervaring. De formule van Sellmeijer uit 1989 is namelijk dit model verwerkt. Eerst is hiervoor de formule uit 1989 omgeschreven in de formule uit 2006. Het MSeep-model uit 2006 is goed toepasbaar in dit rapport

³⁸ Förster U. ,(2011),*Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen concept*

³⁹ Vrijling, J.K. ,(2010),*Piping, Realiteit of Rekenfout?*

MSeep 2011 bèta

Voor dit onderzoek is door Deltares de nieuwste versie van het MSeep-model beschikbaar gesteld. Dit model van MSeep uit 2011 is gebaseerd op de formules van Sellmeijer uit 2011 en wordt in de praktijk nog niet toegepast. Het model is net als het Technisch Rapport Zand Meevoerende Wellen 2011 nog in concept vorm. Het gaat hierbij ook om de bèta-versie van het programma. Waarschijnlijk wordt het model nog aangepast. De grootste reden hiervoor is dat de invoering veel consequenties zal hebben voor het dijkontwerp^{40, 41}. Veel dijken zullen niet voldoen met deze regel wat grote financiële gevolgen heeft.

Het model is net als de formules uit 2011 alleen gevalideerd in ideale situaties en niet uitvoerig met meerdere lagen.

Voor het MSeep-model uit 2011 is nog geen handleiding beschikbaar waardoor onduidelijkheden niet opgelost kunnen worden. Er bestaat bijvoorbeeld onduidelijkheid over de invoerparameter d_{70m} . Deze parameter is nieuw in de formules van Sellmeijer uit 2011 maar is niet terug te vinden als invoerparameter in het model. Het is ook niet mogelijk gebleken om de resultaten van het model te controleren.

Door de onzekerheid over het MSeep-model uit 2011 zijn de beschreven situaties niet doorgerekend met dit model. In het vervolg van het rapport is er alleen nog ingegaan het MSeep-model uit 2006.

Hiermee is ook antwoord gegeven op de deelvraag: *In hoeverre is de aangepaste formule van Sellmeijer (2011) en het aangepaste MSeep-model (2011) doorontwikkeld en bruikbaar voor het onderzoek?*. In de voorgaande paragrafen over de formules van Sellmeijer uit 2011 en het MSeep-model uit 2011 blijken deze versies niet vergenoeg doorontwikkeld te zijn om toegepast te worden in het onderzoek.

⁴⁰ Arcadis,(2012), *Consequentie analyse aangepaste pipingregel*

⁴¹ Bos, M. ,(2009),*SBW Hervalidatie Piping, Kwalificeren en herijken beheerdersoordeel*

6 Resultaatanalyse

In dit hoofdstuk zijn de resultaten uit de berekeningen geanalyseerd. In de analyse van de resultaten zijn verbanden of juist verschillen tussen de opgestelde situaties en variaties onderzocht. Er worden observaties gegeven met een verklaring waar dat mogelijk is. Het doel van de analyse is antwoord te kunnen geven op de volgende deelvragen:

- Hoe verloopt de stijghoogte in een éénlaagssysteem en een tweelagensysteem?
- Wat is het stromingsbeeld van een éénlaagssysteem en een tweelagensysteem?
- Wat is de invloed van de deklaag in een éénlaagssysteem en een tweelagensysteem?
- Hoe kan in PlaxFlow het risico op piping worden bepaald?

In de paragrafen die volgen is de opbouw van de deelvragen aangehouden. De resultaten zijn gekoppeld aan de deelvragen, waardoor deze makkelijker beantwoord kunnen worden. In het begin van elke paragraaf zal eerst antwoord worden gegeven op de deelvraag waarna de observaties volgen. Omdat alle variaties in de verschillende situaties (besproken in hoofdstuk 5) invloed op elkaar hebben, komen sommige observaties terug in meerdere paragrafen omdat deze voor meerdere deelvragen van toepassing zijn.

De gebruikte methoden en modellen geven verschillende resultaten. Voor de formule van Sellmeijer en Bligh zijn dit alleen de kritieke waterstanden. De modellen PlaxFlow en MSeep geven het stijghoogteverloop, stroomrichting en stromingssnelheid weer. MSeep rekent ook de kritieke waterstanden uit.

Vanwege de hoeveelheid resultaten, welke in de vorm van tabellen, figuren en grafieken zijn weergegeven, zal per paragraaf worden verwezen naar de bijbehorende bijlagen. In het begin van de bijlagen zal een beschrijving van de resultaten worden gegeven. Waar nodig zal ter verduidelijking een afbeelding in de tekst worden opgenomen.

Omdat de situatie 'open slootbodem met zand' niet met MSeep kan worden doorgerekend, is deze niet te vergelijken zoals de andere situaties. Deze situatie is in paragraaf 6.1 en 6.2 wel kort vergeleken met de situatie 'open slootbodem' met de resultaten uit PlaxFlow om de invloed van deze situatie toch weer te geven.

Zoals eerder beschreven, is er al onderzoek is uitgevoerd naar de heterogeniteit in verticale richting⁴². Hieronder zijn de relevante conclusies van dit onderzoek weergegeven die betrekking hebben op dit hoofdstuk.

- In de proeven is waargenomen dat het kritiek verval kleiner is in de situatie waar een grove laag aanwezig is onder een fijne zandlaag dan in de situatie waar dit niet het geval is.
- Het proces van 'deep seated piping', waarbij heave optreedt in de fijne toplaag, kan optreden wanneer het doorlatendheidscontrast tussen beide materialen groot is en de toplaag relatief dun.

⁴² Beek, V.M. van,(2011),*SBW Piping: 3A onderzoeksplan Macro-heterogeniteit in verticale richting*

6.1 Stijghoogteverloop

In deze paragraaf wordt ingegaan op het stijghoogteverloop. Deze is berekend in PlaxFlow en MSeep voor de verschillende situaties. De stijghoogte is bepaald in de zandlaag in een horizontale lijn direct onder de dijk en deklaag omdat in dat gebied piping optreedt. Dit is gedaan om inzicht te krijgen in het stijghoogteverloop bij de opgestelde situaties. De resultaten zijn weergegeven in bijlage 9. Bijlage 9.5 wordt behandeld in paragraaf 6.4.

Deelvraag

Hoe verloopt de stijghoogte in een éénlaagssysteem en een tweelagensysteem?

Het stijghoogteverloop is afhankelijk van de opgegeven waterstand buiten- en binnendijks⁴³. Specifiek voor MSeep is ook de kritieke pipelengte van belang. MSeep neemt de kritieke pipelengte mee in de berekening en dit is terug te zien in het stijghoogteverloop als een 'knik' in de stijghoogtelijn. De stijghoogte daalt dan naar het uiteinde van de kritieke pipelengte⁴⁴ en vervolgens naar de opgegeven binnendijkse waterstand. Bij een éénlaagssysteem worden hogere buitendijkse (kritieke) waterstanden gevonden dan in een tweelagensysteem (hierop wordt dieper ingegaan in paragraaf 6.4). Hierdoor hebben de stijghoogtelijnen in een éénlaagssysteem een hogere beginwaarde dan in een tweelagensysteem. Verder is de kritieke pipelengte in een éénlaagssysteem korter dan in een tweelagensysteem. In de situatie met deklaag wordt een lager kritiek verval gevonden dan zonder deklaag, Het aanwezige stromingsbeeld rondom het uittredepunt is met deklaag veel geconcentreerder.

Observaties en verklaringen

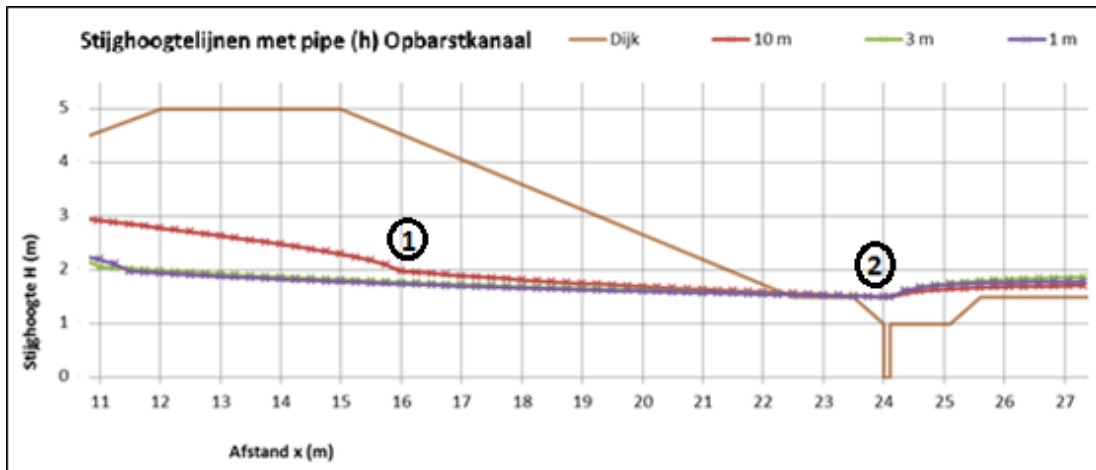
De deelvraag is beantwoord aan de hand van de volgende observaties:

- In bijlage 9.1 t/m 9.4 geldt voor elke situatie dat de stijghoogtelijnen van de opgegeven waterstand buitendijks, naar opgegeven waterstand binnendijks dalen. De situatie 'opgehoogde waterstand' heeft binnendijks een hogere opgelegde waterstand waardoor de stijghoogte 0,3 meter hoger uitkomt bij het uittreepunt dan de overige situaties. Verder heeft deze situatie veel overeenkomsten met de situatie 'zonder deklaag'.
- In bijlage 9.3 en 9.4 is te zien dat op de plek bij het uittreepunt waar geen deklaag of een 'open ruimte' in de deklaag aanwezig is, de stijghoogte lijnen opeens snel dalen en gelijk liggen met de waarde van de opgegeven waterstand binnendijks. Omdat in dit punt geen weerstand aanwezig is.
- Bij de situaties 'opbarstkanaal' en 'open slootbodem' loopt de stijghoogte weer op na de open ruimte in de deklaag, naar mate verder binnendijks wordt gekeken (bijlage 9.3, Figuur 44 en Figuur 45). In de situaties 'zonder deklaag' en 'opgehoogde waterstand' blijft de stijghoogte wel gelijk met de opgegeven waterstand binnendijks (bijlage 9.3, Figuur 43 en Figuur 46). De deklaag zorgt dus voor een verhoogde waterdruk. In bijlage 9.1 is te zien dat bovenstaande ook geldt als er een pipe aanwezig is. Hierbij is de opstuwning van de stijghoogte door deklaag wel minder dan een situatie zonder pipe.
- MSeep geeft de kritieke pijplengte weer in het model. Dit is te zien aan de 'knik' in de stijghoogtelijnen. De stijghoogte daalt snel aan het einde van de (kritieke)pipe omdat dit een 'holle ruimte' is met minder weerstand dan het omringende zand. Vanaf dit punt daalt de stijghoogte verder naar de opgegeven waterstand binnendijks. Dit is te zien in bijlage 9.1 en 9.2.

⁴³ Meer, M.T. van der, (2004), *Waterspanningen bij dijken*

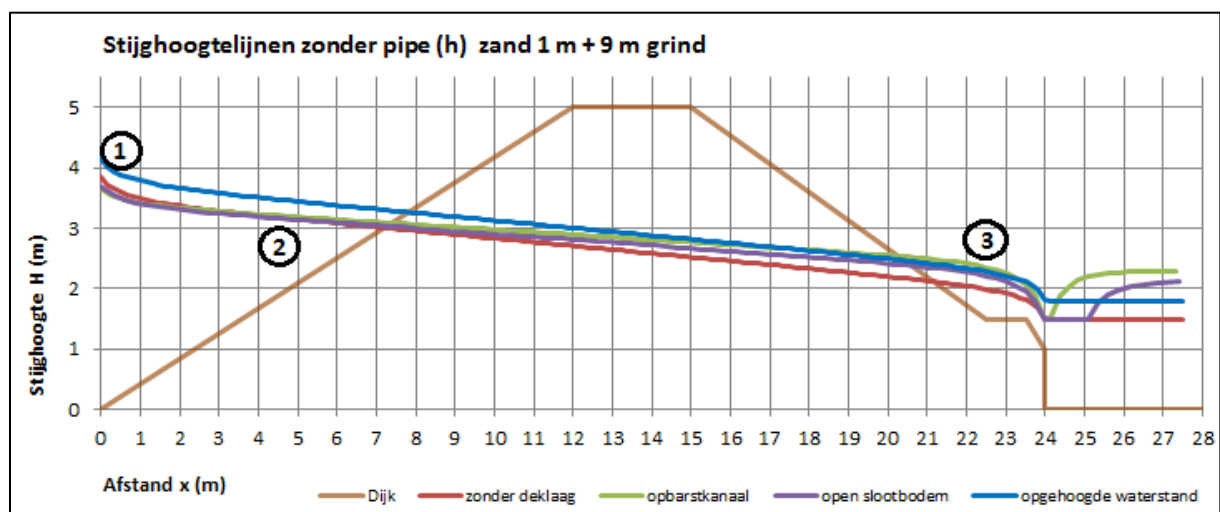
⁴⁴ De pipe begint bij de binnentee van de dijk

- In de figuren in bijlagen 9.1 en 9.2 is te zien dat de druk in het einde van de pipe niet gelijk wegvalt tot de binnendijkse waterstand. In Figuur 13 is ingezoomd op een willekeurige situatie om dit duidelijk in beeld te brengen. De druk neemt niet meteen af bij het eind van de pipe (1 in Figuur 13). Bij het begin van de pipe (2 in Figuur 13) is te zien dat de druk geheel is afgenomen tot de hoogte van de binnendijkse waterstand. Dit komt waarschijnlijk omdat de pipe niet dik genoeg is om de volledige druk meteen te kunnen laten afnemen.



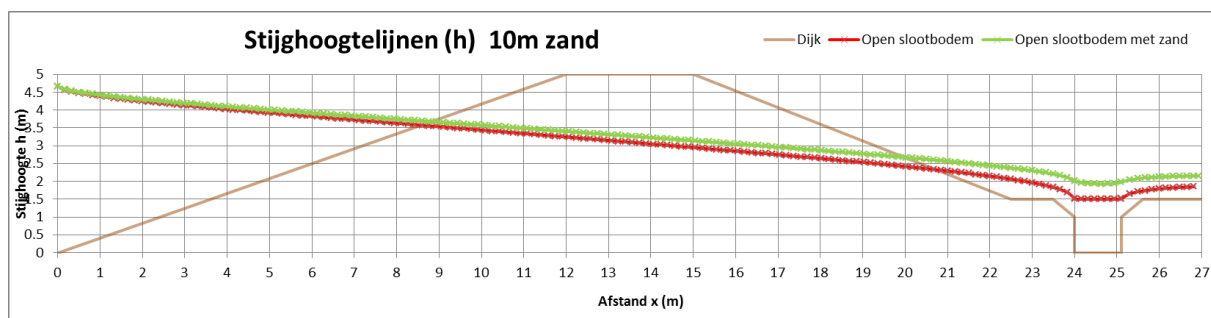
Figuur 13: Verduidelijking druk in pipe.

- Bij alle situaties met alleen een zandlaag is de kritieke pipelengte een stuk korter dan wanneer er ook een grindpakket aanwezig is. De kritieke waterstand is bij alle situaties met alleen zand hoger dan wanneer er ook een grindpakket aanwezig is. Dit is goed te zien in de figuren van bijlage 9.1.
- In bijlage 9.4 is te zien dat de stijghoogtelijnen van de situaties 'open slootbodem' en 'opbarstkanaal' (zonder pipe) een kleinere helling hebben dan de overige lijnen. Dit betekent dat de situaties 'open slootbodem' en 'opbarstkanaal' een weerstand ondervinden. In deze situaties is daadwerkelijk een deklaag gemodelleerd met een open ruimte, deze zorgt voor een 'ventielwerking' waar de drukverlaging kan optreden. Hierin is ook zichtbaar dat de situatie met het 'opbarstkanaal' door de kleinere opening de meeste ventielwerking heeft en daarmee dus over een kortere afstand de druk verlaagd. In Figuur 14 is nader toegelicht; de beginwaarden van de situatie 'zonder deklaag' ligt hoger (1), maar kruist de lijnen van de situaties 'opbarstkanaal' en 'open slootbodem' (2). Hierdoor komen deze hoger uit (3).



Figuur 14: Verduidelijking ventielwerking door deklaag.

- In bijlage 9.3 is te zien dat naar mate er meer grind in de ondergrond zit, het drukverval ter plaatse van het uittredepunt hoger wordt. Dit is hetzelfde principe als hiervoor beschreven. Als er meer grind in de ondergrond zit, is de stijghoogte onder de binnenteen hoger door de grotere doorlatendheid. Bij een opbarstkanaal wordt het drukverval daarmee ook hoger.
- In Figuur 15 is de situatie 'openslootbodem met zand' weergegeven. Deze situatie is niet door te rekenen met het MSeep-model. Hierdoor is er geen kritieke waterstand bepaald en is de kritieke waterstand van situatie 'open slootbodem' overgenomen. In Figuur 15 is te zien dat de toevoeging van de zandlaag onder de bodem van de sloot (situatie 'open slootbodem met zand') resulteert in een hogere stijghoogte onder de slootbodem. De stijghoogte is gemeten onder de 1m zand opvulling van de slootbodem. De waterdruk aan de bovenzijde van de zandopvulling is gelijk aan het slootpeil (en daarmee gelijk aan de situatie met open slootbodem zonder zandopvulling). Dit betekent dat er over de zandopvulling nog een verval optreedt van circa 0,4 m. Dit verval komt niet over met de 0,3d regel (0,3 m).



Figuur 15: Stijghoogtelijnen voor de situaties 'open slootbodem' en 'openslootbodem' met zand.

6.2 Stroming

In deze paragraaf wordt ingegaan op het algemene stromingsbeeld. Hierbij gaat het vooral om de stromingsrichtingen, stroomsnelheden en de daarbij horende verhangen⁴⁵ om inzicht te krijgen in het stromingsbeeld bij verschillende situaties. Hierbij is gekeken naar verschillen of juist overeenkomsten tussen de verschillende resultaten uit PlaxFlow en MSeep. Ook is specifiek gekeken naar de stroming rondom het uittreepunt omdat hier sterke stromingen heersen en de pipe hier begint. De resultaten zijn weergegeven in bijlage 10.

Deelvraag

Wat is het stromingsbeeld van een éénlaagssysteem en een tweelagensysteem?

Het stroombeeld van een éénlaagssysteem is minder complex dan die van een tweelagensysteem, doordat er geen groot contrast aanwezig is in doorlatendheid van de ondergrond (met uitzondering van de deklaag). Bij een éénlaagssysteem worden hoge stroomsnelheden gevonden in de zandlaag onder de dijk en in een tweelagensysteem neemt deze snelheid af. In het tweelagensysteem zijn de hoge stroomsnelheden in de grindlaag aanwezig. Vooral ter hoogte van het uittreepunt liggen de stroomsnelheden hoog. De stroomrichting in de zand- en grindlaag loopt horizontaal onder de dijk. Bij het uittreepunt neemt de stroming een verticale richting aan. Als er geen deklaag aanwezig is, kan het water binnendijs vrij uitstromen. Als er wel een deklaag aanwezig is wordt de stroming meer gebundeld en neemt deze bij het uittreepunt een sterkere verticale richting aan. Als het tweelagensysteem bestaat uit een zandlaag van 3m, worden 2 sterke stromingen waargenomen. Aan de onderkant van de deklaag en bij de overgang van zand naar grind. Bij een zandlaag van 1m concentreert de stroming in het zand zich meer onder het uittreepunt en wordt de stroming bij de overgang van zand naar grind sterker. De snelheid aan het einde van de pipe is groot als naar de

⁴⁵ Dit wordt beschreven in Bijlage 10.

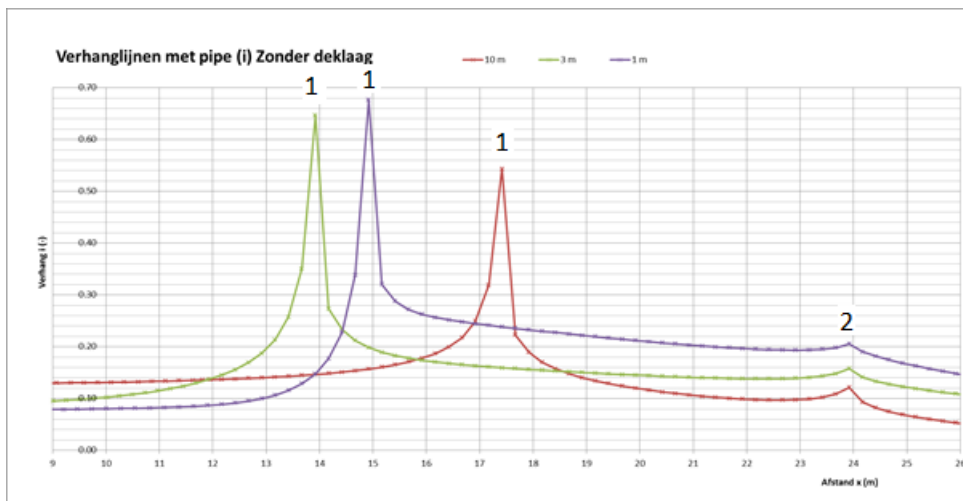
resultaten uit MSeep wordt gekeken. De snelheid in het uittreepunt neemt dan af. Als er meer grind in de ondergrond aanwezig is, neemt de snelheid in de pipe toe.

Observaties en verklaringen

De deelvraag is beantwoord aan de hand van de volgende observaties:

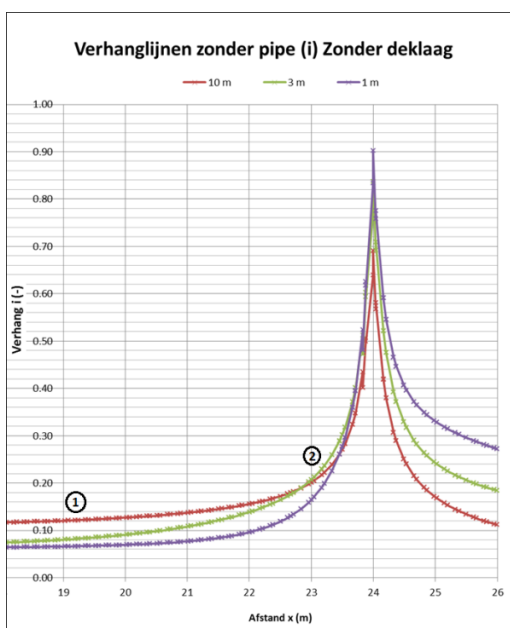
- In bijlage 10.1, Figuur 51, is te zien dat het verhang met een ondergrond bestaande uit 10m zand net onder de deklaag het grootst is en hier dus de sterkste stroming aanwezig is. De stroomsnelheid en het verhang is bekeken op het punt waar de stroming nog net horizontaal loopt (twee meter voor het uittreepunt). Dichter bij het uittreepunt neemt de stroming een verticale richting aan.
- In bijlage 10.1, Figuur 52 (bij een bodemopbouw bestaande uit 3 m zand op 7 m grind), is te zien dat het verhang op het grensvlak tussen de zand- en grindlaag het grootst is. Het verhang onder de deklaag neemt iets af. De grondwaterstroming lijkt door het grindpakket het dominantst. Door het grote contrast in doorlatendheid van de zand- en grindlaag wordt de stroming in de onderkant van de zandlaag afgeremd, maar zal de stroming vanuit het grind wel tegen de onderkant van de zandlaag drukken. De richting van de stroming veranderd door de aanwezigheid van de grindlaag. Deze neemt op het grensvlak van zand en grind al eerder een verticale stroming aan. De stroming in de zandlaag is iets afgenomen ten opzichte van de situatie met alleen een zandlaag, maar deze is ongeveer vergelijkbaar.
- In bijlage 10.1, Figuur 53 (bodemopbouw bestaande uit 1 m zand op een 9 m dik grindpakket), is te zien dat het verhang op één meter diepte het grootst is. Dit is de stroming op het grensvlak van zand en grind, bekeken vanaf de bovenkant van de grindlaag. Het verhang op het grensvlak tussen de deklaag en de zandlaag is afgenomen ten opzichte van de bovengenoemde situaties. De richting van de stroming in de zandlaag lijkt, in tegenstelling tot de situatie met drie meter zand, langer horizontaal door te lopen. Nabij het uittreepunt neemt deze snel een verticale richting aan. De stroming door het grind is nog dominanter geworden dan bij de situatie met drie meter zand. Hierdoor is de stroming in de zandlaag meer afgenomen.
- In bijlage 10.2 is te zien dat in een situatie met een deklaag de stroming geconcentreerd wordt naar de opening in de deklaag. Ook is er een sterke verticale stroming aanwezig. Het verloop van de stroming onder de waterkering lijkt wel overeen te komen met die van een situatie zonder deklaag.
- In de figuren in bijlage 10.2 (figuren 54 t/m 56) is te zien dat de toevoeging van zand in de slootbodem, een effect heeft op de stroming bij het uittreepunt. De sterkte van de stroming neemt af door de weerstand die het zand veroorzaakt.
- In bijlage 10.2 (figuren 57 t/m 59) is te zien dat de hoogste snelheden zich bij het punt bevinden in de linker hoek aan de onderkant van de deklaag. In de tabellen is te zien dat het verhang bij het uittreepunt afneemt door de toevoeging van de zandlaag. Het uittreepunt in de situaties ligt niet op dezelfde hoogte (door de zandlaag in de sloot).
- De verticale verhangen in bijlage 10.2 (figuren 57 t/m 59) liggen allemaal rond, of boven de 0,5. Dit betekent dat het zand zich in een kritieke situatie bevindt en er een kans bestaat dat de zandkorrels onder de slootbodem in beweging kunnen komen door de opwaartse kracht van het water (uitgaande van het Heave-principe).
- In bijlage 10.3 (figuren 60 t/m 63) In de situatie met pipe is het verhang het hoogst ter plaatse van het uiteinde van de pipe (Figuur 16, nummer 1) onder de waterkering. Bij het uittreepunt

(Figuur 16, nummer 2) is deze een stuk lager. De snelheid in en voor het einde van de pipe is hoger naar mate er meer grind aanwezig is. Dus de pipe krijgt meer toestroom van water uit de grindlaag.



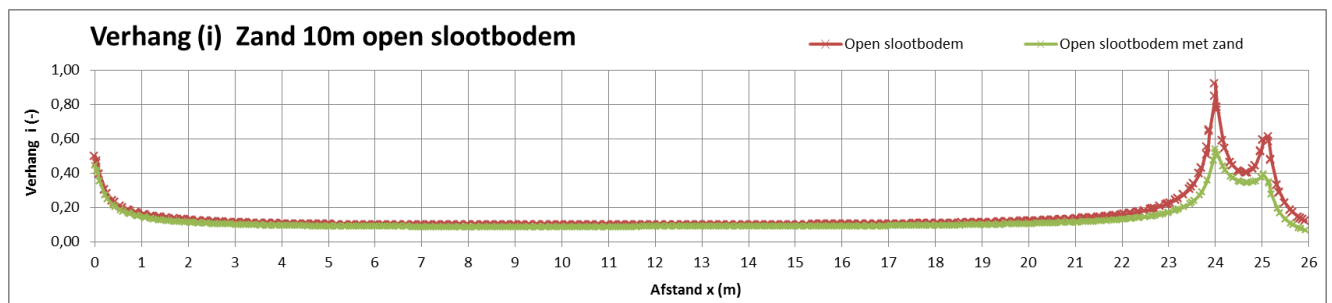
Figuur 16: Verduidelijking verhanglijnen met pipe voor willekeurige situatie.

- In bijlage 10.4 (figuren 64 en 65) is bij de situaties met een deklaag te zien dat er een piek bij het uittreepunt aanwezig is. Bij de situatie ‘zonder deklaag’ en ‘opgehoogde waterstand’ is deze piek in mindere mate aanwezig, doordat deze geen ‘ventielwerking’ ondervinden van de deklaag en het water hier vrij kan uitstromen.
- in bijlage 10.3 en 10.4. is te zien dat de bodemopbouw met alleen zand het grootste verhang heeft onder de dijk. Dit is verduidelijkt in Figuur 17, nummer 1. Dit betekent dat de waterdruk voor de situaties met grind en zand hoger blijft dan bij een homogene zandlaag over de gehele diepte.



Figuur 17: Verduidelijking verhanglijnen zonder pipe voor willekeurige situatie.

- De situaties 'zonder deklaag' en 'verhoogde waterstand' (met pipe) zijn redelijk gelijk. Dit geldt ook voor de situaties 'open slootbodemp' en 'opbarstkanaal'.
- In de situaties waarbij daadwerkelijk een deklaag is gemodelleerd 'open slootbodemp' en 'opbarstkanaal' is te zien dat de verhangen een stuk hoger liggen dan bij de overige twee situaties. De deklaag zorgt dus voor een 'ventielwerking' waardoor de verhangen hoger worden.
- De snelheid neemt richting het uittreepunt sneller toe naar mate er meer grind aanwezig is. Dit is te zien in Figuur 17, nummer 2.
- In Figuur 18 is te zien dat de pieken worden gedempt door de weerstand van de zandlaag. Hier is de situatie voor een willekeurige bodemopbouw weergegeven, maar het effect is gelijk voor de verschillende ondergronden.



Figuur 18: Verhangen voor situatie open slootbodemp en openslootbodemp met zand.

- In bijlage 10.5, Figuur 66, is een willekeurige situatie (uit MSeep) weergegeven om het stroombeeld in beeld te brengen als er een pipe aanwezig is. Het stroombeeld verschilt aanzienlijk van een situatie zonder pipe. De plek waar de pipe eindigt is aangegeven met een '1' in eerder genoemd figuur. De stroming voor het einde van de pipe is horizontaal. Dichter bij het einde van de pipe draait de horizontale stroming bij onder een hoek richting dit eindpunt. Na het eindpunt van de pipe is de stroming in de zandlaag geheel verticaal. Er is dan toestroom naar de pipe toe.

6.3 Invloed deklaag

In deze paragraaf is de invloed van de deklaag nader geanalyseerd. Dit wordt gedaan aan de hand van het stijghoogteverloop, stroombeeld en de kritieke waterstanden. Eerst wordt teruggeblikt naar de paragrafen 6.1 en 6.2. Hierin wordt kort teruggeblikt naar invloed van de deklaag. Hierna worden de observaties gegeven die horen bij de analyse van de kritieke waterstanden. De resultaten van de kritieke waterstanden zijn weergegeven in bijlage 11.

Deelvraag

Wat is de invloed van de deklaag in een éénlaagssysteem en een tweelagensysteem?

De invloed van de deklaag zorgt voor een hoge, geconcentreerde stroming (ventielwerking). Dit heeft tot gevolg dat de waterdruk wordt verhoogd, waardoor er een weerstand wordt ondervonden bij en in het uittreepunt. Situatie opbarstkanaal en open slootbodemp nemen de ventielwerking mee, wat zorgt voor een lagere kritieke waterstand. Echter houden deze situaties geen rekening met weerstand in het uittreepunt. De situatie opgehoogde waterstand houdt rekening met de weerstand nabij en in het uittreepunt. Dit heeft een verhoging van de kritieke waterstand tot gevolg. Deze situatie houdt echter geen rekening met de ventielwerking, omdat niet daadwerkelijk een deklaag is gemodelleerd. Een combinatie van beide situaties zal waarschijnlijk een realistische manier zijn om

een deklaag te modelleren. Mogelijk heffen de weerstand en de ventielwerking elkaar op, waardoor een soortgelijke kritieke waterstand wordt gevonden als een situatie zonder deklaag.

In paragraaf 6.1(stijghoogte) is het volgende duidelijk geworden:

- In 'opbarstkanaal' en 'open slootbodern' is de druk ten gevolge van de aanwezigheid van de deklaag terug te zien in de stijghoogte. In het uittreepunt is te zien dat deze druk sterk wordt verlaagd door de opening in de deklaag.
- In 'opgehoogde waterstand', de waterdruk niet meeneemt, wel wordt de weerstand meegenomen.

Uit paragraaf 6.2 (stroming) is gebleken dat de deklaag (in situatie opbarstkanaal en open slootbodern):

- Invloed heeft op de stroming nabij het uittreepunt. Door de deklaag wordt de stroming geconcentreerd naar de opening in de deklaag (ventielwerking).

Observaties en verklaringen

De deelvraag is beantwoord aan de hand van de volgende observaties:

- In bijlage 11, Tabel 15, is te zien dat de situaties 2 en 3 ('opbarstkanaal' en 'open slootbodern') een lager kritieke waterstand hebben dan situatie 1 'zonder deklaag'. Doordat in deze situaties daadwerkelijk een deklaag is gemodelleerd wordt de eerder genoemde ventielwerking meegenomen. Hierdoor neemt de kritieke waterstand af ten opzichte van de situatie 'zonder deklaag'.
- Tabel 16 geeft weer dat situatie 5 'opgehoogde waterstand' juist een hogere kritieke waterstand heeft ten opzichte van de situatie 'zonder deklaag'. In deze situatie is wel rekening gehouden met een weerstand maar hierbij wordt geen rekening gehouden met de ventielwerking doordat er geen deklaag gemodelleerd is. De weerstand heeft juist een verhoging van de kritieke waterstand tot gevolg.
- In Tabel 15 is te zien dat situatie 2 en 3 nagenoeg overeenkomen. Dus het maakt voor de kritieke waterstand nagenoeg niets uit of een smal opbarstkanaal aanwezig is, of de hele slootbodern open is.
- Naar mate er meer grind in de ondergrond aanwezig is heeft dit een verlaging van de kritieke waterstand tot gevolg. Dus als er een grindpakket aanwezig is, verhoogt dit de kans op piping. De afname van de kritieke waterstand naar mate er meer grind in de ondergrond aanwezig zit is ongeveer hetzelfde voor alle situaties. Voor de overgang van 10m zand naar 3m zand neemt de kritieke waterstand af met $\pm 0,7\text{m}$ en bij de overgang van 3m zand naar 1m zand met $\pm 0,3\text{ m}$.
- Voor de formule van Sellmeijer geldt dat deze voor de overgang van 10m zand naar 3m zand gevoelig reageert op grind in de ondergrond. De kritieke waterstand neemt met 1,26m af terwijl bij de overgang van 3m zand naar 1m zand de kritieke waterstand met 0,14m afneemt. In paragraaf 5.3 is aangegeven dat er met een gewogen gemiddelde voor de D_{70} van de watervoerende laag is gerekend. Deze methode lijkt dus conservatief als er grind aanwezig is, maar de hoeveelheid grind heeft minder invloed.
- De uitkomsten uit de formule van Bligh geven de laagste kritieke waterstand in vergelijking met de formule van Sellmeijer en de uitkomsten uit MSeep. Dit wil zeggen dat de formule van Bligh erg conservatief is ten opzichte van MSeep en Sellmeijer.

- In Tabel 15 is te zien dat in een situatie zonder deklaag de uitkomsten uit de formule van Sellmeijer 0,31m boven de uitkomst van MSeep liggen voor een éénlaagssysteem (zandlaag van 10m). Als er grind in de ondergrond aanwezig is liggen de uitkomsten juist onder degene uit MSeep (voor 3m zand 0,32m en voor 1m zand 0,13m). Dit betekent dat de formule van Sellmeijer voor een situatie met een grindlaag conservatiever is dan MSeep. Voor alleen een zandlaag is MSeep juist conservatiever.
- In Tabel 16 is de formule van Sellmeijer gecorrigeerd voor een situatie met deklaag. Hierin wordt, net als in situatie 5 (opgehoogde waterstand), alleen rekening gehouden met een weerstand. De ventielwerking wordt buiten beschouwing gelaten, waardoor de kritieke waterstanden hoger uitkomen. Dus de formule van Sellmeijer, gecorrigeerd voor een deklaag, is dus niet conservatief.

