



Pipingproef Vijfhuisterdijk - Eindrapportage

Eindrapportage | Vijfhuisterdijk

Fugro-projectnummer 1219-154756

Deltares-projectnummer 11204843

Definitief V4 28-05-2021

Documentbeheer




Documentgegevens

Projectnaam	Pipingproef Vijfhuisterdijk
Documentnaam	Eindrapportage
Fugro-projectnr. Deltares-projectnr.	1219-154756 11204843
Documentnummer	1219-154756-34-R01
Versienummer	4
Opstellers	Marc Hijma, Bernard van der Kolk, Marios Karaoulis (Deltares), Rick van Tilborg (Fugro)
Reviewers	Vera van Beek (Deltares), Gert-Ruben van Goor (Fugro), Kevin van der Giessen (Wetterskip Fryslân), Bianca Hardeman (HWBP)

Klantgegevens

Klant	Wetterskip Fryslân
Adres klant	Fryslânplein 3, 8914 BZ Leeuwarden
Contactpersoon klant	Kevin van der Giessen
Documentnr. klant	-

Versiebeheer

Versie	Datum	Status	Omschrijving	Opgesteld door	Gecontroleerd door	Goedgekeurd door
1.0	14-12-2020	Concept	Initiele versie	MPH, RTI, BVK, MK	KVG, VVB, GRG, BH	
2.0	25-03-2021	Concept	Tweede versie	MPH, RTI, BVK, MK	KVG, VVB, GRG	
3.0	14-04-2021	Concept	Derde versie	MPH, RTI, BVK, MK	KVG, GRG	
4.0	28-05-2021	Definitief	Vierde versie	MPH  RTI, BVK, MK	BH, KVG	HK  GRG 

Projectteam

	Naam	Rol
MPH	Marc Hijma	Projectleider/Senior geoloog (Deltares)
RTI	Rick van Tilborg	Adviseur waterbouw (Fugro)
BVK	Bernard van der Kolk	Adviseur Geotechniek/Waterkeringen (Deltares)
MK	Marios Karaoulis	Geofysisch Adviseur/onderzoeker (Deltares)
KVG	Kevin van der Giessen	Geotechnisch specialist (Wetterskip Fryslân)
VVB	Vera van Beek	Senior adviseur/onderzoeker (Deltares)
GRG	Gert-Ruben van Goor	Team Manager Waterbouw (Fugro)
BH	Bianca Hardeman	Senior adviseur Techniek en Innovatie (HWBP)
HK	Hanneke van der Klis	Unitmanager Bodem- en Grondwatersystemen (Deltares)

Inhoudsopgave

1. Inleiding	3
1.1 Aanleiding	3
1.2 Piping in getijdenzand in een groter verband	4
1.3 Doel van de proef	5
1.4 Leeswijzer	5
2. Projectaanpak	6
2.1 Locatiekeuze	6
2.2 Proefontwerp	6
2.3 Ontwerpnote en draaiboek	6
2.4 Modelleren	6
3. Proefterrein en grondeigenschappen	8
3.1 Geometrie	8
3.2 Grondwaterstand en stijghoogte	9
3.3 Geologie	10
4. Proefopzet	19
4.1 Proefontwerp	19
4.2 Monitoring	23
5. Proefuitvoering	27
5.1 Proefverloop: Twee fases	27
5.2 Uittredepunt	29
6. Resultaten	32
6.1 Stijghoogte	32
6.2 Waterspanningsmeters	33
6.3 Onttrekkingsdebiet	38
6.4 ERT	39
6.5 CSI	41
7. Analyses	43
7.1 Minimaal aangetoonde sterktefactor	43
7.2 Gevoeligheidsanalyse	44

7.3	Kleine schaalproeven	45
8.	Conclusies en aanbevelingen	54
8.1	Algemeen	54
8.2	Doelstellingen	54
8.3	Discussie	56
8.4	Aanbevelingen	56
9.	Referenties	59
Appendix A Logboek		61
Appendix B Vaststellen doorlatendheid		62
Appendix C Leerpunten en evaluatie		80

1. Inleiding

1.1 Aanleiding

Piping is één van de dominante faalmechanismen die de versterkingsopgave van waterkeringen in Nederland bepaalt. De opgave is fors en de impact groot. Tegelijkertijd wordt in het werkveld onderkend dat de rekenregel niet altijd aansluit bij de werkelijkheid of ervaring van beheerders. Een oorzaak hiervoor is dat de Sellmeijer-rekenregel, die voor beoordeling en ontwerp gebruikt wordt, gefit is op proeven met homogeen rivierzand zonder de fijne fractie. Er zijn steeds meer aanwijzingen dat getijdenzand fors meer weerstand biedt tegen piping dan het eerder geteste homogene rivierzand zonder fijne fractie. Uit verschillende onderzoeksprojecten, zowel in het veld als in het laboratorium, volgt dat getijdenzand minstens een factor 2 sterker is dan volgt uit de rekenregel. De extra sterkte wordt deels veroorzaakt door aspecten die de belasting verminderen (toestroming naar de pipe) en deels door aspecten die het pipingproces beïnvloeden. Deze nieuwe inzichten zijn (nog) niet expliciet opgenomen in het beoordelings- en ontwerpinstrumentarium, onder andere omdat praktijkvalidatie nog ontbreekt. De extra sterkte die gevonden wordt, kan door onderstaande factoren veroorzaakt worden:

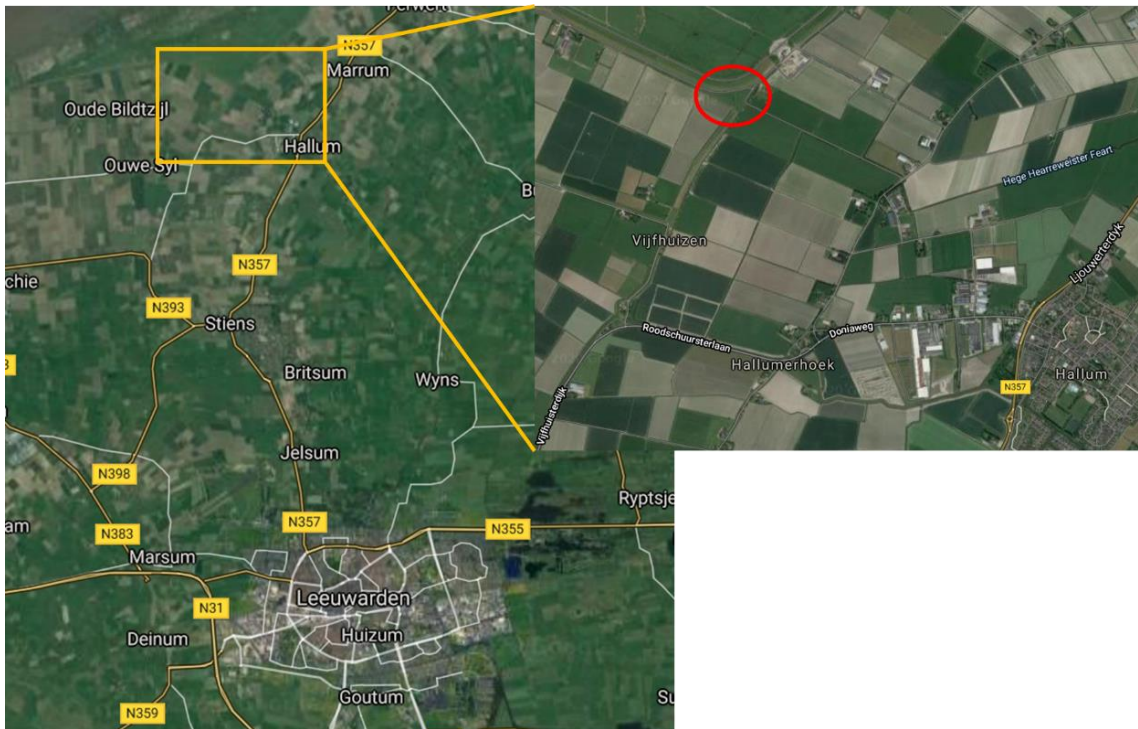
- Meerlaagsheid binnen de getijdenafzetting (variatie in de doorlatendheid tussen lagen).
- Anisotropie in doorlatendheid (voornamelijk door gelaagdheid van klei en zand binnen lagen).
- Hoog percentage fijne fractie (silt en klei; $< 63 \mu\text{m}$), invloed duidelijk aanwezig in internationale literatuur en in kleine schaalproeven.
- Cohesie (tussen kleideeltjes, door kleicoating op zandkorrels, biofilms).
- Doolhof: complexe structuren waarlangs of onderdoor een erosiepijp dient te groeien, vooral door de aanwezigheid van dunne kleilaagjes.

Een grootschalige veldproef naar de overstromingsbestendigheid van een waterkering op getijdenzand tegen piping biedt een welkome kans om de reeds opgedane kennis te valideren en verder te brengen voor toepassing binnen beoordelings- en versterkingsprojecten. Deze toepassing zal leiden tot een kleinere versterkingsopgave (minder afkeur) en een doelmatige, snellere en meer duurzame inzet van middelen met minder ruimtebeslag op trajecten waar wel een opgave ligt (optimalisatie maatregelen). Een dergelijke proef is in september 2020 uitgevoerd langs de Vijfhuisterdijk (Friesland). Voorliggend rapport gaat in op de opzet en resultaten van deze pipingproef in getijdenzand. De locatie ligt aan het traject Koehool-Lauwersmeer, een traject met een forse initiële

pipingsogave, en de resultaten van de proef zijn daarom ook direct inzetbaar tijdens het versterkingsproject dat is gestart voor traject Koehool-Lauwersmeer.

1.2 Piping in getijdenzand in een groter verband

De proef bij de Vijfhuisterdijk moet in samenhang met andere lopende projecten gezien worden en is een belangrijke schakel in het vergroten van de kennis van piping in getijdenzand, anisotropie in doorlatendheid en de invloed van de fijne fractie op piping. De andere projecten betreffen kleine schaalproeven op getijdenzand (Deltares), Anisotropie-onderzoek Spui-West (WSHD-Fugro-Deltares) en het lopende Hedwigeproject (WSHD-Fugro-Deltares).



Figuur 1-1 Het proefterrein ligt in Noord-Friesland, ten noordwesten van Hallum en direct ten zuiden van de knik in de primaire kering.

Bij het onderzoek naar piping in getijdenzand komt steeds duidelijker naar voren dat het relevant is om een onderscheid te maken in getijdengeul- en getijdenplatafzettingen, waarbij geulafzettingen pipinggevoeliger zijn dan platafzettingen doordat de geulzandpakketten dikker en gemiddeld minder slibrijk zijn. De proef bij de Vijfhuisterdijk richtte zich op platafzettingen, bij de Hedwigepolder zal het om geulafzettingen gaan. Het onderzoek zal uiteindelijk leiden tot een gedifferentieerde aanpak voor deze twee types getijdenzand. De uitwerking hiervan zal plaatsvinden tijdens het Hedwigepolderproject.

1.3 Doel van de proef

Het hoofddoel van de landelijk uitgerolde onderzoekslijn naar piping in getijdenzand, en waar bovengenoemde onderzoeken en deze proef aan bijdragen, is: *de daadwerkelijke sterkte van getijdenzand tegen piping bepalen, de (sterkte)-eigenschappen en het pipingproces karakteriseren en deze kennis vertalen en toepasbaar maken voor beoordelings- en versterkingsprojecten van waterkeringen.*

Het specifieke doel van het uitvoeren van de *in situ* grootschalige pipingproef bij de Vijfhuisterdijk is het onderzoeken van de sterkte van getijdenzand door het valideren van de resultaten van de kleine schaalproeven die eerder in het laboratorium zijn uitgevoerd (Wetterskip Fryslân, 2020). Bij die kleine schaalproeven bleek het getijdenzand gemiddeld twee keer zo sterk. Voor de pipingproef bij de Vijfhuisterdijk is de volgende hoofdvraag opgesteld: *Kunnen we op basis van de resultaten van de kleine schaalproeven en de pipingproef aan de Vijfhuisterdijk extra sterkte van de getijdenzanden in rekening brengen?*

Deelvragen voor het beantwoorden van de hoofdvraag:

- Hoe kan het zand waarop onderzoek gedaan wordt, geotechnisch gekarakteriseerd worden?
- Tot welke SOS-eenheid behoort het getijdenzand?
- Welke mate van anisotropie is aanwezig in het getijdenzand?
- Hoe is de ontwikkeling van de waterspanningen in getijdenzand bij toenemende externe waterdruk?
- Is de ontwikkeling van de waterspanningen in getijdenzand aanleiding tot het meevoeren van zand binnendijks?
- Wat is de weerstand van het type getijdenzand bij de Vijfhuisterdijk tegen piping?

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt kort de projectaanpak en het vooronderzoek beschreven, gevolgd door een hoofdstuk dat het proefterrein beschrijft, in aanvulling op het draaiboek dat voor de proef geschreven is (Deltares et al., 2020). Het navolgende hoofdstuk gaat in op het proefontwerp en hoe deze uiteindelijk in het veld gerealiseerd is. Hoofdstuk 5 beschrijft de proefuitvoering, inclusief de CSI en de monsternamen, waarna de resultaten beschreven worden in hoofdstuk 6. Hoofdstuk 7 geeft vervolgens de analyses van de proefresultaten. Aangezien de proef bij de Vijfhuisterdijk gevolgd wordt door een vergelijkbare proef in de Hedwigepolder, zijn alle lessen die bij de Vijfhuisterdijkproef getrokken zijn gedocumenteerd in Appendix C. Het laatste hoofdstuk gaat in op de conclusies en aanbevelingen.

2. Projectaanpak

Het idee voor een pipingproef in getijdenzand in Friesland is ontstaan in 2018. De eerste pilotstudie naar dit onderwerp was net succesvol afgerond (Hijma & Oost, 2018). Deltares en Fugro werkten al vruchtbaar samen in het anisotropieonderzoek van WSHD (Fugro et al., 2020) en in een toelichtend gesprek bij het Wetterskip Fryslân (WF) ontstond het idee om een proef uit te voeren bij de Lontkade in het kweldergebied van het Noorderleeg. Uiteindelijk is hiervoor een Plan van Aanpak geschreven voor het HWBP (definitieve versie Wetterskip Fryslân, 2020; eerdere versie verschenen in 2019) en in de herfst van 2019 is daadwerkelijk gestart met het project.

2.1 Locatiekeuze

Eind 2019 werd duidelijk dat de locatie bij de Lontkade niet beschikbaar was, omdat de proef tot teveel stikstofdepositie zou leiden in het Natura 2000 gebied. Er is daarom uitgeweken naar een binnendijks gronddepot van WF nabij gemaal De Heining en naast de voormalige primaire waterkering de Vijfhuisterdijk. Dat deze locatie geschikt is voor de proef is vastgesteld naar aanleiding van handboringen, sonderingen en ERT-onderzoek (samengevat in Hijma, 2020a).

2.2 Proefontwerp

Nadat de locatie geschikt bevonden was, is verder gegaan met het detailleren van het proefontwerp. Eerste opzet hiervoor was al gegeven in het PvA van de Lontkade. De detaillering is gedaan op basis van modellering (Van der Kolk, 2020), HPT-AMPT[®] resultaten (Fugro, 2020) en afstemming met aannemers. Hieruit volgden uiteindelijk predicties voor kritieke vervallen en verwachte debieten, op basis waarvan het definitieve ontwerp gemaakt is.

2.3 Ontwerpnootie en draaiboek

Het definitieve ontwerp is vastgelegd in zowel een ontwerpnootie als in een draaiboek. De ontwerpnootie (Hijma, 2020b) was bedoeld als discussiestuk en als overlegmiddel met de aannemers; het draaiboek (Deltares et al., 2020) was bedoeld voor gebruik binnen het projectteam en voor tijdens het uitvoeren van de proef zelf.

2.4 Pipingproef

De pipingproef is in een week uitgevoerd door stapsgewijs de belasting in de vorm van een stijghoogte in het getijdenzand te verhogen. De stijghoogte is verhoogd met infiltratiebuizen. Het uittredepunt is uitgegraven in de deklaag. Zowel het debiet als de stijghoogte is tijdens de proeven gemeten.

2.5 CSI en schaalproeven

Na de pipingproef is de grond bij het uittredepunt vrij gegraven voor een visuele inspectie en de mogelijkheid om monstermateriaal voor laboratorium- en schaalproeven te hebben. Deze fase wordt CSI (Crime Scene Investigation) genoemd.

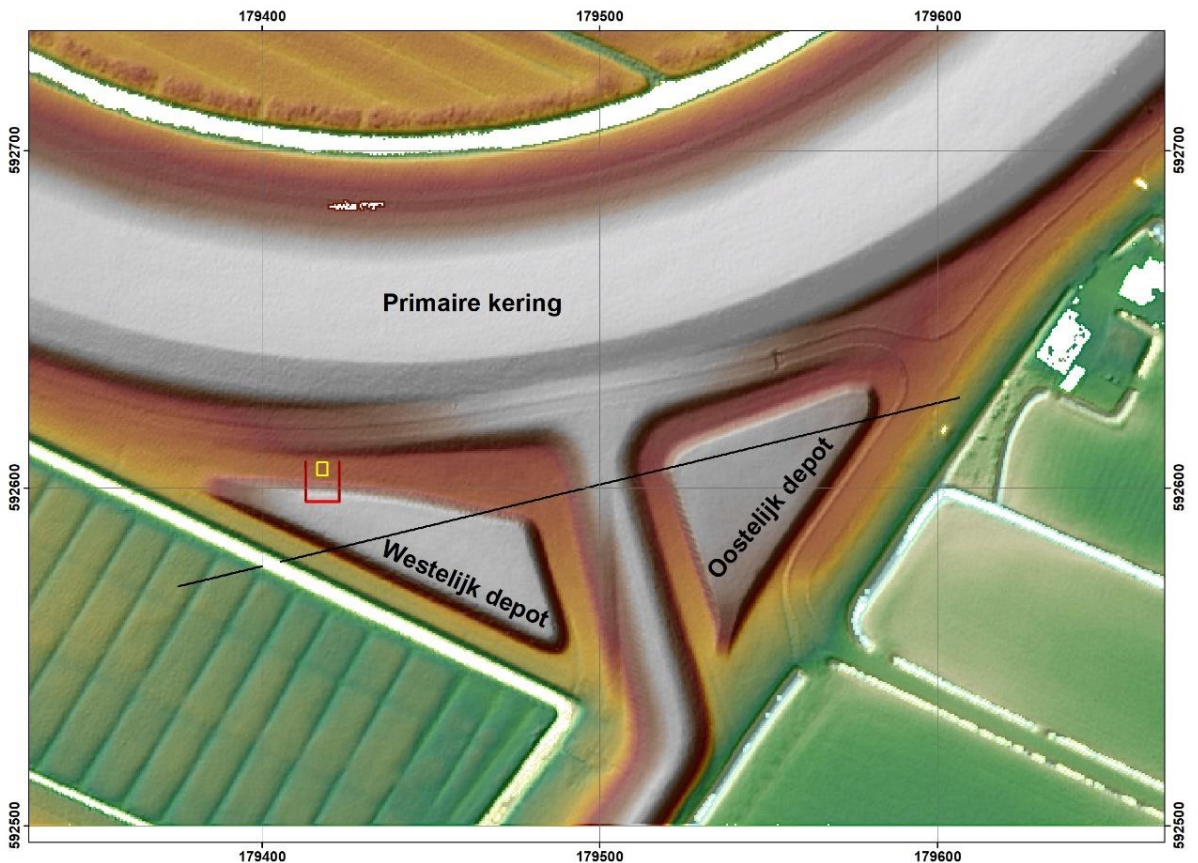
2.6 Modelleren

Voor het modelleren van de grondwaterstroming en kritieke zijn verschillende modellen gebruikt. Deze worden hieronder kort benoemd:

- Plaxis (Flow) : gebruikt om de semi-3D (as-symmetrische) grondwaterstroming en waterspanningen te berekenen tijdens de HPT-AMPT metingen. Op basis van de Plaxis-berekeningen en de HPT-AMPT metingen zijn de verticale en horizontale doorlatendheden en de mate van anisotropie bepaald.
- D-Geo Flow: is gebruikt voor het berekenen van 2D grondwaterstroming tijdens de proef en het berekenen van de kritieke vervallen op basis van de rekenregel van Sellmeijer. D-Geo Flow is feitelijk een grafische gebruikersinterface (GUI) rondom het eindige elementen rekenplatform DGFlow.
- DGFlow: rekenplatform dat dus gebruikt wordt in D-Geo Flow, maar door Deltares ook direct (zonder GUI) ingezet wordt. Hiermee is het mogelijk om 2D berekeningen te automatiseren of om 3D grondwaterstromingen te berekenen. Er zijn tijdens het Vijfhuisterdijkproject geen kritieke vervallen berekend op basis van 3D grondwaterstroming.