6.4 Bepaling piping risico met PlaxFlow

In deze paragraaf is onderzocht of het risico op piping kan worden bepaald met PlaxFlow en hoe dit gedaan kan worden. Omdat PlaxFlow niet beschikt over een pipingmodule, is onderzocht of het risico op piping toch kan worden bepaald door overeenkomsten te vinden tussen de resultaten uit PlaxFlow en MSeep. Van de stijghoogtelijnen zijn de verhangen bepaald⁴⁶ om de hellingen van de lijnen te vergelijken. Ook is het uittreeverhang onderzocht in het stroombeeld van situatie 'open slootbodem met zand'. Dit is een methode die gebruikt wordt als 'QuickScan' om het risico op piping te bepalen. De resultaten zijn weergegeven in bijlage 9.5 en 10.2.

Deelvraag

Hoe kan in PlaxFlow het risico op piping worden bepaald?

Een methode om in PlaxFlow het risico op piping te bepalen is lastig, omdat PlaxFlow niet beschikt over een pipingmodule die het ontstaan van een pipe simuleert en berekend in het model. Er zijn geen duidelijke overeenkomsten gevonden in de stijghoogte lijnen van PlaxFlow en MSeep. Het is de vraag in hoeverre het risico op piping bepaald kan worden door te kijken naar de verhangen bij het uittreepunt. Mogelijk is het stroombeeld (en daarmee het verhang) niet juist, doordat PlaxFlow geen pipe laat ontstaan.

Observaties en verklaringen

De deelvraag is beantwoord aan de hand van de volgende observaties:

- In bijlage 9.5, Tabel 14, is te zien dat de verhangen van de situaties 'open slootbodem' en 'open slootbodem met zand' nagenoeg overeenkomen. mogelijk komt dit omdat het verhang bepaald is van een lineair stuk van de stijghoogtelijn. Dus krommingen bij het uittreepunt zijn niet meegenomen terwijl hier juist het verschil zit tussen beide situaties.
- De verhangen van het begin van de pipe liggen een stuk hoger dan die van het einde van de pipe. Dus eerst loopt de lijn steiler af en in de pipe wordt deze helling flauwer. Dit komt door de knik in de stijghoogtelijn. Dit knik punt is de kritieke pipelengte vanaf de binnen teen van de dijk.
- Er zit verder geen duidelijke trend in de verkregen verhangen die iets zeggen over een mogelijk verband tussen PlaxFlow en MSeep. De verschillen tussen sommige waarden zijn dusdanig klein dat dit mogelijk ook door onnauwkeurigheid van het model kan komen.
- Een van de methodes die RoyalHaskoning DHV gebruikt als 'quickscan' voor piping is het controleren van het begin van het piping proces met behulp van Plaxflow. Dergelijke methodes worden alleen toegepast als er men niet met de reguliere methodes tot een oplossing komt en

⁴⁶ Dit wordt beschreven in bijlage 9.

de opdrachtgever om geavanceerdere analyses vraagt. Hierbij is de hoofdregel: Als de zandkorrels in het uittredepunt niet in beweging komen, kan er ook geen piping optreden. Voor het in beweging komen van de korrels worden vuistregels gebruikt, zoals een maximaal verhang van 0,5 voor verticale stroming en 0,3 voor horizontale stroming ter plaatse van het uittredepunt en de verhanglijnen onder het binnentalud. Het verhang van 0,5 is gebaseerd op het principe 'Heave' en bezit een veiligheidsfactor van 2. Dit betekent dat de korrels bij een verhang van 1 in beweging zijn gekomen en dat met het uitgangspunt van 0,5 er een zekere veiligheid in rekening wordt gebracht. De verhanglijnen onder het binnentalud worden getoetst aan de verhanglijnen die volgen uit Sellmeijer of Bligh. De verhangen in de tabellen van 'open sloot met zand' in bijlage 10.2 (figuren 52 t/m 54) zijn bekeken bij het uittreepunt en liggen allemaal rond, of boven, de 0,5. Dit betekent dat een dergelijke situatie met de methode van RoyalHaskoning DHV wordt afgekeurd. Te zien is dat de verhangen bij een zandlaag van 10 meter, lager liggen dan wanneer er een zandlaag van 3 of 1 meter aanwezig is. Dit zou betekenen dat de methode van RoyalHaskoning DHV conservatief is voor een tweelagensysteem. Omdat het verhang van 0,5 dus al bij een lagere waterstand wordt gevonden.

Of bovenstaande direct vergeleken kan worden is discutabel. In Mseep wordt de kritieke waterstand berekend, die wordt ingevoerd in plaxflow. Verondersteld wordt dat dit de kritieke situatie in PlaxFlow is, maar deze neemt de pipevorming niet mee terwijl dit wel van invloed is op het stroombeeld (waardoor de verhangen ook veranderen).

7 Conclusies en aanbevelingen

In dit hoofdstuk is eest antwoord gegeven op de hoofdvraag. Hierna is een overzicht van de deelvragen en de daarbij horende antwoorden gegeven. Verder zijn er verschillende aanbevelingen weergegeven en tot slot is er een reflectie van het onderzoek beschreven.

In 2011 is er onderzoek uitgevoerd naar de invloed van de heterogeniteit in verticale richting⁴⁷. Bij dit onderzoek is er gebruik gemaakt van zand met verschillende graderingen. Er is geen gebruik gemaakt van grind. Er zijn experimenten uitgevoerd en de resultaten zijn vergeleken met de resultaten uit een MSeep-model. De hoofdconclusies van dit onderzoek zijn weergegeven in het begin van hoofdstuk 6.

7.1 Conclusies

De hoofdvraag van dit afstudeeronderzoek luidt:

Wat is het risico op piping in een tweelagensysteem met een bodemopbouw bestaande uit grind met daarop een dunne zandlaag en een cohesieve deklaag?

Uit dit onderzoek is gebleken dat het risico op piping toeneemt als er grind aanwezig is in de ondergrond. Dit blijkt uit analyse van de kritieke waterstanden op basis van de methode Sellmeijer en het MSeep-model. Uit interviews en literatuuronderzoek volgt dat er in een ondergrond bestaande uit grind met daarop een deklaag mogelijk een ander mechanisme maatgevend kan zijn dan het in Nederland bekende faalmechanisme piping, namelijk deep seated piping. Deep seated piping is het eroderen van zand in verticale richting door de dominante verticale stroming in het uitteepunt. De ontwikkeling van een horizontale pijp treedt hierbij niet op. Dit is voornamelijk het geval bij een situatie met een deklaag. Naar mate de zandlaag dunner wordt is de kans op deep seated piping ook groter. Uit de resultaten van dit onderzoek blijkt dat bij de zandlaag van 1m een dominante verticale stroming wordt waargenomen. Bij een zandlaag van 3m is dit in mindere mate het geval. Bij welke dikte van de zandlaag het omslagpunt ligt, waarbij geen deep seated piping meer optreedt, is niet bekend. Indien sprake is van deep seated piping is de formule van Sellmeijer niet meer geldig.

De analytische berekening met Sellmeijer (formule met hand) geeft voor een 2 lagensysteem een conservatiever resultaat dan MSeep. In een homogeen pakket (volledig zand) is de handberekening ongunstiger en MSeep conservatiever.

Het piping risico bepalen met een programma dat niet over een pipingmodule beschikt is lastig. In de vergelijking van resultaten uit PlaxFlow en MSeep zijn geen duidelijke overeenkomsten gevonden, waardoor met PlaxFlow niet het risico op piping kan worden bepaald.

Het is belangrijk om over goede meetdata te beschikken om een betrouwbaar model op te stellen. Door de gevoeligheid van bepaalde invoerparameters kan dit grote invloed hebben op de uitkomsten. Ook is meetdata belangrijk om het model te valideren, waardoor deze betrouwbaarder wordt. Door tegenvallende stijghoogtegegevens is het risico op piping specifiek voor een situatie van de casus niet bepaald. Er is wel een algemeen beeld geschetst van het risico op piping in een tweelagensysteem.

Een deklaag zorgt voor een concentratie van de stroming richting het uitteepunt (ventielwerking). Dit leidt tot een verlaging van de kritieke waterstand die met MSeep wordt berekend. Verder wordt er bij een deklaagsituatie weerstand ondervonden in het opbarstkanaal. Deze weerstand zorgt voor een verhoging van de kritieke waterstand. Omdat in de gebruikte situaties geen goede combinatie is

⁴⁷ Beek, V.M. van,(2011),*SBW Piping: 3A onderzoeksplan Macro-heterogeniteit in verticale richting*

gemaakt van ventielwerking en de weerstand in het uittreepunt, kan niet met zekerheid gezegd worden wat de invloed van een deklaag exact is. Mogelijk heffen de invloeden elkaar op waardoor de kritieke waterstand ongeveer gelijk uitkomen met een situatie zonder deklaag.

De modellering in MSeep is gevoelig voor de aanwezigheid van een deklaag. Bij aanwezigheid van een deklaag in de praktijk, moet ook een deklaag in het model worden toegevoegd. Het toepassen van een deklaag heeft in de uitgevoerde berekeningen een ongunstig effect van 20 cm (lager kritiek verval).

De hoofdvraag is beantwoord aan de hand van de volgende deelvragen:

1. Hoe verloopt de stijghoogte in een éénlaagssysteem en een tweelagensysteem?

Het stijghoogteverloop is afhankelijk van de opgegeven waterstand buiten- en binnendijks⁴⁸. Specifiek voor MSeep is ook de kritieke pipelengte van belang. MSeep neemt de kritieke pipelengte mee in de berekening en dit is terug te zien in het stijghoogteverloop als een 'knik' in de stijghoogtelijn. De stijghoogte daalt dan naar het uiteinde van de kritieke pipelengte⁴⁹ en vervolgens naar de opgegeven binnendijkse waterstand.

Bij een éénlaagssysteem worden hogere buitendijkse (kritieke) waterstanden gevonden dan in een tweelagensysteem. Hierdoor hebben de stijghoogtelijnen in een éénlaagssysteem een hogere beginwaarde dan in een tweelagensysteem. Verder is de kritieke pipelengte in een éénlaagssysteem korter dan in een tweelagensysteem. In de situatie met deklaag wordt een lager kritiek verval gevonden dan zonder deklaag, Het aanwezige stromingsbeeld rondom het uittredepunt is met deklaag veel geconcentreerder.

2. Op welk moment en hoe ontstaat de 'pipe' en hoe verloopt deze in een éénlaagssysteem en een tweelagensysteem?

Een pipe ontstaat als de zandkorrels onder de dijk in beweging komen en uittreden door een waterstroom onder de dijk. Deze waterstroom wordt veroorzaakt als er een bepaalde waterstand tegen de dijk staat. Normaal gesproken wordt er in PlaxFlow gewerkt met een maximaal toelaatbare buitendijkse waterstand, de zogenaamde ontwerpwaterstand. In het PlaxFlow-model is er voor de ontwerpwaterstand de kritieke waterstand aangehouden. Deze kritieke waterstand volgt uit het MSeep-model. Deze waterstand geeft de hoogte van de waterstand buitendijks aan waarbij er nog net geen doorgaande (kritieke) pipe ontstaat maar er al wel een pipe aanwezig is. MSeep geeft ook de lengte van de kritieke pipe weer in het model.

Omdat er in PlaxFlow geen pipe gemodelleerd kan worden is deze situatie, met net geen doorgaande pipe, niet na te bootsen in het PlaxFlow-model. Hierdoor kan er niet worden aangenomen dat stroomsnelheden en stijghoogtes, rond het uittreepunt, van toepassing zijn op een situatie met een gevormde pipe. Ook is deze ontwerpwaterstand niet de buitendijkse waterstand waarbij de pipe begint te ontstaan. Door de buitendijkse waterstand op deze manier te modelleren kan er wel gezocht worden naar een verband tussen de MSeep en PlaxFlow modellen. Over het moment van ontstaan en het verloop tot aan de kritieke pijplengte kan dus niets worden gezegd.

3. In hoeverre is de aangepaste formule van Sellmeijer (2011) en het aangepaste MSeep-model (2011) doorontwikkeld en bruikbaar voor het onderzoek?

Zowel de formule als het model worden in de praktijk nog niet toegepast. Ze zijn beide namelijk nog in conceptvorm en zullen nog worden aangepast. De grootste reden hiervoor is dat de veel consequenties zal hebben voor het dijkontwerp. De formule en het model zijn alleen getest in ideale situaties en niet uitvoerig met meerdere lagen. Komende jaren zal er onderzoek uitgevoerd worden naar heterogeniteit in zowel horizontale als verticale richting. Ook zullen er nog proeven uitgevoerd

⁴⁸ Meer, M.T. van der, (2004), *Waterspanningen bij dijken*

⁴⁹ De pipe begint bij de binnentoe van de dijk

gaan worden met grondgesteldheden uit het veld. Voor het MSeep-model uit 2011 is nog geen handleiding beschikbaar waardoor onduidelijkheden niet opgelost kunnen worden. Er bestaat bijvoorbeeld onduidelijkheid over de invoerparameter d_{70m} . Ook is het niet mogelijk gebleken om de resultaten van het model te controleren. Aan de hand van de hierboven staande redenen is besloten dat de aangepaste formule van Sellmeijer (2011) en het aangepaste MSeep-model nog niet ver genoeg zijn doorontwikkeld om bruikbaar te zijn voor dit onderzoek.

4. Wat is het risico op het faalmechanisme piping specifiek op de situatie in de casus?

Door de tegenvallende stijghoogteresultaten is het niet mogelijk om het risico op het faalmechanisme piping specifiek op de situatie in de casus te bepalen. Dus voor een bestaande dijk met bijbehorende ondergrond en stijghoogtegegevens. Wel is een algemeen beeld geschetst van het risico op piping in een tweelagensysteem met en zonder een cohesieve deklaag met representatieve waarden voor het casusgebied. Dit slaat terug op de hoofdvraag.

5. Hoe kan met de beschikbare meetdata een betrouwbaar en algemeen toepasbaar model worden gevormd en gevalideerd?

Er wordt geprobeerd om een zo algemeen toepasbaar model te vormen door vijf verschillende situaties op te stellen en deze elk te variëren in laagopbouw. Dit wordt gedaan door in alle vijf de situaties eerst een ondergrond volledig van zand beschouwd met een dikte van 10 m. Hierna is een grondopbouw met 3 m zand en 7 meter grind en afsluitend een grondopbouw met 1 m zand en 9 m grind beschouwd. Zo beschouwen wij in totaal 15 situaties. Ook wordt er gerekend met verschillende methodes. Door de tegenvallende stijghoogteresultaten is het niet mogelijk om de modellen te valideren. Dit is opgenomen als aanbeveling. In tegenstelling tot een specifieke situatie is door representatieve waarden te gebruiken en gegevens te middelen wel een algemeen toepasbaar model samengesteld. Dit is gedaan door naar een groot gebied te kijken (situatie langs de Maas).

6. Wat is het stromingsbeeld van een éénlaagssysteem en een tweelagensysteem?

Het stroombeeld van een éénlaagssysteem is minder complex dan die van een tweelagensysteem, doordat er geen groot contrast aanwezig is in doorlatendheid van de ondergrond (met uitzondering van de deklaag). Bij een éénlaagssysteem worden hoge stroomsnelheden gevonden in de zandlaag onder de dijk en in een tweelagensysteem neemt deze snelheid af. In het tweelagensysteem zijn de hoge stroomsnelheden in de grindlaag aanwezig. Vooral ter hoogte van het uittreepunt liggen de stroomsnelheden hoog. De stroomrichting in de zand- en grindlaag loopt horizontaal onder de dijk. Bij het uittreepunt neemt de stroming een verticale richting aan. Als er geen deklaag aanwezig is, kan het water binnendijs vrij uitstromen. Als er wel een deklaag aanwezig is wordt de stroming meer gebundeld en neemt deze bij het uittreepunt een sterkere verticale richting aan. Als het tweelagensysteem bestaat uit een zandlaag van 3m, worden 2 sterke stromingen waargenomen. Aan de onderkant van de deklaag en bij de overgang van zand naar grind. Bij een zandlaag van 1m concentreert de stroming in het zand zich meer onder het uittreepunt en wordt de stroming bij de overgang van zand naar grind sterker. De snelheid aan het einde van de pipe is groot als naar de resultaten uit MSeep wordt gekeken. De snelheid in het uittreepunt neemt dan af. Als er meer grind in de ondergrond aanwezig is, neemt de snelheid in de pipe toe.

7. Wat is de invloed van de deklaag in een éénlaagssysteem en een tweelagensysteem?

De invloed van de deklaag zorgt voor een hoge, geconcentreerde stroming (ventielwerking). Dit heeft tot gevolg dat de waterdruk wordt verhoogd, waardoor er een weerstand wordt ondervonden bij en in het uittreepunt. Situatie opbarstkanaal en open slootbodem nemen de ventielwerking mee, wat zorgt voor een lagere kritieke waterstand. Echter houden deze situaties geen rekening met weerstand in het uittreepunt. De situatie opgehoogde waterstand houdt rekening met de weerstand nabij en in het uittreepunt. Dit heeft een verhoging van de kritieke waterstand tot gevolg. Deze situatie houdt echter geen rekening met de ventielwerking, omdat niet daadwerkelijk een deklaag is gemodelleerd. Een combinatie van beide situaties zal waarschijnlijk een realistische manier zijn om

een deklaag te modelleren. Mogelijk heffen de weerstand en de ventielwerking elkaar op, waardoor een soortgelijke kritieke waterstand wordt gevonden als een situatie zonder deklaag.

8. Hoe kan in PlaxFlow het risico op piping worden bepaald?

Een methode om in PlaxFlow het risico op piping te bepalen is lastig, omdat PlaxFlow niet beschikt over een pipingmodule die het ontstaan van een pipe simuleert en berekend in het model. Er zijn geen duidelijke overeenkomsten gevonden in de stijghoogte lijnen van PlaxFlow en MSeep. Het is de vraag in hoeverre het risico op piping bepaald kan worden door te kijken naar de verhangen bij het uittreepunt. Mogelijk is het stroombeeld (en daarmee het verhang) niet juist, doordat PlaxFlow geen pipe laat ontstaan.

7.2 Aanbevelingen

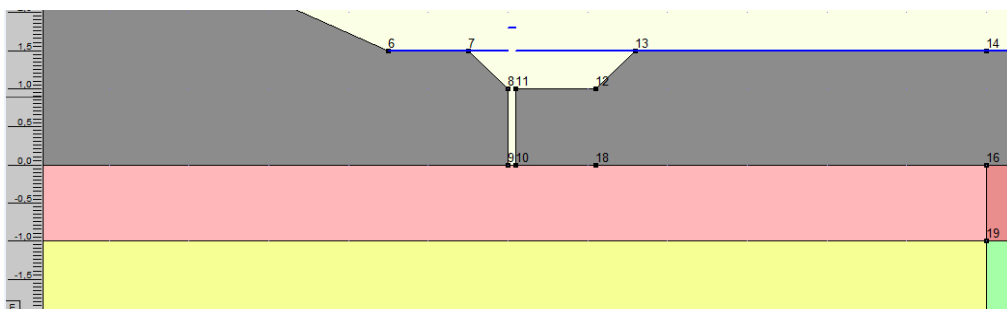
In deze paragraaf volgen aanbeveling voor vervolgonderzoek. Door beperkte tijd en afbakening van dit rapport hebben wij de volgende aanbevelingen:

1. De invloed van het intreepunt

In dit onderzoek is alleen aandacht besteed aan het uittreepunt. Het intreepunt, vooral de weerstand van deze, oefent invloed uit op het faalmechanisme piping waardoor vervolgonderzoek hiernaar interessant is. Dit bleek ook uit interviews met specialisten van Deltares, zie bijlage 8. In deze interviews is ook een situatie besproken waarbij de Maas de grindlaag aansnijdt, wat in de praktijk ook het geval is. Bij deze situatie is er waarschijnlijk sprake van een weerstand dit in de tijd varieert door het neerslaag van sediment in de Maas.

2. Het combineren van situatie twee en vijf (een situatie met deklaag, met een opbarstkanaal en een plaatselijke opgehoogde waterstand)

De situatie met deklaag en opbarstkanaal geeft van alle situaties het beste de ventielwerking weer maar door deze benadering is er geen of weerstand aanwezig in de open ruimte van de cohesieve deklaag. De situatie opgehoogde waterstand simuleert goed de weerstand die de cohesieve deklaag teweeg brengt, maar geeft niet goed de ventielwerking weer. Door deze twee situaties te combineren wordt de ventielwerking van het opbarstkanaal meegenomen en de weerstand door de ophoging van de waterstand. Waarschijnlijk simuleert deze situatie dus het beste de deklaag. In onderstaand figuur is een aanbeveling gegeven van een manier om de deklaag te simuleren, zie Figuur 19. In de figuur is te zien dat de weerstand alleen plaatselijk is verhoogd met 0,3m. Dit is gedaan omdat er op de plaats waar er wel een deklaag aanwezig is er geen simulatie van de deklaag hoeft plaats te vinden.



Figuur 19: Aanbeveling deklaag simulatie.

3. Het modelleren van een deklaag in MSeep

Er wordt aanbevolen om meer onderzoek uit te voeren naar het modelleren van een deklaag in MSeep. Uit dit onderzoek is gebleken dat niet alleen de weerstand van de deklaag meegenomen dient te worden maar ook de zogenaamde ventielwerking. Het verkeerd modelleren van de deklaag heeft veel invloed op de kritieke waterstand.

4. Berging modelleren in PlaxFlow en fitten op MSeep

PlaxFlow kan tijdsafhankelijke grondwaterstromingsberekeningen maken. Hierdoor kan berging in het grindpakket gemodelleerd worden. Door de uiteindelijke grondwaterstroming te fitten in MSeep kan er een piping berekening uitgevoerd worden rekening houdend met de berging in het grindpakket.

5. De invloed van het achterland

In de casus dijkverbetering Limburg stroomt er grondwater vanuit het achterland richting de Maas (dit blijkt uit de stijghoogtegegevens). Aanbevolen wordt dit nader te onderzoeken. Dit kan net als de berging tijdsafhankelijk gemodelleerd worden in PlaxFlow waarna de resultaten gefit kunnen worden in MSeep.

6. Turbulente stroming in het grindpakket

Een anders aandachtspunt is dat de modellen en methodes alleen toepasbaar zijn bij laminaire stroming. Door hoge stroomsnelheden in de grindlaag zou er turbulente stroming kunnen ontstaan⁵⁰. Er wordt aanbevolen dit in vervolgonderzoek mee te nemen.

7. Piping risico in PlaxFlow

In het onderzoek is het niet gelukt om een verband te vinden, tussen het MSeep-model en het PlaxFlow-model, betreffende het piping risico. Het is wel gelukt om enkele verbanden uit te sluiten. Er wordt aanbevolen nog verder onderzoek te doen naar een verband tussen MSeep en PlaxFlow betreffende het risico op piping. Hierin kunnen de resultaten uit dit onderzoek als basis gebruikt worden.

8. 'Deep seated piping'

Een gebrek van alle modellen en methodes is dat deze alleen rekening houden met het faalmechanisme piping en niet met andere mechanismen die ook invloed kunnen hebben op het piping proces. Vooral in een situatie met een relatief dunne zandlaag met daaronder een grindlaag kunnen er andere situaties voordoen dan alleen het faalmechanisme piping. In deze situatie is er namelijk sprake van een sterke verticale stroming ter hoogte van het uittreepunt. Hier is de rekenregel van Sellmeijer misschien zelf helemaal niet geldig. Er wordt aanbevolen om meer onderzoek uit te voeren naar deze sterke verticale stroming rond het uittreepunt. Hiervoor wordt er ook verwezen naar een Chinees onderzoek waarin gesproken wordt over 'deep seated piping'⁵¹. Van dit onderzoek zijn weinig resultaten gevonden.

9. Ontstaan van de pipe

Er wordt aanbevolen om meer onderzoek uit te voeren naar het ontstaan van de pipe. Het is namelijk nog niet bekend bij welke buitendijkse waterstand de pipe begint te vormen. In dit onderzoek is de kritieke waterstand gebruikt waarbij er net geen doorgaande pipe ontstaat.

10. MSeep 2011 en Sellmeijer 2011

Er wordt aanbevolen om de in het onderzoek uitgevoerde berekeningen en modelleringen ook uit te voeren met de nieuwste versie van het MSeep-model en de nieuwste versie van de formule van Sellmeijer. Momenteel komen deze uit MSeep 2006.

⁵⁰ V. van Beek, Deltares, te Delft, betrokken bij SBW-piping en proeven bij de IJkdijk, informatie verkregen door middel van een interview, 18-02-2013

⁵¹ 14 Ding, L. et al.,(2007),(Chinese versie) *Experimental studies on piping development in three-stratum dike foundations*

11. Validatie van het MSeep-model

Er wordt aanbevolen om het MSeep-model te valideren met nauwkeurig bepaalde invoerparameters en boor- en stijghoogtegegevens uit het veld.

12. Variatie laagdikte en dijklichaam

In dit onderzoek is er gebruik gemaakt van een bepaald dijklichaam en een bepaalde dikte van de aquifer. Om de conclusie algemeen toepasbaar te maken wordt er aanbevolen om het onderzoek uit te voeren voor meerdere soorten dijklichamen en verschillende laagdiktes.

13. Macro-heterogeniteit

Er wordt aanbevolen om meer onderzoek te doen naar de macro-heterogeniteit door te variëren in tussenlagen en korrelgrootte. Dit kan zowel in horizontale als verticale richting.

14. Micro-heterogeniteit

Er wordt aanbevolen om meer onderzoek te doen naar de micro-heterogeniteit door te variëren in korrelgrootte in de verschillende lagen. Dit kan zowel in horizontale als verticale richting. Onder dit onderwerp kan ook vermenging van de lagen meegenomen worden. In de praktijk is er namelijk meestal geen scherpe laagscheiding aanwezig.

15. Kunstwerken of andere constructies, taludbekledingen en kwelschermen

In dit rapport zijn kunstwerken of andere constructies, taludbekledingen en kwelschermen buiten beschouwing gelaten. Een aanbeveling is om het risico op piping te ook voor deze elementen te bepalen in een tweelagensysteem met een zand- en grindpakket.

7.3 Reflectie

In deze paragraaf is een reflectie geschreven over het onderzoek. Eerst is er gereflecteerd over het resultaat daarna over de gevolgde methodiek. Afsluitend is er terug gekeken op het verloop van de communicatie.

In de loop van het onderzoek zijn er door nieuw inzicht wijzigingen en toevoegingen aangebracht aan de deelvragen. Hierdoor is meer inzicht verkregen in het stromingsbeeld, de invloed van de deklaag en de manier van het risico op piping bepalen in het PlaxFlow-model. Om te kunnen bepalen hoe het risico op piping bepaald kan worden is er ook een vergelijking gemaakt, betreffende het stijghoogteverloop en het stromingsbeeld, tussen PlaxFlow en MSeep.

Door de complexiteit van het onderzoek is er gekozen om het intrepunt buiten beschouwing te laten en zo het onderzoek verder af te bakenen.

Resultaat

Het is gelukt om de hoofdvraag van dit onderzoek te beantwoorden. De betrouwbaarheid van de gebruikte modellen en daarmee het onderzoek is beschreven in het rapport. Hieruit blijkt dat er een groter risico aanwezig is op piping in een tweelagensysteem van zand op grind.

Veel onderwerpen zijn buiten beschouwing gelaten omdat deze niet meer behandeld konden worden in het onderzoek. Deze zijn weergegeven in de aanbevelingen.

Er is geen projectbezoek uitgevoerd. Dit is achterwege gelaten omdat het niet mogelijk was om één specifieke situatie door te rekenen. Dit maakte een projectbezoek niet noodzakelijk.

Door dit onderzoek is meer inzicht verkregen in het risico op het faalmechanisme piping. Door dit betere inzicht is de kans tot een goed ontwerp vergroot waardoor de waterkeringen niet onder of over gedimensioneerd worden. Op deze manier kan een duurzamer ontwerp worden gerealiseerd.

Gevolgde methodiek

In de oorspronkelijke aanpak zou er een betere koppeling naar de praktijk zijn gemaakt dan uiteindelijk is gedaan. Dit is het gevolg van tegenvallende stijghoogtegegevens. Het eerste plan was om het model te valideren aan de hand van meetdata. Dit is hierdoor ook niet gelukt.

In het MSeep-model zijn vaak onduidelijkheden ontstaan waardoor het model niet altijd gebruiksvriendelijk over kwam. Het is wel gelukt om in MSeep 2006 een goed model te vormen. Aanvankelijk was het plan om gebruik te maken van een bèta versie van MSeep uit 2011. Het gebruik van deze versie bleek helaas niet mogelijk, zie paragraaf 5.3 Modellen en methodes.

Er is in het onderzoek ook geen gebruik gemaakt van de formule van Sellmeijer uit 2011. De reden hiervoor is ook weergegeven in paragraaf 5.3 Modellen en methodes. Het is dus niet mogelijk gebleken om MSeep 2011 en de formule van Sellmeijer uit 2011 toe te passen. Dit heeft geen gevolgen gehad voor de uitkomst van het onderzoek. Het onderzoek is hierdoor alleen verder afgebakend.

In de loop van het onderzoek zijn er vragen ontstaan over betrouwbaarheid van de resultaten van MSeep en Sellmeijer. Deze op elkaar gebaseerde methodes gaven namelijk niet vergelijkbare uitkomsten. Om deze reden is de gevoeligheid van alle invoerparameters van de formule van Sellmeijer, het MSeep-model en zelfs het PlaxFlow-model bepaald. Na deze analyse bleken deze niet vergelijkbare uitkomsten te verklaren.

Communicatie

De communicatie tussen ons beiden verliep goed. Ook de communicatie tussen Hogeschool Van Hall Larenstein en Royal Haskoning DHV goed verlopen. Er hebben veel vergaderingen plaatsgevonden waarin wij feedback hebben ontvangen. Deze goede communicatie heeft ons veel geholpen bij het uitvoeren van dit onderzoek.

De externe communicatie naar Deltares en de Universiteit van Gent is goed verlopen. Het is geluk om de personen van deze instanties te interviewen. Het is helaas niet gelukt om personen van waterschap Peel en Maasvallei en waterschap Roer en Overmaas te interviewen. Het hoofd thema van deze interviews zou de beschikbare meetdata zijn geweest. Door de tegenvallende meetdata heeft het niet interviewen van deze personen geen grote gevolgen voor het onderzoek gehad.

Bij het gebruik van het MSeep-model uit 2011 hebben wij niet veel hulp kunnen ontvangen van Deltares. De reden hiervan is dat dit model nog in een bèta status verkeerd en aanpassingen nog in het vooruitzicht liggen. Van het MSeep-model uit 2011 is ook nog geen handleiding aanwezig. Door de keuze om niet verder in te gaan op het MSeep-model uit 2011 heeft dit geen grote gevolgen gehad voor het onderzoek.

Bronvermelding

Eerst zullen de gebruikte publicatie worden weergegeven, daarna websites van bedrijven of instellingen en mondelinge informatie.

Publicaties

- 1 Arcadis,(2012), *Consequentie analyse aangepaste pipingregel*, waterschappen, Rapport
- 2 Asperen, L. van, e.a.,(2001),*Waterkerende grondconstructies*, TAW, Technisch Rapport
- 3 Beek, V.M. van,(2011),*SBW Piping: 3A onderzoeksplan Macro-heterogeniteit in verticale richting*, Deltares, Rapport
- 4 Beek, V.M. van, e.a.,(2011),*SBW Piping: 3B Onderzoeksrapport Macro-heterogeniteit in verticale richting (def)*, Deltares, Rapport
- 5 Beek, V.M. van, e.a.,(2012),*Validation of Sellmeijer's model for backward piping under dikes on multiple sand layers*, Deltares, TU Delft, China institute of Water Resources and Hydropower Research, Rapport
- 6 Beek, V.M. van, e.a.,(2011),*Observations on the process of backward erosion piping in small-, medium- and fullscale experiments*, Deltares, Rapport
- 7 Beek, V.M. van, e.a.,(2012),*SBW Piping: 2B. Bureaustudies fysische onderbouwing aangepaste rekenregel, tijdsafhankelijkheid en heterogeniteit*, Deltares, Rapport
- 8 Bos, M. ,(2009),*SBW Her validatie Piping, Kwalificeren en herijken beheerdersoordeel*, Royal Haskoning, Fugro, Rapport
- 9 Calle, E.O.F., e.a.,(1999), *Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen*, TAW, Technisch Rapport
- 10 Dam, P. van,(1981),*Dijkdoorbraak Zalk januari (1926)*,Centrum voor Onderzoek Waterkeringen, Rapport
- 11 Deltares,(2005), *Dijkontwerp tegen Sijperosie met MSeep Versie 7*,Rapport
- 12 Ding, L. et al.,(2007),*(Chinese versie) Experimental studies on piping development in three-stratum dike foundations*, China institute of Water Resources and Hydropower Research, Rapport
- 13 Förster U. ,(2011),*Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen concept*, Deltares, SBW piping, Technisch Rapport
- 14 Groot, A. de,(2007),*Voorschrift toetsen op veiligheid primaire waterkeringen*, Ministerie Verkeer en Waterstaat, Rapport
- 15 Hogeweg, R.,(2004),*Een goed rapport*, ThiemeMeulenhoff, Rapport
- 16 Koster, I.W. ,(2004),*Zandboek handboek*, CROW, Rapport
- 17 Knoeff, H.,(2008),*SBW piping*, Deltares, PowerPoint presentatie
- 18 Koelewijn, A.R. ,(2010),*Proeven met ijkdijs tonen gevaar van piping*, Land + Water, Artikel

- 19 Meer, M.T. van der,(2004),*Waterspanningen bij dijken*, TAW, Technisch Rapport
- 20 Ministerie Verkeer en Waterstaat,(2007), *Hydraulische Randvoorwaarden primaire waterkeringen, voor de derde toets ronde 2006 - 2011*, Rapport
- 21 Rooijen, H den,(1992),*Literatuuronderzoek doorlatendheid- korrelkarakteristieken*, Grondmechanica Delft, Rapport
- 22 Sellmeijer, J.B.,(2006),*Numerical computatie of seepage erosion below dams (piping)*, Deltares, Rapport
- 23 Sellmeijer, J.B.,(1988),*On the mechanism of piping under impervious structures*, Proefschrift aan TU Delft, Rapport
- 24 Sellmeijer, J.B. et al.,(2011),*Fine-tuning of the backward erosion piping model through small-scale, medium-scale and IJkdijk experiments*, European Journal of Environmental and Civil Engineering, Rapport
- 25 Smidt, J.T. de,(1994),*Handreiking Constructief ontwerpen*, TAW, Rapport
- 26 Stefess, H. ,(2009),*Project VNK 2 toetst dijringen op veiligheid*, Land + Water, Artikel
- 27 Velzen, E. van, et al.,(2007),*Ontwerp belasting voor het riviereengebied*, Ministerie Verkeer en Waterstaat en ENW, Technisch Rapport
- 28 Vries, G. de, et al.,(2010),*IJkdijk Full Scale Underseepage Erosion (Piping) Test: Evaluation of Innovative Sensor Technology*, Deltares, Rapport
- 29 Vrijling, J.K.,(2010),*Piping, Realiteit of Rekenfout?*, ENW, Rapport

Websites van bedrijven of instellingen

- 30 www.overmaas.nl, februari 2013
- 31 www.dinoloket.nl/ondergrondgegevens, maart 2013
- 32 www.ahn.geodan.nl, juni 2013

Mondelinge informatie

- 33 A. Bezuijen, Deltares/Universiteit Gent, betrokken geweest bij het SBW-piping onderzoek van V. van Beek en nu bij het promotie onderzoek van K. van den Boer, Gent, 18-3-2013
- 34 J. Blinde, Deltares, betrokken bij VNK en SBW-piping, Delft, 25-3-13
- 35 K. van den Boer, Universiteit Gent, promotie onderzoek naar start van de pipe, Gent, 18-3-2013
- 36 U. Förster, Deltares, projectleider SBW-piping, Delft, 25-3-13
- 37 V. van Beek, Deltares, betrokken bij SBW-piping en proeven bij de IJkdijk, Delft, 18-2-2013

Lijst van figuren en tabellen

Lijst van figuren

Figuur 1: Situatie schets	2
Figuur 2: De verschillende fasen van piping.....	8
Figuur 3: Pipinggevoelige bodems	9
Figuur 4: Niet pipinggevoelige bodems.....	9
Figuur 5: Stijghoogte, grensstijghoogte en opdrijfzone voor een willekeurige situatie.	10
Figuur 6: Basis schematisatie rekenmodel van Sellmeijer 1989.	12
Figuur 7: Afzwakken stromingsgradiënten bij ontstaan pipe.....	13
Figuur 8: Hoog achterland, legenda meters t.o.v. NAP.....	18
Figuur 9: Schematisch overzicht van de uitgangssituatie.	20
Figuur 10: Schematische weergave van de vijf situaties.....	21
Figuur 11: Het verval uitgezet tegen de pipelengte.....	27
Figuur 12: Zandmeevoerende wel.....	28
Figuur 13: Verduidelijking weerstand in pipe.	32
Figuur 14: Verduidelijking opstuwing door deklaag.....	32
Figuur 15: Stijghoogtelijnen voor de situaties ‘open slootbodem’ en ‘openslootbodem’ met zand. ..	33
Figuur 16: Verduidelijking verhanglijnen met pipe voor willekeurige situatie.	35
Figuur 17: Verduidelijking verhanglijnen zonder pipe voor willekeurige situatie.....	35
Figuur 18: Verhangen voor situatie open slootbodem en openslootbodem met zand.....	36
Figuur 19: Aanbeveling deklaag simulatie.....	43
Figuur 20: Locatie bodemprofielen van Noord naar Zuid.	6
Figuur 21: De toegepaste boundaries in het PlaxFlow-model.	9
Figuur 22: Het toegepaste mesh in het PlaxFlow-model.	9
Figuur 23: Input overzicht en toegepaste limits in het PlaxFlow-model.....	9
Figuur 24: Het toegepaste mesh in het MSeep-model.	10
Figuur 25: Visualisatie van het uittreepunt in het MSeep-model.	11
Figuur 26: De toegepaste boundaries in het MSeep-model.	11
Figuur 27: Input overzicht met toegepaste limits.	11
Figuur 28: De gevoeligheid van het mesh gerelateerd aan de stroomsnelheid.	13
Figuur 29: Voorbeeld van het mesh in MSeep.	13
Figuur 30: Boundaries van het PlaxFlow-model.....	14
Figuur 31: Boundaries van het MSeep-model.....	14
Figuur 32: De stroomsnelheid direct onder het uittreepunt in het MSeep- en PlaxFlow-model	15
Figuur 33: Schematisatie van de small-scale proefopstelling.	19
Figuur 34: De bepaling van het verhang van de stijghoogtelijnen.....	27
Figuur 35: Stijghoogtelijnen met pipe voor situatie ‘zonder deklaag’.	28
Figuur 36: Stijghoogtelijnen met pipe voor situatie ‘opbarstkanaal’.....	28
Figuur 37: Stijghoogtelijnen met pipe voor situatie ‘open slootbodem’.	28
Figuur 38: Stijghoogtelijnen met pipe voor situatie ‘opgehoogde waterstand’.	28
Figuur 39: Stijghoogtelijnen met pipe bij een zandlaag van 10 meter.....	29
Figuur 40: Stijghoogtelijnen met pipe bij een zandlaag van 3 meter en een grindlaag van 7meter. ...	29
Figuur 41: Stijghoogtelijnen met pipe bij een zandlaag van 1 meter en een grindlaag van 9meter. ...	29
Figuur 42: Stijghoogtelijnen zonder pipe voor situatie ‘zonder deklaag’.	30

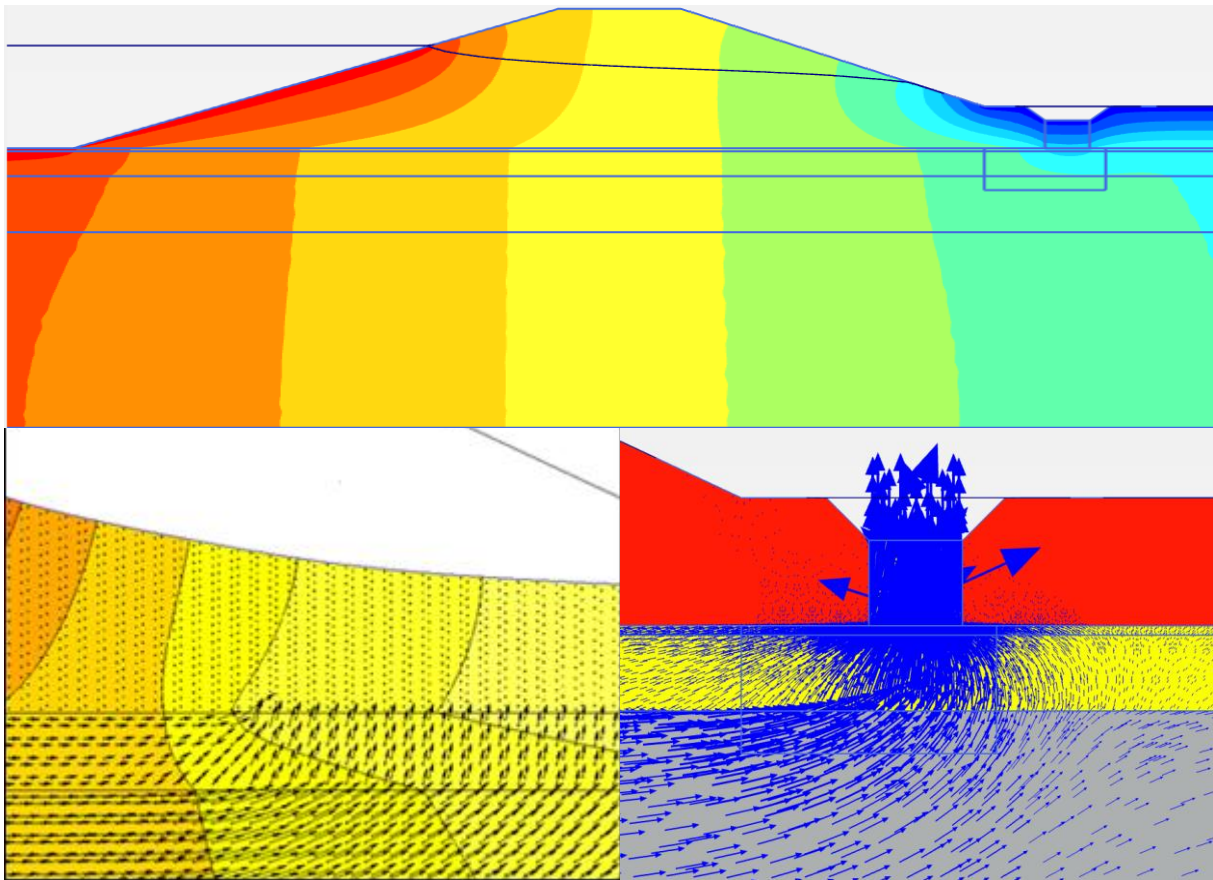
Figuur 43: Stijghoogtelijnen zonder pipe voor situatie 'opbarstkanaal'	30
Figuur 44: Stijghoogtelijnen zonder pipe voor situatie 'open slootbodem'	30
Figuur 45: Stijghoogtelijnen zonder pipe voor situatie 'opgehoogde waterstand'	30
Figuur 46: Stijghoogtelijnen zonder pipe bij een zandlaag van 10 meter	31
Figuur 47: Stijghoogtelijnen zonder pipe bij een zandlaag van 3meter en een grindlaag van 7m.	31
Figuur 48: Stijghoogtelijnen zonder pipe bij een zandlaag van 1meter en een grindlaag van 9m.	31
Figuur 49: Verschil uittreepunt.	33
Figuur 50: Stroombeeld 10m zand.	34
Figuur 51: Stroombeeld 3m zand + 7m grind.	34
Figuur 52: Stroombeeld 1m zand + 9m grind.	34
Figuur 53: Stroombeelden10m zand.	35
Figuur 54: Stroombeelden3mzand + 7m grind.	35
Figuur 55: Stroombeelden 1m zand + 9m grind.	35
Figuur 56: Stroomlijnen situatie 'open slootbodem met zand' (10m zand).	36
Figuur 57: Stroomlijnen situatie 'open slootbodem met zand' (3m zand + 7m grind).	36
Figuur 58: Stroomlijnen situatie 'open slootbodem met zand' (1m zand + 7m grind).	36
Figuur 59: Verhanglijnen met pipe situatie 'zonder deklaag'	37
Figuur 60: Verhanglijnen met pipe situatie 'opbarstkanaal'	37
Figuur 61: Verhanglijnen met pipe situatie 'open slootbodem'	38
Figuur 62: Verhanglijnen met pipe situatie 'opgehoogde waterstand'	38
Figuur 63: Verhanglijnen met pipe 'zonder deklaag' en 'opbarstkanaal'	39
Figuur 64: Verhanglijnen zonder pipe 'open slootbodem' en 'opgehoogde waterstand'	40
Figuur 65: Stroombeeld uit MSeep (situatie 'zonder deklaag' - 1m zand + 9m grind).	41

Lijst van tabellen

Tabel 1: Grondsoorten met bijbehorende mediane korreldiameter en creep-factoren.	11
Tabel 2: Voorbeeld verwerkte zandmonsters uit Venlo.	16
Tabel 3: Monsterlocaties met bijbehorende gemiddelde korrelgroottes, van Noord naar Zuid.	17
Tabel 4: Het monster dat wordt aangenomen voor de zandfractie van de casus.	17
Tabel 5: De korrelverdeling die wordt aangenomen voor de grindfractie van de casus.	17
Tabel 6: De invoerparameters gebruikt in de formule van Sellmeijer uit 1989 en 2011.	8
Tabel 7: De invoerparameters gebruikt in het PlaxFlow-model.	9
Tabel 8: De invoerparameters gebruikt in het MSeep-model.	10
Tabel 9: De gevoeligheid van de modelparameters uit MSeep en PlaxFlow.	13
Tabel 10: De invloed van de rolhoekweerstand en het volumegewicht van het zand.	13
Tabel 11: Invoerparameters voor de modelvergelijking tussen de modellen MSeep en PlaxFlow.	14
Tabel 12: De stroomsnelheid en de stijghoogte direct onder het midden van de dijk.	15
Tabel 13: De stroomsnelheid en de stijghoogte direct onder het uittreepunt.	15
Tabel 14: Verhangen van stijghoogtelijnen.	32
Tabel 15: Kritieke waterstanden voor situatie 1, 2 en 3.	42
Tabel 16: Kritieke waterstanden gecorrigeerd voor siutatie 5.	42

Bijlagenbundel

Piping in een tweelagensysteem



Door:

F.H.G.A. Gerritsen en T.J. de Wit

Inhoud

1 Begrippenlijst.....	1
2 Symbolenlijst	3
3 Boorgegevens	4
4 Bodemprofielen.....	6
5 Stijghoogtegegevens	7
6 Invoerparameters	8
7 Modelparameters.....	12
7.1 Gevoeligheid modelparameters.....	12
7.2 Model vergelijking	14
8 Interviews	17
9 Stijghoogteverloop	27
9.1 Stijghoogteverloop met pipe, per situatie (MSeep).....	28
9.2 Stijghoogteverloop met pipe, per bodemopbouw (MSeep)	29
9.3 Stijghoogteverloop zonder pipe, per situatie (PlaxFlow)	30
9.4 Stijghoogteverloop zonder pipe, per bodemopbouw (PlaxFlow)	31
9.5 Verhangen van stijghoogtelijnen.....	32
10 Stroming	33
10.1 Stroombeelden voor situatie ‘zonder deklaag’ (PlaxFlow)	34
10.2 Stromingsbeelden ‘open slootbodem’ en ‘open slootbodem met zand’ (PlaxFlow)	35
10.3 Verhanglijnen met pipe (MSeep)	37
10.4 Verhanglijnen zonder pipe (PlaxFlow).....	39
10.5 Stroombeeld MSeep.....	41
11 Kritieke waterstanden	42

Status Definitief
6 juni 2013 te Nijmegen



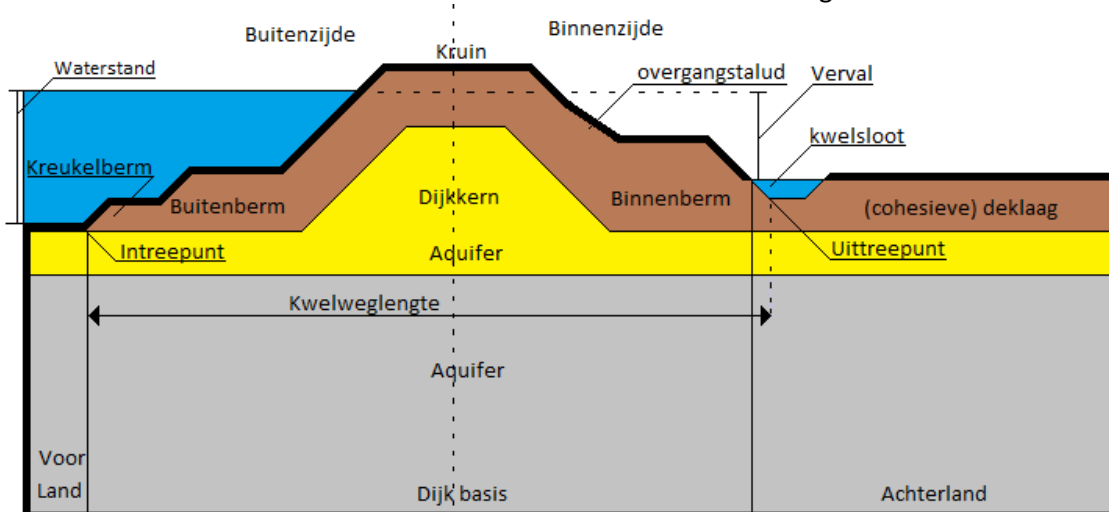
1 Begrippenlijst

De begrippenlijst is voor een groot deel overgenomen uit het Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen⁵². In Figuur 20 is een schematisatie van een waterkering met bijbehorende begrippen weergegeven.

Achterland	Het gebied dat binnendijs ligt.
Achterloopsheid	Vorming van kanaaltjes of holle ruimten aan de zijkant van een kunstwerk ten gevolge van het uitspoelen van grond.
Aquifer	Watervoerende zandlaag.
Binnen (-dijks, -teen)	Aan de kant van het land of binnenwater.
Buiten (-dijks, -teen)	Aan de kant van het buitenwater.
Cohesieve deklaag	Afsluitende, slecht- of nauwelijks doorlatende, bovenste grondlaag.
Éénlaagstelsel	Een profiel met een, of zonder, een cohesieve deklaag met daaronder een zandpakket.
EEM	Eindige Elementen Methode. Berekeningen met behulp van een ('multi-purpose') computerprogramma voor numerieke grondwaterstromingsanalyse. In dit rapport MSeep en PlaxFlow.
Grondbreuk	Zie hydraulische grondbreuk.
Grensstijghoogte	Stijghoogte in de aquifer die bepaald wordt door het gewicht van de cohesieve deklaag.
Tweelagensysteem	Een situatie waarin er na de eventuele deklaag twee verschillende grondlagen aanwezig zijn. In deze situatie een zandpakket boven een grindpakket.
Fluïdisatie	Zie Heave.
Heave	In dit rapport: de situatie waarbij verticale korrelspanningen in een zandlaag wegvallen onder invloed van een verticale grondwaterstroming, ook fluïdisatie of vorming van drijfzand genoemd.
Hydraulische grondbreuk	Verlies van korrelcontact in de grond als gevolg van te hoge wateroverspanningen, in geval van een cohesieve deklaag leidt dit tot opdrijven en opbarsten, in geval van een niet-cohesieve deklaag tot Heave.
Intreepunt	(Theoretisch) punt waar het buitenwater tot de watervoerende zandlaag, of grindlaag, toetreed, als gevolg van het verval onder de waterkering.
Kritiek verval, c.q. kritieke kwelweglengte	Waarde van het verval, c.q. de lengte van de maatgevende kwelweg, waarbij nog net geen piping of heave optreedt.
Kwel	Water dat door of onderdoor een waterkering stroomt, als gevolg van het te keren verval onder de waterkering.
Kwelweg	Mogelijk pad in de grond die het kwelwater aflegt, van het intreepunt naar het uitreepunt.
Kwelweglengte	De afstand die het kwelwater in de grond aflegt.
Kwelscherm	Een waterdicht scherm dat verticaal in de grond wordt aangebracht, waardoor de kwelweglengte wordt vergroot.
Kwelsloot	Sloot aan de binnenzijde van de dijk die tot doel heeft kwelwater op te vangen en af te voeren.
Kritieke waterstand	Waterstand waarbij nog net geen piping optreedt.
Macro-heterogeniteit	Variatie in de korrelgrootte verdeling (D_{70} -waarde) tussen verschillende grondlagen.
Micro-heterogeniteit	Variatie in de korrelgrootte verdeling (D_{70} -waarde) in één grondlaag.

⁵² Förster U. ,(2011), *Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen concept*

Onderloopsheid	Zie piping.
Ontwerpwaterstand	Maatgevende waterstand waarop een dijk wordt ontworpen.
Opbarsten	Scheuren van een cohesieve deklaag die is opgedreven.
Opdrijven	Vorm van hydraulische grondbreuk waarbij een cohesieve deklaag ten gevolge van wateroverspanning in de onderliggende aquifer wordt opgelicht.
Piping	Het ontstaan van holle ruimten onder een dijk of kunstwerk, ten gevolge van een geconcentreerde kwelstroom waarbij gronddeeltjes worden meegevoerd, wordt ook onderloopsheid genoemd. In de feitelijke definitie is sprake van piping indien zich een doorgaand open kanaal heeft gevormd van intreepunt tot uittreepunt
Stijghoogte	Stijghoogte ten opzichte van een referentievlak.
Spreadingslengte	Lengtemaat die de verhouding tussen de horizontale transmissiviteit van de aquifer (product van horizontale doorlatendheids-coëfficiënt en dikte van de aquifer, kD -waarde) en de verticale hydraulische weerstand van de cohesieve laag (quotiënt van dikte van deklaag en verticale doorlatendheid, d/k) weergeeft.
Stijghoogte (in een punt in de grond)	Niveau tot waar het water zou stijgen in een peilbuis met filter ter plaatse van het punt, wordt uitgedrukt in meters waterkolom ten opzichte van een referentievlak.
Theoretische stijghoogte	Stijghoogte in de aquifer indien deze niet wordt begrensd door bijvoorbeeld het gewicht van de cohesieve deklaag.
Uittreepunt	Locatie waar kwelwater het eerst aan het oppervlak treedt.
Uittreeverhang	Verhang in het grondwater ter plaatse van het uittreepunt.
Verhang	Quotiënt van verschil in stijghoogte tussen twee punten en de afstand tussen die punten, wordt ook gradiënt genoemd.
Verval	Verskil in stijghoogte tussen twee punten, bijvoorbeeld de twee zijden van een waterkering.
Voorland	Terrein buitendijks, terrein tussen de dijk en de rivier, specifiek in relatie tot piping of terrein aansluitend aan de dijk, waar een aaneengesloten kleilaag voorkomt.
Waterover-/onderspanning	Verskil tussen de aanwezige waterspanning en de hydrostatische waterspanning.
Wel	Geconcentreerde uitstroming van kwelwater, bijvoorbeeld door een opbarstkanaal of een gat in de cohesieve deklaag.
Zandmeevoerende wel	Wel die zand meevoert uit de ondergrond.



Figuur 20: schematisatie van een waterkering met bijbehorende begrippen.

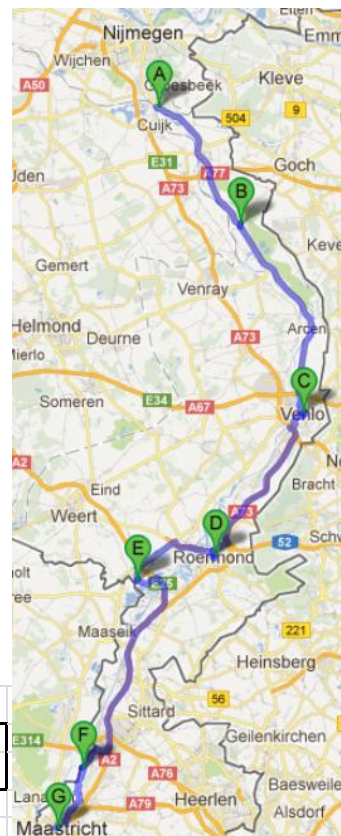
2 Symbolenlijst

ΔH_c	kritieke verval over de waterkering (m).
ΔH	Aanwezig verval (m).
L	Lengte van de kwelweg (m).
$d_{10, 50, 60, 70}$	10-, 50-, 60-, 70-percentielwaarde van de korrelverdeling (m).
d_{70m}	De gemiddelde 70-percentielwaarde van de korrelverdeling (m).
D	Dikte aquifer (m).
d	Lengte van het opbarstkanaal (m).
ϕ_{od}	Stijghoogte vanaf onderkant deklaag ter hoogte van het uittreepunt (m).
n	Porositeit in de zandlaag (-).
k_{intr}	Intrinsieke doorlatendheid van de zandlaag (m ²).
k	Doorlatendheid (m/s).
k_{gemm}	De gemiddelde doorlatendheid. Bepaald door middel van een gewogen gemiddelde van de doorlatendheid en de dikte van de zand- en grindlaag.
η	Sleepkrachtfactor (coëfficiënt van White) (-).
θ	Rolweerstandshoek (°).
C_0	Mate van pakking (-).
U	Deling d_{60} -waarde/ d_{10} -waarde.
C_{creep}	Creepfactor (-).
γ'_p	Het schijnbaar volumegewicht van zandkorrels onder water (kN/m ³).
γ_w	Het volumegewicht van water (kN/m ³).
γ_p	Het volumegewicht van het korrelmateriaal (kN/m ³).
γ_n	Veiligheidsfactor (-).
γ_b	Schematiseringsfactor (volgens TR Grondmechanisch schematiseren bij Dijken)(-).
h_{wsb}	Hoogte van de binnendijkse waterstand t.o.v. het maaiveld ten hoogte van het uittreepunt.

3 Boorgegevens

In deze bijlage is een overzicht van de boorgegevens langs de Maas in Limburg weergegeven.

- A** Mook
- B** Bergen, Limburg
- C** Venlo
- D** Roermond
- E** Thorn
- F** Aan de Maas, Geulle
- G** Maastricht



GRIND									
Maastricht - roer en overmaas									
Datum:		12-sep-12							
Uitgevoerd door:		MOS grondmechanica							
<div style="float: right; border: 1px solid black; padding: 2px;"> hoogste waarde per locatie gemiddelde waarde per locatie </div>									
nr	locatie	nummer	Dikte(m)	D10 (mm)	D50 (mm)	D60 (mm)	D70 (mm)	D60/D10 (zandfractie)	opmerking
1	-	MB1	2	0.5	14.369	20	25	4.93	zeer grof, onderste laag
2	-	MB2	2	0.03	2.819	5.8	10.8	5.37	zeer grof, onderste laag
3	-	MB3	1	0.06	10.763	18	28	9.26	zeer grof, onderste laag
4	-	MB5	1	0.045	10.425	17.5	25	7.37	zeer grof, onderste laag
5	-	MB6	1	0.063	8.955	13	18	5.97	zeer grof, onderste laag
6	-	MB8	1	0.43	13.714	18	26	3.86	zeer grof, onderste laag, onder deklaag
7	-	MB9	3	0.3	11.714	15	20	3.52	matig zandig, onderste laag, onder deklaag
8	-	MB11	2.3	0.18	8.946	16	23	3.94	matig grof, onderste laag, onder deklaag
9	-	MB13	4	0.062	6.98	10	13.5	5.98	matig grof, onderste laag, onder deklaag
gemiddelde	1 t/m 9	1.922222	0.185556	9.853889	14.81111	21.03333	5.57777778		
van mook tot thorn - peel en maasvallei									
Datum:		2-okt-12							
Uitgevoerd door:		inpijn-blokpoel ingenieursbureau							
nr	locatie	nummer	Dikte(m)	D10 (mm)	D50 (mm)	D60 (mm)	D70 (mm)	D60/D10 (zandfractie)	opmerking
1	mook	mm13	1.25	0.25	1.98	3	4.1	2.1	mengmoster, fijn grind tussen zandlagen
gemiddelde	1	1.25	0.25	1.98	3	4.1	2.1		
2	thorn	mm80	1.2	2	33	38	41	2.3	Onder zandlaag, grind fijn, sterk zandig
3	thorn	mm81	1.3	1	18.5	26	44	5.2	grind fijn, matig zandig
4	thorn	mm84	2	0.75	28	33	40	3.7	grind fijn, sterk zandig
5	thorn	mm86	2	0.31	18	22	32.5	3.3	grind fijn, sterk zandig
6	thorn	mm87	1.3	0.9	32	40	45	5.3	onderste grindlaag, grind fijn, matig steenhoudend
gemiddelde	2 t/m 6	1.56	0.992	25.9	31.8	40.5	3.96		
Lateraalkanaal roermond - roer en overmaas									
Datum:		22-okt-09							
Uitgevoerd door:		Fugro							
nr	boring nr	monster nr	Dikte(m)	D10 (mm)	D50 (mm)	D60 (mm)	D70 (mm)	D60/D10 (zandfractie)	opmerking
1	B105	6	0.5	0.08	1.766	10	17	-	onder zand, zeer grof sterk zandig
gemiddelde	1	0.5	0.08	1.766	10	17	-		
			Dikte(m)	D10 (mm)	D50 (mm)	D60 (mm)	D70 (mm)		
GEMIDDELDE TOTAAL			1.327407	0.419185	12.50663	18.87037	26.17778	4.76888889	

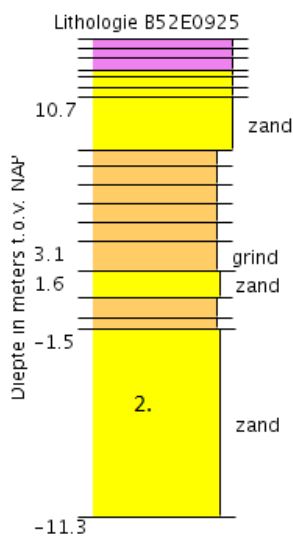
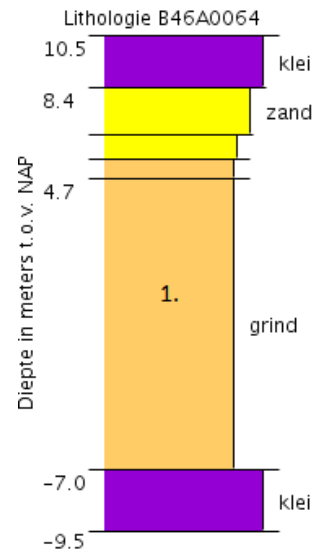
ZAND									laagste waarde per locatie	
									gemiddelde waarde per locatie	
Maastricht - roer en overmaas									waarde niet meegenomen in gemiddelde	
Datum:	12-sep-12									
Uitgevoerd door:	MOS grondmechanica									
nr	locatie	nummer	Dikte(m)	D10 (mm)	D50 (mm)	D60 (mm)	D70 (mm)	D60/D10 (zandfractie)	opmerking	
1	-	MB7	0.8	0.07	10.313	15	20	4.04	Uiterst grindig, onder deklaag boven grind	
2	-	MB10	0.8	0.01	0.04	0.05	0.57	1.84	Sterk siltig (75,3%)	
gemiddelde			0.8	0.01	0.04	0.05	0.57	1.84		
Geulle aan de Maas - roer en overmaas										
Datum:	18-jan-10									
Uitgevoerd door:	Grontmij									
nr	boring nr	monster nr	Dikte(m)	D10 (mm)	D50 (mm)	D60 (mm)	D70 (mm)	D60/D10 (zandfractie)	opmerking	
1	320.010Bh	Bt02.460	0.8	0.01	0.2	0.23	0.38	-	zeer grof matig grindig, onder deklaag boven grind	
2	320.08Bh	Bt1.970	0.5	0.005	0.36	0.39	0.42	-	zeer grof matig grindig, onder deklaag boven cohesievelaag daaronder grind	
3	320.11Bm	Kr2.585	0.5	0.0019	0.02	0.03	0.05	-	uiterstfijn vast kleiig, onder deklaag boven cohesievelaag daaronder grind	
gemiddelde			0.65	0.0075	0.28	0.31	0.4	-		
van mook tot thorn - peel en maasvallei										
Datum:	2-okt-12									
Uitgevoerd door:	inpijn-blokpoeel ingenieursbureau									
nr	locatie	nummer	Dikte(m)	D10 (mm)	D50 (mm)	D60 (mm)	D70 (mm)	D60/D10 (zandfractie)	opmerking	
1	mook	mm01	0.5	0.063	0.25	0.3	0.35	-	2.1 mengmonster	
2	mook	mm02	0.6	0.04	0.25	0.3	0.35	-	2.4 mengmonster, zand onder deklaag	
3	mook	mm03	0.4	0.18	0.255	0.3	0.35	-	1.7 mengmonster, zand boven grind	
4	mook	mm08	0.3	0.18	0.3	0.4	0.45	-	1.9 mengmonster, zand onder deklaag	
gemiddelde			0.45	0.11575	0.26375	0.325	0.375	2.025		
5	bergen	mm25	1	0.22	0.45	0.5	0.7	-	2 mengmonster, zand onder deklaag	
6	bergen	mm26	1	0.255	0.6	0.75	0.98	-	2.2 mengmonster, zand boven grind	
7	bergen	mm27	0.95	0.125	0.4	0.45	0.5	-	1.9 mengmonster, matig grof, onder deklaag	
8	bergen	mm28	0.9	0.25	0.6	0.8	1	-	2.2 mengmonster, matig grof, matig grindig	
9	bergen	mm29	2.1	0.4	1.5	3.8	7	-	4.4 mengmonster, matig grof, matig grindig	
gemiddelde			0.9625	0.2125	0.5125	0.625	0.795	2.075		
10	venlo	mm43	0.2	0.002	0.23	0.255	0.32	-	2.1 mengmonster, matig fijn, kleiig	
11	venlo	mm44	0.4	0.004	0.24	0.27	0.32	-	2.1 mengmonster, matig fijn, siltig	
12	venlo	mm39	0.45	0.125	0.4	0.45	0.48	-	1.7 mengmonster, onder deklaag, matig fijn, siltig	
13	venlo	mm47	1.2	0.004	0.255	0.31	0.38	-	2.3 mengmonster, onder deklaag, matig fijn	
14	venlo	mm48	0.7	0.16	1.4	2.8	3.9	-	2.2 mengmonster, matig grof, sterk grindig	
gemiddelde			0.5625	0.03375	0.28125	0.32125	0.375	2.08		
15	thorn	mm71	0.4	0.0015	0.375	0.43	0.505	-	2.6 onder deklaag, matig grof, siltig, grindig	
16	thorn	mm75	0.5	0.145	0.45	0.55	1.1	-	2.5 onder deklaag, matig fijn	
17	thorn	mm77	0.7	0.135	0.325	0.4	0.46	-	2.1 onder deklaag, matig grof, zwak grindig	
18	thorn	mm73	0.4	0.63	0.375	0.425	0.49	-	2.3 onder deklaag, matig grof, matig grindig	
19	thorn	mm79	1.1	0.21	0.48	0.75	2	-	2.3 mengmonster, onder deklaag boven dik grindpakket, matig grof, matig grindig	
gemiddelde			0.5	0.2555	0.358333	0.418333	0.485	2.36		
Lateraalkanaal roermond - roer en overmaas										
Datum:	22-okt-09									
Uitgevoerd door:	Fugro									
nr	boring nr	monster nr	Dikte(m)	D10 (mm)	D50 (mm)	D60 (mm)	D70 (mm)	D60/D10 (zandfractie)	opmerking	
1	B109	2	1.6	0.065	0.206	0.23	0.25	-	deklaag zand, matig grof, zwak grindig	
2	B110	2	0.7	0.05	0.143	0.18	0.2	-	deklaag zand, matig fijn, sterk siltig	
3	B110	13	0.5	0.03	0.174	0.185	0.193	-	onder cohesieve laag, matig fijn sterk siltig	
gemiddelde			1 t/m 3	0.933333	0.048333	0.174333	0.198333	0.214333		
			Dikte(m)	D10 (mm)	D50 (mm)	D60 (mm)	D70 (mm)			
GEMIDDELDE TOTAAL			0.676389	0.112222	0.311694	0.366319	0.440722	2.135		

4 Bodemprofielen⁵³

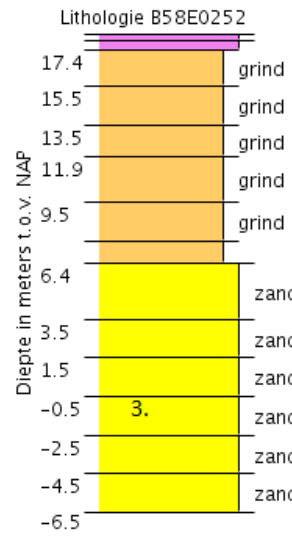
In deze bijlage is een overzicht van enkele bodemprofielen langs de gehele Maas in Limburg weergegeven.

Nr.	Plaats	Grind (m)	Zand (m)
1	Mook	8,5	2,9
2	Bergen	9,4	4,7
3	Venlo	11	-
4	Buggenum	7,9	-
5	Roermond	11,2	2,4
6	Maaseik	11,15	-
7	Sittard-Geleen	13,4	0,1
8	Maastricht	11,7	-

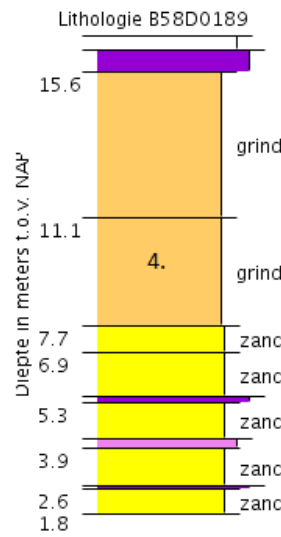
Figuur 21: Locatie bodemprofielen van Noord naar Zuid.