3. Proefterrein en grondeigenschappen

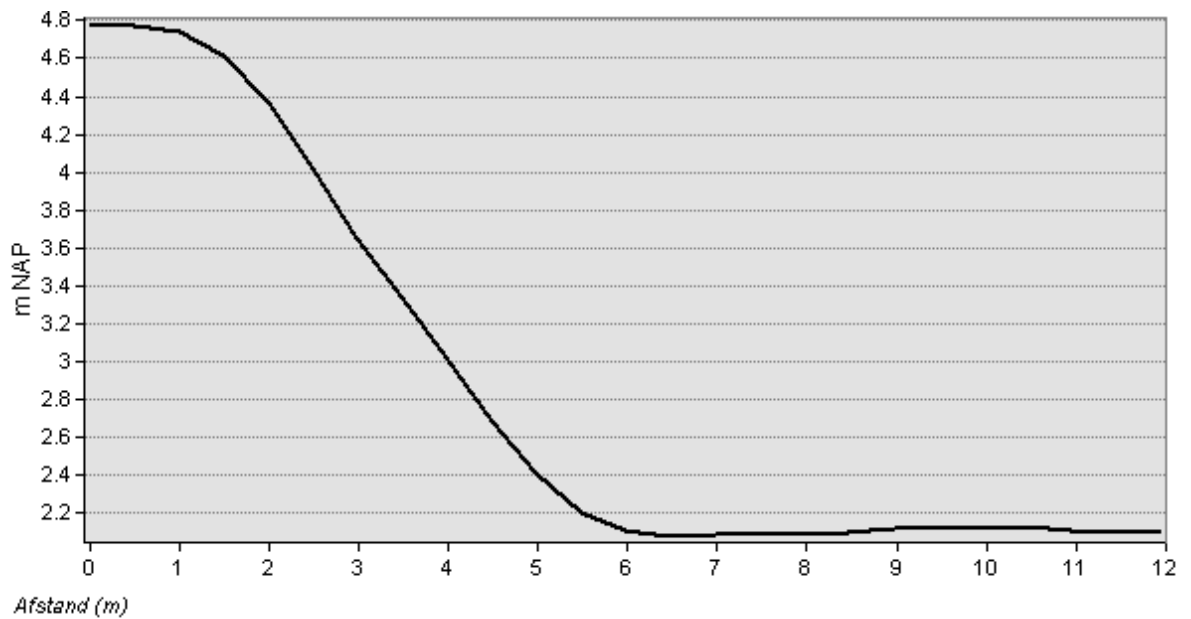
De locatie voor de proef ligt achter de primaire kering op een gronddepot van het Wetterskip Fryslân en bestaat volledig uit grasland. Het depot bestaat uit twee delen die gescheiden worden door een voormalige primaire waterkering: de Vijfhuisterdijk. Deze dijk sluit haaks aan op de huidige primaire kering (Figuur 3-1).



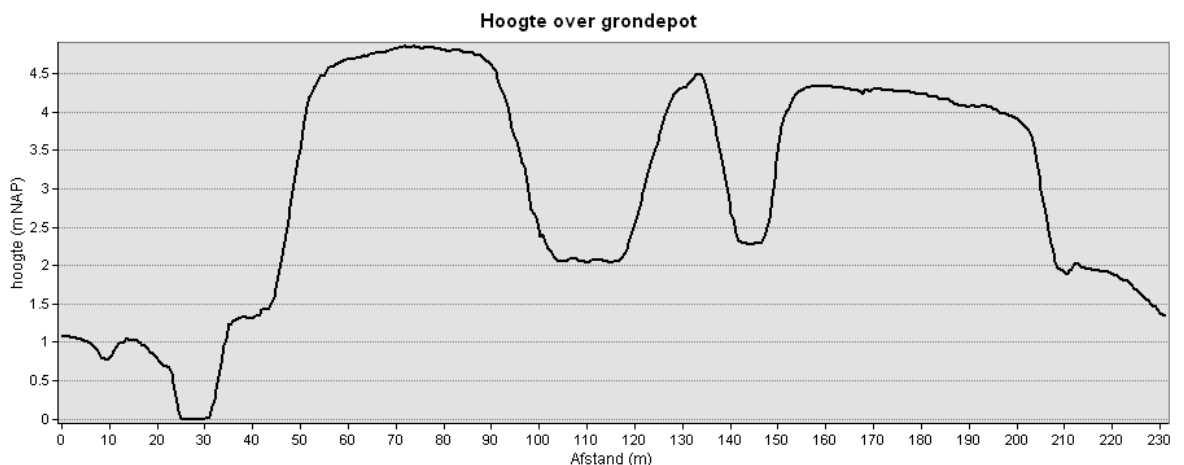
Figuur 3-1 AHN-hoogtekaart van het gebied (groen=laag; wit=hoog) met het hoogtepfiel (zwarte lijn), damwandconstructie (Rode U) en bouwkuip (Gele rechthoek)

3.1 Geometrie

De kruinhoogte van de Vijfhuisterdijk is ongeveer even hoog als die van het gronddepot (zie Figuur 3-3) en bedraagt circa NAP +5,0 m. Het maaiveld ligt ongeveer op NAP +2,1 m. Het talud van het gronddepot is ongeveer 1V : 1H (Figuur 3-2). De geometrie van de proefopstelling wordt behandeld in de beschrijving van de proefopzet.



Figuur 3-2: Profiel van het depot ter plaatse van de proeflocatie



Figuur 3-3 Hoogteprofiel over het depot (zwarte lijn in Figuur 3-1)

3.2 Grondwaterstand en stijghoogte

Het peilbesluit voor de sloot ten zuiden van de proeflocatie ligt op NAP -0,3 m. Tijdens de opbouw en de plaatsing van de sensoren van de proef is gebleken dat de stijghoogte in het getijdenzand ongeveer NAP +0,7 m is. De stijghoogte bouwt, zoals verwacht met een lager slootpeil, vanaf de primaire waterkering richting de kwelsloot achter het gronddepot af. Voor de analyses is de nulmeting voorafgaand aan de proef gebruikt.

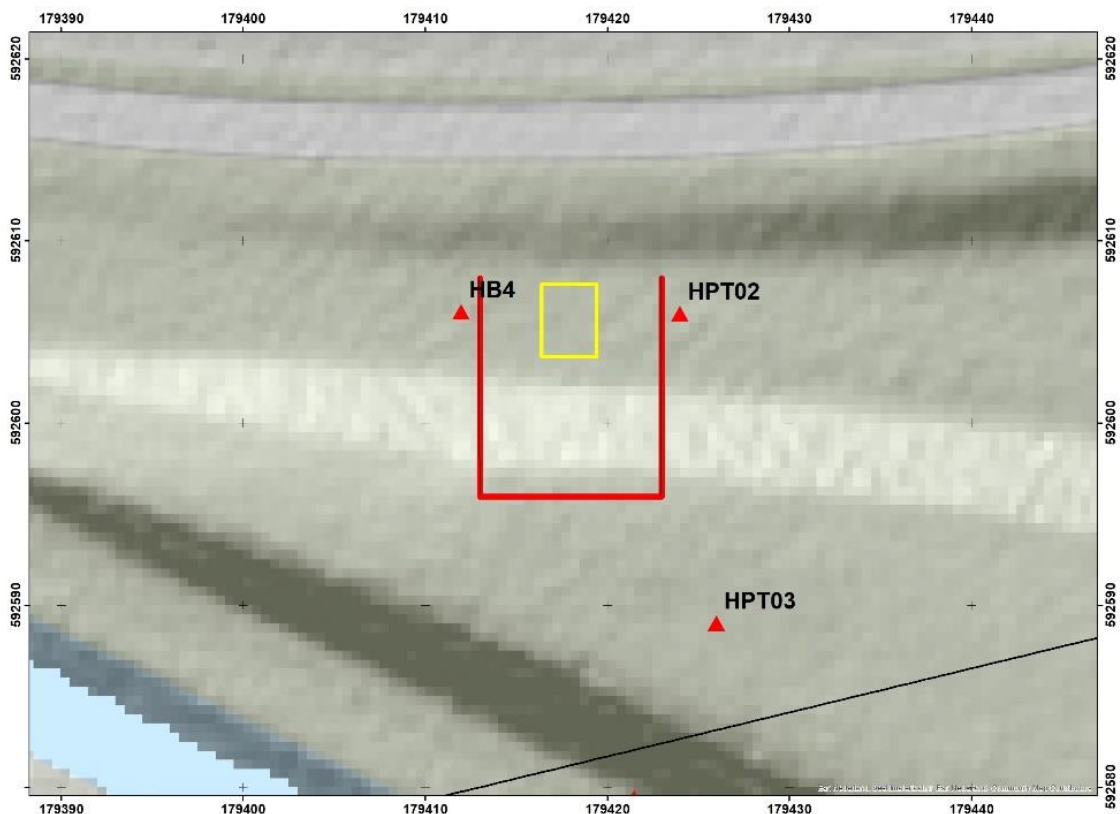
3.3 Geologie

3.3.1 Opbouw van de ondergrond

Voorafgaand aan de proef is de plaatselijke bodemopbouw uitgebreid onderzocht (Karaoulis & Pefkos, 2020) en samenvattend beschreven (Deltares et al., 2020; Hijma, 2020a). De ondergrond ter plaatse van de proef zelf is afgeleid uit omliggende boringen en sonderingen (HB4, HPT02, HPT03; Figuur 3-4) in combinatie met de resultaten van de proef (plaatsing filters en sensoren). De boring (HB4) toont zwak tot matig siltige klei tot circa NAP -1 m gevolgd door het getijdenzand. De geplaatste waterspanningsmeters (zie hoofdstuk 4) laten zien dat het getijdenzand in het gebied meestal rond NAP -0,9 m begint. Sondering HPT02 en HPT03 (Fugro, 2020) laten zien dat het getijdenzand rond NAP -3.25 m ophoudt. Het getijdenzand is opgesplitst in 2 lagen van ieder ongeveer 1 m dik. De bovenste laag bevat meer kleilaagjes en is slechter doorlatend. Tabel 1 vat de algemene opbouw ter plaatse van het uittredepunt samen:

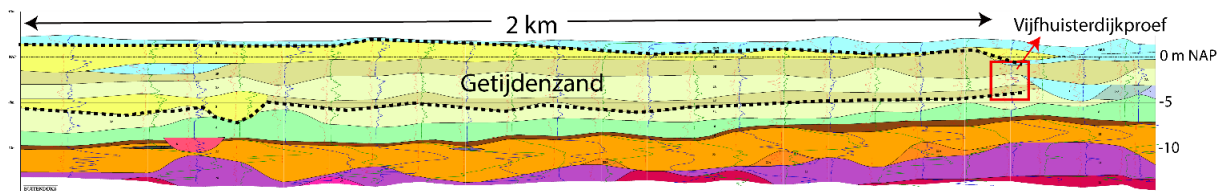
Tabel 1 Schematische ondergrondopbouw

Laag	Top [m NAP]	Basis [m NAP]	Omschrijving	Bron
1	2.1	-0.90	Deklaag: matig tot sterk siltige klei	Boringen en WSM's
2	-0.90	-2.25	Getijdenzand 1 (GZ1): Uiterst siltig zand	HPT2 & HPT3
3	-2.25	-3.25	Getijdenzand 2 (GZ2): Uiterst siltig zand	HPT2 & HPT3
4	-3.25	-4.5	Matig siltige klei	HPT2 & HPT3
5	-4.5	-6.5	Zwak siltige klei	HPT2 & HPT3
6	-6.5	-7	Veen	HPT2 & HPT3



Figuur 3-4 Ligging van het proefopvak in relatie tot de genoemde boring en sonderingen

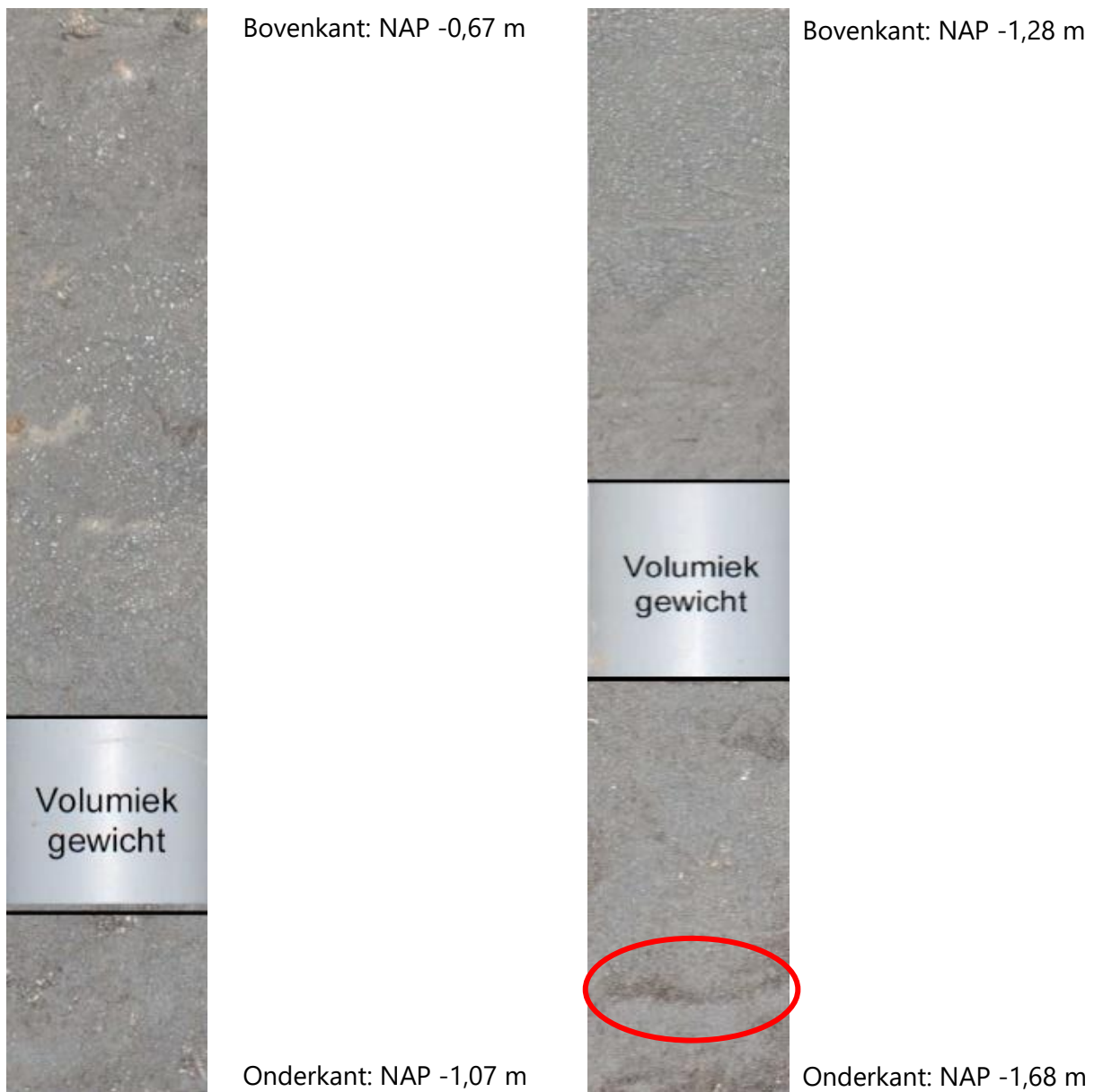
De fotoboringen van de steekbus bij het uittredepunt laten een relatief homogeen pakket getijdenzand zien (zie Figuur 3-6 en Figuur 3-7). De homogeniteit in dit type zand is meestal het gevolg van bioturbatie, omwerking door bodemleven, en karakteristiek voor een bepaald type getijdenplaatafzetting (Hijma & Oost, 2018). Dat het om een getijdenplaatafzetting gaat volgt ook uit de geringe dikte (~2 m) in combinatie met een ruimtelijke verbreiding van vele kilometers. Dit volgt uit boor- en sondeerinformatie uit DINOloket en geotechnische profielen van het Wetterskip (Figuur 3-5). De dikte van het pakket neemt toe richting het westen, richting het centrum van de voormalige getijdengeul van de Middellzee.



Figuur 3-5 Geotechnisch lengteprofiel in de omgeving van de Vijfhuisterdijk. Het beproefde getijdenzandpakket strekt zich tot minimaal 2 km ten westen van de Vijfhuisterdijk uit (tussen gestreepte lijnen). Het profiel is verkregen via Wetterskip Fryslân.

Na de proef is recht onder het uittredepunt een steekbus gestoken (Figuur 3-6), zie ook Fugro (2020). Deze steekbus geeft daarmee het beste beeld van het materiaal dat aanwezig is onder het uittredepunt. In hoofdstuk 5 staat beschreven dat het uittredepunt op NAP -0,55 m lag. De bovenste ± 10 cm bestond uit blubber wat niet op te slaan was in een steekbus, waardoor de bovenkant van steekbus 12 cm dieper begint op NAP -0,67 m. Het is goed te zien dat het GZ1 op de locatie relatief schoon is en niet veel kleilaagjes, maar juist kleine insluitingen en losse schelpjes bevat.

Er is ook een steekbus dieper gestoken (Figuur 3-7), zie ook Fugro (2020). Deze zit ongeveer rond de grens van GZ1 en GZ2. Ten opzichte van het materiaal recht onder het uittredepunt is het materiaal bovenin een stuk "schoner", maar is aan de onderkant een doorlopende verstoring aanwezig (rode cirkel in Figuur 3-7) wat goed aansluit bij het beeld van GZ1. De verstoring bestaat uit organisch materiaal met veel schelpjes.



Figuur 3-6: Fotoboring direct onder uittredepunt (GZ1)

Figuur 3-7: Fotoboring halverwege GZ1

3.3.2 Grondeigenschappen

Bij de voorbereiding van de proef zijn de grondeigenschappen vastgesteld voor de bepaling van de geschiktheid van de locatie en later ook voor het proefontwerp. Deze proeven zijn uitgevoerd net naast de proeflocatie en worden in het vervolg "vooronderzoek" genoemd.

Na de proef is er grond binnen het proefvak deels afgegraven om de daadwerkelijke materiaaleigenschappen van het getijdenzand te bepalen. Dit is achteraf gedaan zodat er geen verstoring voor de proef kan optreden. Deze proeven worden in het vervolg "proefonderzoek" genoemd. Het gaat hierbij om kleine monsters (Kopeckyringen) voor het doorlatendheids- en korrelverdelingsonderzoek. Een Kopeckyring is een kleine monsterring met een diameter van ongeveer 5 cm en een inhoud van ongeveer 100 ml. Dit materiaal is ook gebruikt om het watergehalte, volumiek gewicht en de gloeiverliezen te bepalen. Er zijn

ook twee steekbussen (Lengte: 40 cm, diameter 67 mm) voor de fotoboringen en algemene beschrijving van het materiaal gestoken.

Organisch stofgehalte

Van de monsters is het gloeiverlies bepaald, een maat voor het organische stofgehalte (Tabel 2). Deze percentages zijn laag en het organische stof zal weinig invloed gehad hebben op het pipingproces.

Tabel 2: Resultaat gloeiverlies

	Aantal proeven [-]	Gloeiverlies [%]	
		Mediaan	Stdev
Vooronderzoek	2	0,5	*
Proefonderzoek	10	1,8	0,4
Vershil		+ 1,3	

* Geen standaarddeviatie afgeleid doordat er 2 proeven zijn uitgevoerd

Korrelgrootteverdelingen

Voor de bepaling van de korrelgrootteverdelingen zijn areometerproeven en zevingen uitgevoerd waarmee ook het aandeel van de fijne fractie is bepaald. Het blijkt dat de korrelgrootte d70, die bepalend is in de methode van Sellmeijer, een fractie groter is dan gemeten in het vooronderzoek. Het resultaat voor de d70 is weergegeven in Tabel 3, de fijne fractie in Tabel 4.

Tabel 3: Resultaat korrelverdelingen

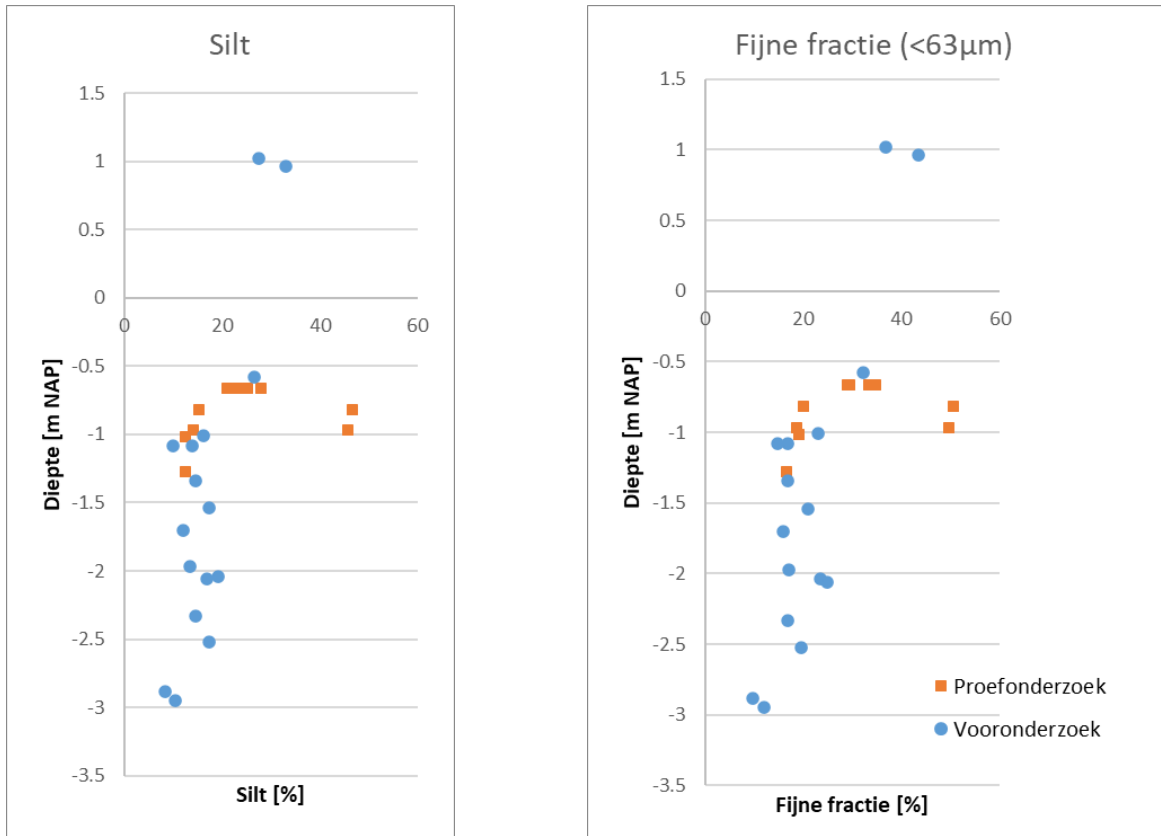
	Aantal proeven [-]	d70 [μm]		d70 zandfractie [μm]	
		Mediaan	Stdev	Mediaan	Stdev
Vooronderzoek	16	104	9	112	8
Proefonderzoek	10	110	13	121	8
Vershil		+ 6		+ 9	

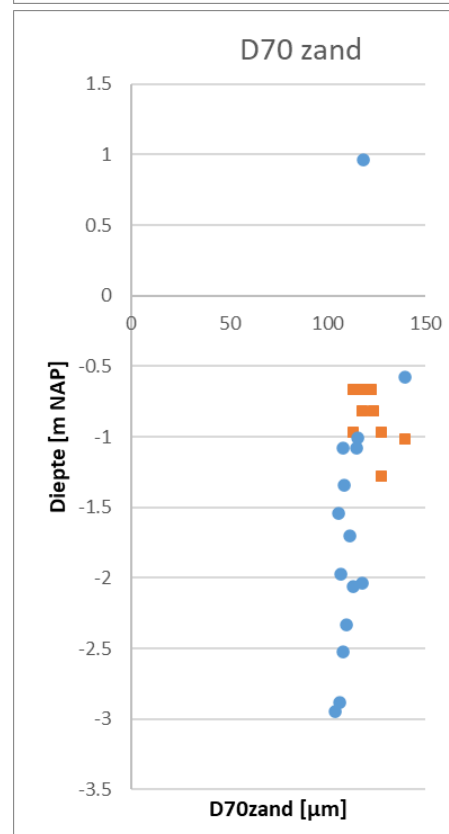
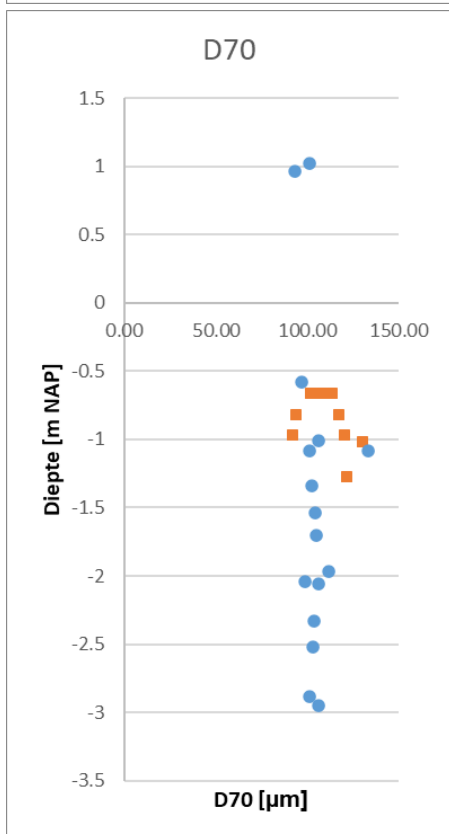
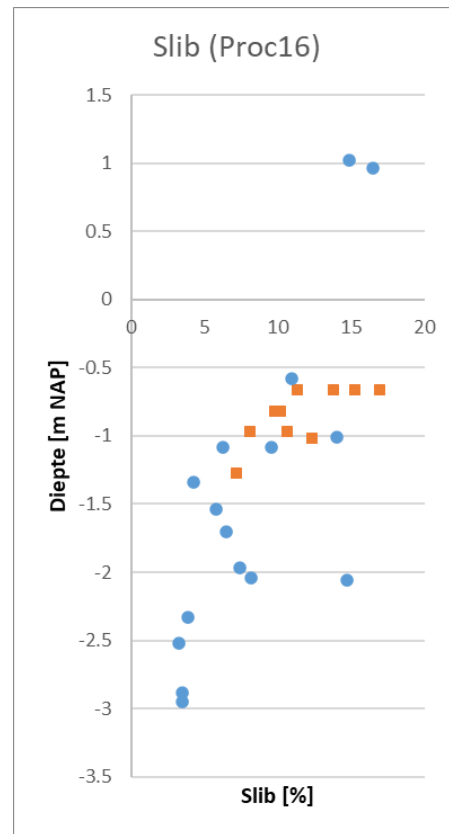
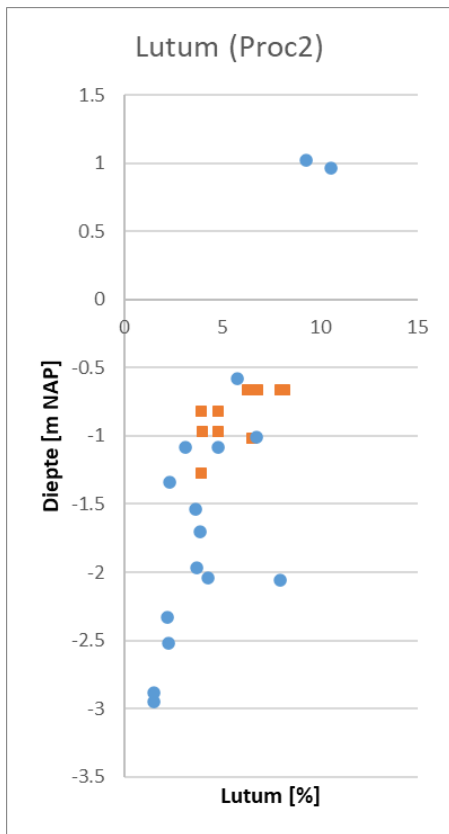
Tabel 4: Resultaat fijn materiaal

	Aantal proeven [-]	Fijne fractie (< 63 μm) [%]		Silt (2 μm – 63 μm) [%]		Slib (< 16 μm) [%]		Lutum (< 2 μm) [%]	
		Mediaan	Stdev	Mediaan	Stdev	Mediaan	Stdev	Mediaan	Stdev
Vooronderzoek	16	20,0	9,1	15,8	6,8	7,2	4,6	3,9	2,8
Proefonderzoek	10	28,1	12,4	21,9	12,7	11,2	3,1	5,6	1,7
Vershil		+ 8,1		+ 6,1		+ 4,0		+ 1,7	

De verschillen tussen het vooronderzoek en het proefonderzoek zijn grotendeels toe te schrijven aan de diepte van het monstermateriaal. Tijdens het vooronderzoek is het monstermateriaal over een groter dieptebereik gestoken. Voor het proefonderzoek bij de

proeflocatie is materiaal net onder de deklaag bemonsterd. Dit is terug te zien in Figuur 3-8, waar duidelijk zichtbaar is dat met de diepte het aandeel fijne fractie afneemt. Dit wordt veroorzaakt doordat tijdens de vorming van de getijdenplaat, deze plaat steeds hoger opslibde waardoor stroomsnelheden afnamen en steeds fijner materiaal werd afgezet. De invloed van deze afzet van fijn materiaal op de D70 is beperkt, zie Figuur 3-8.





Figuur 3-8: Percentage silt, slib, lutum, fijn materiaal en de D70 (zand) ten opzichte van de diepte van het monstermateriaal

Chlorofyl-a

Er is voor een chlorofyl-a analyse alleen na de proef materiaal verzameld. Voor het onderzoek zijn twee monsterzakken gevuld, elk met circa 1 kilogram aan geroerd materiaal. Het materiaal is afkomstig van ongeveer NAP -1,2 m, dus uit de top van het getijdenzand. Chlorofyl-a is een vorm van bladgroen dat gebruikt wordt bij fotosynthese. Het is geopperd dat de hoeveelheid chlorofyl-a een maat is voor hoeveelheid aanwezige biofilms en daarmee een maat voor biologische cohesie (Methorst, 2020). Het onderzoek naar biologische cohesie is in dit project bewust beperkt gebleven tot een eerste verkenning.

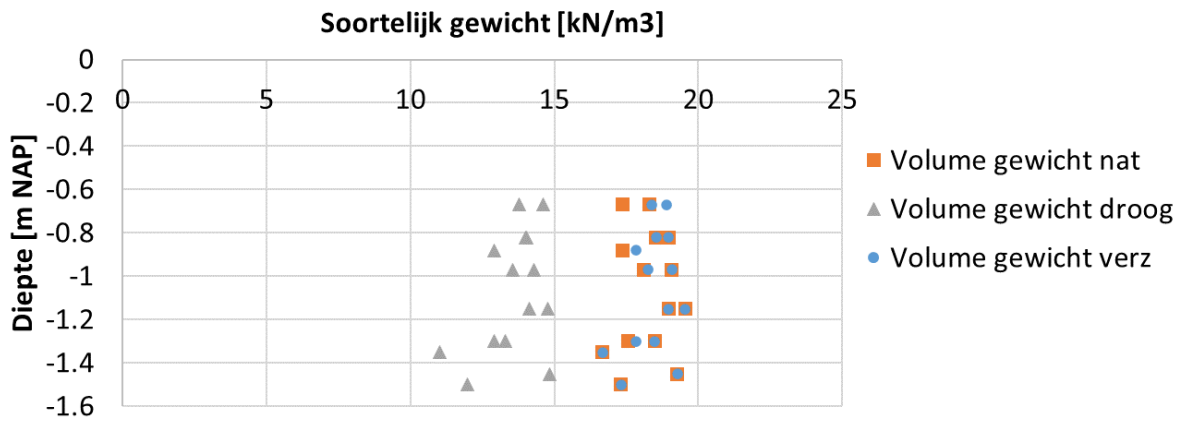
In het materiaal is geen chlorofyl-a aangetroffen boven de detectiegrens. De chlorofyl-a bepaling is uitgevoerd op twee sedimentmonsters in duplo volgens het protocol *Extraction of benthic microalgal pigments for HPLC analyses (2000, Marine ecology progress series 2014: 293-297)*. De meting van het chlorofyl-a zelf is gedaan op de spectrofotometer drLange XION-8, volgens *Protocol for chlorophyll measurement (2016, Radboud Universiteit Nijmegen-Plant Sciences)*. Dit hoeft niet per sé te betekenen dat er geen biofilms aanwezig zijn geweest in het zand. Het is goed mogelijk dat de analyse gevoelig is voor type monsternamen (geroerd monsters) en opslag (wel gekoeld, maar enkele weken opgeslagen geweest; pers. comm. met Stefan Jansen, Deltares). Voor de proef in de Hedwigepolder zal daarom een ander monsterprotocol gebruikt worden.

Volumiek gewicht, watergehalte en poriëngetal

Voor de karakterisering van het getijdenzand is ook het volumiek gewicht en watergehalte bepaald op de monsters waar ook de doorlatendheid mee is bepaald voor het proefonderzoek. Er zijn daardoor 12 sets resultaten bekend. De twee steekbussen, van de fotoboringen (Figuur 3-6 en Figuur 3-7), zijn daarnaast ook beproefd. Bij het vooronderzoek zijn voor dit onderdeel geen proeven uitgevoerd, waardoor er alleen resultaten beschikbaar zijn van GZ1. Tijdens de CSI fase zijn immers alleen monsters genomen van GZ1 (GZ2 zat te diep voor een veilige ontgraving). Op basis van de beschikbare proeven lijkt er geen noemenswaardig verband te zijn tussen de diepte en het volumiek gewicht en watergehalte. Het resultaat is weergegeven in Tabel 5 en Tabel 6.

Tabel 5: Resultaat volumieke gewichten

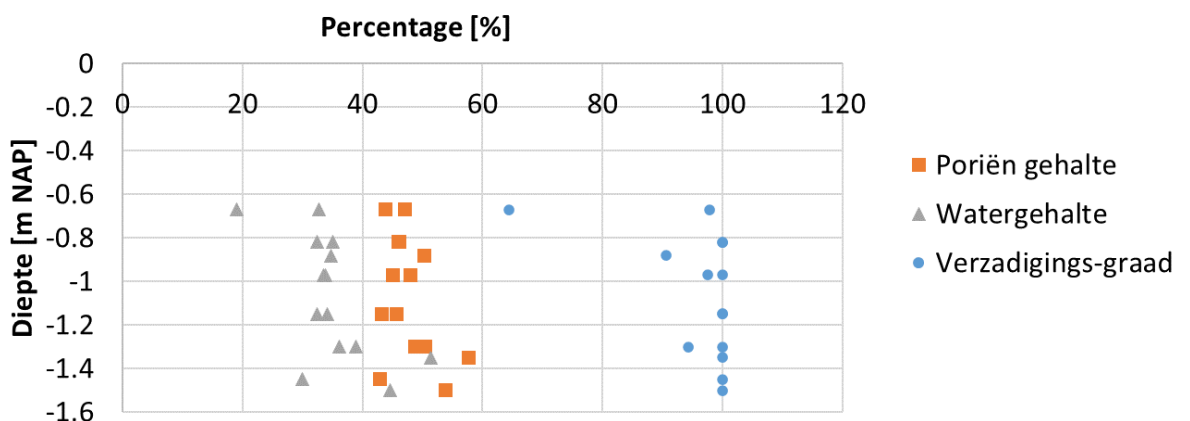
	Aantal proeven [-]	γ_{nat} [kN/m ³]		γ_{verz} [kN/m ³]		γ_{droog} [kN/m ³]	
		Mediaan	Stdev	Mediaan	Stdev	Mediaan	Stdev
Proefonderzoek	14	18,2	0,9	18,4	0,8	13,5	1,1



Figuur 3-9: Geen noemenswaardige trend tussen de diepte en de gewichten binnen GZ1

Tabel 6: Resultaat watergehalte en poriën

	Aantal proeven [-]	Watergehalte [%]		Poriëngehalte [%]		Poriëngetal [-]	
		Mediaan	Stdev	Mediaan	Stdev	Mediaan	Stdev
Proefonderzoek	14	34,2	7,2	47,6	4,2	0,91	0,2



Figuur 3-10: Geen noemenswaardige trend tussen de diepte en gehalten binnen GZ1

Doorlatendheid en anisotropie

Voor het proefonderzoek zijn in het laboratorium net als in het vooronderzoek in totaal 6 anisotropiemetingen uitgevoerd. Hiervoor is per anisotropiemeting een horizontaal en een verticaal gestoken monster (Kopeckyringen) gebruikt. In het vooronderzoek zijn deze monsters geprepareerd uit de in het veld gestoken steekbussen. Hierdoor is voor een anisotropiemeting het monster voor de horizontale doorlatendheid niet in exact dezelfde diepte als voor de verticale doorlatendheid gebruikt (monsters zitten direct boven elkaar). Deze metingen zijn namelijk niet op dezelfde Kopeckyring uitgevoerd. Voor het proefonderzoek na de proef (tijdens CSI) zijn de Kopeckyringen direct in de opgraving (zonder steekbussen) gestoken. Door de monsters direct te steken is er geen preparatieverstoring. Deze monsters voor de anisotropiemetingen zitten daarmee wel op dezelfde diepte, maar direct naast elkaar.