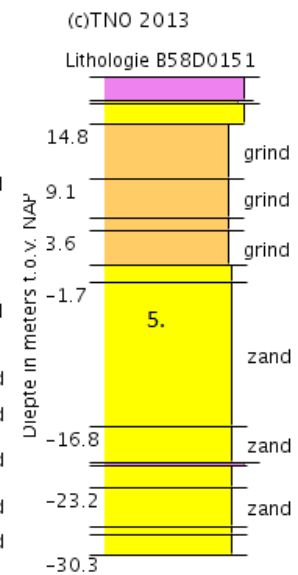
(c)TNO 2013



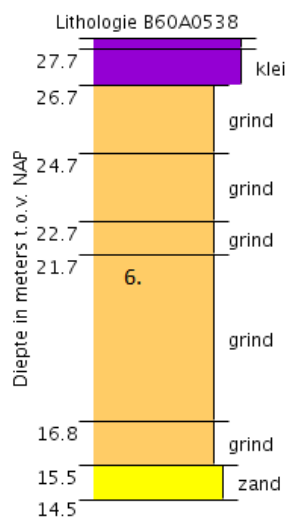
(c)TNO 2013



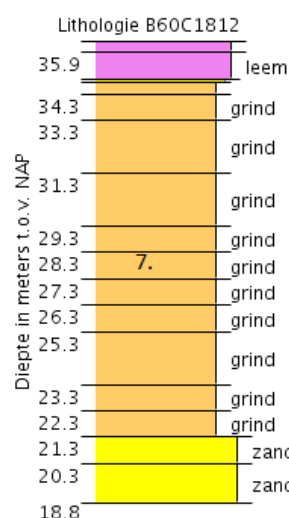
(c)TNO 2013



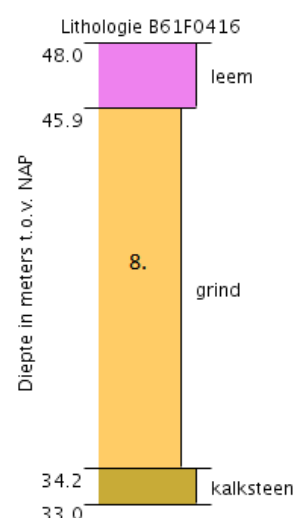
(c)TNO 2013



(c)TNO 2013



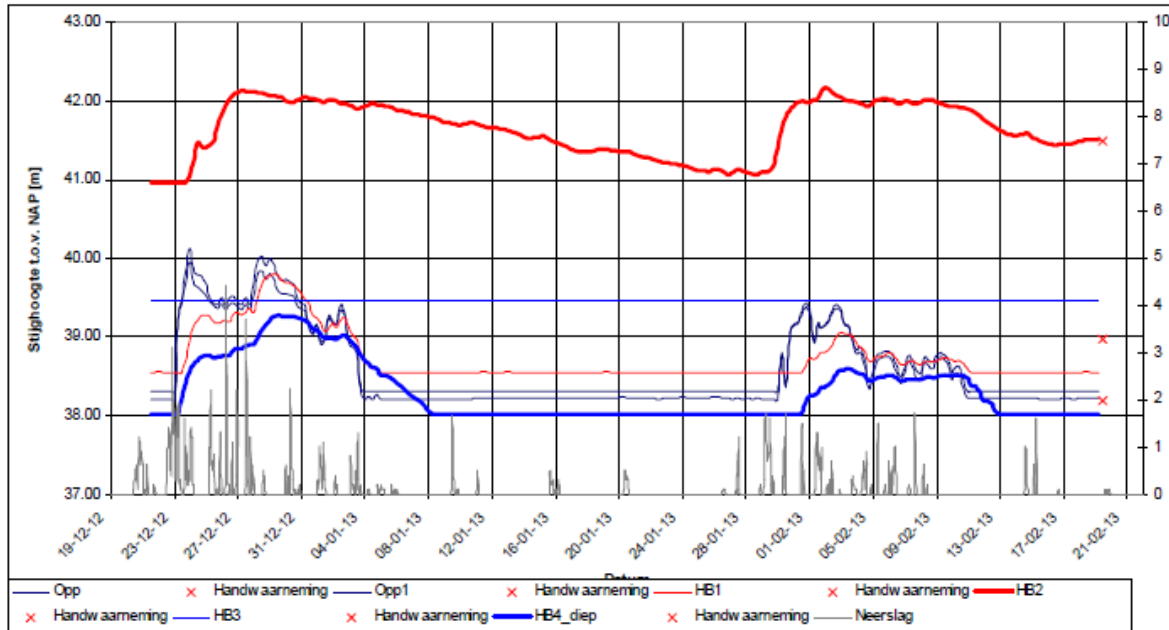
(c)TNO 2013



⁵³ www.dinoloket.nl/ondergrondgegevens, maart 2013

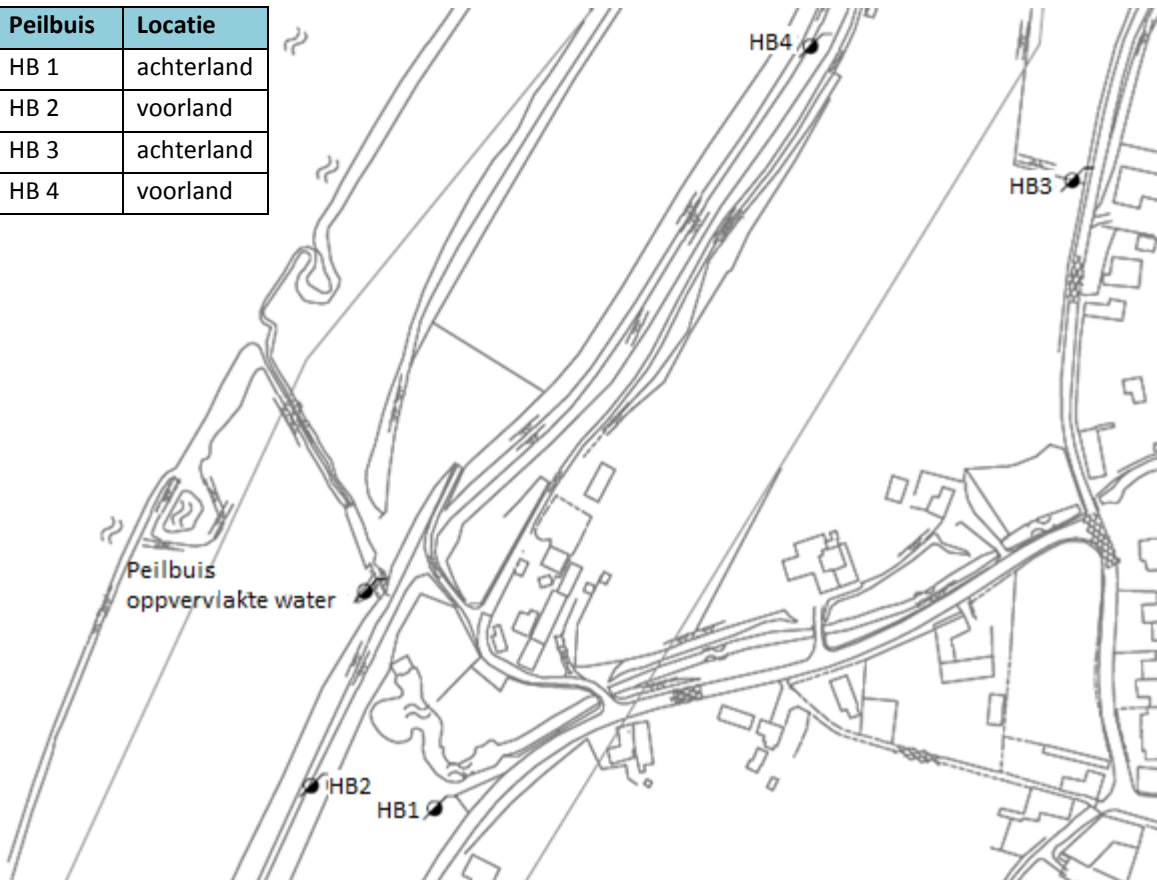
5 Stijghoogtegegevens

In deze bijlage zijn de stijghoogtegegevens weergegeven. Deze gegevens zijn afkomstig van: Fugro GeoServices B.V., grondwaterstandsmetingen betreffende - ondersteuning voorbereiding cluster E sluitstukkaden, opdrachtgever waterschap Roer en Overmaas.



Metingen Geulle a/d Maas

Peilbuis	Locatie
HB 1	achterland
HB 2	voorland
HB 3	achterland
HB 4	voorland



6 Invoerparameters

In deze bijlage zijn de invoerparameters voor de formules van Sellmeijer 1989 en 2006 en de modellen PlaxFlow en MSeep weergegeven.

In Tabel 6 zijn de invoerparameters voor de formules van Sellmeijer uit 1989 en 2006 weergegeven.

Parameter	Waarde	Eenheid	Verklaring	Norm
γ_p	17	kN/m ³	het schijnbaar volumegewicht van zandkorrels onder water	17
γ_w	9,81	kN/m ³	het volumegewicht van water	9,81
θ	41	°	rolweerstandshoek van de zandkorrels	41
L	19,5	m	lengte van de kwelweg (horizontaal gemeten)	-
k	varieert	m/s	doorlatendheid volgt uit de d-waarden van zand en grind	-
η	0,25	-	sleepkrachtfactor (coëfficiënt van White)	0,25
D	10	m	dikte van de aquifer	-
d	1	m	lengte opbarstkanaal/dikte deklaag	-
ΔH	2	m	werkelijk verval	-
γ_b	1,2	-	schematiseringsfactor	-
γ_n	1,2	-	veiligheidsfactor. Aan de hand van de normfrequentie: in de casus 1:250 ^{54,55}	1,2
C_{creep}	12	-	Creepfactor	-
d_{zand}	varieert	m	dikte van het zandpakket	-
D_{10zand}	0,18	mm	10-percentielwaarde van de korrelverdeling van het zand	-
D_{50zand}	0,25	mm	50-percentielwaarde van de korrelverdeling van het zand	-
D_{60zand}	0,30	mm	60-percentielwaarde van de korrelverdeling van het zand	-
D_{70zand}	0,35	mm	70-percentielwaarde van de korrelverdeling van het zand	-
$D_{70mzand}$	0,441	mm	de gemiddelde 70-percentielwaarde van de korrelverdeling van zand	-
C_{0zand}	12000	-	pakking, uitgaande van een middelmatige pakking. De mate van pakking is aan de hand van ervaring en richtlijnen bepaald. ⁵⁶	12000
k_{zand}	$3,585 \cdot 10^{-4}$	m/s	doorlatendheid, schatting op basis van korrelverdeling (d_{60}/d_{10})	-
d_{grind}	varieert	m	dikte van het grindpakket	-
$D_{10grind}$	0,42	mm	10-percentielwaarde van de korrelverdeling van het grind	-
$D_{50grind}$	12	mm	50-percentielwaarde van de korrelverdeling van het grind	-
$D_{60grind}$	18	mm	60-percentielwaarde van de korrelverdeling van het grind	-
$D_{70grind}$	26,18	mm	70-percentielwaarde van de korrelverdeling van het grind	-
$D_{70mgrind}$	26,18	mm	de gemiddelde 70-percentielwaarde van de korrelverdeling van grind	-
C_{0grind}	12000	-	pakking, uitgaande van een middelmatige pakking	12000
k_{grind}	$1,986 \cdot 10^{-3}$	m/s	stroomsnelheid, schatting op basis van korrelverdeling (d_{60}/d_{10})	-

Tabel 6: De invoerparameters gebruikt in de formules van Sellmeijer uit 1989 en 2011.

In Tabel 7 zijn de invoerparameters van het PlaxFlow-model weergegeven. Parameters die geen invloed hebben op het stromingsbeeld worden niet weergegeven. Deze parameters zijn genoemd in Tabel 9.

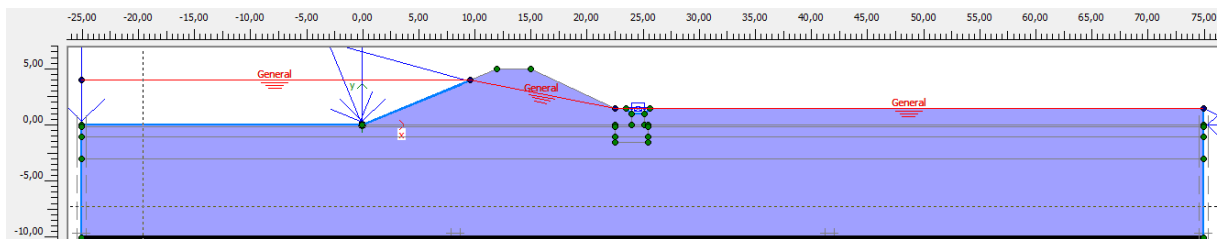
⁵⁴ Ministerie Verkeer en Waterstaat, (2007), *Hydraulische Randvoorwaarden primaire waterkeringen, voor de derde toets ronde 2006 - 2011*

⁵⁵ Velzen, E. van, et al., (2007), *Ontwerp belasting voor het rivierengebied*

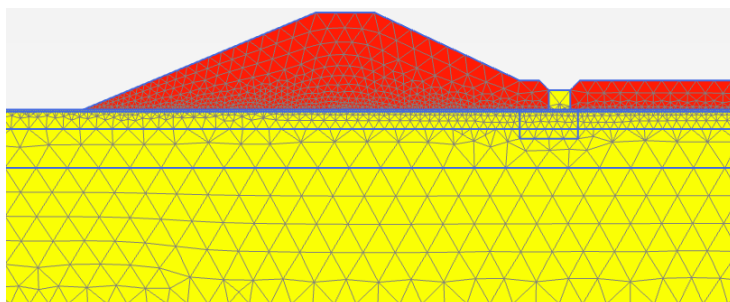
⁵⁶ Koster, I.W. , (2004), *Zandboek handboek*

Parameter	Waarde	Eenheid	Verklaring
versie	2012 build 7049	-	-
mesh	zie Figuur 23	-	het mesh is zo veel mogelijk verkleint onder de dijkbasis, het intreepunt en het uittreepunt.
boundary	zie Figuur 22	-	er wordt gebruik gemaakt van een gesloten grens aan de onderkant van het model. In de linker en rechter grens kan er vrije stroming plaats vinden.
limits	-25 m tot 75 m zie Figuur 24	-	bij deze grenzen is er net geen invloed te zien op het stromingsbeeld
Load	standard fixaties	-	er wordt van uitgegaan dat de grond niet meer zal vervormen.
d_{zand}	varieert	m	dikte van het zandpakket
γ_w	9,81	kN/m^3	Volumegewicht water
γ_{unsat}	17	kN/m^3	volumegewicht van het zand onverzadigd
γ_{sat}	19,5	kN/m^3	volumegewicht van het zand verzadigd
$k_{x,y}$	$3,585 \cdot 10^{-4}$	m/s	doorlatendheid, schatting op basis van korrelverdeling (d_{60}/d_{10})
d_{grind}	varieert	m	dikte van het grindpakket
γ_{unsat}	19	kN/m^3	volumegewicht van het grind onverzadigd
γ_{sat}	21	kN/m^3	volumegewicht van het grind verzadigd
$k_{x,y}$	$1,986 \cdot 10^{-3}$	m/s	doorlatendheid, schatting op basis van korrelverdeling (d_{60}/d_{10})
d_{dek}	varieert	m	dikte van de cohesieve deklaag
γ_{unsat}	18	kN/m^3	volumegewicht van de deklaag onverzadigd
γ_{sat}	19	kN/m^3	volumegewicht van de deklaag verzadigd
$k_{x,y}$	$7,22 \cdot 10^{-6}$	m/s	doorlatendheid, standaard waarde uit PlaxFlow

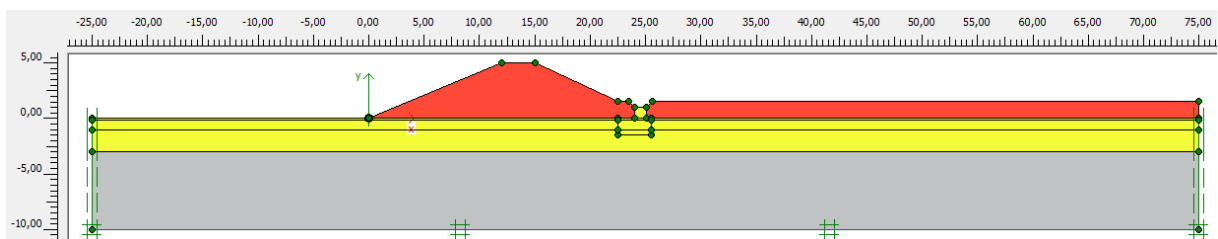
Tabel 7: De invoerparameters gebruikt in het PlaxFlow-model.



Figuur 22: De toegepaste boundaries in het PlaxFlow-model.



Figuur 23: Het toegepaste mesh in het PlaxFlow-model.

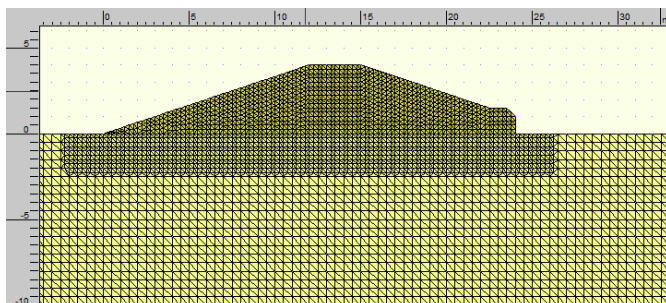


Figuur 24: Input overzicht en toegepaste limits in het PlaxFlow-model.

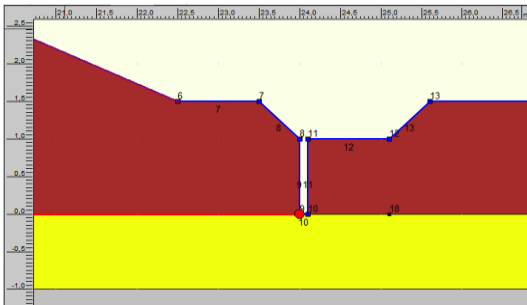
In Tabel 8 zijn de invoerparameters van het MSeep-model weergegeven.

Parameter	Waarde	Eenheid	Verklaring
versie	7.4 build 2.1	-	-
mesh	zie Figuur 25	-	het mesh is zo veel mogelijk verkleint onder de dijkbasis, het intreepunt en het uittreepunt
uittreepunt	zie Figuur 15	-	aangegeven met een rode stip
intreepunt	buitenteen	-	Intreepunt wordt gemodelleerd op de buitenteen van de dijk
boundary	zie Figuur 27	-	er wordt gebruik gemaakt van een gesloten grens aan de onderkant van het model. In de linker en rechter grens kan er vrije stroming plaats vinden.
limits	-25 m tot 75 m zie Figuur 28	-	bij deze grenzen is er net geen invloed te zien op het stromingsbeeld
γ_w	9,81	kN/m ³	Volumegewicht water
d_{zand}	varieert	m	dikte van het zandpakket
ϕ/η	0,4	-	porositeit
d_{70}	350	μm	70-percentielwaarde van de korrelverdeling
γ_{sat}	19,5	kN/m ³	volumegewicht van het zand verzadigd
θ	41	°	rolweerstandshoek
η	0,25	-	sleepkrachtfactor (coëfficiënt van White)
$k_{x,y}$	$3,585 \cdot 10^{-4}$	m/s	doorlatendheid, schatting op basis van korrelverdeling (d_{60}/d_{10})
d_{grind}	varieert	m	dikte van het grindpakket
ϕ/η	0,4	-	porositeit
d_{70}	26000	μm	70-percentielwaarde van de korrelverdeling
γ_{sat}	21	kN/m ³	volumegewicht van het zand verzadigd
θ	41	°	rolweerstandshoek
η	0,25	-	sleepkrachtfactor (coëfficiënt van White)
$k_{x,y}$	$1,986 \cdot 10^{-3}$	m/s	doorlatendheid, schatting op basis van korrelverdeling (d_{60}/d_{10})
d_{dek}	varieert	m	dikte van de cohesieve deklaag
ϕ/η	0,4	-	porositeit
d_{70}	10	μm	70-percentielwaarde van de korrelverdeling
γ_{sat}	19	kN/m ³	volumegewicht van het zand verzadigd
θ	41	°	rolweerstandshoek
η	0,25	-	sleepkrachtfactor (coëfficiënt van White)
$k_{x,y}$	$7,22 \cdot 10^{-6}$	m/s	doorlatendheid, standaard waarde uit PlaxFlow

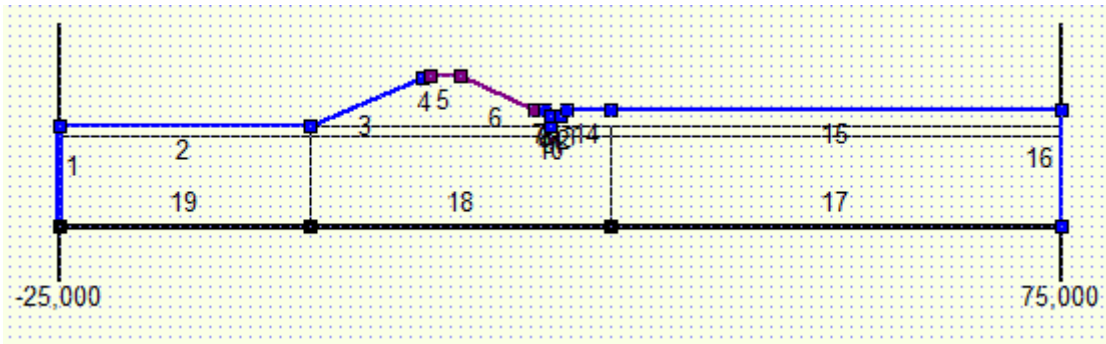
Tabel 8: De invoerparameters gebruikt in het MSeep-model.



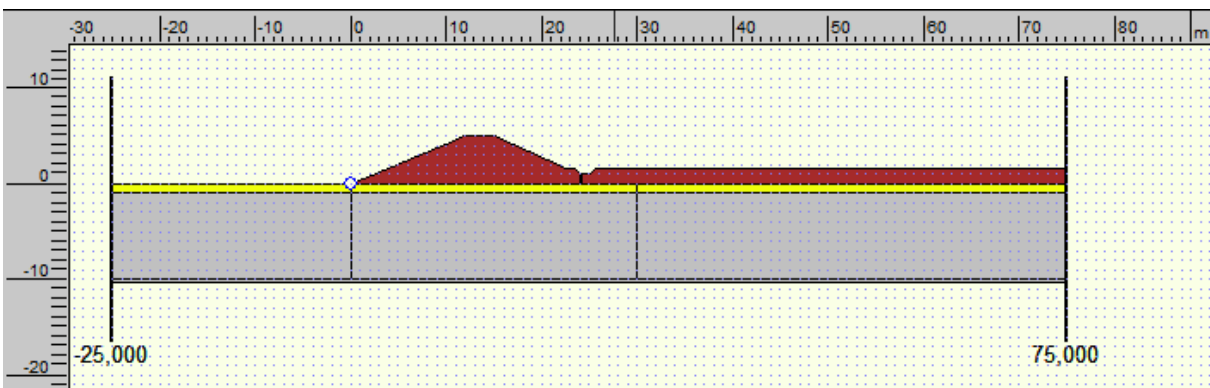
Figuur 25: Het toegepaste mesh in het MSeep-model.



Figuur 26: Visualisatie van het uittreepunt in het MSeep-model.



Figuur 27: De toegepaste boundaries in het MSeep-model.



Figuur 28: Input overzicht met toegepaste limits.

7 Modelparameters

In deze bijlage is de gevoeligheid van de modelparameters besproken. Er is ook een vergelijking gemaakt van de modellen PlaxFlow en MSeep. Tussen deze twee modellen is de grondwaterstroming vergeleken. De grondwaterstroming is in beide modellen gemodelleerd vanuit de wet van Darcy. Met deze wetenschap is er van uitgegaan de modellen hierin ook overeenkomen. Dit is in deze bijlage nader onderzocht.

7.1 Gevoeligheid modelparameters

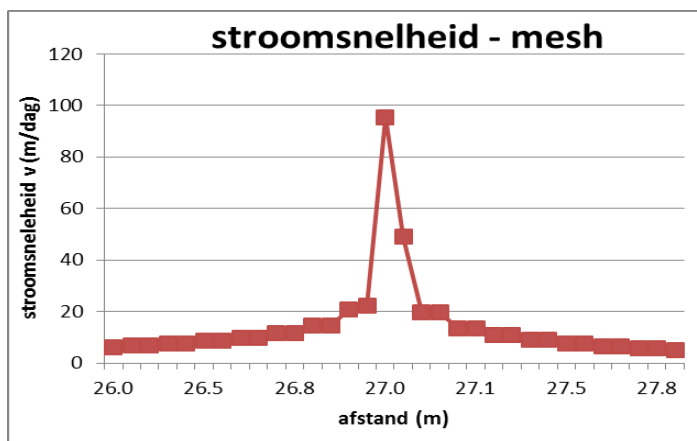
In deze paragraaf zijn alle gevoeligheden van de invoerparameters van de modellen PlaxFlow en MSeep besproken, zie Tabel 9. Hierin zijn alle parameters van de modellen meegenomen, dus ook de pipingspecifieke parameters. De invloed van onderstaande parameters dient goed bekeken te worden om foute resultaten te voorkomen.

Parameter	Beschrijving	Invloed
Algemeen		
γ_w	Volumegewicht water	In alle methodes en modellen uitgaan van $9,81 \text{ kN/m}^3$. Invloed: tot 10 cm in ΔH_c uitkomst (t.o.v. 10 kN/m^3).
k	Doorlatendheid	Is van grootte invloed op de stroming en de ΔH_c resultaten.
Ophogen dijk	-	Beperkte invloed op de stroming en de ΔH_c resultaten. Maximaal 5 cm.
PlaxFlow		
ϕ/η	Porositeit	Geen opmerkbare invloed op de stroming.
γ	Volumegewicht zand	Geen opmerkbare invloed op de stroming.
e_{init}	Initial void ratio	Geen opmerkbare invloed op de stroming.
Ψ_{unsat}	Suction height	Geen opmerkbare invloed op de stroming.
Korrelgrootte	Soil parameters	Geen opmerkbare invloed op de stroming.
Drainage type	-	Geen opmerkbare invloed op de stroming.
Mesh	Zie Figuur 29	Verfijnen van het mesh rond het uittreepunt is erg belangrijk. De stroomsnelheid is namelijk erg gevoelig rond dit punt. Er is een verschil in maximum stroomsnelheid waarneembaar bij het aanpassen van het mesh.
C_k	-	Geen opmerkbare invloed op de stroming
Limits	Grenzen van het model	Limits 50 m voor en 150 m achter de buitenteen geen opmerkbare invloed op de stroming. De limits zijn hierna verkleind om de rekentijd te verkorten. Bij de limits 25 m voor en 75 m achter de buitenteen hadden de limits net geen invloed meer.
MSeep		
d_{70}	70-percentielwaarde van de korrelverdeling	De korrelverdeling is van grootte invloed op de ΔH_c resultaten. Bij een andere korrelverdeling hoort ook een andere doorlatendheid. Deze doorlatendheid heeft invloed op de stroming.
ϕ/η	Porositeit	Grote invloed op het ΔH_c -resultaat maar niet op het stromingsbeeld. Bijvoorbeeld: $\eta=0,4$; $\Delta H_c = 2,663$ en $\eta=0,5$; $\Delta H_c = 3,193$.
Limits	Grenzen van het model	Limits 50 m voor en 150 m achter de buitenteen geen opmerkbare invloed op de stroming en de ΔH_c . De limits zijn hierna verkleind om de rekentijd te verkorten. Bij de limits 25 m voor en 75 m achter de buitenteen hadden de limits net geen invloed meer. Gesloten grenzen geen invloed.
Dijkontwerp	De vormgeving van het dijklichaam	Als de dijk wordt gemodelleerd als een rechthoek is ΔH_c vergroot met 0,14 m. MSeep geeft wel een 'freatic layer warning' doordat deze de stijghoogte niet goed kan berekenen.
Doorlatendheid dijklichaam	-	Als de dijk wordt gemodelleerd als een rechthoek en zeer ondoorlatend wordt gemaakt ($k = 1^{-E-12} \text{ m/s}$) wordt de ΔH_c vergroot met 0,17 m.

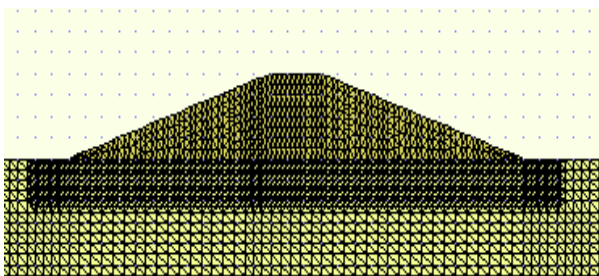
Mesh	Zie Figuur 30	Hoe fijner het mesh, hoe groter het kritiek verval wordt. Ook wordt de kritieke kwelweglengte nauwkeuriger berekend
k_{intri}	Intrinsieke doorlatendheid	Er wordt uitgegaan van de vaste waarde van $k_{intri} = k * 1,35$. In werkelijkheid is dit: $k_{intri} = k * 1,35576$. Dit heeft echter geen invloed
θ	Rolhoekweerstand. Zie Tabel 10.	Grote invloed op het ΔH_c –resultaat maar niet op het stromingsbeeld. In Tabel 10 is te zien dat een verhoging van de rolweerstandshoek met 4 graden het ΔH_c –resultaat verhoogd met 0,5 m.
γ_{sat}	Volumegewicht van het zand onder water. Zie Tabel 10.	Grote invloed op het ΔH_c –resultaat maar niet op het stromingsbeeld. In Tabel 10 is te zien dat een verhoging van het volumegewicht met 0,5 kN/m^3 het ΔH_c –resultaat verhoogd met 0,19 m.

Tabel 9: De gevoeligheid van de modelparameters uit MSeep en PlaxFlow.

Uit Tabel 9 is af te leiden dat er veel parameters invloed hebben op het faalmechanisme piping. Veel van deze parameters zijn moeilijk te bepalen, zoals de rolhoekweerstand en het volumegewicht van het zand onder water. Toch kunnen foute inschattingen grote gevolgen hebben voor het ΔH_c –resultaat.



Figuur 29: De gevoeligheid van het mesh gerelateerd aan de stroomsnelheid.



Figuur 30: Voorbeeld van het mesh in MSeep.

$\theta(^{\circ})$	ΔH_c (m)	γ_{sat} (kN/m^3)	ΔH_c (m)
37	3,168	19	3,474
41	3,666	19,5	3,666
44	4,075	20	3,855
45	4,221		

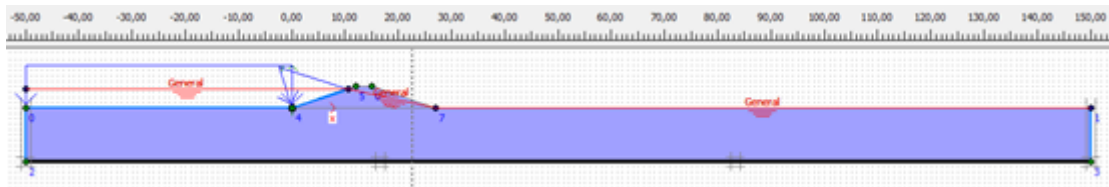
Tabel 10: De invloed van de rolhoekweerstand en het volumegewicht van het zand.

7.2 Model vergelijking

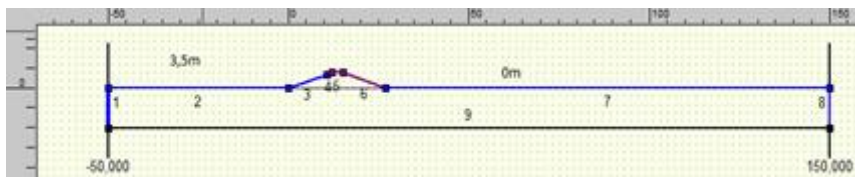
In deze paragraaf is de grondwaterstroming tussen de Eindige Elementen Methodes PlaxFlow en MSeep vergeleken. In Tabel 11 zijn de invoerparameters voor beide modellen weergegeven. Om de vergelijking tussen de twee programma's meer inzichtelijk te maken is er gekozen om de PlaxFlow resultaten een **licht oranje kleur** te geven en de MSeep resultaten een **licht blauwe kleur**.

PlaxFlow	Waarde	Eenheid	MSeep	Waarde	Eenheid
Kwelweglengte	27	m	Kwelweglengte	27	m
Hoogte dijk	4	m	Hoogte dijk	4	m
Talud	1:3	-	Talud	1:3	-
Limits	-50 tot 150	m	Limits	-50 tot 150	m
Buitenteen	0,0	x,y	Buitenteen	0,0	x,y
Dikte aquifer	10	m	Dikte aquifer	10	m
Mesh	Very fine	-	Mesh	7	cm
Boundary	Figuur 31	-	Boundary	Figuur 32	-
Zandeigenschappen			Zandeigenschappen		
Nat volumegewicht	17	kN/m ³	Doorlatendheid	0.0003585	m/s
Droog volumegewicht	15	kN/m ³	Natvolumegewicht	17	KN/m ³
Drainage type	Drained		Porositeit	0.4	-
< 2 um	4	%	D70	350	um
2 um - 50 um	4	%	Rolweerstandshoek	41	°
50 um - 2 mm	92	%	Constante van White	0.25	-
kx	30.98	m/dag	Klei-eigenschappen		
ky	30.98	m/dag	Doorlatendheid	7.21990 E-06	m/s
Klei-eigenschappen			Natvolumegewicht	19	KN/m ³
Nat volumegewicht	19	kN/m ³	Porositeit	0.4	-
Droog volumegewicht	19	kN/m ³	D70	10	um
Drainage type	Drained	-	Rolweerstandshoek	41	°
Soil type	Clay loam	-	Constante van White	0.25	-

Tabel 11: Invoerparameters voor de modelvergelijking tussen de modellen MSeep en PlaxFlow.



Figuur 31: Boundaries van het PlaxFlow-model.



Figuur 32: Boundaries van het MSeep-model.

Het MSeep- en PlaxFlow-model zijn vergeleken door de stroomsnelheid en de stijghoogte op twee plaatsen direct onder de dijk te analyseren namelijk:

- Direct onder het midden van de dijkbasis te bekijken. Er is hiervoor gekozen voor een lengte van twee meter ($x=12,5$ tot $x=14,5$). Zie Tabel 12.
- Direct onder het uittreepunt. Er is hier ook gekozen voor een lengte van twee meter ($x=26$ tot $x=28$). Zie Tabel 13.