Voor het vooronderzoek zijn daarnaast nog 3 HPT-AMPT sonderingen uitgevoerd. Tijdens de proefuitvoering zijn responsmetingen uitgevoerd waarmee zowel analytisch als numeriek een doorlatendheid is afgeleid. Tot slot zijn in het laboratorium aanvullende pipingproeven uitgevoerd op geroerd materiaal. Hiervoor is afzonderlijk ook een doorlatendheid bepaald. Het resultaat is weergegeven in Tabel 7 en uitgebreid beschreven in Appendix B waarin ook de standaardafwijkingen zijn bepaald.

Tabel 7: Resultaat doorlatendheidsmetingen

Type Proef	Mediaan Kh [m/d]			Mediaan Kv [m/d]			Mediaan anisotropie [-]		
	GZ1	GZ2	Totaal	GZ1	GZ2	Totaal	GZ1	GZ2	Totaal
Laboratorium vooronderzoek	0,13	0,18	0,15	0,05	0,01	0,02	2,54	14,81	6,14
Laboratorium proefonderzoek	0,07	-	-	0,03	-	-	2,39	-	-
HPT-AMPT (vooronderzoek)	0,65	1,48	0,98	0,16	0,17	-	4,1	8,9	5,6
Responsmeting (analytisch)	-	-	1,29	-	-	-	-	-	-
Responsmeting (numerieke)	0,65	1,5	-	0,16	0,17	-	4,1	8,9	-
Schaalproef piping (geroerd materiaal)	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-
Doorstroomproef (geroerd materiaal)	1,0	-	-	-	-	-	-	-	-

Het meest nauwkeurige resultaat is behaald met de HPT-AMPT. Dit onderzoek geeft inzicht in zowel de gelaagdheid als de anisotropie van het getijdenzand. De resultaten blijken ook goed aan te sluiten bij de bulkdoorlatendheden die met de responsmeting zijn bepaald. De pipinganalyses zijn daarom uitgevoerd met de resultaten van de HPT-AMPT aangevuld met enkele gevoeligheidsanalyses voor de doorlatendheid.

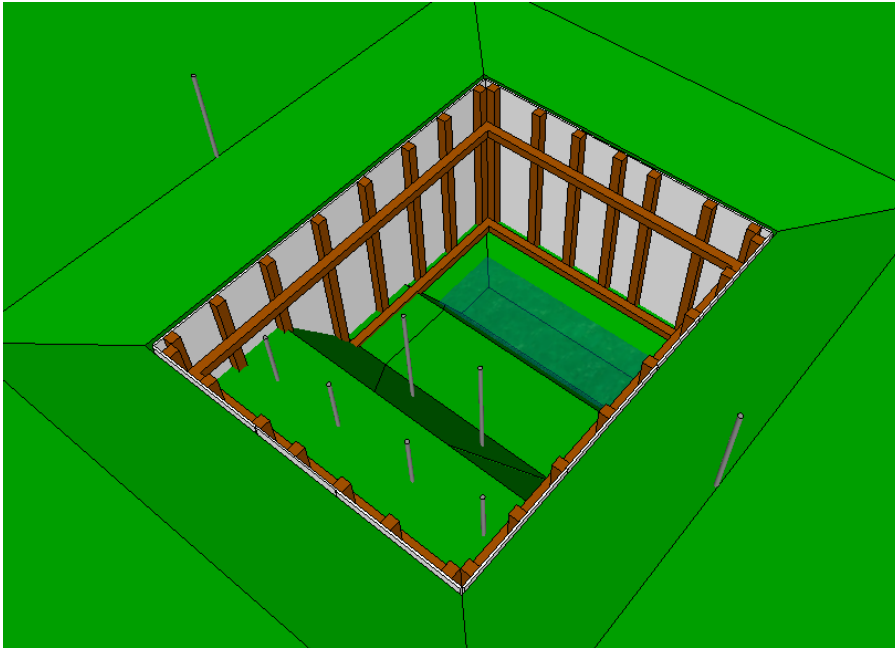
Het blijkt dat de laboratoriumproeven een relatief lage doorlatendheid en anisotropie opleveren. Dit effect is reeds aangetoond in het anisotropieonderzoek bij het Spui (Fugro et al., 2020) en is te wijten aan het schaaffect en een mogelijke selectiebias van laboratoriummonsters.

4. Proefopzet

Met het vooronderzoek zijn ontwerpberekeningen uitgevoerd om te bepalen wat de afmetingen van de proefopzet dienen te zijn. Bij een te grote proefopzet is namelijk onvoldoende verval te realiseren om het pipingproces te starten en een hogere sterkte aan te tonen. Er is uiteindelijk gekozen voor een kwelweglengte rond de 10 m, omdat bij deze lengte het gemodelleerde kritieke verval 2.58-3.16 m is (dit is inclusief meerlaagsheid en anisotropie; exclusief extra sterkte getijdenzand). Rekening houdend met de invloed van 3D-stroming en de extra sterkte levert dit verwachte kritieke vervallen op van 5-6.5 m (Van der Kolk, 2020). Het ruim kunnen leveren van dit verval was leidend bij het proefontwerp. In dit hoofdstuk worden de proefopzet en het ontwerp voor de monitoring beschreven.

4.1 Proefontwerp

Voor de proef is een U-vormige damwandconstructie aangelegd met afmetingen van 12,2 (L) x 9,6 (B) m en een bouwkuip met afmetingen van 3,4 m x 3,4 m (Figuur 4-1 & Figuur 4-2). Figuur 4-3 toont een tekening van de proefopzet, terwijl Figuur 4-4 laat zien hoe de proefopzet er in het veld uiteindelijk uitgezien heeft. Het uittredepunt is in een houten bouwkuip gerealiseerd. De bouwkuip maakte het mogelijk om binnen de beperkte ruimte een diep punt te hebben, zonder dat de wanden instorten. De dikte van de deklaag kon hierdoor aanzienlijk verminderd worden en het verval dus groter. Binnen de bouwkuip zijn 3 niveaus aangelegd. Dit was nodig om rondom het uittredepunt ook ruimte te hebben om te kunnen staan en te inspecteren. Het hoogste niveau, het verst van het uittredepunt, lag het hoogst om zoveel mogelijk tegendruk te hebben. De bouwkuip was van hout om de signalen van de ERT niet te verstoren. Tijdens de proef is het uittredepunt steeds aangepast aan de omstandigheden en wordt daarom niet in deze paragraaf beschreven, maar in het hoofdstuk over de uitvoering (§5.2).



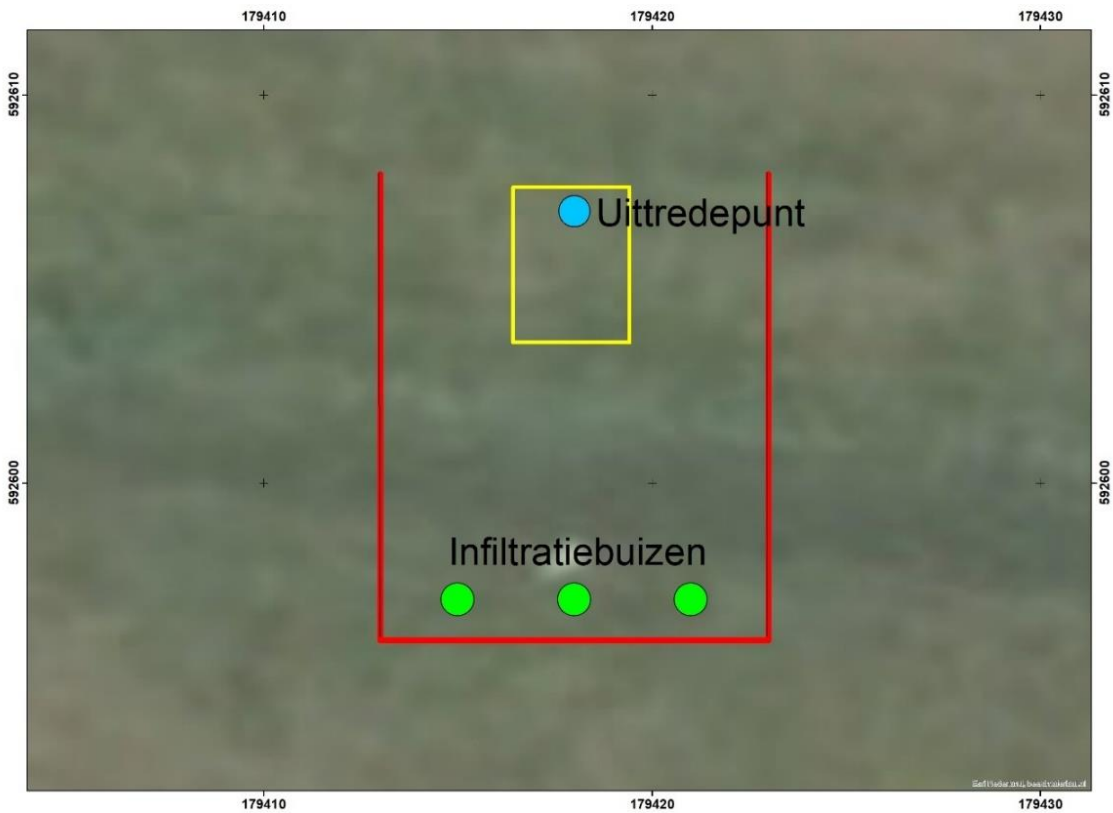
Figuur 4-1: Schetsontwerp van de bouwkuip voor het uittredepunt

Om de waterdruk te kunnen verhogen en piping te kunnen initiëren zijn drie infiltratiebuizen vanaf de bovenzijde van het gronddepot in het getijdensand geplaatst. Deze buizen zijn in de verhoging van het depot geplaatst, zodat er tegendruk aanwezig is van de grond. De afstand tussen het midden van de middelste infiltratiebuis en het midden van het uittredepunt is 10,2 m. De effectieve kwelweglengte loopt echter van de rand van het filtermateriaal rondom de infiltratiebuis tot de rand van het uittredepunt en is ongeveer 9,6 m (in fase 1 was deze iets langer, zie details verderop). De coördinaten van de belangrijkste punten staan in Tabel 8. De details van de proefopzet staan in het draaiboek (Deltares et al., 2020) en worden hier niet herhaald. Een filmpje over de proef is te vinden via <https://www.youtube.com/watch?v=TpectAXNd7g>

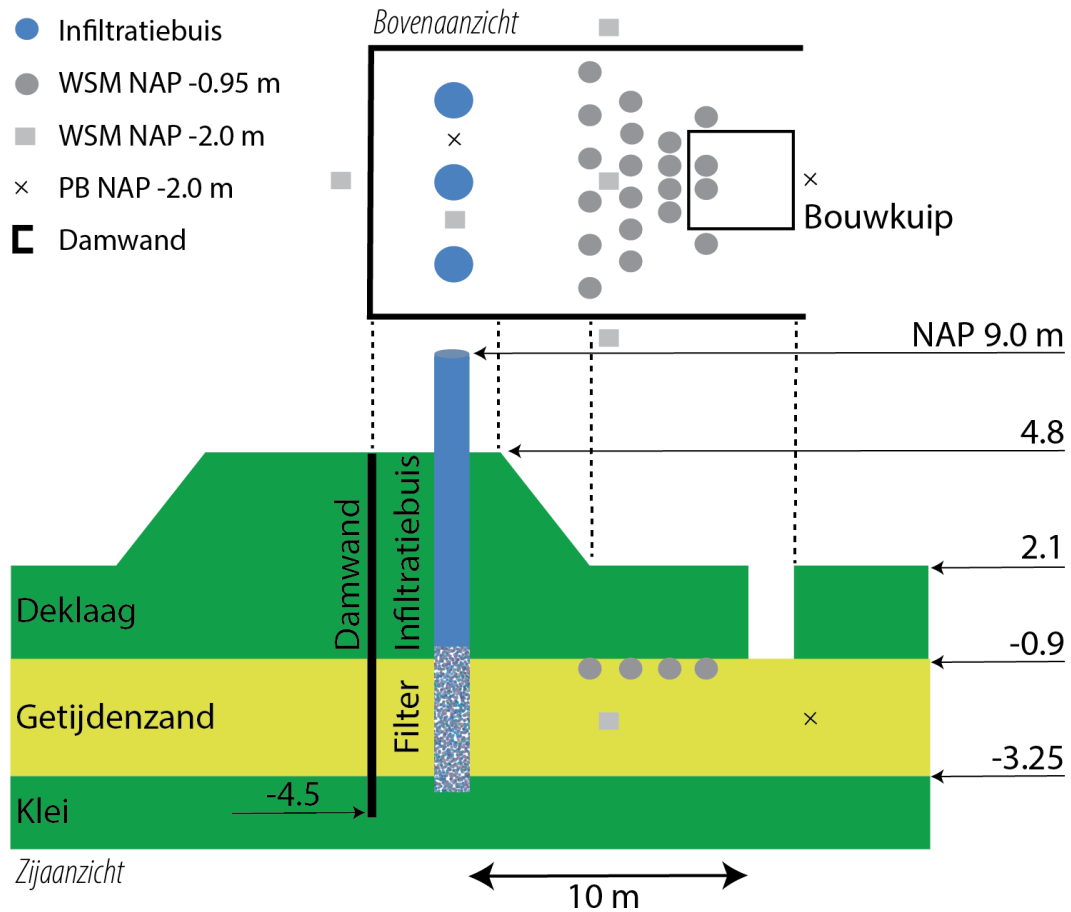
Tabel 8: Coördinaten van belangrijke (hoek)punten bij de proef. Het uittredepunt is tijdens de proef aangepast waardoor de diepte variabel is.

Naam	X	Y	Z	Functie
NW-Damwand	179413,4	592608,3	2,141	Hoekpunt damwand-constructie
ZW-Damwand	179412,6	592596,2	4,713	Hoekpunt damwand-constructie
ZO-Damwand	179422,4	592595,5	4,868	Hoekpunt damwand-constructie
NO-Damwand	179422,8	592607,7	2,088	Hoekpunt damwand-constructie

Inf-1	179414,7	592596,8	9,013	Centrum Infiltratiebuis
Inf-2	179417,5	592596,8	9,103	Centrum Infiltratiebuis
Inf-3	179420,7	592596,7	8,873	Centrum Infiltratiebuis
Uittredepunt	179418,1	592606,9	Var *	Centrum uittredepunt
NW-Bouwkuip	179416,6	592607,9	2,018	Hoekpunt bouwkuip
ZW-Bouwkuip	179416,3	592604,7	1,964	Hoekpunt bouwkuip
ZO-Bouwkuip	179419,7	592604,2	1,988	Hoekpunt bouwkuip
NO-Bouwkuip	179420,1	592607,6	2,047	Hoekpunt bouwkuip



Figuur 4-2: Opzet damwandconstructie (rood) en bouwkuip (geel) bij de pipingproef Vijfhuisterdijk



Figuur 4-3 Schematische weergave van de proefopzet, inclusief de locaties van de waterspanningsmeters.



Figuur 4-4 Foto van de proefopzet

4.2 Monitoring

Tijdens de proef zijn veranderingen in de geleidbaarheid gemeten met ERT en waterdrukken met WSMs.

4.2.1 ERT

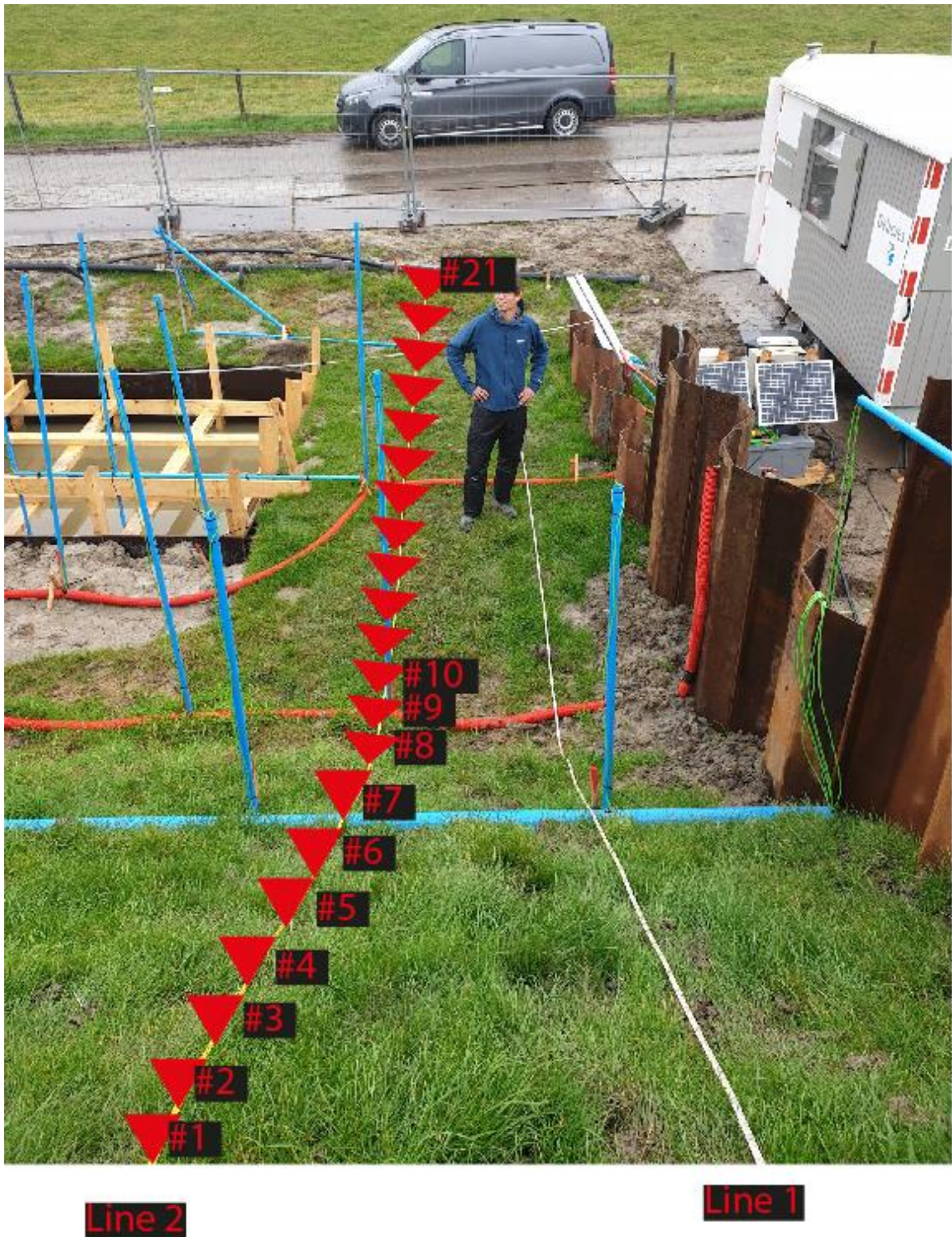
Tijdens het vooronderzoek is de ondergrond van het depotgebied met behulp van ERT-metingen onderzocht (Karaoulis & Pefkos, 2020). Dit heeft bijgedragen aan de uiteindelijke selectie van het locatiegebied. Tijdens de proef zelf is ook ERT-monitoring aangebracht om veranderingen in de ondergrond als gevolg van toenemende waterspanningen en eventueel ontstane pipes te kunnen volgen. Ter plaatse van pipe verandert de samenstelling van de ondergrond (van zand met water naar water) en die verandering zou met ERT te meten kunnen zijn.

Achtergrond

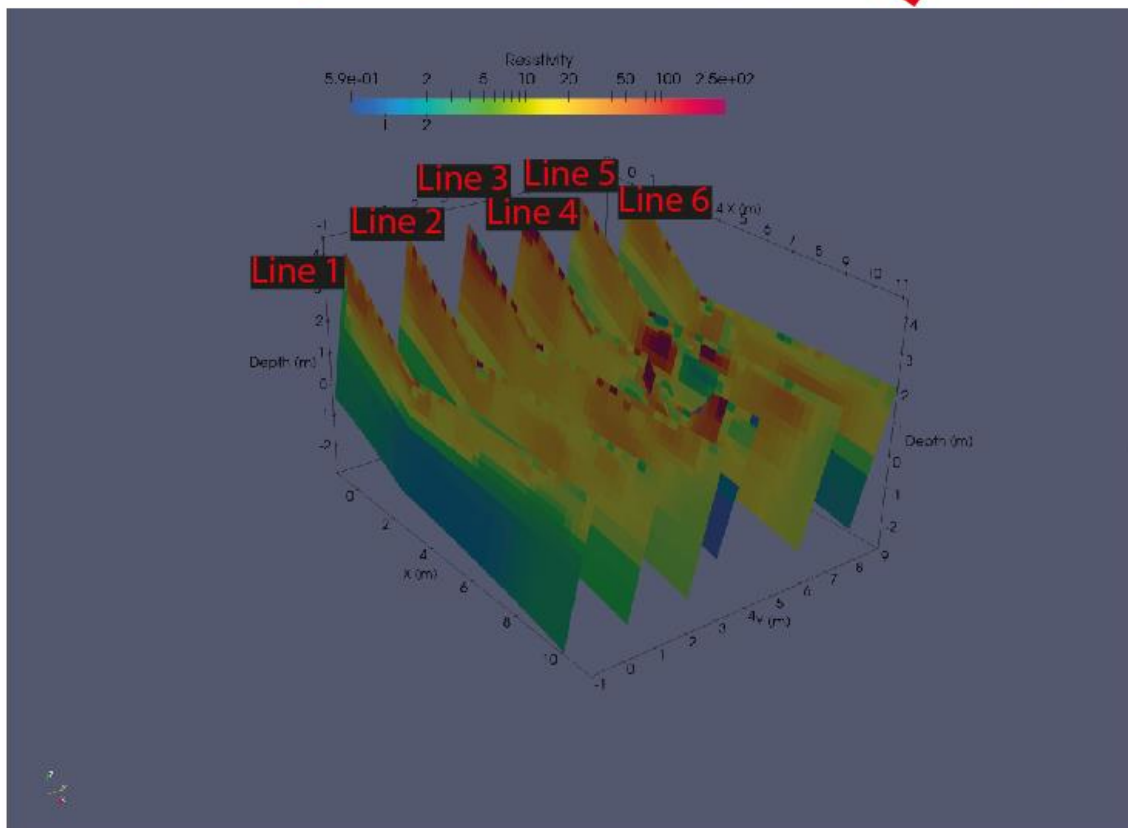
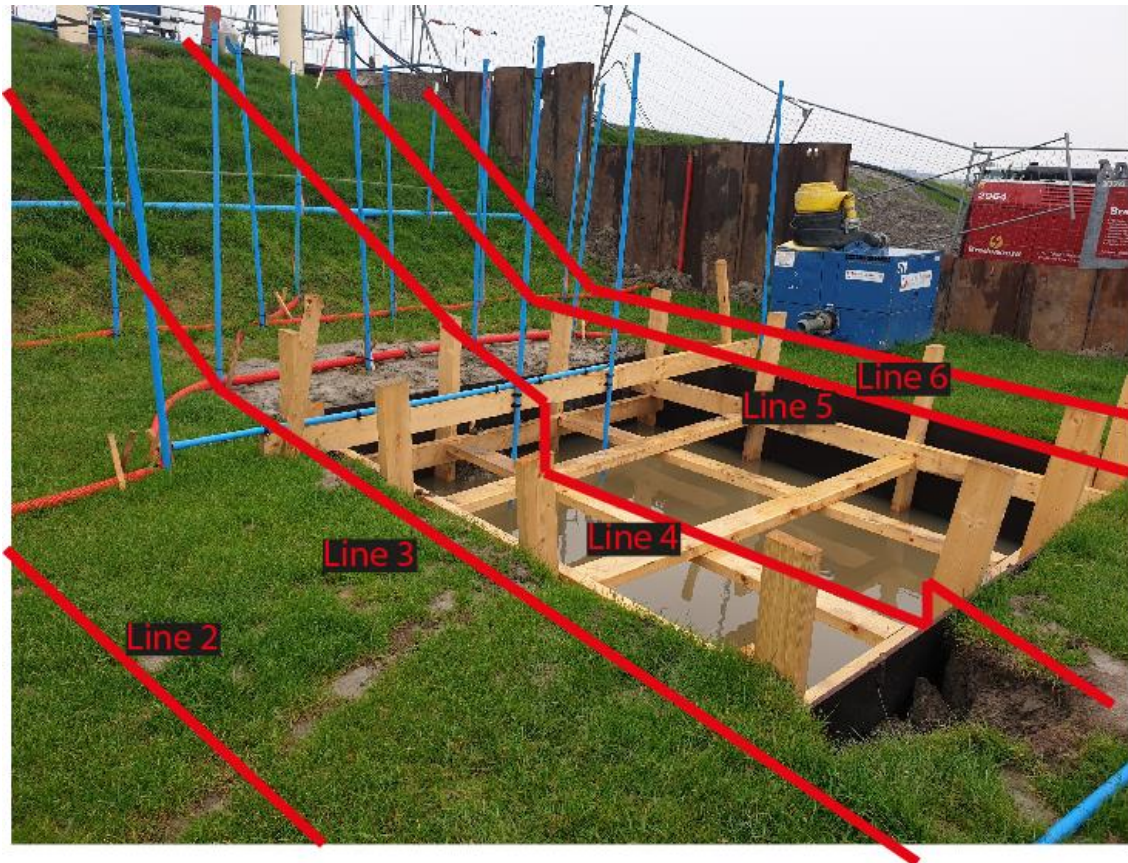
ERT is gebaseerd op verschillen in elektrische weerstanden in een medium, zoals grond of water. De elektrische weerstand is een maat voor de oppositie tegen elektrische stromen. Een grote elektrische weerstand geeft aan dat elektrische stroom moeilijk door het medium gaat. Elektrische weerstand is een materiaaleigenschap en de elektrische weerstand van grond varieert als gevolg van bijvoorbeeld waterverzadiging, grondsoort, verweringsgraad en de samenstelling van het grondwater. De verdeling van de elektrische weerstand van een medium kan bepaald worden door stroom in het medium in te brengen en de elektrische potentiaal te meten. Voor een volledige beschrijving van ERT wordt verwezen naar bijvoorbeeld Revil et al. (2012), maar ook in Karaoulis & Pefkos (2020) is aanvullende informatie over ERT te vinden.

Opzet en gegevensverwerking

Door het proefgebied zijn 6 ERT-lijnen uitgerold, elk met 21 elektrodes. De afstand tussen de elektrodes was 0,6 m (Figuur 4-5). Met deze afstand tussen de pinnen kan tot meer dan 10 m beneden het maaiveld gekeken worden met een horizontale resolutie van circa 0,5 m en een verticale resolutie van circa 0,15 m bovenin. Deze neemt met de diepte af en ligt rond de 3,5 m -mv op circa 0,75 m. Elektrodes 1 t/m 7 lagen op het talud van het depot, elektrodes 8 t/m 21 lagen op het vlakke gedeelte. De afstand tussen de lijnen was variabel, gemeten van de oostelijke damwand lagen de lijnen respectievelijk op 1,2 m, 2,3 m, 3,9 m, 5,5 m, 7,3 m en 8,3 m (Figuur 4-6). De variabele afstand had te maken met de breedte van de bouwkuip waar we slechts 1 lijn door heen wilden leggen. Voor de inversie van de data is gebruik gemaakt van 4D-inversie software (Kim & Yi, 2010). De principes hiervan worden beschreven in Karaoulis et al. (2011).



Figuur 4-5: Positie van de 21 elektrodes per lijn



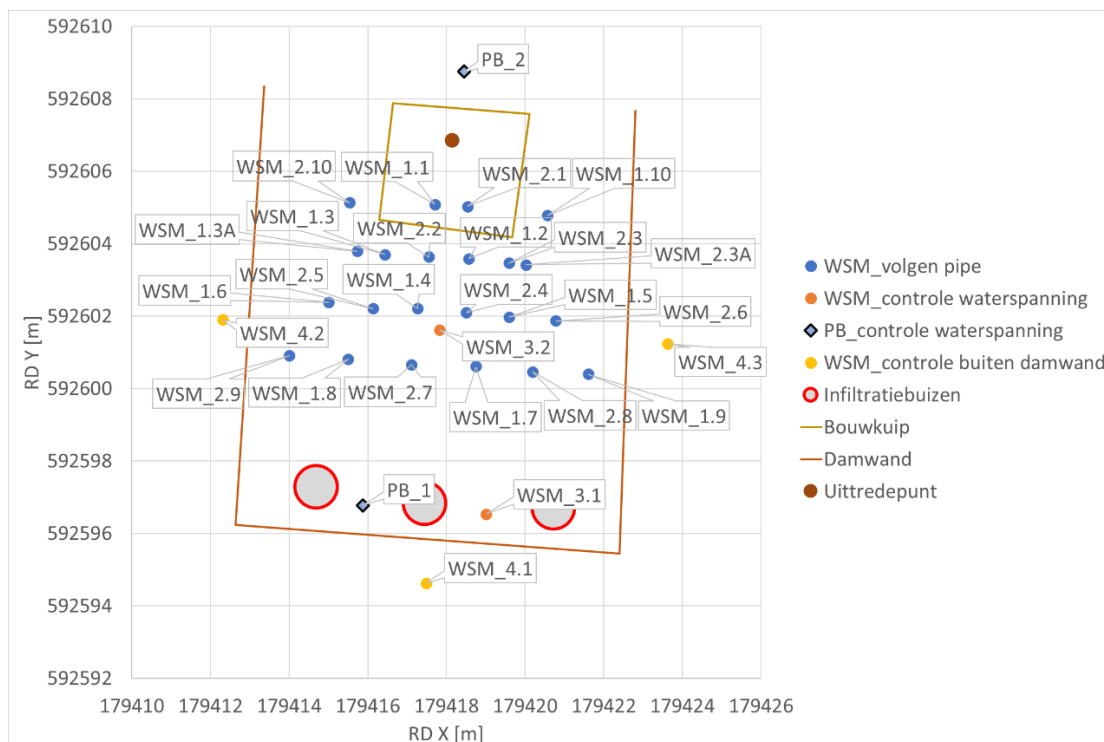
Figuur 4-6: Bovenpaneel: Positie van de 6 lijnen met 21 elektrodes per lijn. Onderpaneel: een voorbeeld van de weerstandswaarden tijdens het begin van de proef. Er is een duidelijk verschil te zien tussen de eerste paar meter (geel) met relatief hoge weerstand (klei, zoet) en de meters daaronder (brakker water)

4.2.2 Waterspanningsmeters en peilbuizen

De groei van een pipe zorgt ervoor dat de waterspanning in het getijdenzand verandert. Om dit goed te kunnen volgen en analyseren zijn waterspanningsmeters (WSM) in meerdere raaien geplaatst. In totaal zijn er 25 WSM's en 2 peilbuizen (PB'n) geplaatst. Deze WSM's en PB hadden drie functies:

1. Het grootste deel (20 WSM's) diende ervoor om eventuele pipegroei te kunnen detecteren. Deze zaten met de sensor op een diepte van gemiddeld NAP -0,95 m. Dit is bovenin het getijdenzand, net onder de deklaag. De WSM's zijn geplaatst in een driehoekige grid zodat ze bij het uittredepunt relatief dicht bij elkaar staan en dichterbij de infiltratiebuizen verder uit elkaar. Dit is gedaan omdat de locatie van de pipe het verst van het uittredepunt het meest onzeker is.
2. Er zijn daarnaast 2 WSM's en 2 PB'n geplaatst om de waterspanningen in het getijdenzand te monitoren. De 4 sensoren zaten in het midden van het getijdenzand (ongeveer NAP -2,0 m), verspreid over de locatie waarbij er 1 PB achter het uittredepunt stond. 2 Sensoren zijn geplaatst tussen de infiltratiebuizen om te achterhalen welke stijghoogte door 3d werking aanwezig is.
3. Om lekkage door de damwanden te detecteren zijn 3 extra WSM's geplaatst buiten de damwanden. Ook deze WSM's zaten op een diepte van NAP -2,0 m. Aan iedere kant van de damwanden is een WSM geplaatst.

Alle WSM's en PB'n meten met een meetfrequentie van 1 Hz. Een overzicht van WSM en PB is weergegeven in Figuur 4-7.



Figuur 4-7: Locaties WSM en PB

5. Proefuitvoering

In dit hoofdstuk wordt het proefverloop beschreven en wordt in detail ingegaan op de uiteindelijke vormgeving van het uittredepunt. Alle genoteerde waarnemingen staan vermeld in het logboek dat te vinden is in Appendix A.

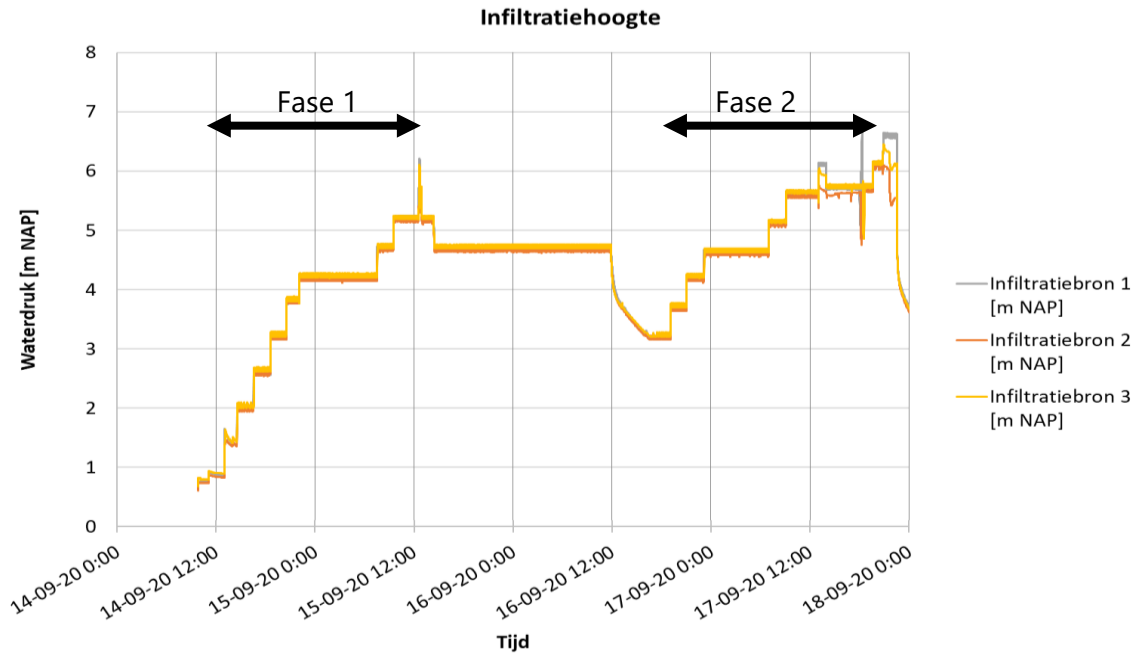
5.1 Proefverloop: Twee fases

Om het kritieke verval te bepalen is het nodig om tijdens de proef te bepalen bij welk verval doorgaande pipegroei optreedt. Het is daarom noodzakelijk om in stappen het verval op te voeren. Hoe kleiner deze stapgrootte, hoe nauwkeuriger het kritiek verval te bepalen is. Na elke verhoging nemen de waterspanningen toe en het duurt enige tijd voordat deze toename afvlakt en de waardes weer stabiel worden. Dit komt doordat de grond bergings-eigenschappen heeft. Voor de proef is ervoor gekozen om stappen van ongeveer 0,5 m per 2 uur aan te houden. Hierdoor is het mogelijk de proef in 1 week af te ronden. De uiteindelijke belastingtrappen zijn afgestemd op het verloop van de proef.

Op de eerste dag (maandag 14 september 2020) is in 6 stappen een waterstand in de infiltratiebuizen van ongeveer NAP +4,2 m bereikt. Gedurende de nacht is er niet verhoogd. Op dinsdag 15 september is vervolgens bij de derde ophoogstap van die dag geconstateerd dat er zeer veel lekkage door de sloten van de damwand aan de oostzijde optrad. Hierdoor begon er water in de bouwkuip te stromen en is besloten de waterstand in de infiltratiebuizen weer af te bouwen. Dit betekende het einde van fase 1, zie Figuur 5-1. In deze fase was de maximale waterstand in de buizen NAP +5,2 m. Tijdens fase 1 is geen enkele zandmeevoerende wel gezien. Er kwam wel water omhoog uit het boorgat, maar met zeer lage snelheden/debietten en nauwelijks waarneembaar.