MSeep		PlaxFlow			MSeep	PlaxFlow	
V (m/s)	i	V (m/s)	i	Vershil i	Stijghoogte (m)	Stijghoogte (m)	Vershil stijghoogte (m)
3.78E-05	0.11	3.76E-05	0.10	0.00	1.91	1.91	0.00
3.77E-05	0.11	3.76E-05	0.10	0.00	1.88	1.88	0.00
3.78E-05	0.11	3.76E-05	0.10	0.00	1.85	1.85	0.00
3.77E-05	0.11	3.75E-05	0.10	0.00	1.82	1.82	0.00
3.78E-05	0.11	3.75E-05	0.10	0.00	1.78	1.78	0.00
3.76E-05	0.10	3.75E-05	0.10	0.00	1.75	1.75	0.00
3.77E-05	0.11	3.75E-05	0.10	0.00	1.72	1.72	0.00
3.76E-05	0.10	3.74E-05	0.10	0.00			
3.77E-05	0.11	3.75E-05	0.10	0.00			
3.76E-05	0.10	3.74E-05	0.10	0.00			

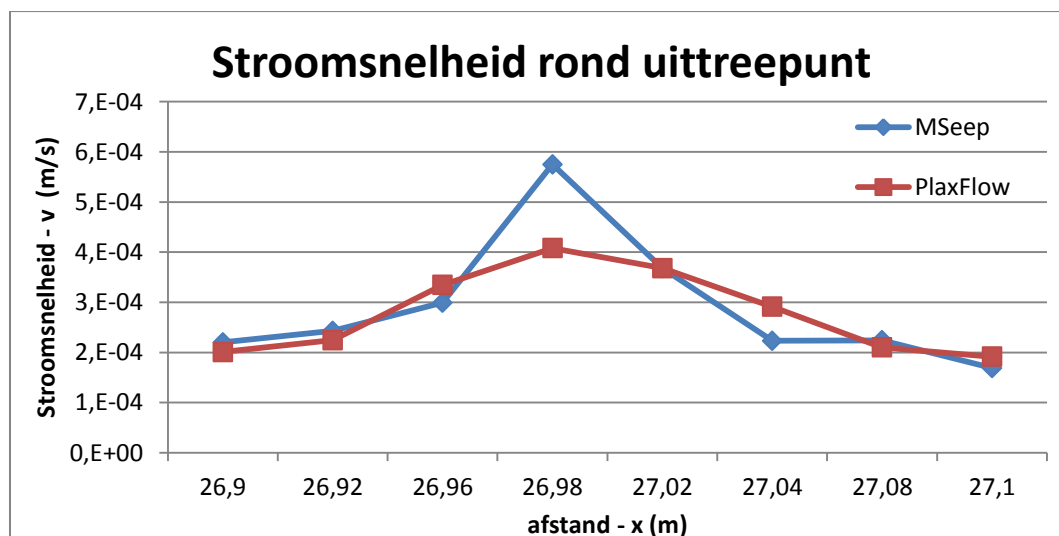
Tabel 12: De stroomsnelheid en de stijghoogte direct onder het midden van de dijk.

In Tabel 12 is te zien dat er direct onder het midden van de dijk geen verschil is in zowel de stroming als de stijghoogte tussen de twee modellen.

MSeep		PlaxFlow			MSeep	PlaxFlow	
V (m/s)	i	V (m/s)	i	Vershil i	Stijghoogte (m)	Stijghoogte (m)	Vershil stijghoogte (m)
8.61E-05	0.24	8.31E-05	0.23	0.01	0.33	0.34	0.01
9.56E-05	0.27	9.37E-05	0.26	0.01	0.26	0.27	0.01
1.19E-05	0.03	1.06E-04	0.30	-0.26	0.17	0.19	0.02
1.13E-04	0.32	1.28E-04	0.36	-0.04	0.00	0.00	0.00
2.43E-04	0.68	1.79E-04	0.50	0.18	0.00	0.00	0.00
1.46E-04	0.41	1.38E-04	0.39	0.02	0.00	0.00	0.00
9.14E-05	0.26	1.27E-04	0.35	-0.10	0.00	0.00	0.00
9.30E-05	0.26	8.89E-05	0.25	0.01			
6.90E-05	0.19	8.05E-05	0.22	-0.03			
6.96E-05	0.19	6.69E-05	0.19	0.01			

Tabel 13: De stroomsnelheid en de stijghoogte direct onder het uittreepunt.

In Tabel 13 is te zien dat er direct onder het uittreepunt nog verschillen aanwezig zijn tussen het MSeep- en PlaxFlow-model. Dit verschil is relatief klein als er rekening wordt gehouden met de gevoeligheid van het mesh. De gevoeligheid van het mesh is ook besproken in de vorige paragraaf 7.1. Deze gevoeligheid houdt in dat kleine verschillen in x-richting resulteren in grote verschillen in de stroomsnelheid. Zie ook Figuur 33.



Figuur 33: De stroomsnelheid direct onder het uittreepunt in het MSeep- en PlaxFlow-model.

Aan de hand van bovenstaande resultaten kan geconcludeerd worden dat er geen verschil aanwezig is tussen de modellen MSeep en PlaxFlow betreffend het grondwaterstromingsbeeld op de aangewezen punten. Uit PlaxFlow worden er per afstand in x-richting, meer waarden verkregen waardoor er onder andere beter gekeken kan worden naar de uittreepunt. Hierdoor zijn de stroomsnelheden en stijghoogtes voor het grootste deel in PlaxFlow bepaald.

8 Interviews

De volgende specialisten zijn geïnterviewd:

- V. van Beek, Deltares, betrokken bij SBW-piping en proeven bij de IJkdijk, Delft, 18-2-2013
- A. Bezuijen, Deltares/Universiteit Gent, betrokken geweest bij het SBW-piping onderzoek van V. van Beek en nu bij het promotie onderzoek van Kristine van den Boer, Gent, 18-3-2013
- K. van den Boer, Universiteit Gent, promotie onderzoek naar start van de pipe, Gent, 18-3-2013
- J. Blinde, Deltares, betrokken bij VNK en SBW-piping, Delft, 25-3-13
- U. Förster, Deltares, projectleider SBW-piping, Delft, 25-3-13

Eerst zal het interview met V. van Beek worden weergegeven. Daarna het interview met A. Bezuijen en K. van den Boer. Afsluitend is het interview met J. Blinde en U. Förster weergegeven.

Notulen interview

Datum: 18-2-2013

Plaats: Deltares, Delft

Betrokkenen: V. van Beek (V)

T. de Wit (A)

F. Gerritsen (A)

(A) Bent u betrokken geweest bij verschillende onderzoeken betreffende het faalmechanisme piping zoals: VNK (veiligheid Nederland in kaart), SBW-piping (sterkte en belastingen waterkeringen) en IJkdijk proeven om de nieuwe rekenregel van Sellmeijer te valideren?

(V) Ik ben niet zozeer betrokken bij VNK, Jan Blinde is degene binnen Deltares die daarbij betrokken is. Ulrich Förster is projectleider van SBW-piping en is ook wat minder betrokken bij VNK.

Zelf ben ik vooral betrokken bij SBW-piping en proeven bij de IJkdijk.

(A) Wij hebben gezien dat de formule van Sellmeijer (1989) een aantal keer is aangepast, waarom is dit gedaan?

(V) In 2006 is er een kleine wijziging aangebracht. Toen is de formule geïmplementeerd in het programma MSeep. Daarvoor was het gewoon de regel en de analytische afleiding daarachter.

De regel zelf heeft een analytische basis, maar is uiteindelijk ook een fit. Deze is niet gebaseerd op eindige elementen sommen. Nu is de rekenregel gefit op berekeningen met MSeep, zodat uitkomsten met de regel overeenkomen met uitkomsten van MSeep.

Sellmeijer is begonnen met een regel op basis van een 4 krachten evenwicht op de korrels.

Zwaartekracht, sleepkracht langs de korrel en verschil gradiënt van de stroming nam hij ook mee.

Omdat de gradiënt op het grensvlak van grond en water niet zo'n grote rol speelt, is dat omgezet naar een 2 krachten evenwicht en dat is de implementatie in MSeep. Alleen zwaartekracht en sleepkracht worden daarin meegenomen. Krachten veroorzaakt door verschil in gradiënt worden verwaarloosbaar beschouwd.

(A) De formule van Sellmeijer uit 2011 is gevalideerd op een tweelaagssysteem van zandpakketten met een verschillende d_{70} waarde. Er wordt hierbij een doorlatende onderlaag gebruikt met grof zand. Zou deze formule ook goed bruikbaar zijn voor een grindpakket met daarboven een zandpakket (situatie van onze casus)?

(V) Het is natuurlijk altijd de vraag in hoeverre je onderzoek kunt extrapoleren naar andere zandsoorten. Als je kijkt naar de theorie van de regel Sellmeijer voor een meelagensysteem, wordt er een pipe verondersteld waarbij gekeken wordt naar het evenwicht van de korrels op de bodem van dat pipe. De kracht op de korrels bepaald het evenwicht van de korrels op de bodem van de pipe. De kracht op de korrels wordt weer bepaald door de stroming in pipe doordat er water naar de pipe toe stroomt. De situatie in jullie casus is een ongunstige situatie omdat er veel water door de grindlaag naar de zandlaag kan stromen door de hoge doorlatendheid (de belasting). Als je kijkt naar wanneer de korrels worden meegenomen speelt de korrelgrootte van de zandlaag een rol omdat hierin de korrels gaan rollen, dus dat bepaald de sterkte.

Zolang de stroming laminair is in het grindpakket, kun je er mee rekenen. Maar dan zou ik niet met de regel rekenen, want die is gemaakt voor één laag, maar dan zou ik met MSeep rekenen. Hierin kun je goed 2 lagen dimensioneren.

(A) Maakt het niet uit dat het niet gevalideerd is op een grove grindlaag?

(V) Nee, er zitten een paar basis aannames in. Een daarvan is dat de stroming laminair moet zijn, dus daar zouden jullie op moeten letten.

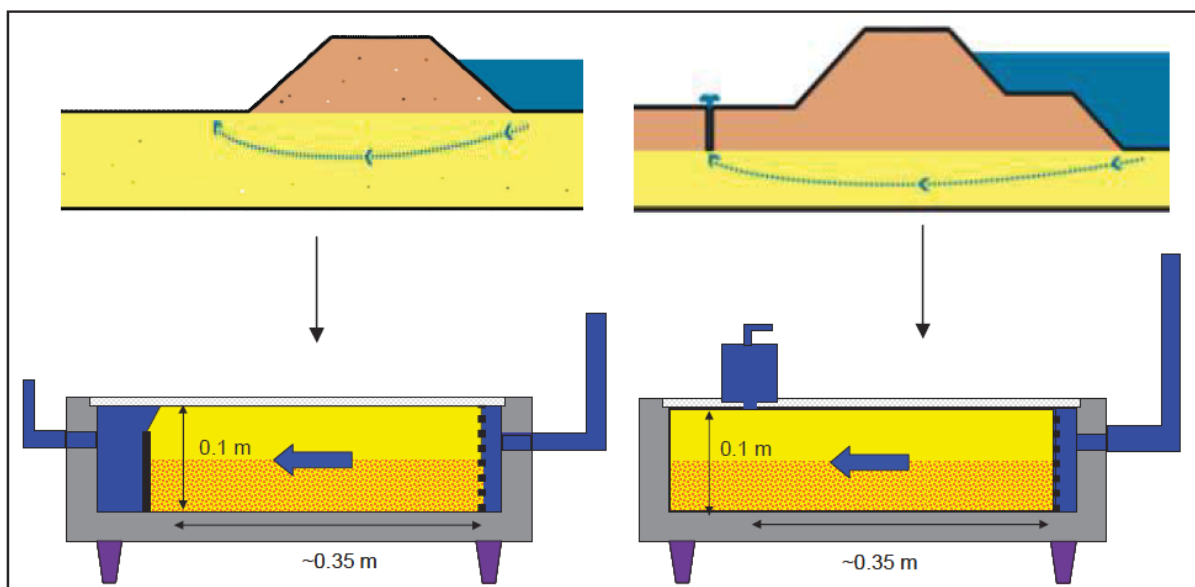
(A) Wij weten nog niet welke d_{70} waarde wij hebben in onze casus, dus weten we nog niet welke doorlatendheid onze ondergrond heeft.

(V) Misschien zijn er doorlatendheid gegevens of pompproeven. Deze geven nog een betere indicatie dan de korrelgrootte. Voor de grindlaag is vooral de doorlatendheid van belang. Voor de fijne zandlaag is het wel belangrijk de d_{70} te kennen.

Er is een onderzoek China uitgevoerd en die is misschien interessant. Hierbij zijn proeven uitgevoerd met een grove onderlaag en zand. Bij de proeven die Deltares heeft uitgevoerd is een minder grove onderlaag gebruikt. Ook is de laagdikte van fijn en grof zand enigszins gelijk gehouden. In China is er een zeer dunne toplaag toegepast. Omdat in jullie casus de zandlaag dun is, zal sneller piping optreden, omdat de te overbruggen afstand door de zandlaag dus klein is.

Maar wat er in die situatie ook kan gebeuren, bij hoog contrast in doorlatendheid van de lagen en zeer dunne toplaag is dat de verticale stroming gradiënten groter worden dan 1. Hierdoor fluidiseert de toplaag wat te vergelijken is met Heave. Dit proces wordt "Deep seated piping" genoemd. Dan is Sellmeijer niet geldig omdat het een ander proces is. Hierover is nog niet veel beschreven.

(A) Zouden er eventueel dezelfde proeven uitgevoerd kunnen worden als bij de ontwikkeling van de nieuwe rekenregel van Sellmeijer (zie Figuur 34) maar dan met een onderlaag van grind?



Figuur 34: Schematisatie van de small-scale proefopstelling.

(V) Lastige bij kleine schaalproeven in combinatie met grind is het schaaffect. Bij een kleine schaal krijg je grotere kritieke gradiënten dan in het veld. De hoge gradient benodigd om piping te veroorzaken kan lastig zijn bij proeven op grind, omdat de stroomsnelheden in het pakket dan erg groot worden en de stroming turbulent kan worden.

(A) Is de nieuwe formule van Sellmeijer er al doorheen?

(V) Nee, mensen hebben er al wel vertrouwen in, maar er staat nog veel te gebeuren (nieuwe ontwikkelingen). Het nieuwe Technisch Rapport is daarom aangenomen als onderzoeksrapport.

(A) Als het conceptrapport zand meevoerende wellen goedgekeurd is, is de regel er dan doorheen?

(V) Ik weet niet of dat gebeurt. De consequenties van de aanpassing zijn heel groot.

Niet alleen de invloed van d_{70} wat uit proeven volgde, maar ook de lengte effect. Als de dijkkring groter is wordt de kans ook groter dat er ergens een zwakke schakel inzit. Ook zijn de veiligheidsfactoren aangepast. Het oude rapport was nog van voor de formule geïmplementeerd

werd in MSeep. Dus dat rapport is nog gebaseerd op 4 krachten evenwicht, terwijl het nu een 2 krachten evenwicht is.

(A) Zullen de dijken met de nieuwe rekenregel slechter uitvallen?

(V) Ja, maar er zijn nog aspecten die nu nog niet in de regel zitten die wel wat hoop bieden. Als je kijkt naar de studie van VNK, zijn de parameters vrij conservatief gekozen. De schematisatie laat maar een beperkte variatie in grondopbouw toe, de grondwaterstroming wordt stationair verondersteld en daardoor komen er hoge faalkansen uit.

Kun je nu de intree weerstand netjes meenemen evenals de berging van water en kun je de ondergrond goed in kaart brengen, dan komen er weer andere kansen uit, omdat deze parameters zoveel invloed hebben op het piping proces. Dus het onderzoek is nog niet klaar, er komen ook nog zeker veranderingen. Heterogeniteit, dus correct meenemen van grondwater stroming en variatie d70, samen met de tijdsafhankelijkheid zie ik als grote winstpakkers.

(A) Er komen dus nog veranderingen op de formule van Sellmeijer?

(V) Ja, ook afgezien van heterogeniteit en tijdsafhankelijkheid. De aangepaste rekenregel is gebaseerd op een multivariate analyse. We hebben een aantal soorten zand beproefd en daar kwam een bepaalde invloed uit van de parameters. Want als je ander zand kiest, veranderd ook de korrelgrootte, doorlatendheid, uniformiteitscoëfficiënt en de hoekigheid enz. Met de multivariate analyse is dit gescheiden en op die manier opgenomen in de nieuwe rekenregel. Dit is empirische aanpassing, terwijl het model en theoretische oorsprong heeft. Het is belangrijk om uit te vinden waarom die aanpassingen nodig zijn.

(A) Welke parameters hebben de meeste invloed op de aangepaste formule van Sellmeijer? Voor de formule, van toepassing op een éénlaagsysteem, was de D70-waarde van grote invloed op de uitkomst.

(V) De d70 was eerst lineair afhankelijk van het kritiek verhang. In de nieuwe formule is de invloed verkleind naar factor 0.4. Maar als je grover zand hebt krijg je toch een lager kritiek verhang, omdat de doorlatendheid ook groter wordt.

(A) Welke andere parameters hebben invloed?

(V) Relatieve dichtheid, Korrelvorm en Uniformiteitscoëfficiënt. Deze parameters hadden een wat kleinere invloed en er is daarom besloten om deze parameters niet mee te nemen in de nieuwe formule.

(A) Wij zijn van plan om een model op te stellen met het programma MSeep in combinatie met PlaxFlow. Dit omdat wij de voordelen van de programma's optimaal willen benutten. Heeft u ervaring met PlaxFlow en ziet u een combinatie van deze twee programma's slagen?

(V) De implementatie van het model in de EEM is heel ingewikkeld.

MSeep kan goed gebruikt worden om een stationaire situatie na te rekenen, maar het is niet mogelijk om instationair te rekenen. Dat kan wel in PlaxFlow, maar in PlaxFlow is het model niet geïmplementeerd. Dus om een inzicht te krijgen is een vergelijking van de programma's PlaxFlow en MSeep wel een goede mogelijkheid.

(A) Komt er na de nieuwe formule van Sellmeijer nog een aangepaste versie van het programma MSeep.

(V) John van Esch heeft een nieuw programma ontwikkeld, waarin wel instationair gerekend kan worden, maar dit model is nog niet gevalideerd, dus er wordt aan gewerkt.

(A) Hebben de parameters intree- en uitreeweerstand en snelheid veel invloed op piping?

(V) Ja, maar deze zijn niet meegenomen in de formule. Volgens het VTV (toets voorschrift) mag je, als je niks over het voorland weet, daar ook niks over meenemen.

Jan Blinde heeft de invloed van het voorland beschouwd. Als er weerstand in het voorland zit, is dit voordelig te benutten, omdat het de reductie van het drukval teweegbrengt en bovendien voor extra kwelweglengte zorgt. Het uittreepunt is van invloed, wel afhankelijk van de vorm. Is dit punt bijvoorbeeld groot of klein. Er moet wel een pipe gevormd worden wil de formule gelden, want deze veronderstelt een pipe. Als het water vrij kan uitstromen zal er niet zo snel een well ontstaan. Bij een hele geconcentreerde stroming zal snel een pipe starten, maar voor de doorgroei maakt het niet zoveel uit. Er is altijd een bepaalde stroming naar de pipe toe en dat water kan in principe altijd wel afgevoerd worden. Alleen bij grindlagen gaat het natuurlijk om heel wat meer water, dus dan is de invloed op piping misschien hoger. De ervaring met uittreepunt is dat het belangrijk is voor het starten, maar in mindere mate voor het doorgroeien van de pipe.

(A) Het begin van een pipe staat dus los van Sellmeijer?

(V) Ja, het begin van de pipe is een ander mechanisme. Er moet eerst een groepje zandkorrels in beweging komen, maar dit is voor de praktijk minder interessant, omdat er hele specifieke gegevens nodig zijn. Maar het geeft wel een beeld als je afstroming hebt verder de polder in, neemt de concentratie bij de teen af, dus start een pipe minder snel. Dit geeft een indicatie voor de praktijk. Bij hoog water worden er vaak wellen gezien. Maar als dit geconcentreerde punten zijn is het kritiek verval mogelijk nog niet bereikt. Maar als dit voorkomt bij het eerste plaatje van figuur 2, is het waarnemen van een zandmeevoerende well erger dan het tweede plaatje omdat je dan waarschijnlijk dichterbij het kritieke verval zit.

(A) Dus het is niet alleen het verhang, ΔH , maar ook de concentratie van de stroming die er toe doet?

(V) Ja, de grondwaterstroming is de motor en als die stroming geconcentreerd is er daar sneller activiteit dan wanneer het verspreid wordt over een groot gebied. Als alles door een klein gaatje moet worden de druk hoger en gaat het sneller zand meenemen.

Dit zijn meer praktische aspecten waarmee in het veld rekening mee kan worden gehouden.

Niet iedere zand meevoerende well is een gevaar, het ligt er ook aan waar deze zit. Bijvoorbeeld aan de teen van een dijk of verder in het achterland.

(A) Reageren dijken waar geen water tegenaan staat anders dan dijken waar wel water tegenaan staat?

(V) Ja, waarschijnlijk is er meer berging en dat heeft ook te maken met het tijdsafhankelijke principe

Notulen interview

Datum: 25-3-13
Locatie: Deltares, stieltjesweg
Aanwezigen: Jan Blinde (**JB.**)
Ulrich Förster (**UF.**)
Frank Gerritsen, afstudeerder (**A.**)
Tom de Wit, afstudeerder (**A.**)
Doel: Interview naar het risico op piping bij een tweelaagssysteem van zand en grind

A. Introductie van het afstudeeronderzoek en de hoofdvraag: *Wat is het risico op piping in een tweelaagssysteem met een bodemopbouw bestaande uit grind met daarop een dunne zandlaag en een cohesieve deklaag?*

JB. Waaruit bestaat de deklaag? Er zijn namelijk ook löss-gebieden in Limburg.

A. We zijn geen löss lagen tegen gekomen. Wij hebben boorgegevens langs de gehele Maas. Deze laten geen löss zien maar alleen klei en leem.

JB. Er is dus echt een goede scheiding aanwezig tussen de deklaag en het zand? Bij VNK heb ik boringen gezien met een deklaag van löss en dan een diffuse overgang naar het zand. Er is dus een hele geleidelijke overgang. Hierbij is geen harde duidelijke scheiding aanwezig.

A. Wij zien in de boringen toch wel een scheiding. Wij zien in de boringen wel dat er ook grind in de zandlaag aanwezig is. Bij een dunnere zandlaag bestaat deze dan ook voor een groot deel uit grind. Bij een dikkere zandlaag is te zien dat hier echt fijn zand aanwezig is.

JB. Hebben jullie ook foto's gezien van de boorkernen? De benamingen zand, klei, grind enz. worden namelijk gegeven als de gemiddelde waarde boven een bepaalde korrelgrootte komen. Dit hoeft niet te betekenen dat de hele laag dan uit bijvoorbeeld zand bestaat.

A. Wij hebben van alle boorgegeven korrelverdelingen. Hierin is wel de verdeling te zien in de zand-, klei-, leem- of grindlaag. De overgang tussen zand en grind is natuurlijk nooit strak. Hier zagen wij bijvoorbeeld ook grind in de zandlaag.

A. Bij welke onderzoeken zijn jullie betrokken op het gebied van piping (op een tweelaagssysteem)?

UF. Wij bekijken nu pas ook experimenteel naar het tweelagensysteem. Voorheen hebben wij alleen een hervalidatie van de formule van Sellmeijer gemaakt door middel van laboratoriumproeven in ideale omstandigheden, een homogeen zandpakket met als kleilaag een plexiglasplaat en de Sellmeijer formule (2011) hierop gefit. Er zijn dus geen proeven gemaakt met grondgesteldheden uit het veld. Vanaf dit jaar gaan we de komende twee jaar versterkt kijken naar de invloed van verticale en horizontale heterogeniteit. Tot nu toe hebben we in bureaustudies met MSeep gekeken naar de invloed van de aanwezigheid van cohesieve lagen en grindpakketten. Ook is er gekeken welke invloed de ligging van het zand of grindpakket heeft, in het voorland of onder de dijk. Omdat er in de formule van een ideale situatie wordt uitgegaan kunnen bij de aanwezigheid van grove zand- of grindlazen er ook vaak veel gunstigere of juist ongunstigere resultaten uitkomen.

JB. Voor VNK is er een model ontwikkeld met de oude formule van Sellmeijer(1989, 2006) waarbij het mogelijk is om met meerdere lagen piping uit te rekenen. Dit is gedaan doormiddel van een neurale netwerk. Hierin zijn verschillende parameters gevarieerd. Met deze (40.000) gegevens is het model gemaakt. In de formule van Sellmeijer wordt er uitgegaan van alleen horizontale stroming in de pipe. In de situatie met grind kan deze eigenlijk al niet gebruikt worden omdat er ook verticale

stroming aanwezig is. In werkelijkheid is er horizontale stroming in de pipe maar ook stroming naar de pipe toe. Hier wordt bij de formule Sellmeijer geen rekening meer gehouden. In het numerieke model dat in MSeep zit kan dit wel worden meegenomen.

A. Wij hebben na het interview met Vera van Beek een licentie van MSeep gekregen met de nieuwste versie van de formule van Sellmeijer (2011).

JB. Dit is in principe nog een bèta-versie maar goed dat jullie die hebben gekregen.

A. Er is een gewogen gemiddelde genomen van de doorlatendheid bij de simpele berekeningen in Excell. Is dit gewogen gemiddelde een realistische benadering?

JB. Het grindpakket zal hierdoor hard aan het gemiddelde werken. Hierdoor krijg je bij je kleine zandlaag bijna de volledige doorlatendheid van het grind. Hierdoor zal je het gevaar voor piping waarschijnlijk heel erg overschatten. Dit komt ook omdat je bij een kleine zandlaag een stroming hebt die bijna verticaal omhoog is. Hierdoor krijg je een andere situatie. Het is niet mogelijk om het op een betere manier te doen dan via een gewogen gemiddelde in een eenvoudige berekening. Tegen dit probleem lopen wij constant aan. Daarom nemen wij bij dunne lagen die uitkomst maar aan. Hierdoor is er in ieder geval een veilige benadering.

A. Wat gebeurt er als er verticale stroming optreedt? Wij begrepen dat er dan een anders soort mechanisme is werking treedt, namelijk een soort heave. Dit is in een onderzoek in China ook deep-seated piping genoemd.

JB. Dit onderzoek is nog niet gedaan en daarom valt er ook nog niet veel concreets over te zeggen.

UF. Een soort situatie als deep-seated piping is hier niet onderzocht omdat deze situatie zich niet echt veel voordoet in Nederland. Ik heb dit artikel een paar jaar geleden gezien en kan mij er verder niet veel van herinneren. Wij hebben laboratoriumproeven en ijkdijkproeven gedaan met een verticaal geotextiel. Hierbij was, vooral bij de kleinschalige proeven, over de inbouwdiepte van het geotextiel een verticale gradiënt van vier. Dit is niet realistisch. Dit betekent dat we ervan uitgaan dat het zand direct onder de pipe door de stroming een veel kleinere dichtheid krijgt dus veel doorlatender wordt. Dit moeten wij met een verdere analyse van de proeven nog checken. Deze heave situatie onder de pipe heeft dus wel invloed.

JB. Het onderzoek naar deze situatie is nog heel erg in zijn beginfase waardoor jullie er ook nog niet veel mee kunnen. Als je kijkt wat verder beschikbaar en toepasbaar is kun je met MSeep de GWS modelleren en de stroming in de pipe (redelijk goed). De andere dingen zijn nog erg experimenteel. Om dit te onderzoeken is nog zeker 2 jaar onderzoek nodig. Zoals jullie het nu aanpakken lijkt mij een goede aanpak (de vergelijking tussen PlaxFlow en MSeep). In principe moet de grondwaterstroming in alle twee de modellen gelijk zijn. Alleen de stroming in de pipe kan alleen met MSeep worden berekend. PlaxFlow heeft als voordeel dat je tijdsafhankelijk kan rekenen en daardoor een berging mee kan nemen. Door dit eerst in PlaxFlow te bepalen kun je het MSeep-model daarmee fine-tunen. Hierdoor kun je goed je model optimaliseren.

A. In onze situatie stroomt er ook grondwater vanuit het achterland naar de Maas toe. Wat is de invloed hiervan?

JB. Ik weet niet zeker of je dit in MSeep kan meenemen. Ik denk dat deze extra toestroming alleen effect heeft in de tijd. Het stijghoogte zal hierdoor sneller toenemen in de tijd. De stroming vanuit het achterland remt niet de stroming vanuit het voorland. Deze twee stromingen beïnvloeden elkaar

dus alleen tijdsafhankelijk. Die tijdsafhankelijkheid kun je in PlaxFlow wel meenemen maar of dit voor een advies uitmaakt weet ik niet want dan kies je voor de ongunstigste situatie.

A. In onze situatie snijdt de Maas het grindpakket aan. Welke invloed heeft dit op de intreeweerstand?

JB. Er is altijd sprake van intreeweerstand. Het is alleen de vraag hoeveel.

UF. De intreeweerstand kan in de loop van de tijd veranderen. Als het rustig water is kan het sediment tussen het grind gaan zitten. Bij een hoge waterstand en een snellere stroming wordt dit sediment weer weggespoeld. Hierdoor kan je niet van een vaste waarde uitgaan omdat je begin waarde hierdoor hoger is dan je eindwaarde.

JB. Ik zou niet uitgaan van intreeweerstand omdat het sediment kan wegspoelen tijdens hoogwaterafvoer.

A. Waar bevindt zich het intrepunt als de dijk een duidelijk voorland heeft maar de Maas aansnijdt in het grindpakket?

JB. Als je een schatting kan maken van de doorlatendheid van de deklaag kan dit worden bepaald uit het grondwaterstromingsmodel. Bij Plaxis zou je het onderlopen van het voorland kunnen meenemen. Het kan ook analytisch bepaald worden. Dit kun je terugvinden in technisch rapport waterspanningen bij dijken. Hierbij wordt de factor lambda bij de kwelweglengte geteld. Hierin zit de weerstand verwerkt. Het moeilijke hieraan is dat de k-waarde van de deklaag moeilijk te bepalen is.

A. Hebben jullie het Chinese rapport nog kunnen vinden?

UF. Deze hadden wij alleen als hard-copy en Vera heeft met haar zwangerschapsverlof haar spullen opgeruimd maar is deze niet meer tegengekomen. Deze hebben wij niet digitaal.

A. In dit rapport kwam mooi de gelaagdheid van grind en zand naar voren. Is er bij Deltares ooit gekeken naar een soortgelijke opbouw?

JB. In een van de eerste proeven is er alleen gekeken naar een variatie (grof/fijn) in het horizontale vlak.

Notule interview

Datum: 18-3-2013
Locatie: Gent (België)
Aanwezigen: K. van den Boer (K)
A. Bezuijen (A)
T. de Wit, student (S)
F. Gerritsen, student (S)

S: Bij welke onderzoeken zijn jullie betrokken (geweest) op het gebied van piping?

A: Ik ben betrokken geweest bij het onderzoek van Vera van Beek en nu bij het promotie onderzoek van Kristine, verder niet.

K: Ik ben nu bezig mijn promotieonderzoek. Hiermee ben ik afgelopen september gestart.

S: Wat gaan jullie in de toekomst nog onderzoeken op het gebied van piping?

A: Voor toekomstige onderzoeken zijn er nog geen plannen.

K: Gedurende de volgende jaren zal ik voor mijn promotieonderzoek het erosiemechanisme piping onderzoeken.

S: Wat houden deze onderzoeken precies in?

K: In mijn promotie onderzoek doe ik onderzoek naar het ontstaan en het verloop van piping. Hierin maak ik gebruik van 'small-scale' experimenten in 2- en 3D. Er wordt 1 homogene zandlaag gebruikt, dus geen meerdere lagen. Ook wordt er gevarieerd in uittreepunten. Zowel in 2D als in 3D wordt gekeken naar de waterspanningen, watersnelheden en uittreeverhagen die ontstaan.

Ik doe ook numeriek onderzoek met het computerprogramma Abaqus.

Rondom de pipe en het uittredepunt zijn er heel veel mesh-elementen. Die uitstroming vlakbij de rand van de pipe is nooit helemaal goed te modelleren, omdat hier voor de gevallen die analytisch oplosbaar zijn een singulariteit ontstaat. Doordat de kleinste elementen van dezelfde orde zijn als een zandkorrel is nu wel een redelijk nauwkeurige oplossing verkregen. Daarin was te zien dat het uittreeverhang extreem hoog is rondom de pipe bij de randen.

In 3D zijn de waterspanningen en uitreesnelheid goed te zien. Rondom de pipe is te zien dat de poriënsparing erg laag is.

S: Wij gaan onderzoeken wat de invloed van een tweelaagssysteem is op piping. Wat denken jullie dat de invloed is op piping bij een gelaagdheid van zand en grind?

A: Door het grote verschil tussen de doorlatendheid en korrelgrootte van het zand en grind zal dit een ongunstige situatie zijn. Waarschijnlijk krijg je verticale stroming, wat wellicht piping door heave tot gevolg heeft. Dan geldt de formule van Sellmeijer ook niet. Ook moeten jullie weten of het zand en het grind vermengd zijn.

S: In onze situatie hebben we te maken met stroming van 2 kanten. Namelijk vanuit de rivier, maar ook vanuit het achterland. Wat is de invloed hiervan op piping?

A: Een pipe kenmerkt zich meestal door een dominante stroom 1 kant op. Maar in jullie situatie kan de stroming vanuit 2 kanten ongunstig zijn voor piping. De waterdruk wordt hoger en er is extra toestroom naar het opbarstkanaal.

K: de initiatie van piping zal door deze extra wateraanvoer inderdaad vergemakkelijken. Voor de groei van de pipe in de richting van de rivier zal de wateraanvoer van het achterland minder invloed hebben.

S: Weten jullie of er verder al onderzoeken zijn geweest naar de invloed van een tweelaagssysteem op piping?

A: Ik weet alleen dat Vera van Beek hierbij betrokken is geweest. Zij heeft de nodige 2-D sommen met MSeep gemaakt.

S: Wij gaan het tweelaagssysteem versimpelt simuleren door een gewogen gemiddelde te nemen van de doorlaatbaarheid van het grind en het zand en verder de d70 waarde mee te nemen van het zand. Denken jullie dat dit een realistische benadering is?

A: Voor de analytische benadering kan het niet anders. De formule van Sellmeijer neemt geen meerdere lagen in beschouwing. Het is wel interessant dat jullie ook de vertaalslag maken van de numerieke benadering naar de modellen die jullie gebruiken. De modellen zullen waarschijnlijk laten zien dat er verticale stroming is en Sellmeijer dus niet geldt.

S: Wij zijn van plan om een model op te stellen met het programma MSeep in combinatie met PlaxFlow. Dit omdat wij de voordelen van de programma's optimaal willen benutten. Hebben jullie ervaring met PlaxFlow/MSeep en ziet u een combinatie van deze twee programma's slagen?

A: Bij Deltares heb ik wel wat met MSeep gewerkt, maar niet heel veel. MSeep kan soms vrij lastig zijn. Misschien kunnen jullie eenvoudig beginnen en de uitkomsten laten controleren door Deltares.

S: Wat denken jullie dat de mate van invloed is van de parameters intree- en uitreweerstand?

A: In jullie situatie kan dit van grote invloed zijn. Als de Maas in verbinding staat met de grindlaag heeft dit grote invloed op het stijghoogteverschil. Als hier slib, of een slecht doorlatende laag aanwezig is, zal dit een remmende werking hebben.

K: Ik zou in jullie geval niet uitgaan van horizontale instroming, maar van een verticale instroming door de deklaag. Anders is er in het model rechtstreekse instroming in de grindlaag, terwijl de instroom in werkelijkheid eerst door de zandlaag moet. In het model is dit waarschijnlijk makkelijk aan te passen.

S: Omdat de stijghoogte in onze situatie niet altijd tegen de deklaag staat, moet het grindpakket zich eerst 'vullen'. Welke invloed kan deze tijdsafhankelijke situatie hebben op piping?