Er is vervolgens een poging gedaan de lekkage te dichten door schuim in het lekkende damwandslot te spuiten. Toen dit is afgerond is ook het uittredepunt aangepast, zodat een hoger verval bereikt kon worden (meer informatie volgt in §5.2). Vervolgens is op woensdag 16 september fase 2 gestart, waarbij de waterstand in de buizen eerst is afgebouwd tot NAP +3,2 m, zodat er weer begonnen werd met een verval dat lager ligt dan het destijds ingeschatte kritieke verval (zie H4). Hierna is in drie stappen de waterstand in de buizen verhoogd tot NAP +4,6 m. Dit peil is 's nachts stabiel gehouden. Op donderdag 17 september is na twee ophoogstappen een mogelijke lekkage langs de peilbuis tussen de infiltratiebuizen gezien. Ook langs de damwanden begon zeer veel water te stromen, terwijl mogelijk ook langs de infiltratiebuizen lekkage optrad. Hierdoor kon geen stabiele waterstand in de infiltratiebuizen aangehouden worden. In een uiterste poging is de pompcapaciteit verdubbeld. In fase 2 is een maximale (stabiele) waterstand van NAP +5,6 m bereikt. De absolute maximum waterstand in fase 2 bedraagt gemiddeld tussen de buizen NAP +6,4 m. Een hoger niveau halen lukte niet door lekkages. Enkele uren na de start van

fase 2 (om 20:30 op woensdag 16 september) werden de eerste welletjes geconstateerd (Figuur 5-2). Rond 22:30 waren 4 welletjes waarneembaar. Op donderdag 17 september rond 08:00 waren de welletjes zand meevoerend geworden. Deze bleven actief tot het einde van fase 2, maar namen verder niet in omvang toe. Er was duidelijk zanddepositie op de bodem van de buis.



Figuur 5-1: Opgelegde stijghoogte in de tijd (fase 1 en fase 2)



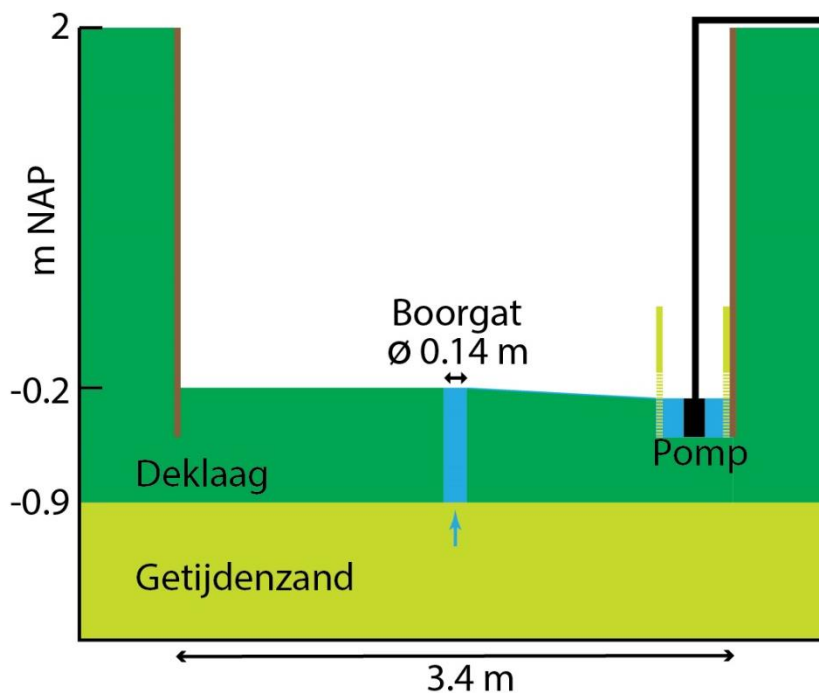
Figuur 5-2 Foto van de vier zandmeevoerende wellen die zijn aangegeven met de rode lijnen: 1 links en 3 in het rechtervlak.

5.2 Uittredepunt

5.2.1 Fase 1

Het diepste punt van de bouwkuip lag uiteindelijk ongeveer op NAP -0,2 m. Dit is minder diep dan aangegeven staat in het draaiboek: daar staat een diepte van NAP -0,5 m tot NAP -0,75 m als gewenste diepte. Deze aanpassing bleek noodzakelijk, omdat de bodem van de bouwkuip in de praktijk niet dieper kon reiken dan MV -2,2 m vanwege veiligheids-overwegingen. Er werden namelijk betonplexplaten van 2,5 m lang gebruikt langs de wanden van de kuip en we wilden de kuip minder diep houden dan de lengte van deze platen. Onder het diepste deel van de bouwkuip was dan nog een deklaag van circa 0,7 m aanwezig (zie §3.3.1) die naar beneden toe steeds siltiger en zandiger wordt. Het getijdenezand onder de bouwkuip begint op ongeveer NAP -0,9 m. In Fase 1 (zie ook Figuur 5-1) is het uittredepunt vormgegeven door het resterende deel van de deklaag te doorboren tot de top van het getijdenezand. De diameter van het boorgat was 0,14 m en het boorgat was 0,7 m diep. Dit is aanzienlijk dieper dan het oorspronkelijk ontwerp, waarin uitgegaan werd van 0,25 m. Dit werd dus veroorzaakt doordat de bodem van de bouwkuip minder diep aangelegd kon worden dan voorzien. Deze opzet zorgde dus voor 0,45 m minder verval en met aanzienlijk meer weerstand in het boorgat dan voorzien.

Het water dat uit het boorgat stroomde werd via een flauwe helling richting een hoek van de bouwkuip geleid waar het werd opgevangen en weggepompt. De opvangkuil zat in een filterbuis, zodat relatief schoon water weggepompt kon worden. Het uittrededebiet werd bijgehouden met een debietmeter.

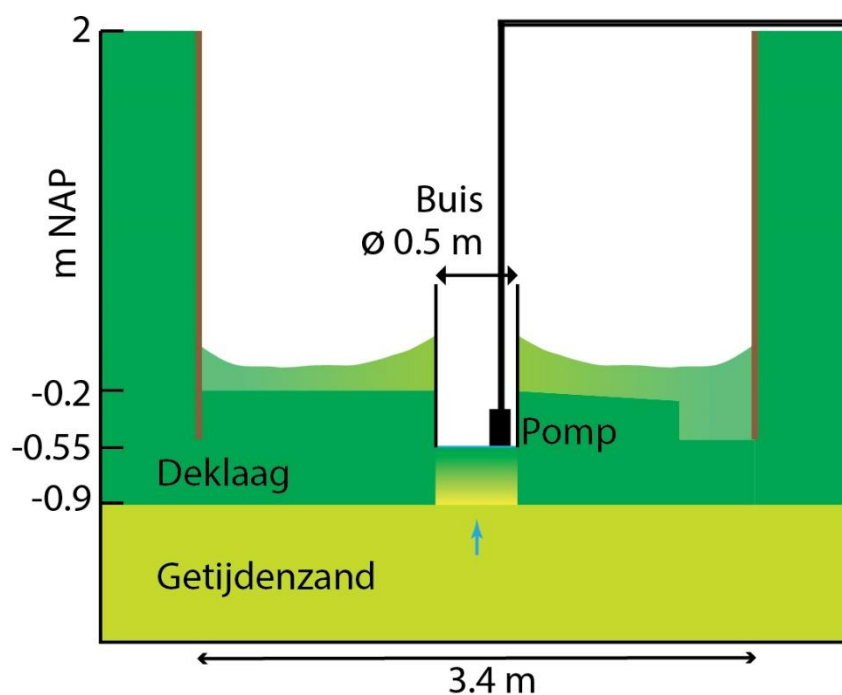


Figuur 5-3 Schets van het uittredepunt in Fase 1

5.2.2 Fase 2

Op Dag 3 is het uittredepunt aanzienlijk veranderd (Figuur 5-4). Rondom het boorgat is een PVC-buis van 1 m lang en met een diameter van 0,5 m zo diep mogelijk ingegraven en ingedrukt. De buis is ingegraven over het boorgat heen. Het binnenste van de buis is hierbij steeds leeggeschept. Uiteindelijk is de buis ingegraven tot NAP -0,55 m, dieper lukte niet. Het daadwerkelijk getijdenzand zat dus nog 0,35 m onder de bodem van de buis. Die 0,35 m bestond uit een mengsel van voornamelijk zand en silt, maar bevatte ook nog lutumdeeltjes. Het mengsel was zeker geen deklaag te noemen, maar leverde wel weerstand op. Het oorspronkelijke boorgat was niet meer zichtbaar. De bodem van de bouwkuip was inmiddels opgehoogd doordat het lekwater veel sediment naar binnen bracht en door het materiaal dat uit het binnenste van de buis geschept was. In de buis werd een pomp geïnstalleerd, die weer verbonden was met de debietmeter.

Deze aanpassing had meerdere voordelen. Ten eerste kon het verval verhoogd worden, doordat het water in de buis steeds afgepompt kon worden en de buis dus leeg stond. Het uittredepunt van fase 1 stond steeds vol water. Een tweede voordeel was dat de gemeten debieten nu ook echt de debieten van het uittredepunt waren. In fase 1 werd feitelijk het debiet van de gehele toestroom naar de bouwkuip gemeten. Een derde voordeel was dat de bodem van het uittredepunt goed zichtbaar was en er dus goede waarnemingen gedaan konden worden. Een vierde voordeel was dat de weerstand tegen heave verminderd werd.



Figuur 5-4 Schets van het uittredepunt in Fase 2

5.2.3 Samenvattend

In fase 1 en fase 2 zijn verschillende uittredepunten gebruikt. Deze worden samengevat in onderstaande figuur.

Fase 1

In de eerste fase bestaat het uittredepunt uit een boorgat vanaf bodem bouwput (NAP -0,2 m) tot het begin van het getijdenzand (NAP -0,9 m). Dit boorgat heeft een diameter van 0,14 m (zie de rode pijl in foto hieronder). Dit boorgat staat vol met water doordat de pomp het water vanaf de bodem van de bouwkuip wegpompt.



Fase 2

In de tweede fase bestaat het uittredepunt uit een buis met een diameter van 0,5 m die helemaal leeg is geschept. De buis wordt steeds leeggepompt, waardoor het verval groter is dan in de eerste fase. De onderkant van de buis staat op NAP -0,55 m. Om te voorkomen dat de pomp het water uit de grond pompt in plaats van uit het gat door vrije uitstroom is de pomp iets verhoogd op een plank neergezet.



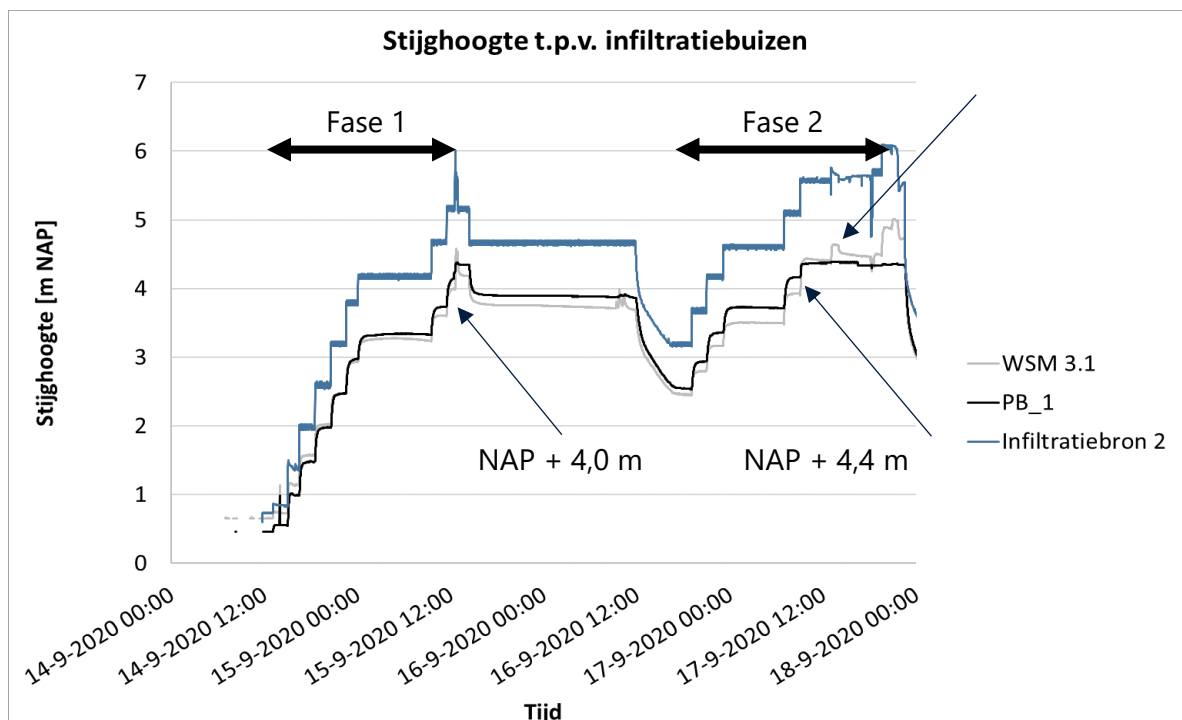
Figuur 5-5: Foto's van het uittredepunt in fase 1 (links, boorgat bij punt rode pijl) en fase 2 (rechts)

6. Resultaten

In dit hoofdstuk zijn de (meet)resultaten van de proef beschreven. Zoals eerder beschreven is de proef in twee fases uitgevoerd. Deze fases verschillen in vormgeving van het uittredepunt. Per fase is de drukopbouw stapsgewijs verhoogd. Alle genoteerde waarnemingen staan vermeld in het logboek dat te vinden is in Appendix A.

6.1 Stijghoogte

Tussen de infiltratiebuizen is de stijghoogte in het getijdenzand gemeten (Figuur 6-1). Dit wordt hier voor het onderscheid ten opzichte van de opgelegde stijghoogte in de infiltratiebuizen, de *gemeten stijghoogte* genoemd. Het blijkt dat de gemeten stijghoogte het patroon van de opgelegde stijghoogte goed volgt, maar wel altijd lager ligt. Dit komt door de 3D werking in de ondergrond, waardoor midden tussen de infiltratiebuizen een lagere waterdruk heerst (holling). Vlak voor de piek van fase 2 is zichtbaar dat er lekkage begint op te treden langs de WSM tussen de buizen. Dit is zichtbaar door een plotselinge afname of scherpe knik in gemeten stijghoogte, terwijl de opgelegde stijghoogte niet veranderd is of geleidelijk aan het toenemen is. De maximaal gemeten stabiele stijghoogte tijdens fase 1 bedraagt NAP +4,0 m (zie pijl). Voor fase 2 is de maximaal gemeten stabiele stijghoogte NAP +4,4 m (zie pijl) met, ondanks de kortsluitingen, een maximale gemeten stijghoogte van NAP +5,0 m. Als er geen lekkage langs de WSM was opgetreden was de gemeten stijghoogte hoger geweest.

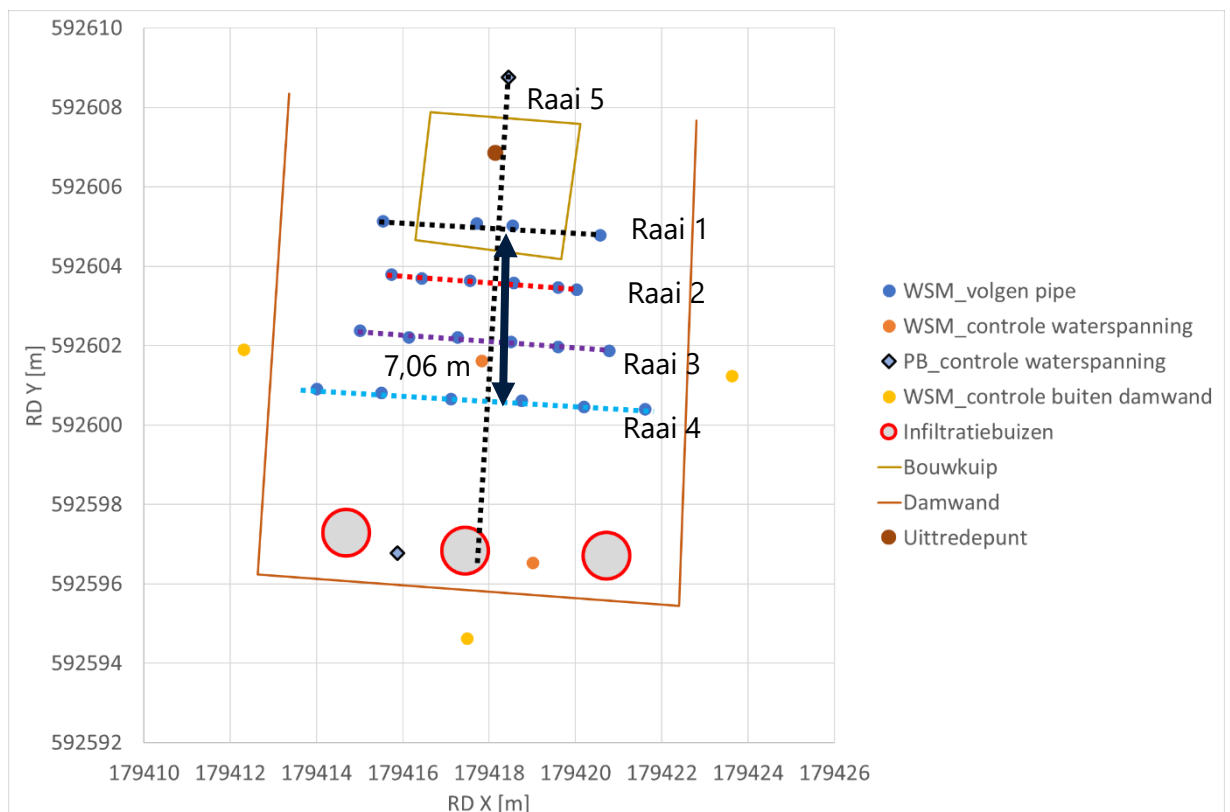


Figuur 6-1: Gemeten stijghoogte in de tijd (fase 1 en fase 2)

6.2 Waterspanningsmeters

De 25 WSM's en 2 PB'n zijn met 1Hz continue gemeten tijdens de proef. In deze paragraaf zijn de resultaten van de metingen gepresenteerd. Dit is gedaan door de WSM data per raai in de tijd te plotten.

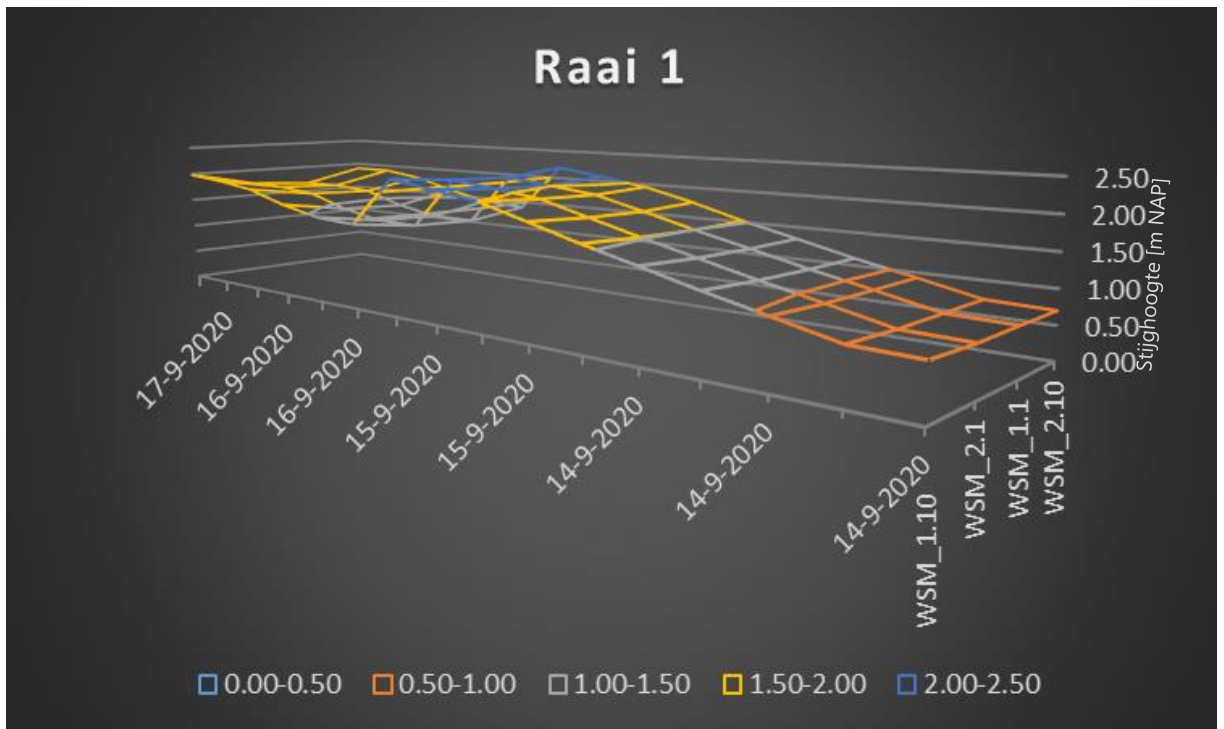
De raaien, zie Figuur 6-2, hebben ieder een eigen functie. De oost-west georiënteerde raaien dienen om de waterspanningsveranderingen ten gevolge van de pipegroei te meten. De noord-zuid georiënteerde raai dient om het globale waterspanningenverloop in het zandpakket te monitoren. De namen van de sensoren zijn gepresenteerd in Figuur 4-7.



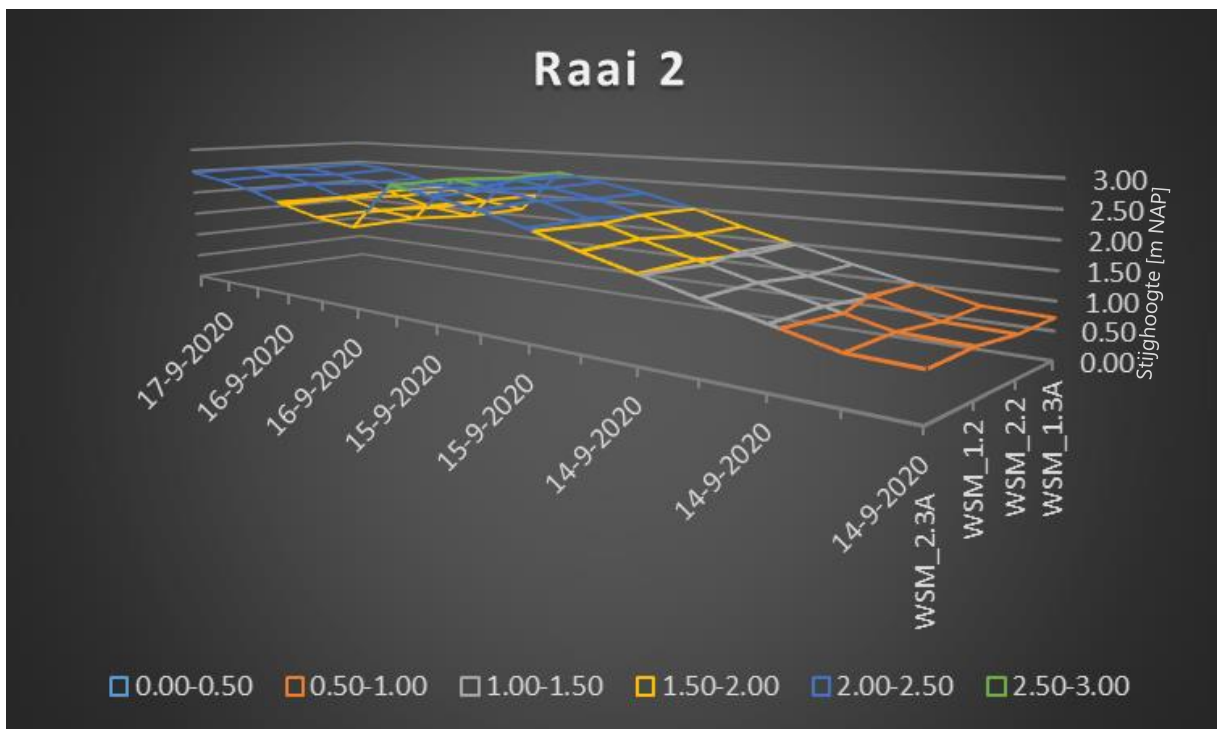
Figuur 6-2: Locaties van de WSM en PB en de verdeling in raaien

De volgende plots laten de stijghoogte per raai geplot in de tijd zien. Het zijn dus geen vlakdekkende plots. De volgende onderdelen zijn afgebeeld:

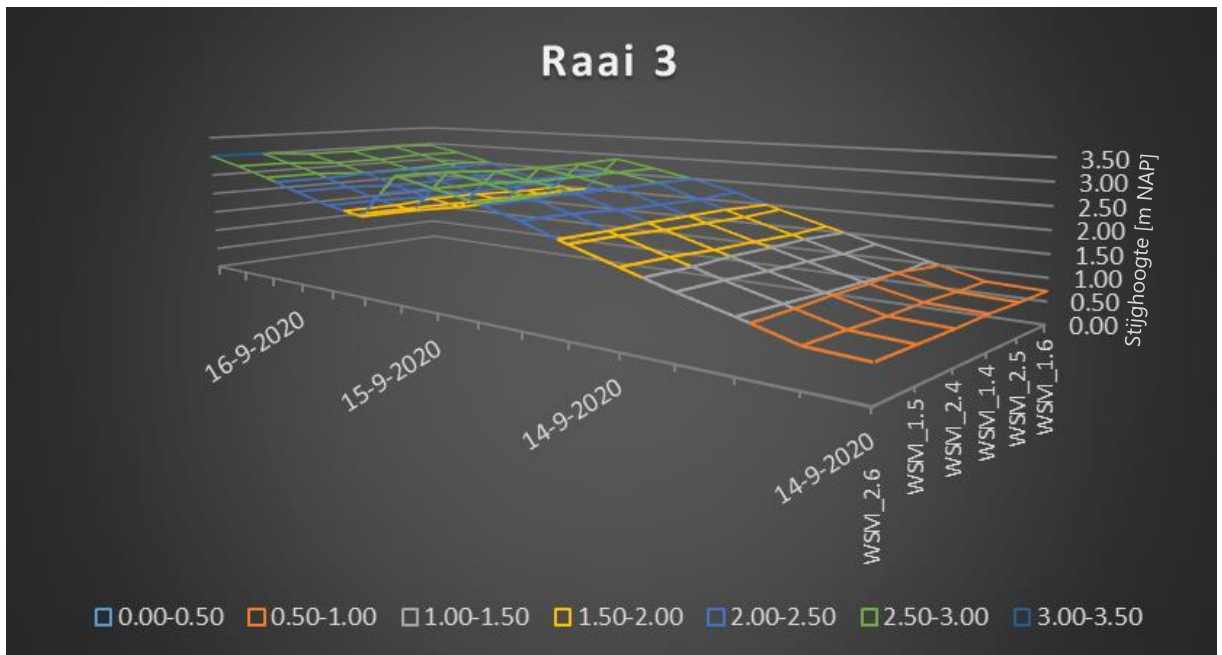
1. Waterspanning voor de pipegroei (bovenin het pakket)



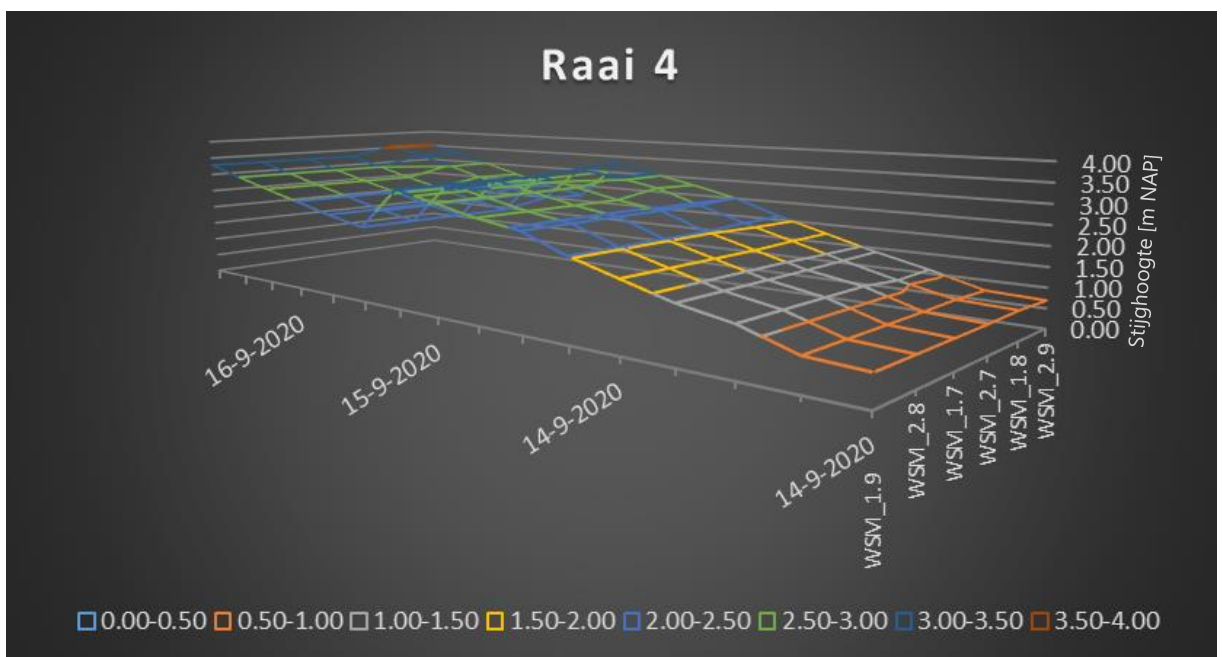
Figuur 6-3: Stijghoogte in de tijd voor raai 1



Figuur 6-4: Stijghoogte in de tijd voor raai 2



Figuur 6-5: Stijghoogte in de tijd voor raai 3



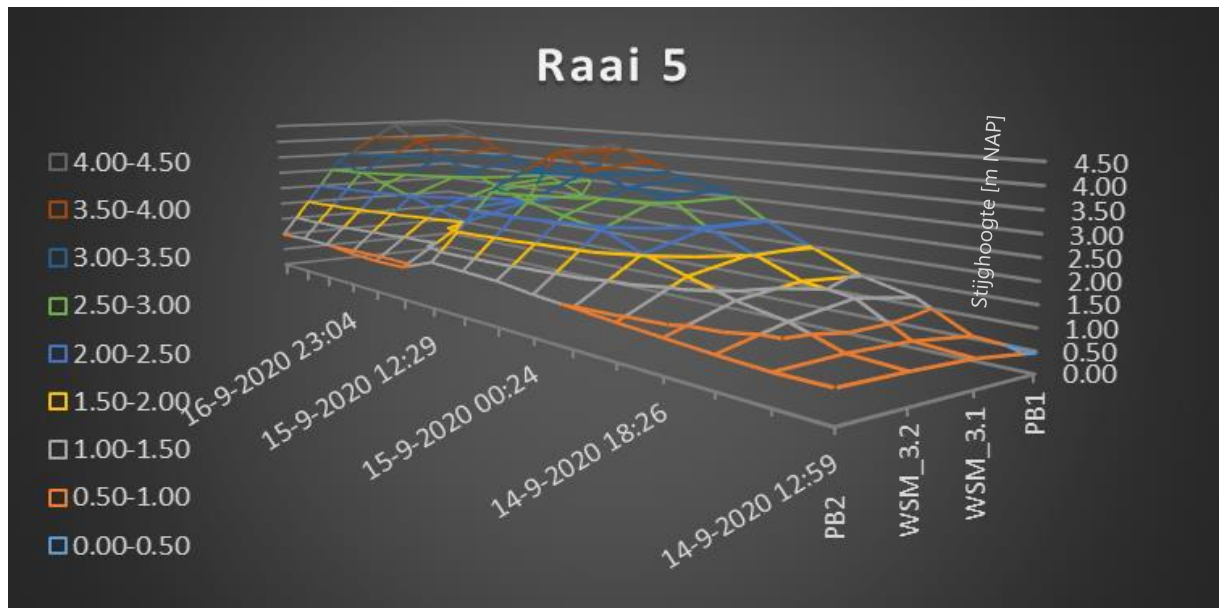
Figuur 6-6: Stijghoogte in de tijd voor raai 4

Het is goed te zien dat de metingen van de WSM's binnen een raai over het algemeen een constante waterspanning oplevert. Hierop zijn twee uitzonderingen te zien, voornamelijk bij periodes met hogere drukken. In raai 1 is een soort kuipvorm te herkennen aan het einde van fase 2 (helemaal links). Dit komt doordat deze raai relatief dicht bij het uittredepunt ligt waardoor de stijghoogte in het midden meer afneemt dan aan de buitenkanten door radiale stroming rondom en naar het uittredepunt. Het absolute verschil in stijghoogte binnen raai 1 is bij de eerste 5 belastingstappen ongeveer 5 cm. Dit neemt naarmate de opgelegde stijghoogte toeneemt toe tot ruim 10 cm aan het eind van fase 1. Het maximum wordt

bereikt aan het eind van fase 2 (30 cm) dit komt doordat het uittredepunt in deze fase groter en dieper is en dit het 3D stromingseffect versterkt.

In raai 4 is in WSM1.8 en WSM2.9 een duidelijke verhoging te zien ten opzichte van de rest van de raai (zie donkerrode lijn als piek linksboven). Dit komt waarschijnlijk door de lekkage die aan die kant van de proef heeft plaatsgevonden. Hierdoor is mogelijk een direct contact ontstaan met de infiltratiebuizen waardoor de stijghoogte hier relatief hoog is.

2. Waterspanningen in het midden van de getijdenzandlaag



Figuur 6-7: Stijghoogte in de tijd voor raai 5

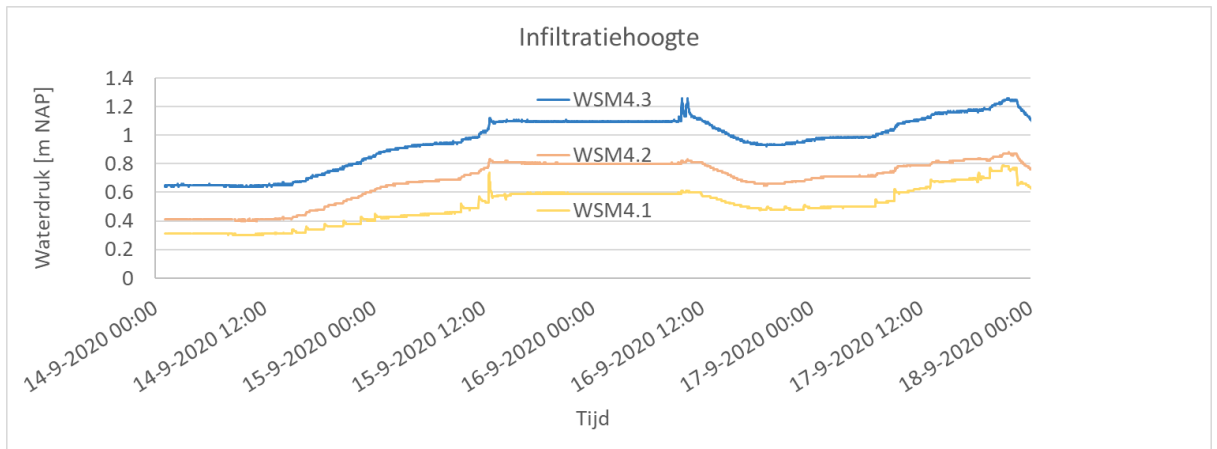
Vanaf PB2 (direct achter het uittredepunt) neemt de stijghoogte geleidelijk toe tot WSM3.1 en PB1. Hierin valt op dat de toename richting PB1 en WSM3.1 niet evenredig is, maar afbuigt (holling). Dit komt mogelijk doordat de stijghoogte bij de infiltratiebuizen door 3D werking hoger is dan gemeten met WSM3.1 en PB1 die midden tussen de buizen staan.

3. Waterspanningen buiten de damwanden

Gedurende de proef neemt ook de stijghoogte buiten de damwanden toe (Figuur 6-8). Bij het grootste verval is de toename maximaal 0,6 m (eind fase 2). Dit is deels te verklaren doordat de damwanden in een U-vorm zijn geplaatst waardoor een zijde open is. Dit grondwater stroomt dan om de damwanden heen naar de sensoren buiten de damwanden. De volgende waarnemingen vallen op:

- De stijging aan beide zijkanten van de bak (4.2 en 4.3) is voor de eerste fase gelijk, maar de stijghoogte neemt bij 4.3 in fase 2 sneller toe dan bij 4.1. Dit zou kunnen duiden op kortsluiting (extra lekkage) aan de oostzijde van de damwanden waardoor de stijghoogte hier relatief snel (t.o.v. de westzijde) toeneemt.