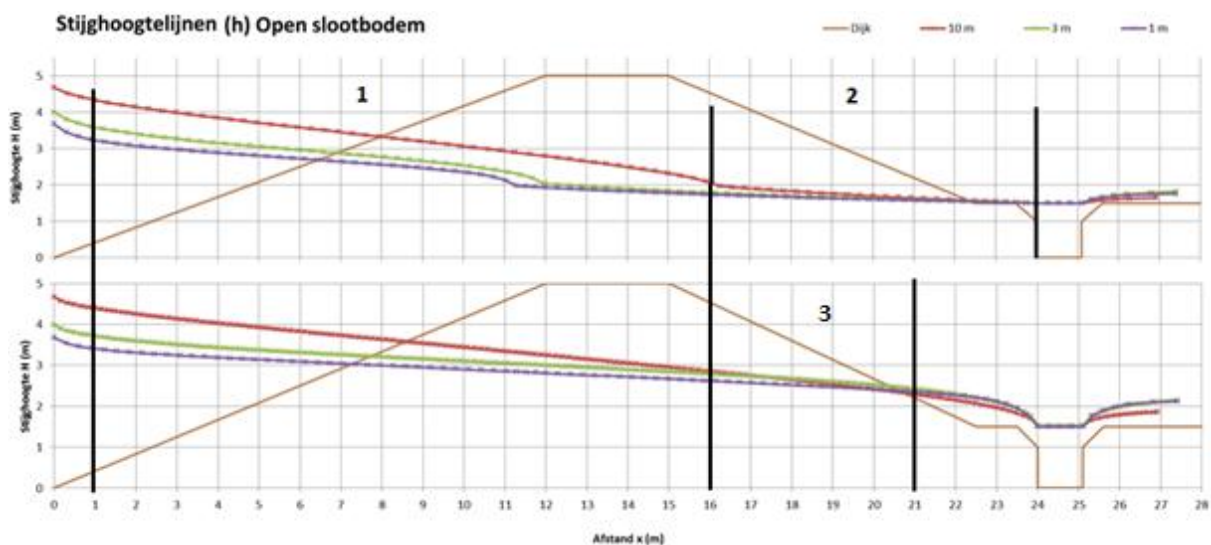
A: Tijdsafhankelijkheid op deze manier was mij nog niet bekend. In MSeep kun je geen tijdsafhankelijkheid meenemen en in PlaxFlow wel.

9 Stijghoogteverloop

In deze bijlage zijn de resultaten gepresenteerd die horen bij het stijghoogteverloop. Deze bestaan uit een aantal grafieken waarin het stijghoogteverloop met pipe en zonder pipe is uitgezet. Dezelfde waarden zijn hierin twee keer op een andere manier uitgezet, namelijk per situatie (9.1 en 9.3) en per type bodemopbouw (9.2 en 9.4). Dit om de verschillen/ overeenkomsten makkelijker inzichtelijk te maken. De stijghoogte is onder de dijk (en deklaag) bepaald dus de stijghoogtelijn geeft de waterdruk (in 'meter waterkolom') weer in de zandlaag. Op deze plaats treedt piping op, daarom is gekozen voor deze plaats.

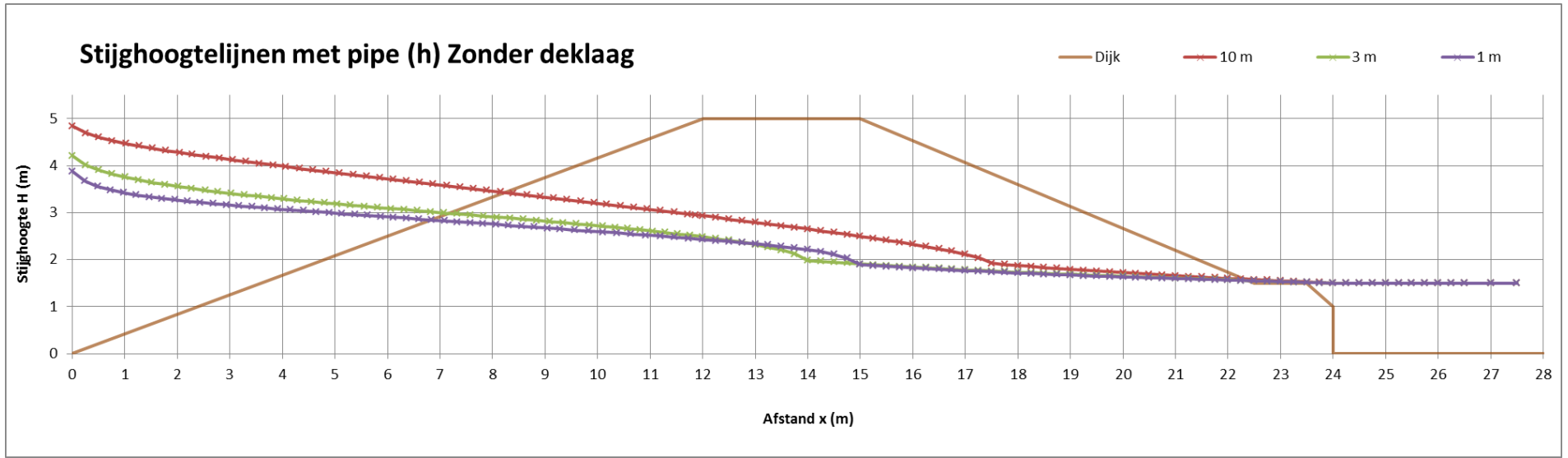
In bijlage 9.5 is een tabel weergegeven met daarin de verhangen van de stijghoogtelijnen. Met 'verhang' wordt hier de helling van de stijghoogtelijn bedoeld. Dit is gedaan om te onderzoeken of er een verband is tussen de verhangen van de situatie die is berekend in PlaxFlow en degene uit MSeep. De afstanden waarover de verhangen zijn berekend zijn in onderstaand figuur aangegeven: Aan het begin van de stijghoogtelijnen, voor de pipe (nummer 1 in onderstaand figuur) en de verhangen aan het einde van de stijghoogtelijnen in de pipe (nummer 2). Van de stijghoogtelijnen uit PlaxFlow is het verhang bepaald over het stuk waar in MSeep een pipe zit (nummer 3). Het verhang is bepaald waar de stijghoogtelijnen lineair lopen. Dus krommingen in de lijnen zijn niet meegenomen. Vandaar is de afstand van '3' korter dan nummer 2 in onderstaand figuur.

In onderstaand figuur is een willekeurige situatie beschouwd. Enkel de rode lijn van 10m zand is hier als voorbeeld genomen. De overige lijnen kunnen buiten beschouwing worden gelaten.

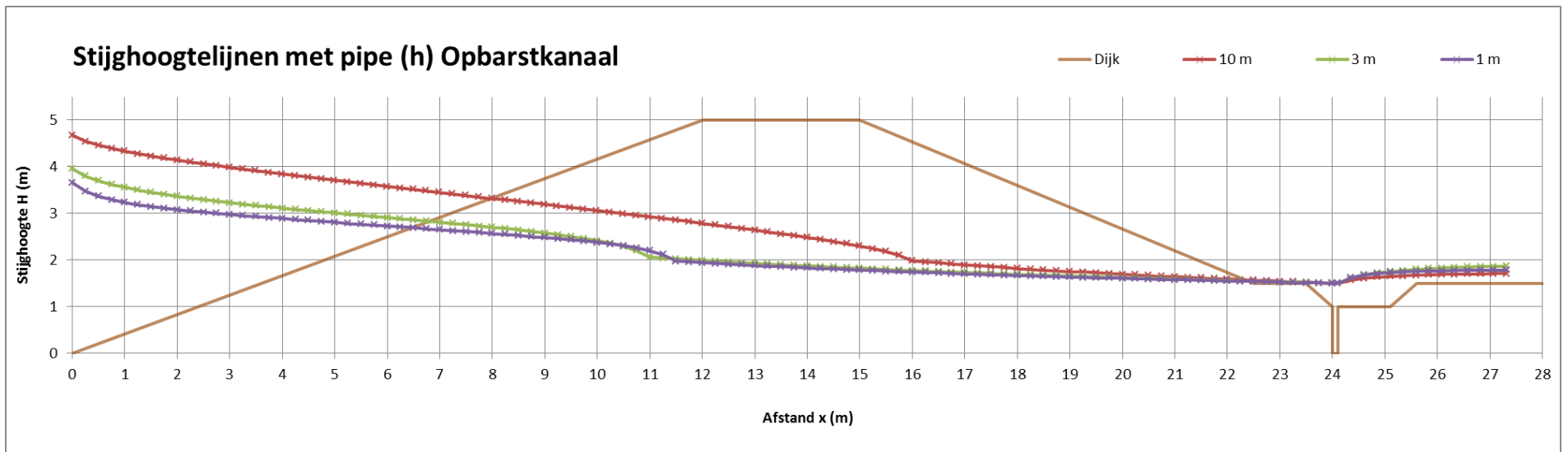


Figuur 35: De bepaling van het verhang van de stijghoogtelijnen.

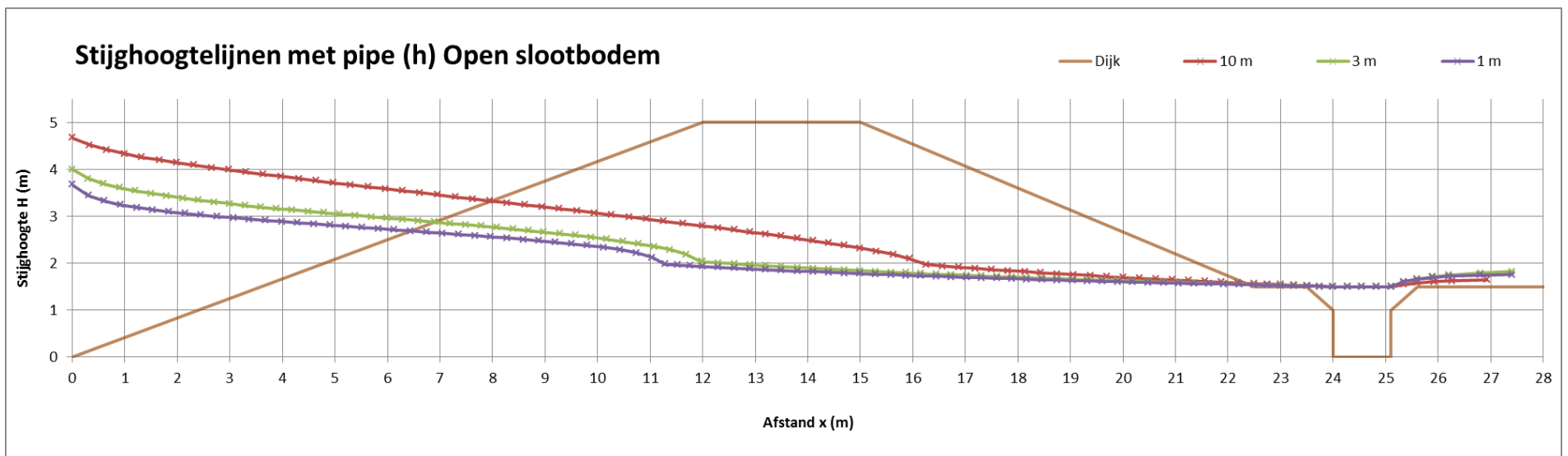
9.1 Stijghoogteverloop met pipe, per situatie (MSeep)



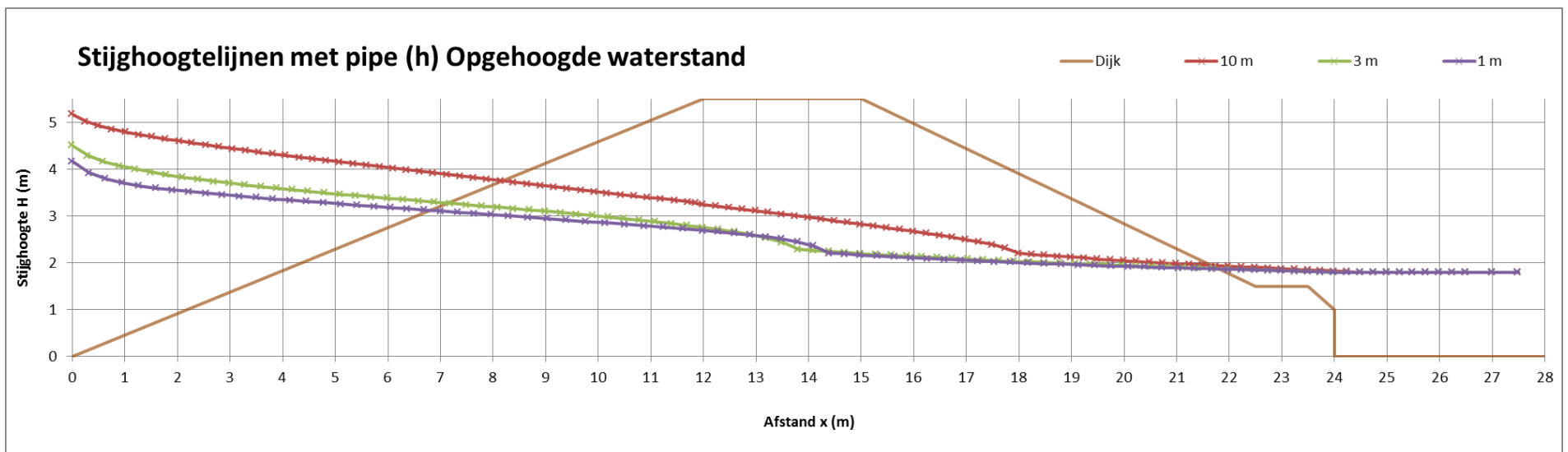
Figuur 36: Stijghoogtelijnen met pipe voor situatie 'zonder deklaag'.



Figuur 37: Stijghoogtelijnen met pipe voor situatie 'opbarstkanaal'.

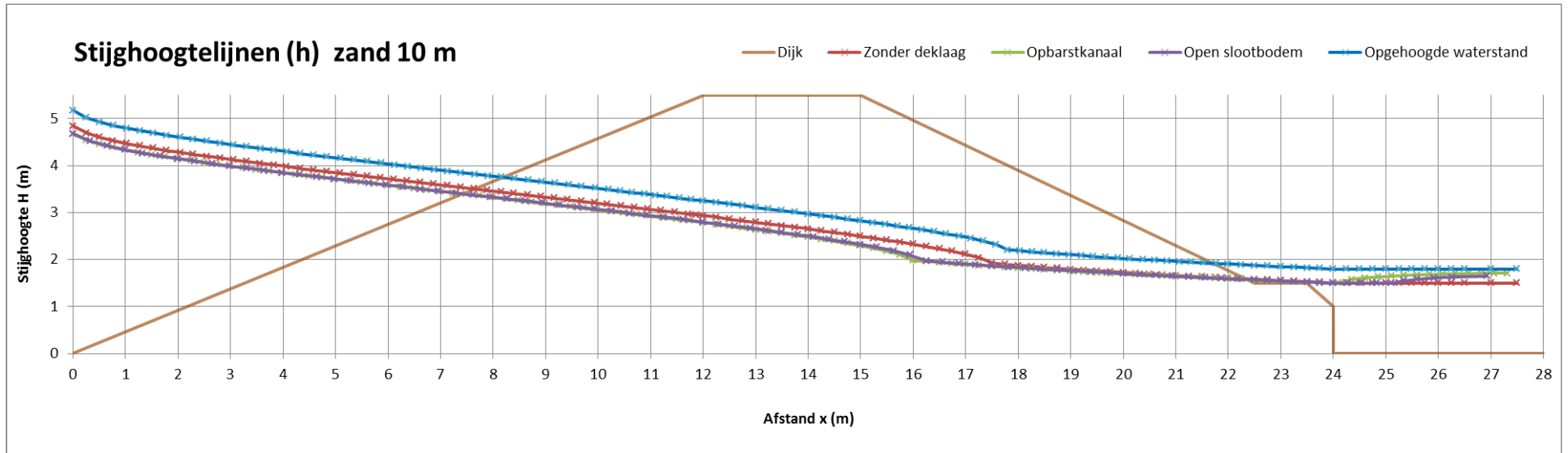


Figuur 38: Stijghoogtelijnen met pipe voor situatie 'open slootbodem'.

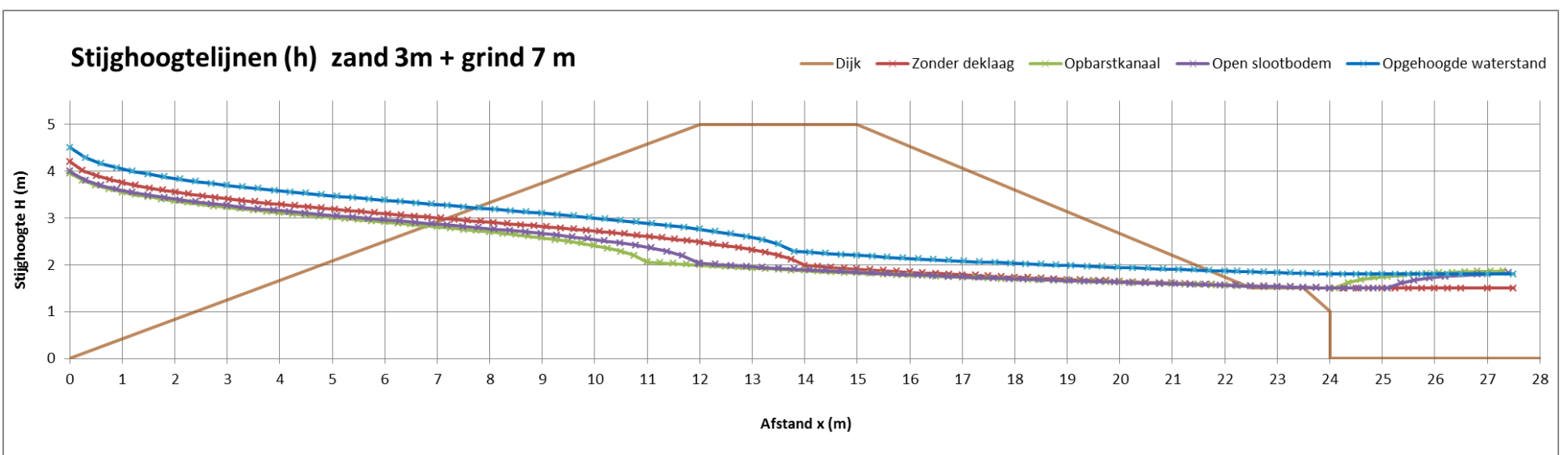


Figuur 39: Stijghoogtelijnen met pipe voor situatie 'opgehoogde waterstand'.

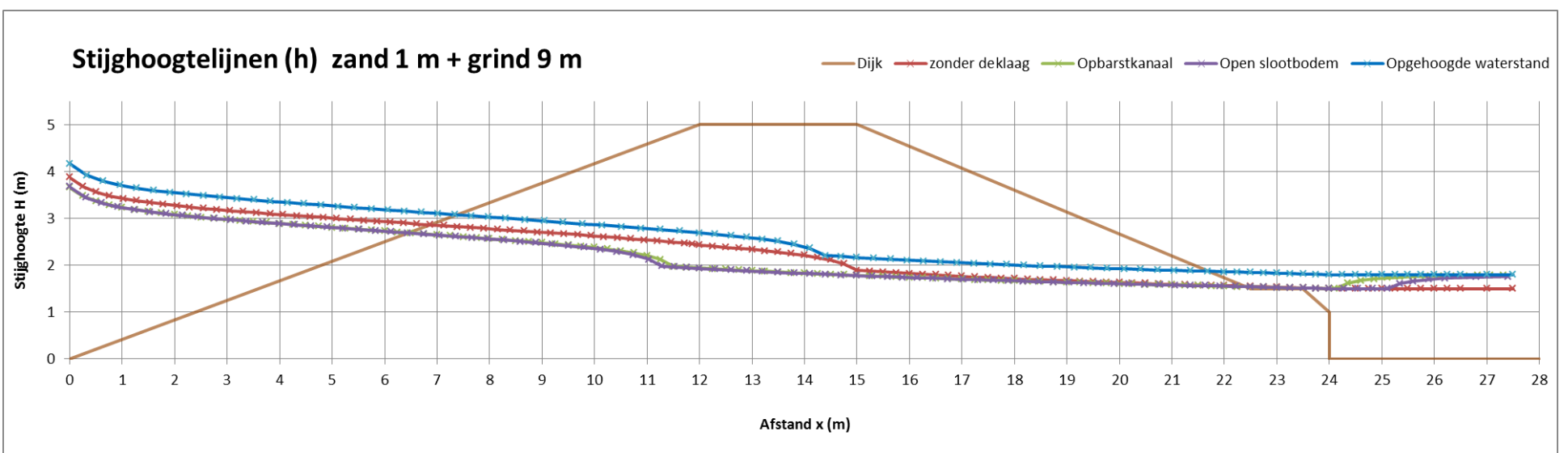
9.2 Stijghoogteverloop met pipe, per bodemopbouw (MSeep)



Figuur 40: Stijghoogtelijnen met pipe bij een zandlaag van 10 meter.

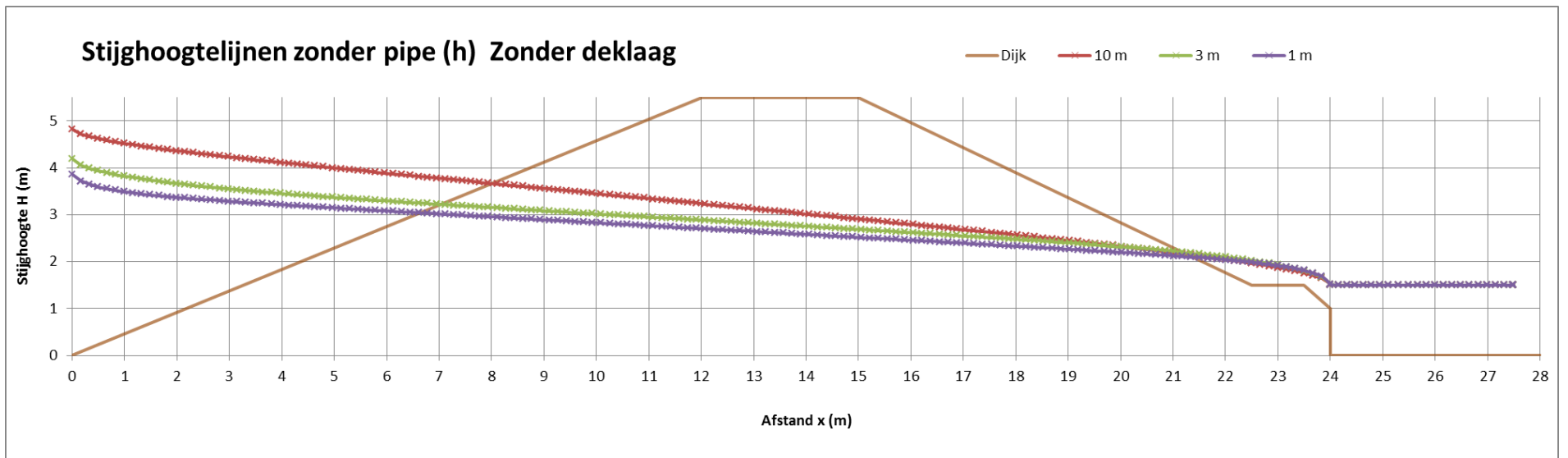


Figuur 41: Stijghoogtelijnen met pipe bij een zandlaag van 3 meter en een grindlaag van 7meter.

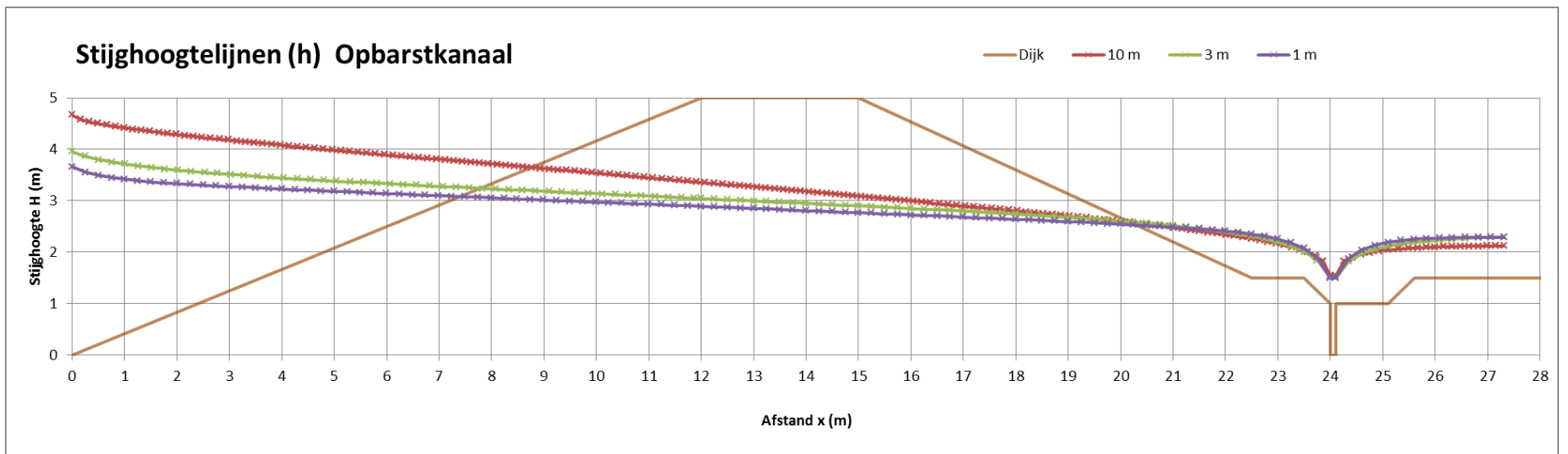


Figuur 42: Stijghoogtelijnen met pipe bij een zandlaag van 1 meter en een grindlaag van 9meter.

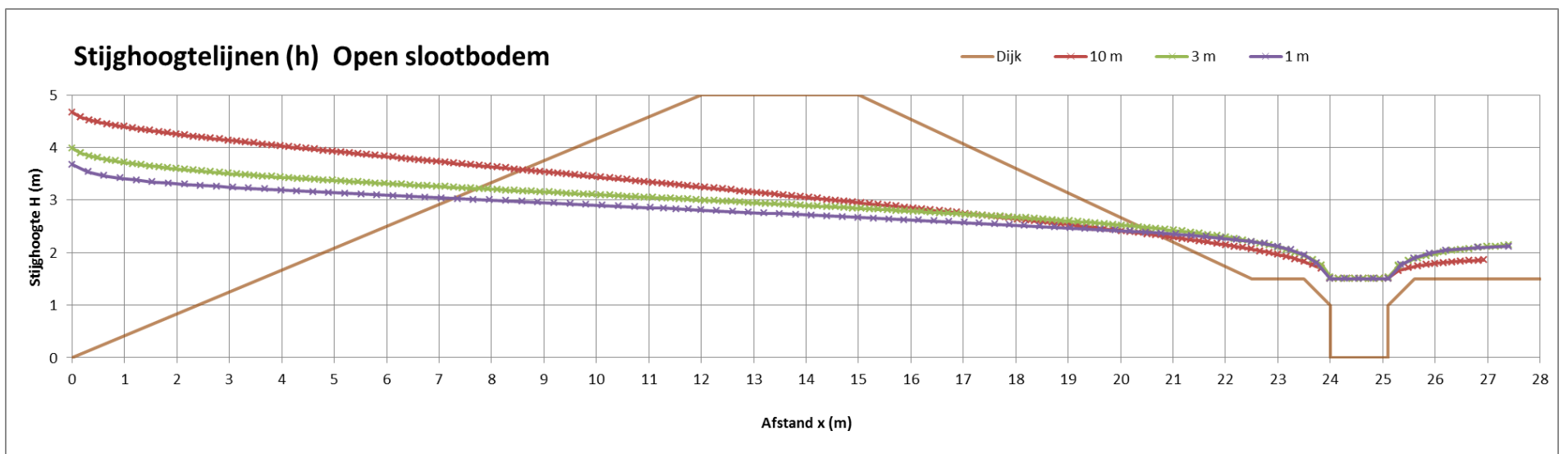
9.3 Stijghoogteverloop zonder pipe, per situatie (PlaxFlow)



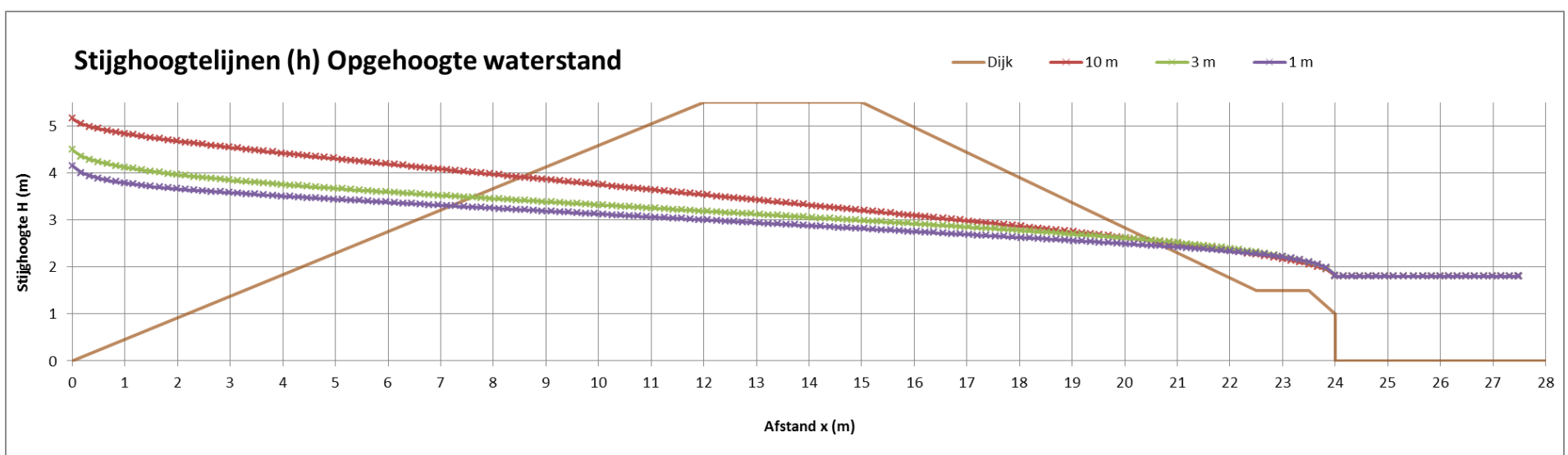
Figuur 43: Stijghoogtelijnen zonder pipe voor situatie 'zonder deklaag'.



Figuur 44: Stijghoogtelijnen zonder pipe voor situatie 'opbarstkanaal'.

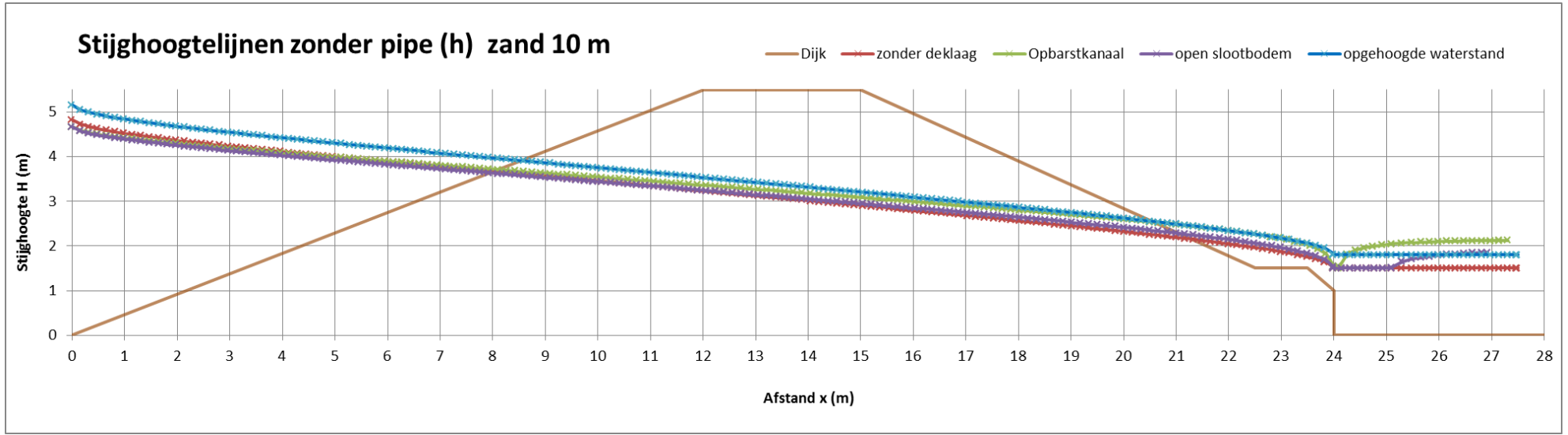


Figuur 45: Stijghoogtelijnen zonder pipe voor situatie 'open slootbodern'.

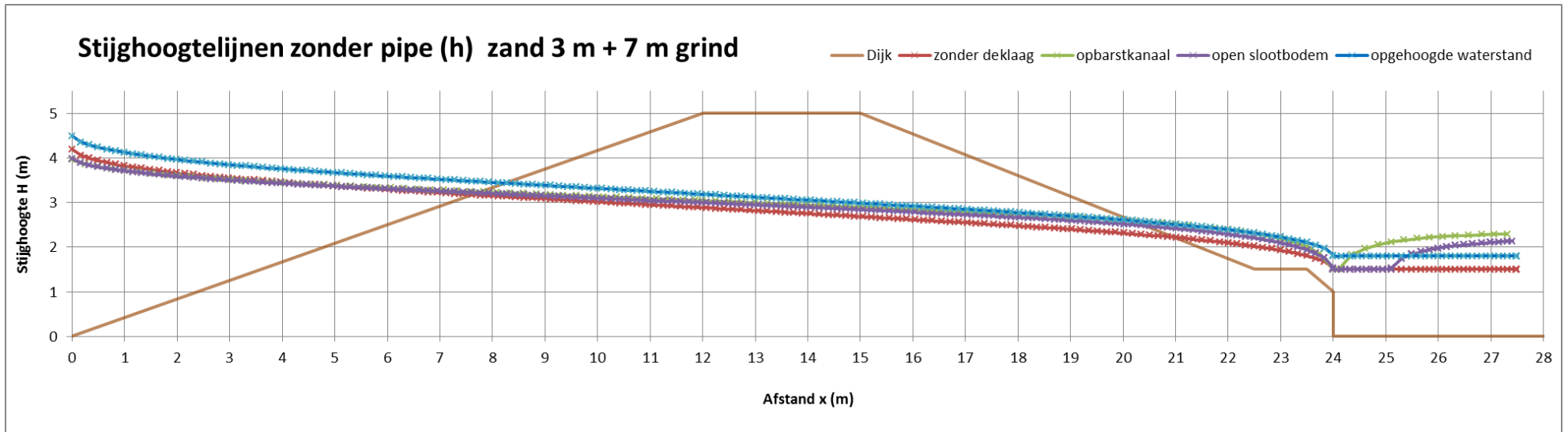


Figuur 46: Stijghoogtelijnen zonder pipe voor situatie 'opgehoogte waterstand'.

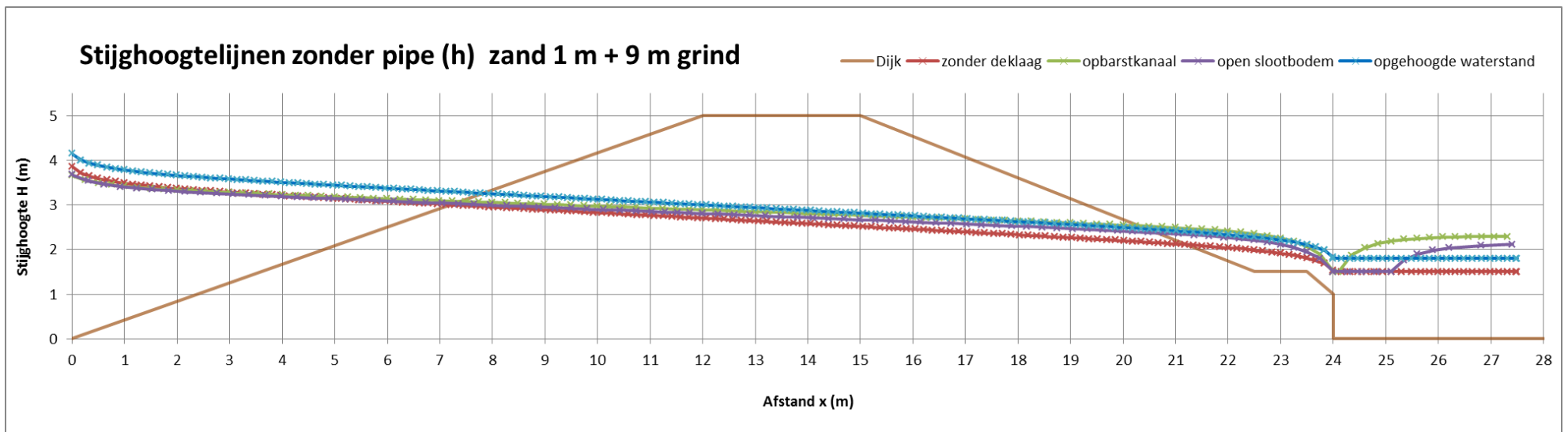
9.4 Stijghoogteverloop zonder pipe, per bodemopbouw (PlaxFlow)



Figuur 47: Stijghoogtelijnen zonder pipe bij een zandlaag van 10 meter.



Figuur 48: Stijghoogtelijnen zonder pipe bij een zandlaag van 3meter en een grindlaag van 7m.



Figuur 49: Stijghoogtelijnen zonder pipe bij een zandlaag van 1meter en een grindlaag van 9m.

9.5 Verhagen van stijghoogtelijnen

verhang	Zonder deklaag	Opbarstkanaal	Open sloot	Open sloot met zand	Opgehoogde waterstand
	verhang zonder pipe				
10 m	0,13	0,11	0,12	0,11	0,13
3 m	0,08	0,06	0,06	0,06	0,08
1 m	0,07	0,05	0,05	0,04	0,07
verhang met pipe BEGIN					
10 m	0,14	0,14	0,14	-	0,14
3 m	0,12	0,13	0,12	-	0,12
1 m	0,09	0,09	0,10	-	0,09
verhang met pipe EINDE					
10 m	0,06	0,06	0,06	-	0,07
3 m	0,05	0,04	0,04	-	0,05
1 m	0,04	0,04	0,04	-	0,04

Tabel 14: Verhagen van stijghoogtelijnen.

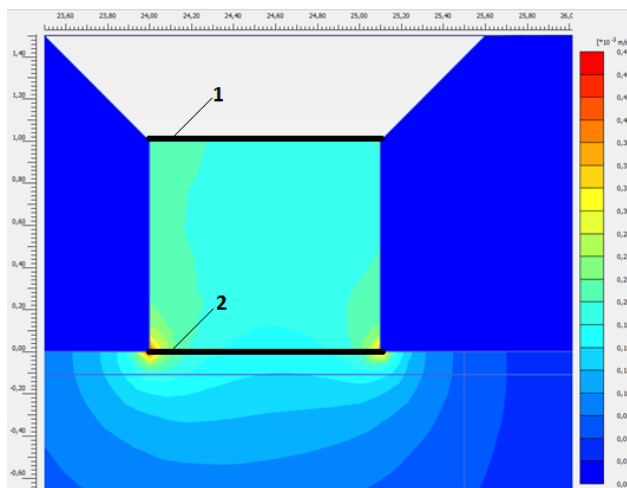
10 Stroming

In deze bijlage zijn verschillende stroomkaarten weergegeven. Hierin is in zijaanzichten en dwarsdoorsnedes goed te zien hoe het water door de watervoerende laag stroomt. Ook zijn de stroomsnelheden en verhangen op verschillende plaatsen weergegeven in tabellen en grafieken. Dit is een ander verhang dan besproken in paragraaf 6.1 stijghoogte. Het snelheids verhang wordt berekend door de snelheid te delen door de doorlatendheid ($i = v/k$). Door de snelheden te delen door een vaste waarde (de doorlatendheid) worden de waarden gangbaarder. Het verhang en de snelheid zijn van elkaar afhankelijk. Dus een hoog verhang, betekent ook een hoge snelheid en visa versa. De regel geldt ook dat bij een verticale stroming de korrels in beweging komen als het verhang 0,5 of groter is. De grindlaag heeft een andere doorlatendheid dan de zandlaag. Hierdoor moet, om het verhang in de grindlaag te bepalen, de snelheid in de grindlaag door de doorlatendheid worden gedeeld, die van toepassing is op de grindlaag. Dit is aangegeven in de tabellen waarbij dit van toepassing is. Ook is de snelheid van de grindlaag gedeeld door de doorlatendheid van het zand. Dit is gedaan om het verhang te bepalen die de zandkorrels ondervinden, aan de bovenkant van de grindlaag.

In bijlage 10.1 zijn de stroombeelden weergegeven voor een situatie zonder deklaag. Er zijn doorsnedes gemaakt op de plaats waar de stroming grotendeels nog net horizontaal stroomt. Dit punt is het omslagpunt naar verticale stroming. Vervolgens zijn er op verschillende dieptes de snelheden en verhangen weergegeven in de tabel.

In bijlage 10.2

Is hetzelfde gedaan als in bijlage 10.1 maar dan voor de situaties 'open slootbodem' en 'open slootbodem met zand'. De dwarsdoorsnedes zijn op verschillende x-coördinaten bekeken. Waardoor deze onderling niet goed te vergelijken zijn. Ook is de stroming bij het uittreepunt is specifiek bekeken. Hierbij zijn de dwarsdoorsnedes weergegeven met de tabellen van de verhangen ter hoogte van het uittreepunt. Er is in onderstaand figuur duidelijk gemaakt op welke plek het uittreepunt zich bevindt voor de situaties. Voor de situatie 'open slootbodem met zand' is dit nummer 1. Voor de situatie 'open slootbodem' is dit nummer 2 (zonder zandlaag in de sloot, die wel in het figuur is weergegeven).

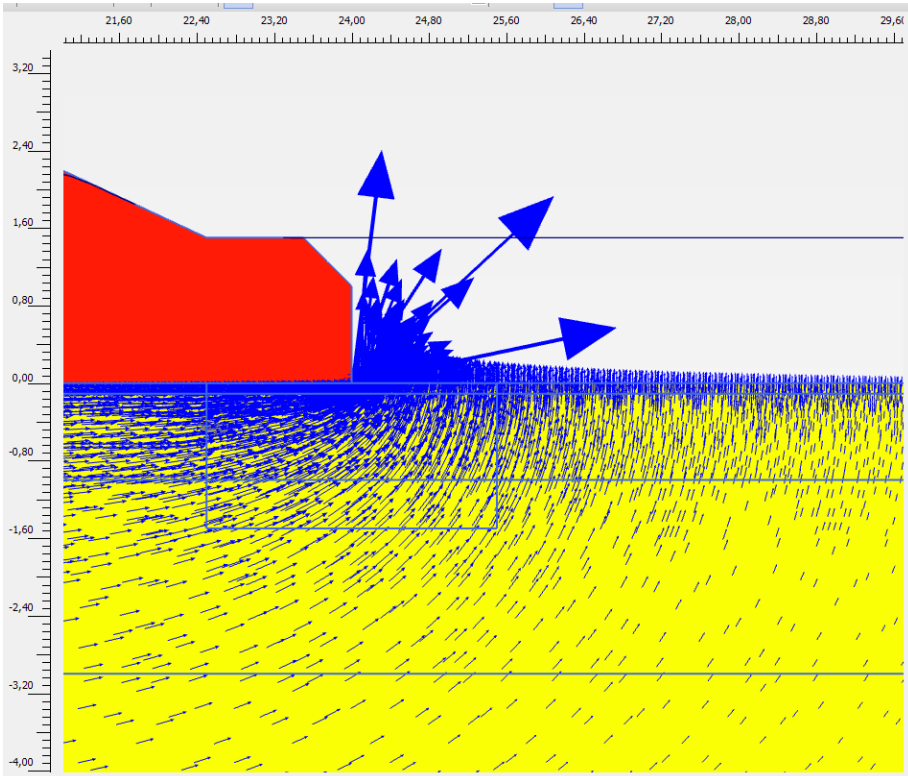


Figuur 50: Verschil uittreepunt.

In bijlage 10.3 en 10.4 zijn de verhangen in de vorm van een grafiek weergegeven. Deze verhangen zijn, net zoals de stijghoogtelijnen uit bijlage 9, bepaald onder de dijk en deklaag.

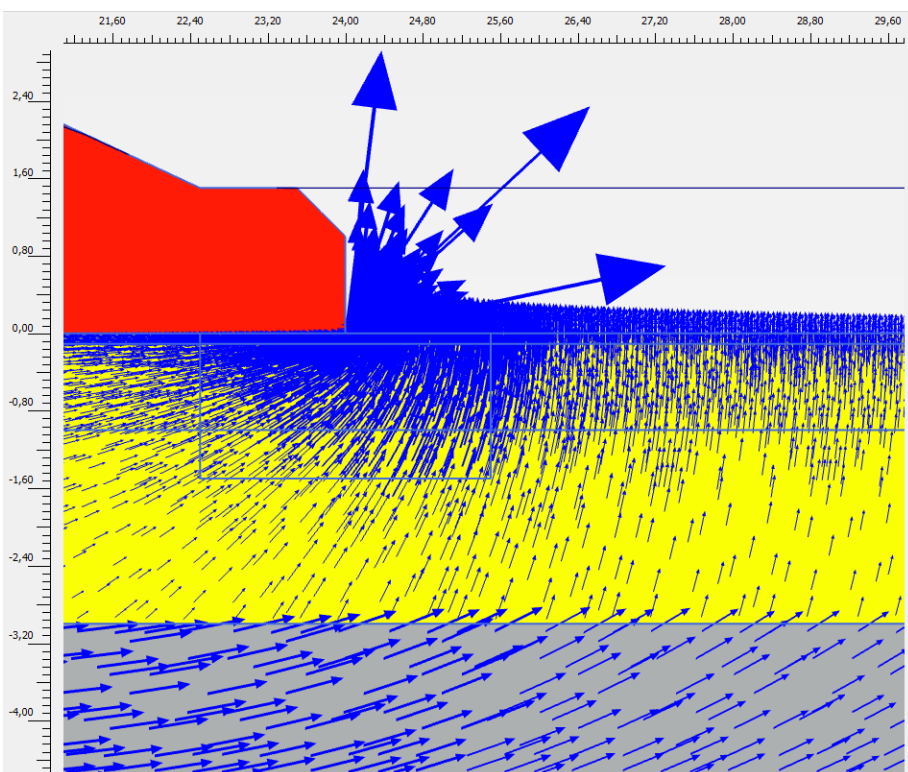
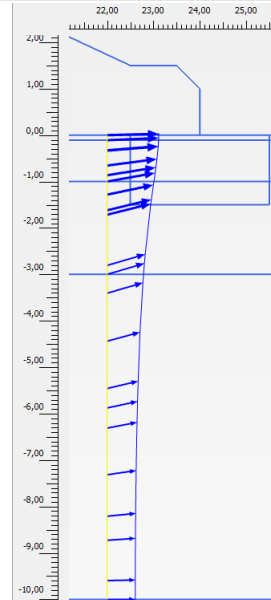
In bijlage 10.5 is een willekeurige situatie van het stroombeeld van MSeep weergegeven om te illustreren hoe het stroombeeld eruitziet als er een pipe aanwezig is.

10.1 Stroombeelden voor situatie 'zonder deklaag' (PlaxFlow)



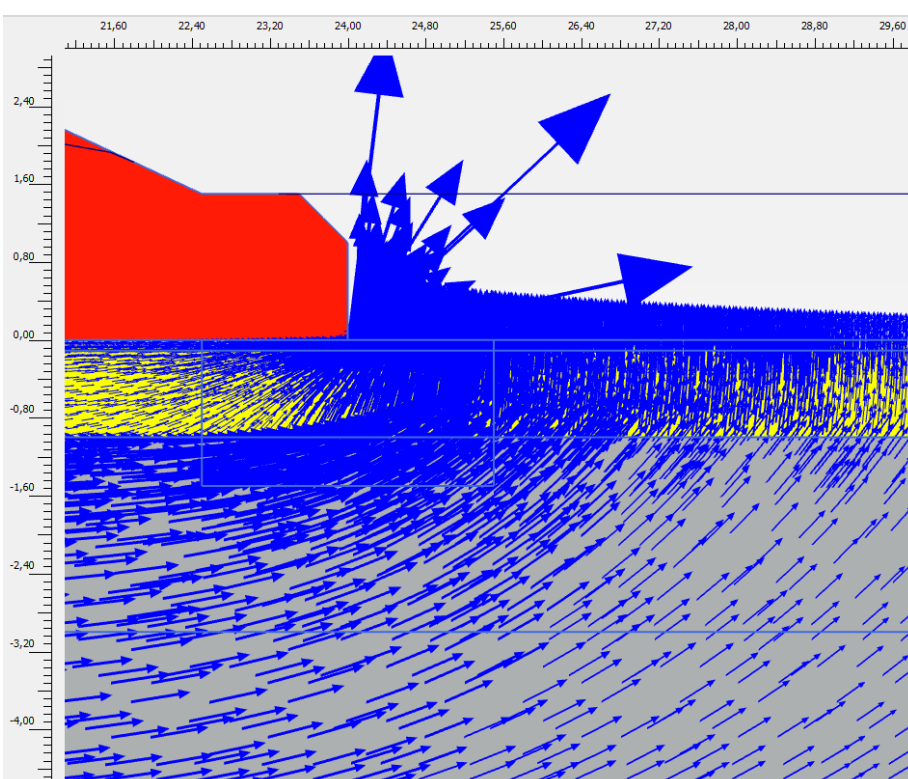
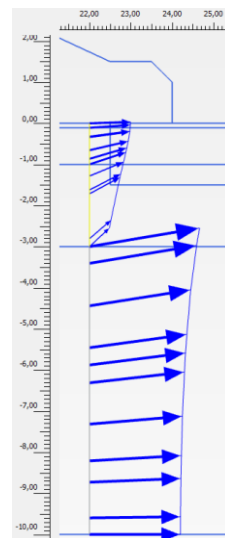
Figuur 51: Stroombeeld 10m zand.

Deklaag met open sloot 10 m zand				
x	y	v	i	opmerking
22,00	0,00	5,58E-05	0,16	Bovenkant zandlaag
22,00	-1,00	5,26E-05	0,15	Zandlaag 1m
22,00	-3,00	4,19E-05	0,12	Zandlaag 3m



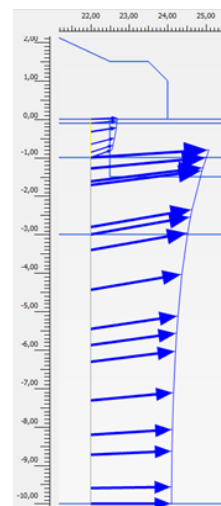
Figuur 52: Stroombeeld 3m zand + 7m grind.

Deklaag met open sloot 3 m zand				
x	y	v	i	opmerking
22,00	0,00	4,97E-05	0,14	Bovenkant zandlaag (K_{zand})
22,00	-3,00	3,29E-05	0,09	onderkant zandlaag (K_{zand})
22,00	-3,00	1,35E-04	0,38	bovenkant grindlaag (K_{zand})
22,00	-3,00	1,35E-04	0,07	bovenkant grindlaag (K_{grind})

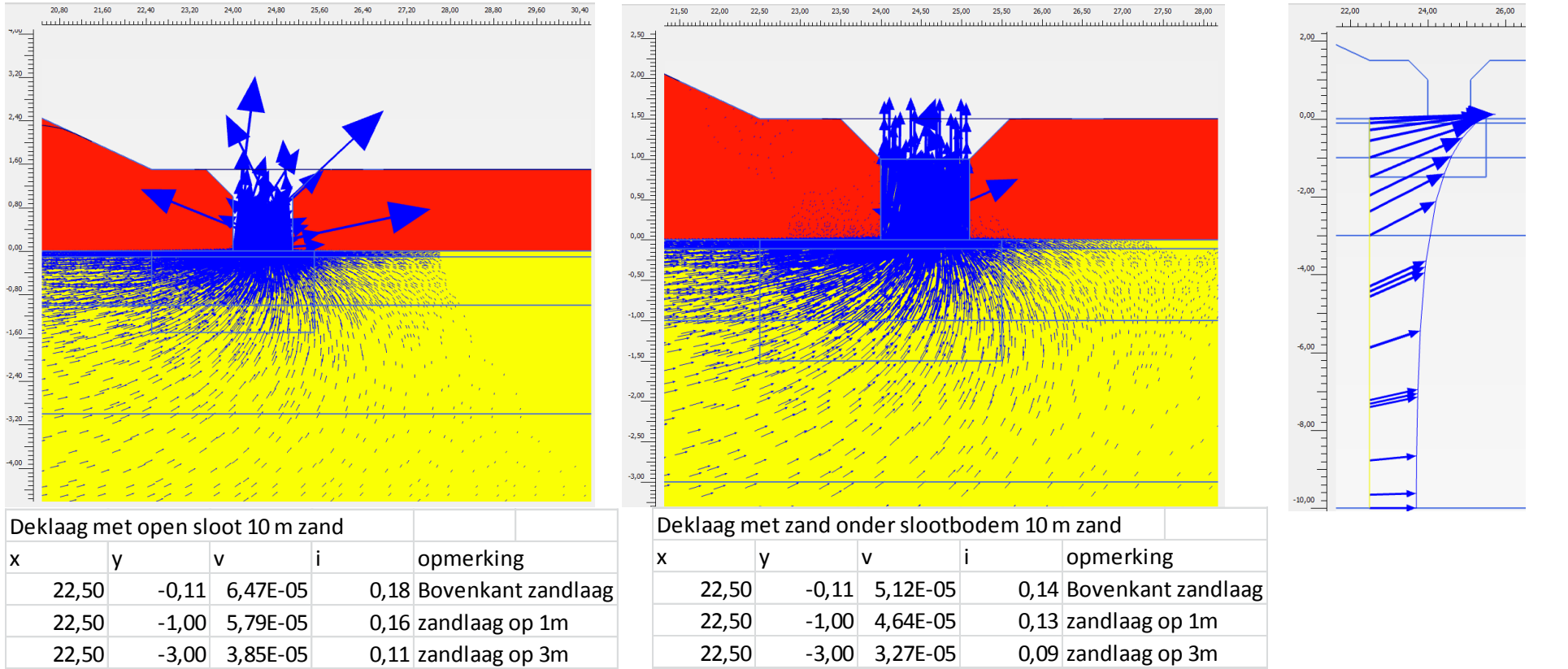


Figuur 53: Stroombeeld 1m zand + 9m grind.

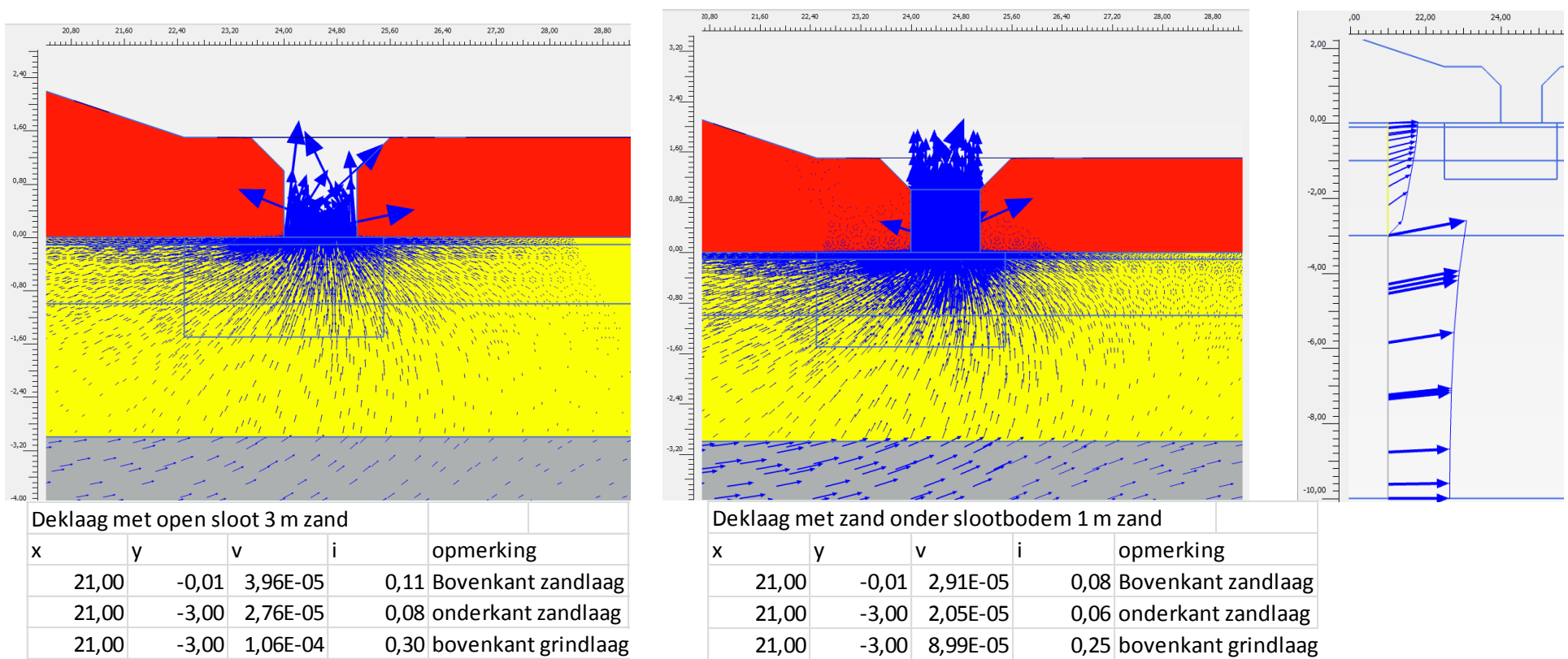
Deklaag met open sloot 1 m zand				
x	y	v	i	opmerking
22,00	0,00	3,45E-05	0,10	Bovenkant zandlaag (K_{zand})
22,00	-1,00	2,94E-05	0,08	onderkant zandlaag (K_{zand})
22,00	-1,00	1,54E-04	0,43	bovenkant grindlaag (K_{zand})
22,00	-1,00	1,54E-04	0,08	bovenkant grindlaag (K_{grind})



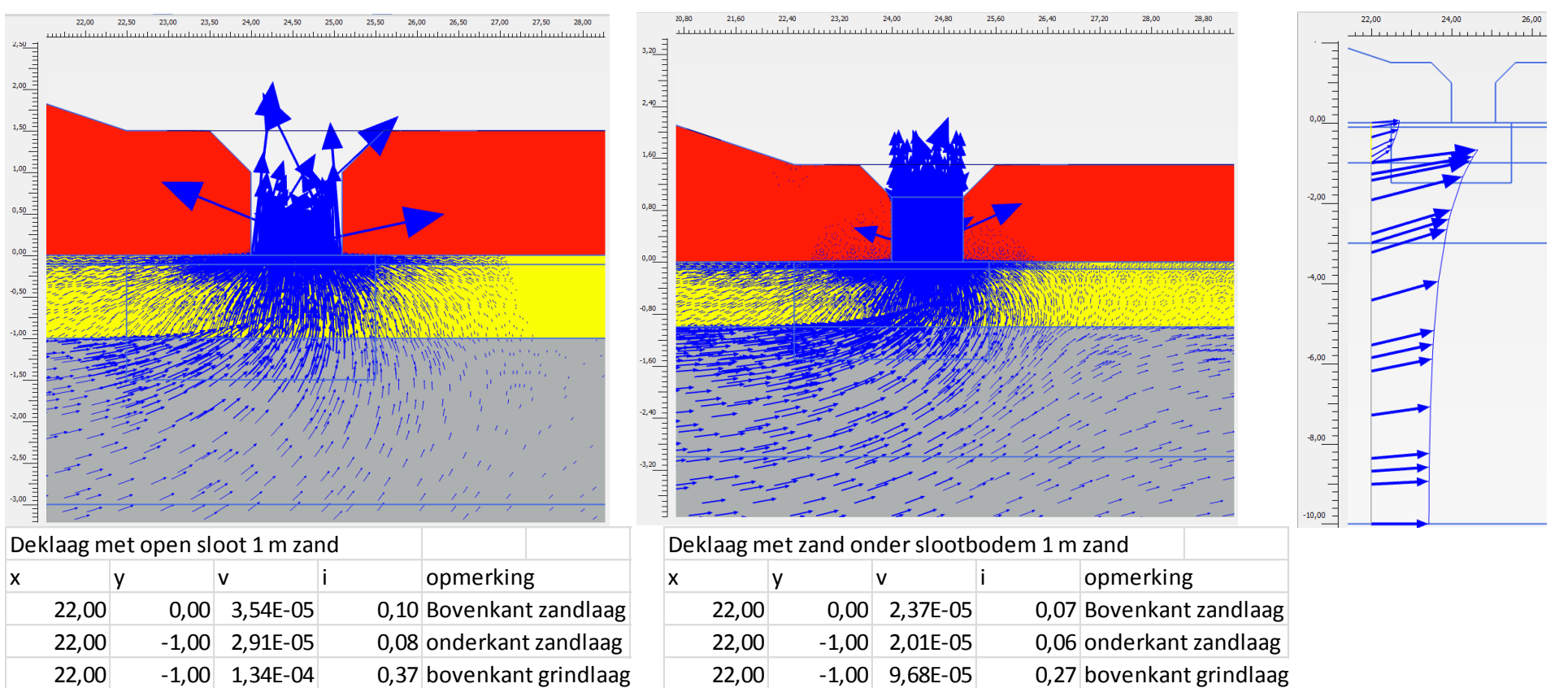
10.2 Stromingsbeelden 'open slootbodem' en 'open slootbodem met zand' (PlaxFlow)



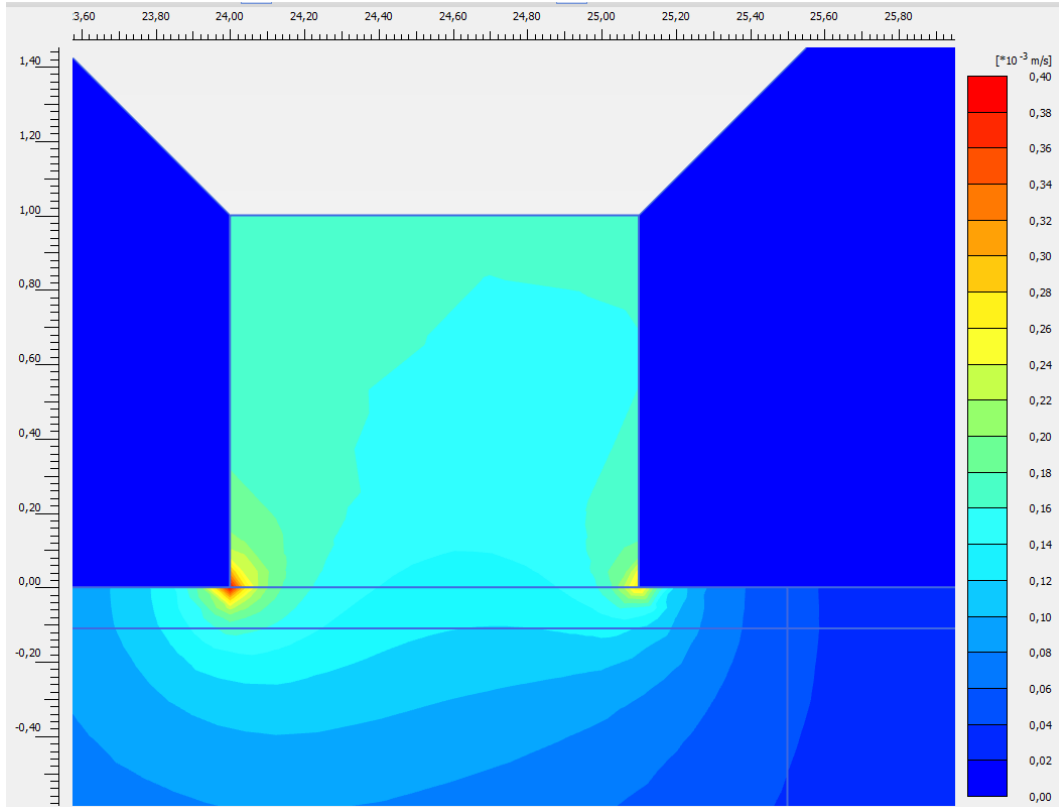
Figuur 54: Stroombeelden 10m zand.



Figuur 55: Stroombeelden 3m zand + 7m grind.

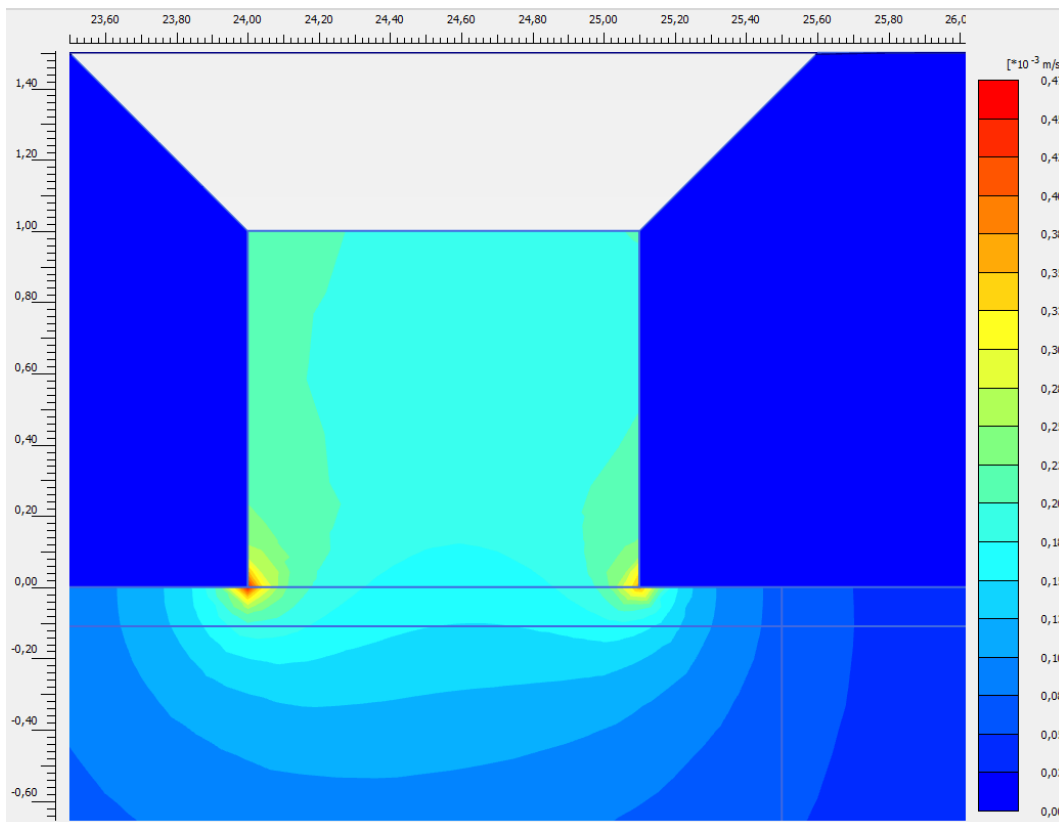


Figuur 56: Stroombeelden 1m zand + 9m grind.



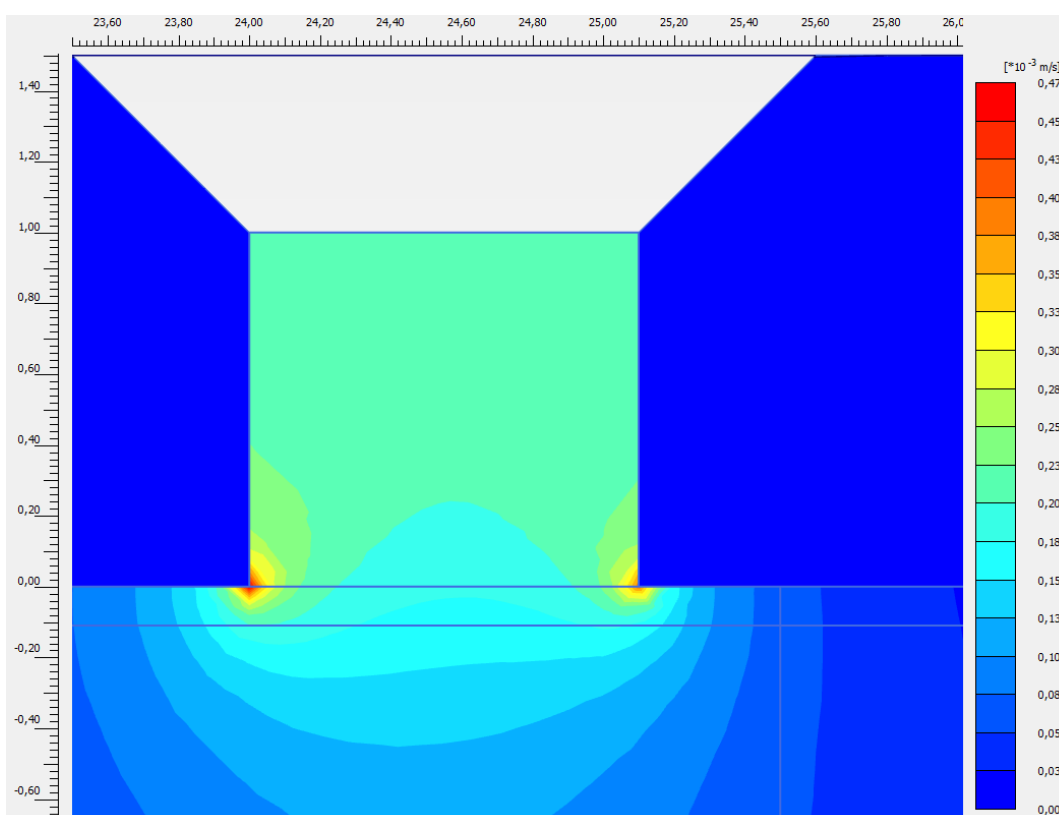
Figuur 57: Stroomlijnen situatie 'open slootbodem met zand' (10m zand).

Open sloot met zand			
x	y	v	i
24.00	1.00	1.66E-04	0.46
24.50	1.00	1.62E-04	0.45
25.00	1.00	1.61E-04	0.45
25.10	1.00	1.61E-04	0.45
Open sloot zonder zand			
24.00	-0.08	3.30E-04	0.92
24.54	-0.08	1.46E-04	0.41
24.98	-0.08	1.90E-04	0.53
25.03	-0.08	2.13E-04	0.59



Figuur 58: Stroomlijnen situatie 'open slootbodem met zand' (3m zand + 7m grind).

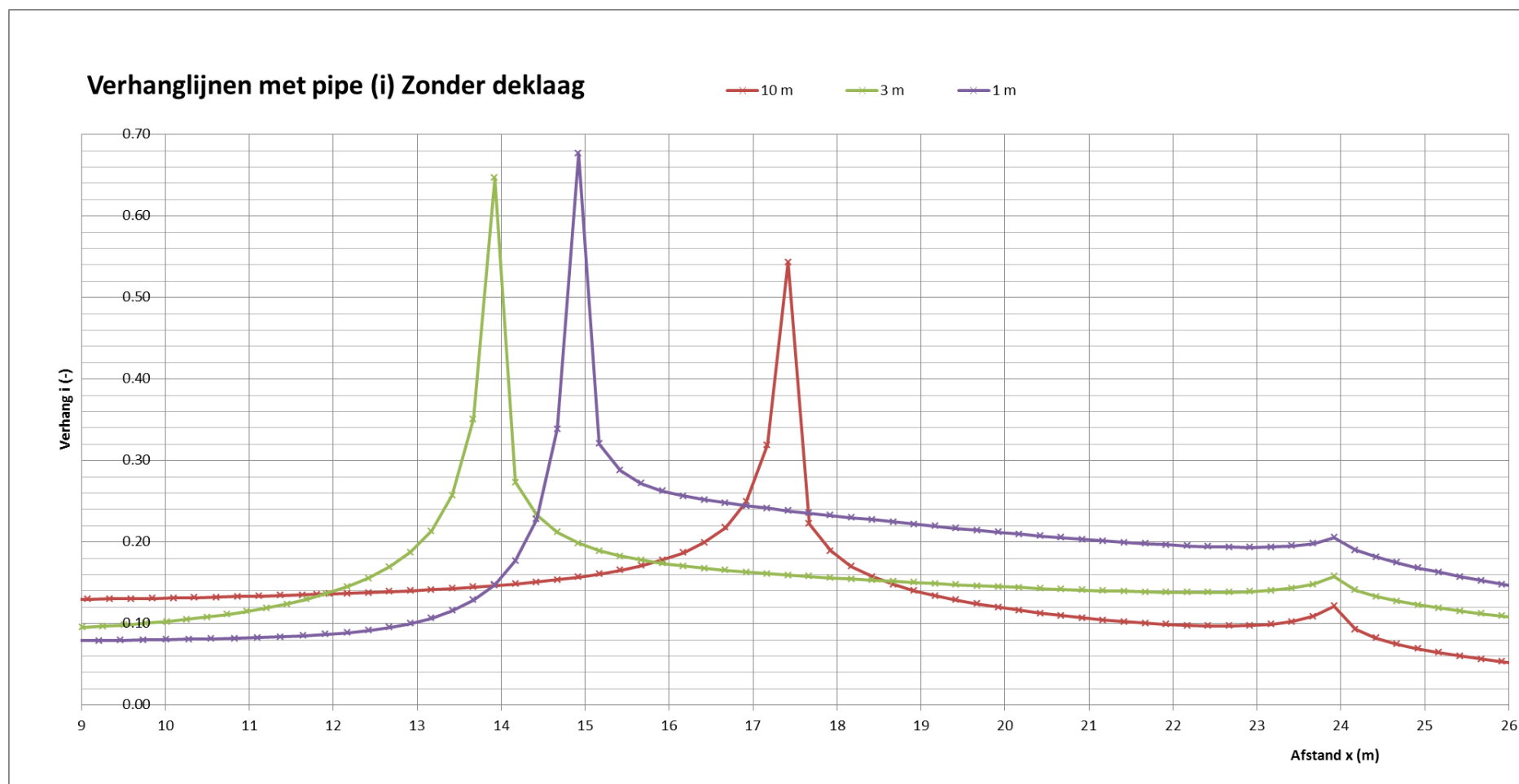
Open sloot met zand			
x	y	v	i
24.00	1.00	2.03E-04	0.57
24.50	1.00	1.99E-04	0.55
25.00	1.00	1.99E-04	0.56
25.10	1.00	2.00E-04	0.56
open sloot zonder zand			
24.00	-0.08	4.17E-04	1.16
24.54	-0.08	2.17E-04	0.60
24.98	-0.08	3.00E-04	0.84
25.03	-0.08	3.37E-04	0.94



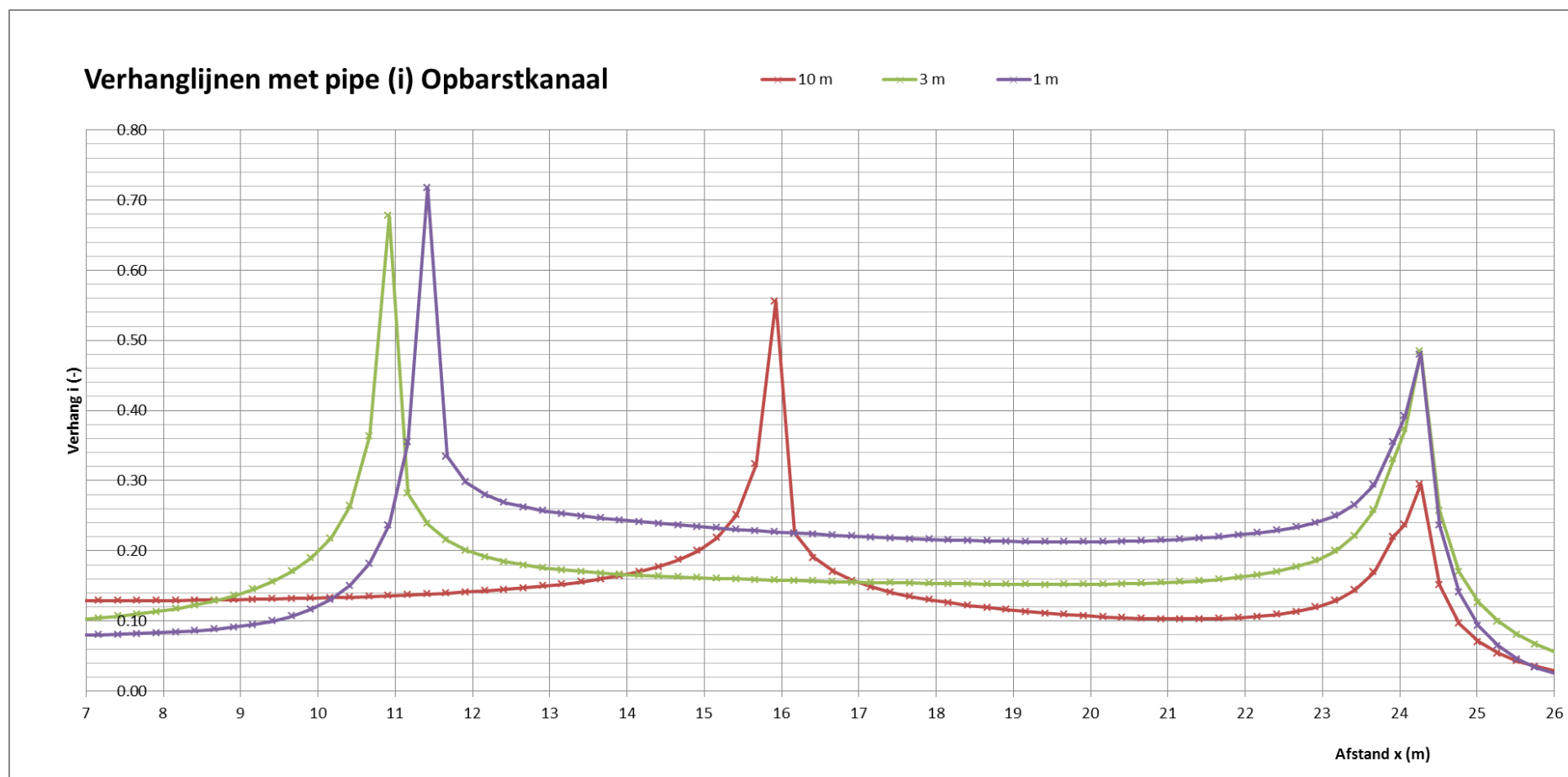
Figuur 59: Stroomlijnen situatie 'open slootbodem met zand' (1m zand + 7m grind).

Open sloot met zand			
x	y	v	i
24.00	1.00	2.19E-04	0.61
24.50	1.00	2.15E-04	0.60
25.00	1.00	2.16E-04	0.60
25.10	1.00	2.16E-04	0.60
open sloot zonder zand			
24.18	-0.08	2.76E-04	0.77
24.46	-0.08	2.56E-04	0.71
24.73	-0.08	2.66E-04	0.74
25.01	-0.08	3.22E-04	0.90

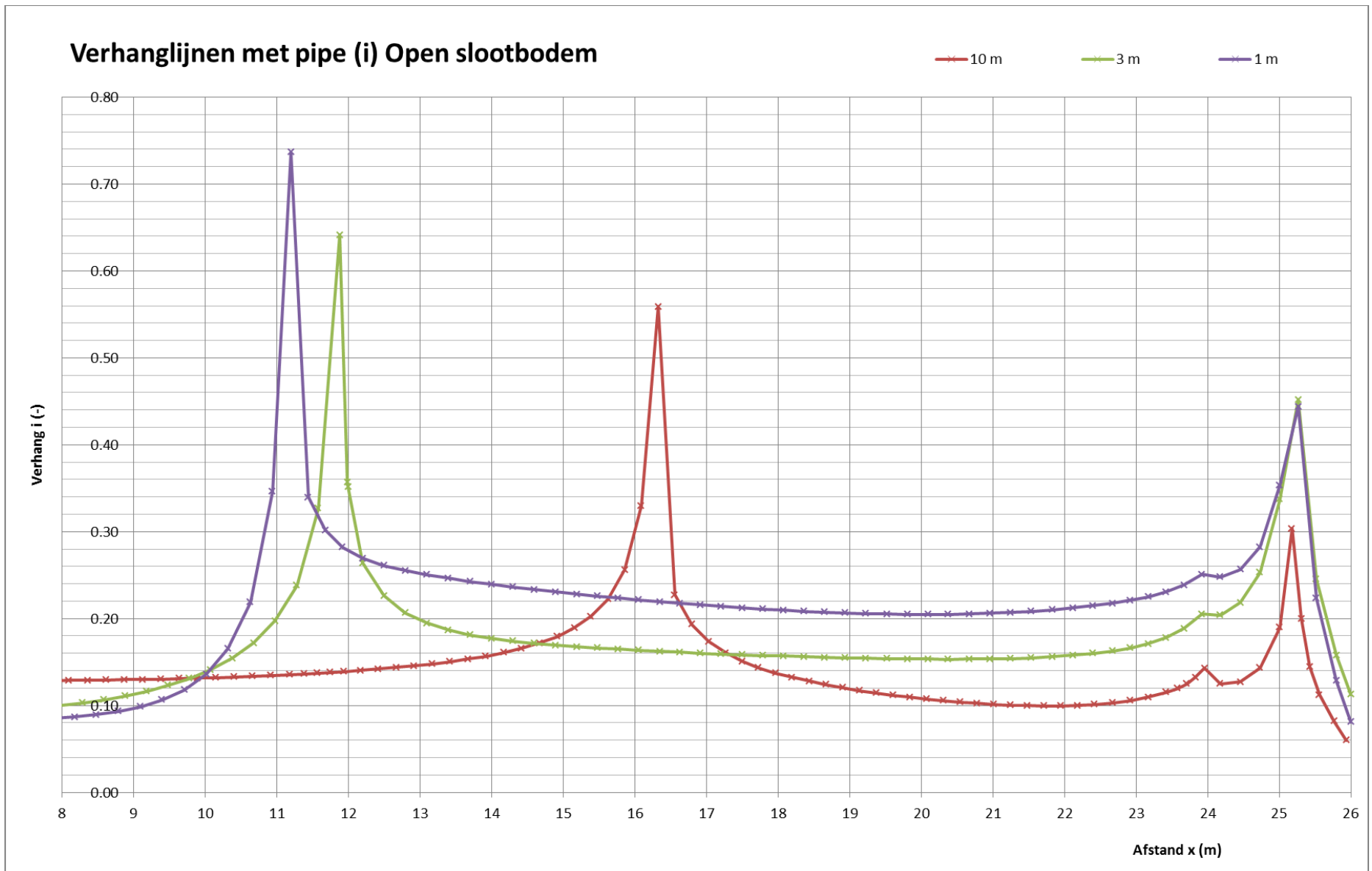
10.3 Verhanglijnen met pipe (MSeep)



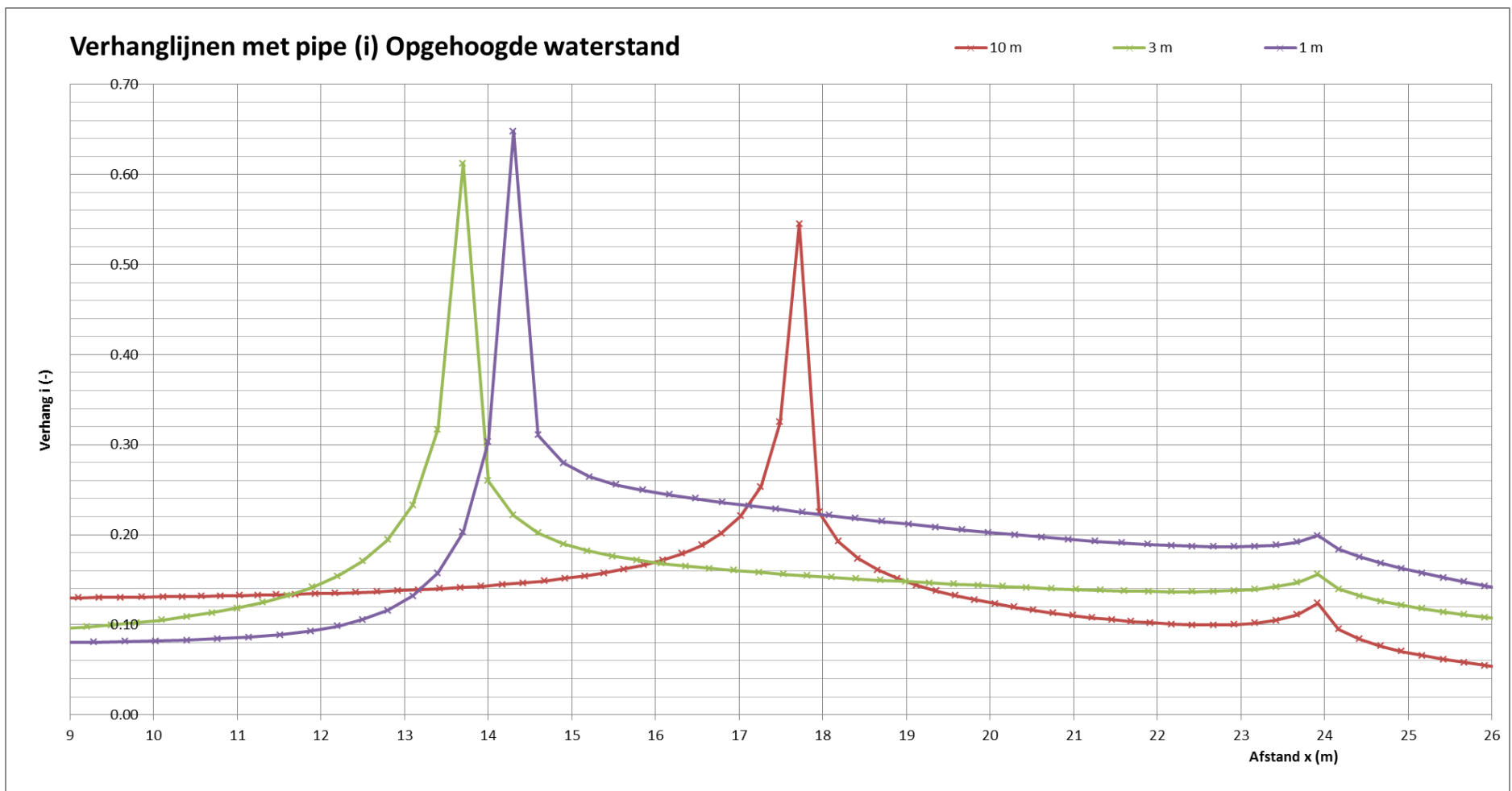
Figuur 60: Verhanglijnen met pipe situatie 'zonder deklaag'.



Figuur 61: Verhanglijnen met pipe situatie 'opbarstkanaal'.

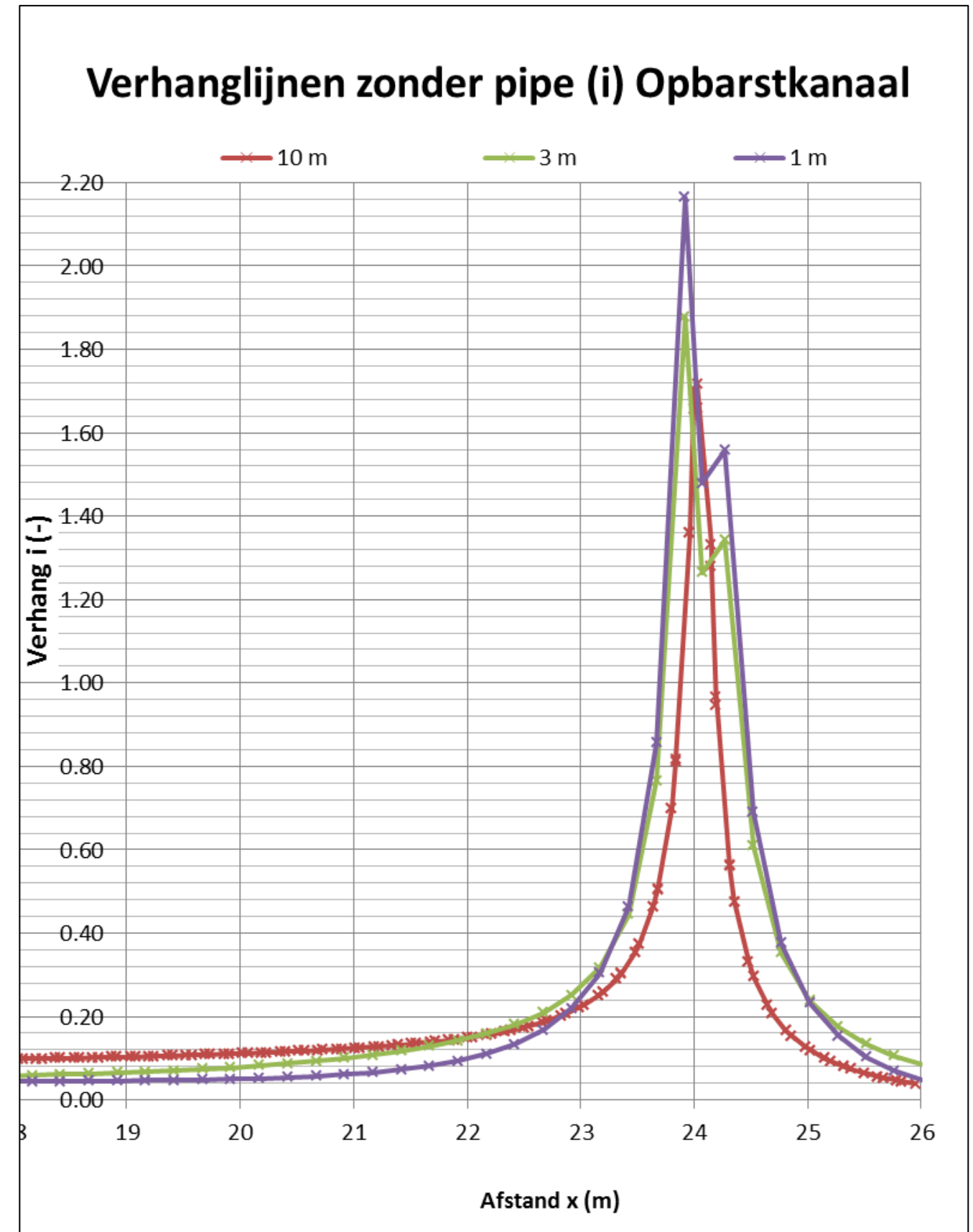
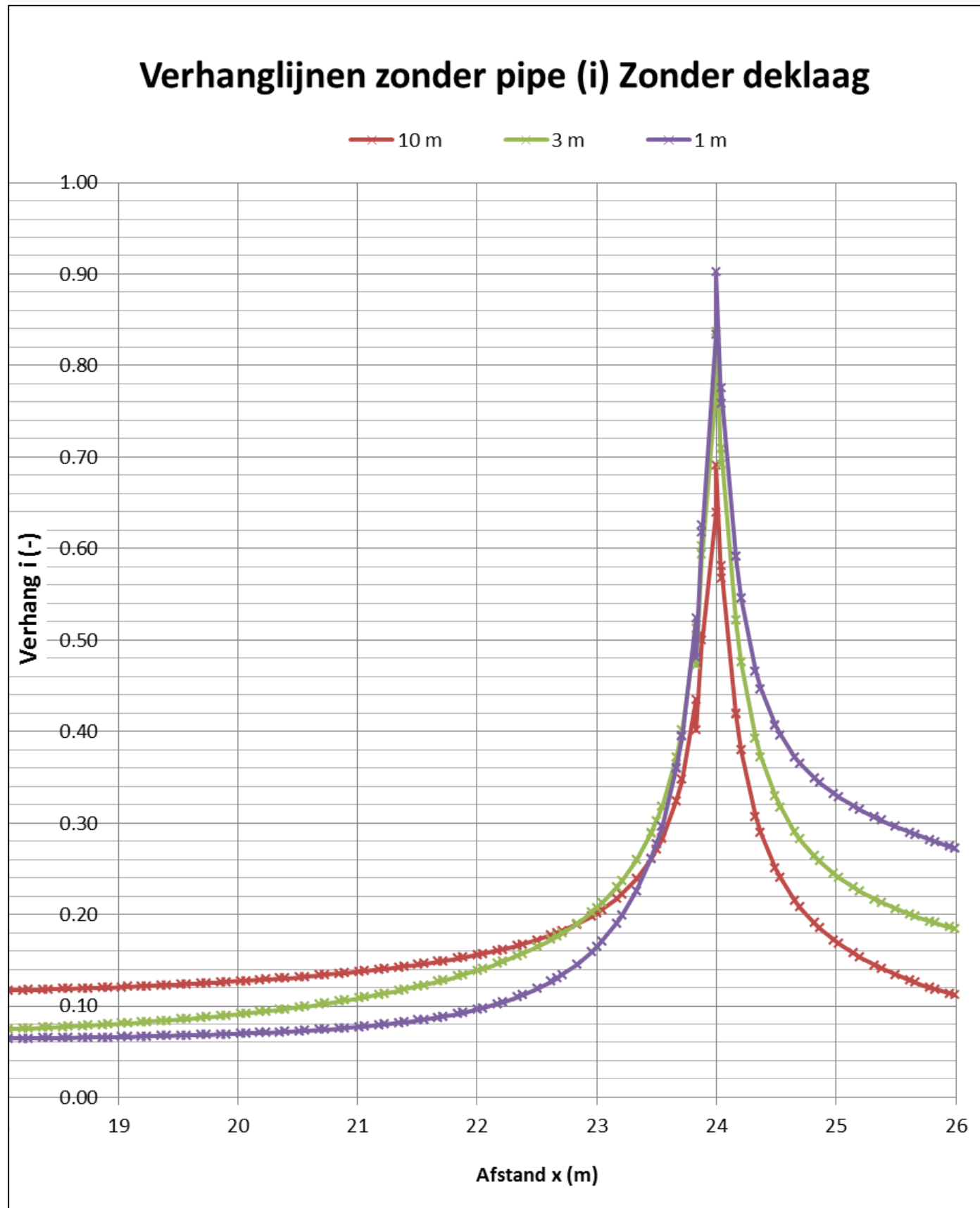


Figuur 62: Verhanglijnen met pipe situatie 'open slootbodem'.

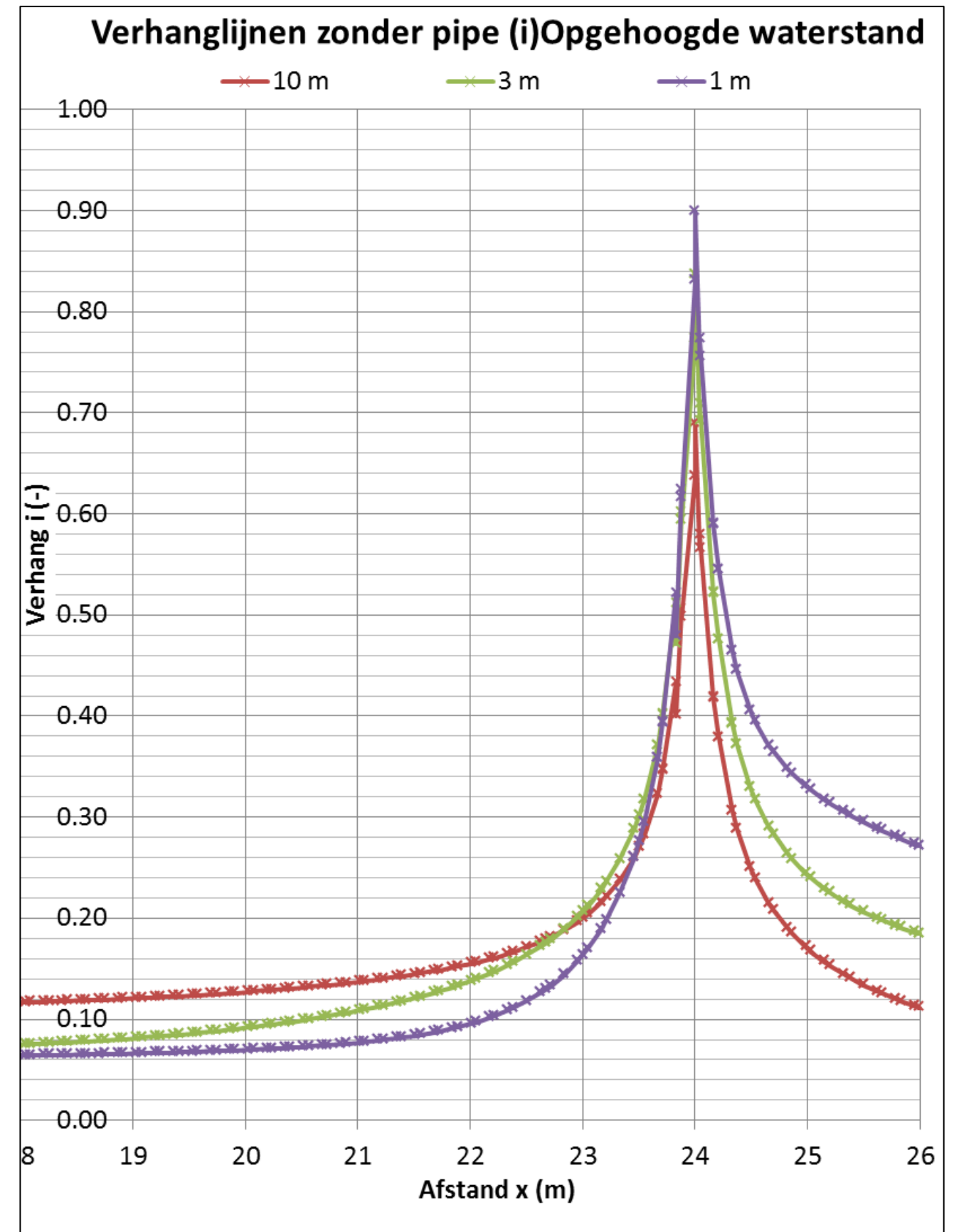
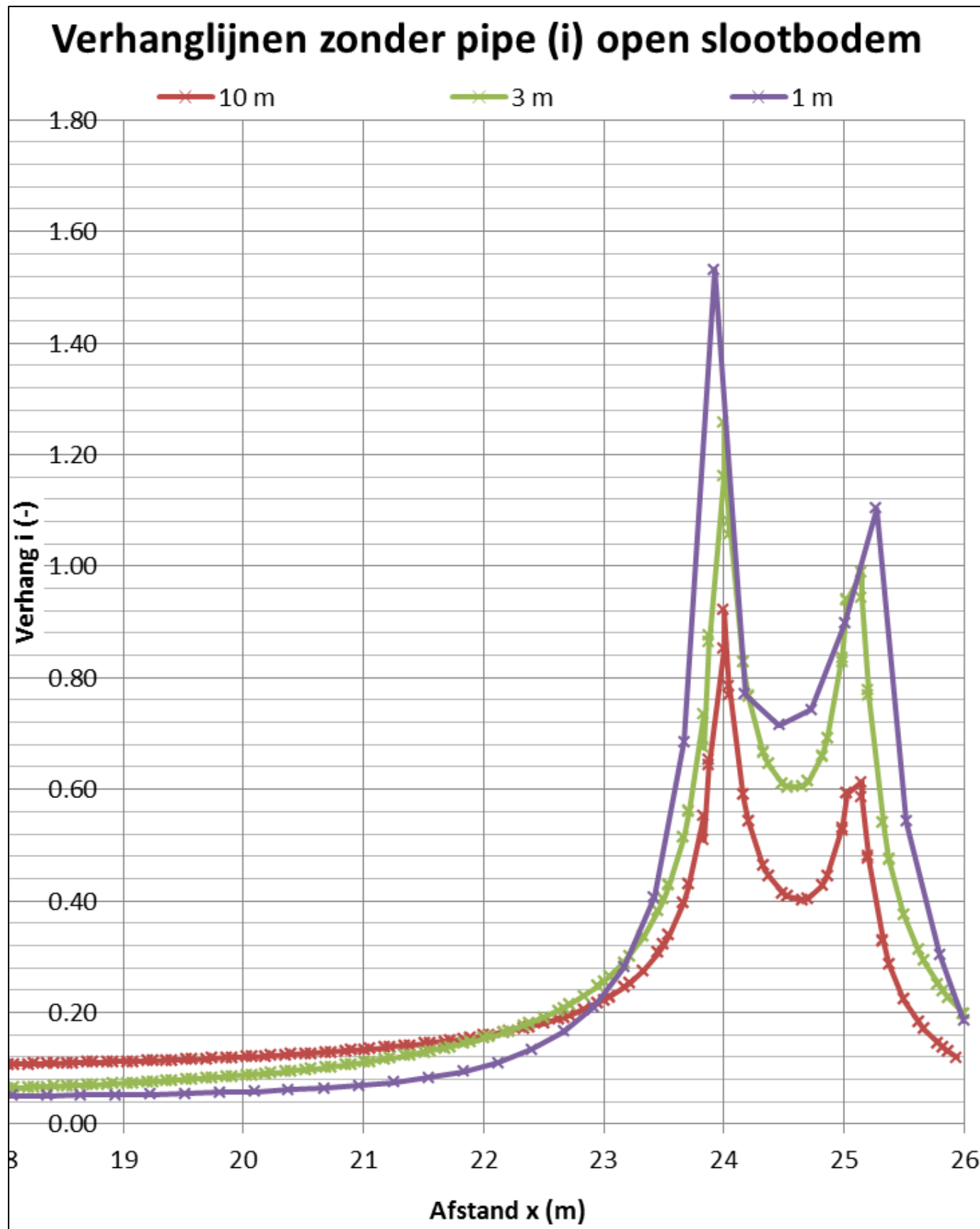


Figuur 63: Verhanglijnen met pipe situatie 'opgehoogde waterstand'.

10.4 Verhanglijnen zonder pipe (PlaxFlow)

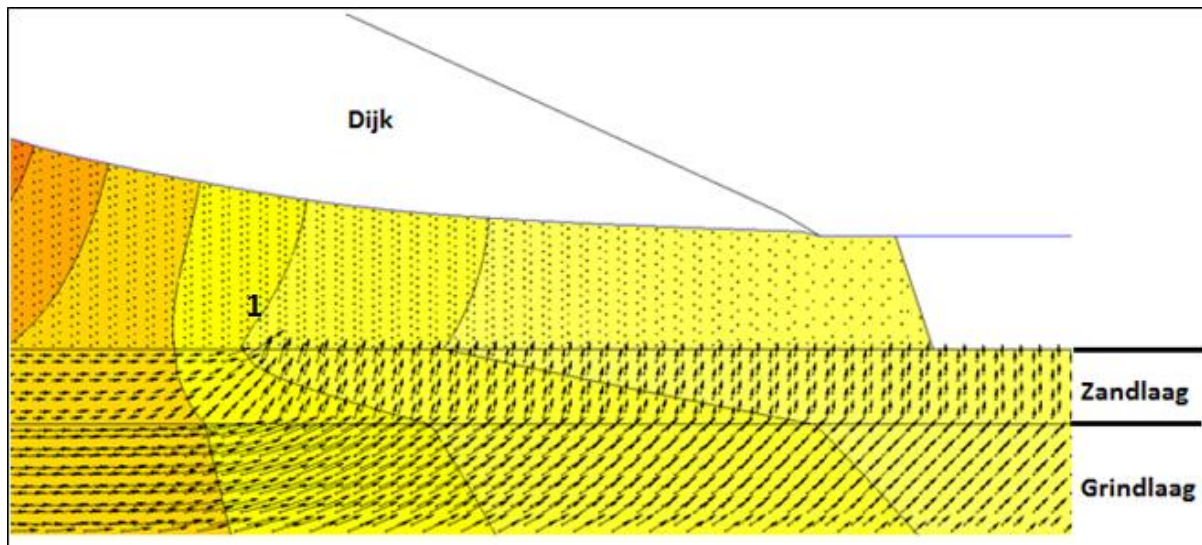


Figuur 64: Verhanglijnen met pipe 'zonder deklaag' en 'opbarstkanaal'.



Figuur 65: Verhanglijnen zonder pipe 'open slootbodern' en 'opgehoogde waterstand'.

10.5 Stroombeeld MSeep



Figuur 66: Stroombeeld uit MSeep (situatie 'zonder deklaag' - 1m zand + 9m grind).

11 Kritieke waterstanden

In deze bijlage zijn de kritieke waterstanden weergegeven voor de verschillende situaties. Hierin ontbreekt situatie 4, omdat deze niet met MSeep kan worden doorgerekend. Er is steeds per situatie en per bodemopbouw een kritieke waterstand weergegeven. Met de formules van Sellmeijer en Bligh wordt in tabel 17 een situatie zonder deklaag doorgerekend (situatie 1 uit MSeep). Deze zijn dus met elkaar te vergelijken. De resultaten die verkregen zijn uit Bligh hebben een vaste waarde omdat Bligh uitgaat van de D_{70} waarde (met bijbehorende creepfactor) van de laag waar piping optreedt. Bligh neemt de invloed van grind niet mee. In tabel 18 zijn de uitkomsten van Sellmeijer en Bligh gecorrigeerd voor een situatie met deklaag door de eerder beschreven '0,3d- regel' toe te passen. Deze zijn nu te vergelijken voor de situaties met deklaag.

Hcrit		situatie (Mseep)			handberekening	
		'zonder deklaag'	'opbarstkanaal'	'open slootbodern'	sellmeijer	bligh
zand	10m	4,84	4,68	4,68	5,15	3,10
	3m	4,21	3,96	4,00	3,89	3,10
	1m	3,88	3,66	3,68	3,75	3,10
		zonder deklaag	met deklaag		zonder deklaag	zonder deklaag

Tabel 15: Kritieke waterstanden voor situatie 1, 2 en 3.

Hcrit		situatie (Mseep)	handberekening	
		gehoogde watersta	sellmeijer	bligh
zand	10m	5,17	5,45	3,40
	3m	4,51	4,19	3,40
	1m	4,17	4,05	3,40
		met deklaag	met deklaag	met deklaag

Tabel 16: Kritieke waterstanden gecorrigeerd voor situatie 5.