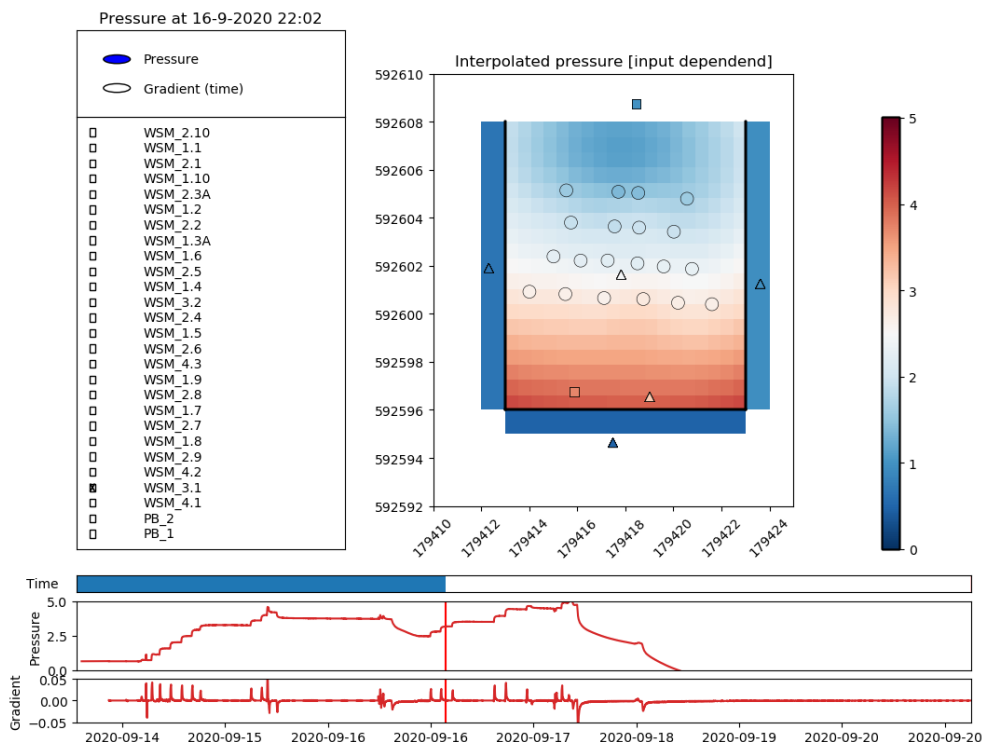
- Relatief neemt de stijging voor 4.1 (achter de bak) sneller toe dan de rest (zie verschil met 4.2 wordt kleiner). Dit kan ook duiden op kortsluiting (extra lekkage) aan de achterzijde.



Figuur 6-8 Verloop van de waterspanningen bij de WSM's buiten de damwandkuip.

6.2.1 Heatmaps

Voor het overzicht is per tijdstap ook een bovenaanzicht gemaakt van de waterspanningsmetingen. Hiermee is ook een filmpje gemaakt van opeenvolgende beelden, zodat eventuele veranderingen nauwkeurig in beeld gebracht kunnen worden. Een voorbeeld van een dergelijke heatmap is weergegeven in Figuur 6-9. Deze data is gebruikt voor de duiding van de resultaten tijdens de uitvoering van de proef en is in deze rapportage verder niet opgenomen of beschreven.



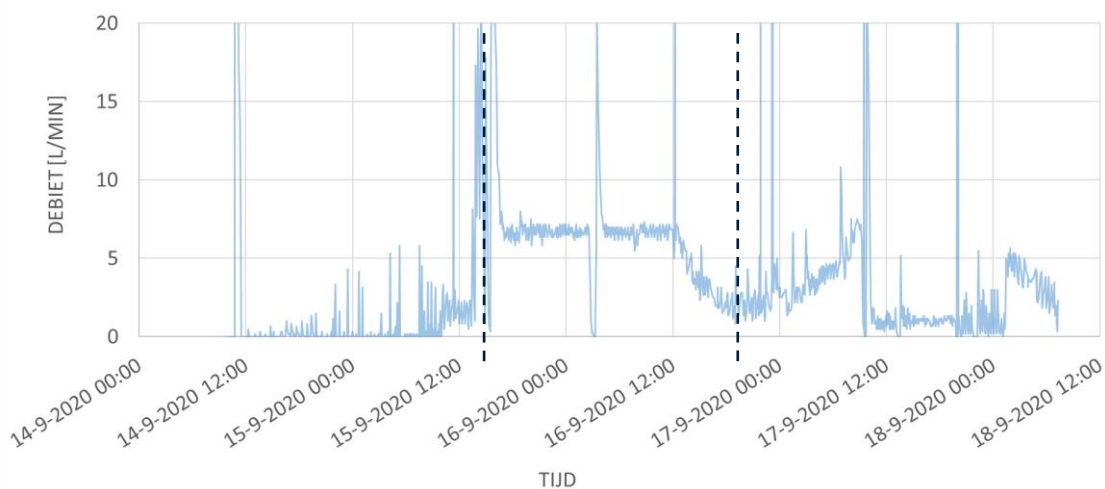
Figuur 6-9: Voorbeeld van de heatmap van de resultaten van de waterspanningsmeters op een bepaald

6.3 Onttrekkingsdebiet

Zoals beschreven in §5.2 is de proef uitgevoerd in twee fasen die worden gekenmerkt door twee verschillende uittredepuntconfiguraties die ook invloed hadden op het gemeten onttrekkingsdebiet. In de eerste fase werd het debiet gevormd door water dat uit de gehele bouwkuip weggepompt werd; in de tweede fase alleen door water dat uit het uittredepunt kwam.

6.3.1 Fase 1

De pomp werkte niet continu, maar sloeg aan bij een bepaalde waterstand in de opvangkuil en het debiet werd dus in fasen gemeten (Figuur 6-10). Tijdens fase 1 begon er steeds meer water te lekken naar de bouwkuip vanuit de zijkanten, dit is goed zichtbaar rond 16:00 op 15 september. Kort daarna is er een forse piek in debiet. Dat is het moment dat het water langs de damwand begint te lekken. Aanvankelijk stroomde dit rechtstreeks de bouwkuip in, maar later werd een groot deel van het lekwater ook opgevangen in kuilen/greppels op het maaiveld rondom de bouwkuip en apart weggepompt. De debietmetingen tijdens fase 1 zijn daardoor zeker niet representatief voor het debiet uit het boorgat. Van dit laatste debiet zijn tijdens fase 1 feitelijk geen bruikbare metingen gedaan. Visueel is vastgesteld dat het debiet door het uittredepunt zeer gering zijn geweest.



Figuur 6-10 Onttrekkingsdebiet tijdens de proef

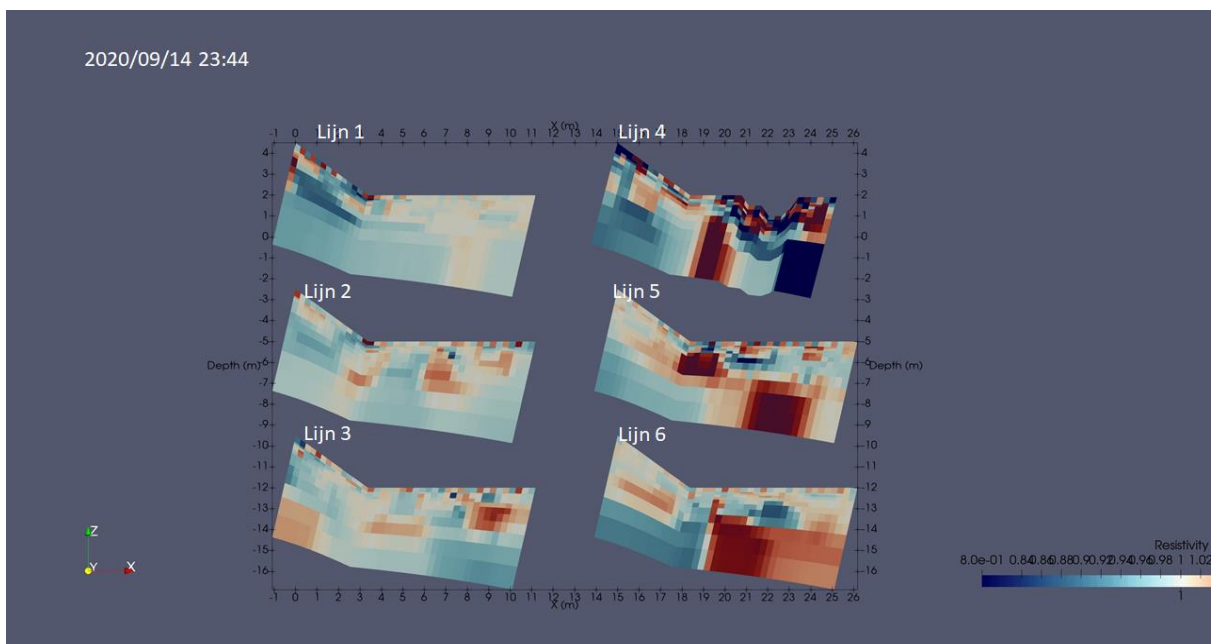
6.3.2 Fase 2

De debietmetingen uit fase 2 betreffen alleen het water dat uit het uittredepunt kwam. In eerste instantie werd steeds afgepompt als er circa 0,1 m water in de buis stond, later is dit verlaagd naar circa 0,03 m. Het moment dat het onttrekkingsdebiet puur uit water uit het uittredepunt bestond is vanaf circa 20:00 's avonds op 16 sept (Figuur 6-10). Het debiet neemt daarna geleidelijk toe tot rond 12:00 op 17 september. Vanaf dat moment daalt het debiet bij het uittredepunt door toenemende lekkages in het proefvak.

6.4 ERT

Gedurende de gehele proef heeft ERT-monitoring gewerkt. Initieel bedoelt om eventuele pipegroei te monitoren, maar de versturende invloed van lekkages en het aan- en afslaan van de pompen is dusdanig groot geweest dat subtiele veranderingen als gevolg van pipegroei alleen na sterke filtering zichtbaar zouden zijn geweest. Omdat er geen pipegroei heeft plaatsgevonden is een dergelijk filter niet ingezet. Een andere grote invloed was indringing van drinkwater in de grond. Het aanwezige grondwater was bovenin zoet, maar werd naar beneden toe brak. Verdringing met zoet drinkwater leidt tot hele andere geleiding van stroom. Ook dit effect kan verwijderd worden door filtering, maar dit is nu niet gedaan.

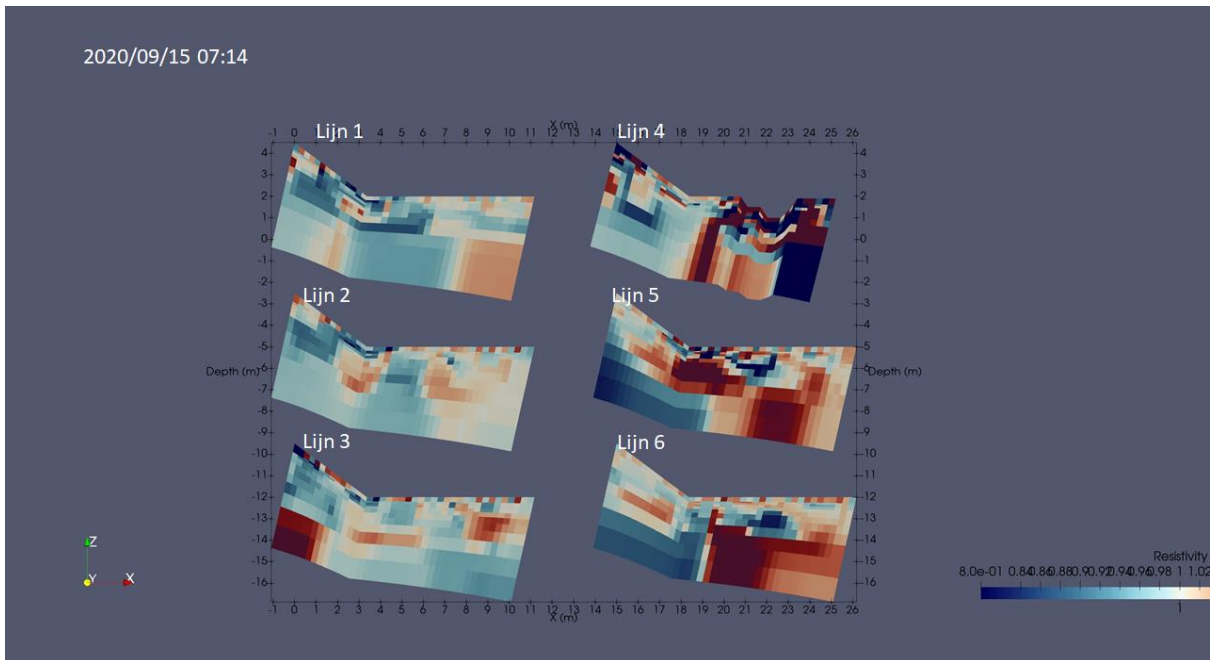
Hieronder worden enkele meetresultaten getoond en besproken. De plaatjes laten steeds de verandering zien ten opzichte van een meting (30 minuten eerder) ervoor, waarbij waardes lager dan 1 (blauw tot donkerblauw) duiden op minder weerstand en waardes hoger dan 1 (oranjerood tot donkerrood) op meer weerstand. Stroming leidt niet per sé tot een andere geleiding, wel als de porositeit van de grond verandert door de stroming (grotere porositeit leidt tot betere geleiding).



Figuur 6-11: Verandering in ERT-waardes om 23:44 op Dag 1 t.o.v. een half uur eerder.

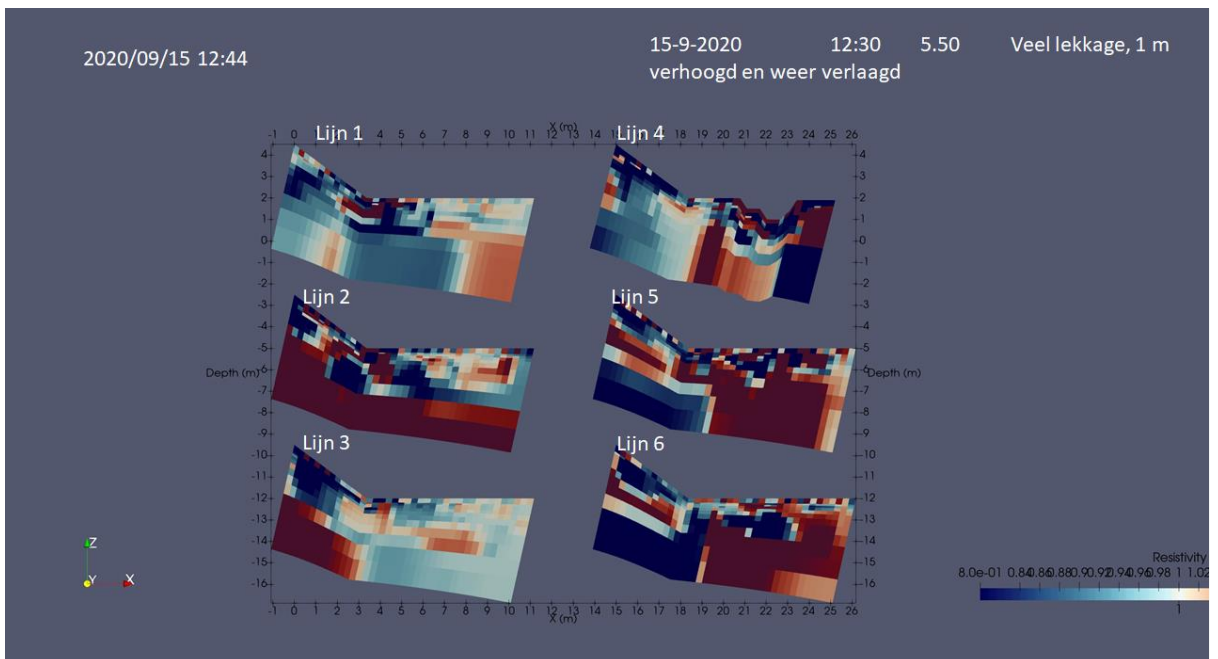
Figuur 6-11 laat een opmerkelijk verschil zien in het patroon voor lijn 1 t/m 3 en lijn 4 t/m 6. In de eerste drie lijnen is de weerstand duidelijk lager dan in lijn 4 t/m 6 en in lijn 1 is een donkerblauwe baan te zien. Deze baan wordt geïnterpreteerd als een lekkagekanaal richting de damwand: meer porositeit (meer water) en dus lagere weerstand (betere geleiding). Dit strookt met de waargenomen locatie bij deze damwand. De hogere weerstand in lijnen 4 t/m 6 wordt mogelijk veroorzaakt door verdringing van brak water door drinkwater. Deze verdringing had in lijn 1 t/m 3 al plaatsgevonden. Rondom de bouwkuip zijn grote veranderingen zichtbaar. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de invloed van pompen

en lekkages richting de bouwkuip. Figuur 6-12 laat een beeld zien van de start van Dag 2. Het lekkagekanaal in lijn 1 lijkt groter geworden te zijn, het overige beeld is niet wezenlijk anders.



Figuur 6-12: Verandering in ERT-waardes om 07:14 op Dag 2 t.o.v. een half uur eerder.

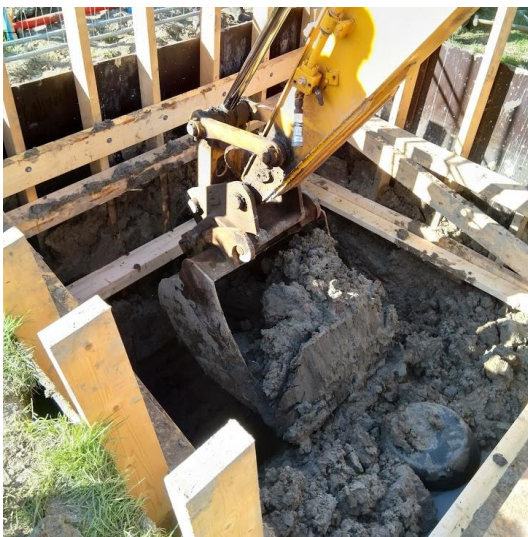
Figuur 6-13, ten slotte, laat een beeld zien halverwege Dag 2. Er is dan erg veel lekkage langs de damwanden, maar ook via andere wegen. Bovenaan het talud is vrijwel alles donkerblauw aan maaiveld, dit wordt veroorzaakt door lekkage en oppervlakkige afstroming over het gras. In lijn 1 is onderaan het talud een blauwe kolom zichtbaar die duidt op lekkage richting het maaiveld.



Figuur 6-13: Verandering in ERT-waardes om 12:44 op Dag 2 t.o.v. een half uur eerder.

6.5 CSI

Na afloop van de proef bij de Vijfhuisterdijk is het gebied binnen de bouwkuip uitgegraven. Er is begonnen met het relatief voorzichtig verdiepen, zodat de grondlagen rondom en onder de buis van het uittredepunt bekeken konden worden. 'Relatief', omdat er nog steeds vooral verdiept werd met een graafmachine (Figuur 6-14). Het uittredepunt zelf is beschermd met een grote dop op de buis die als uittredepunt diende. De meest precieze graafwerkzaamheden zijn gedaan met een spade (Figuur 6-15). Hiermee zijn de schraapsporen van de graafmachine weggehaald. Hierbij zijn verschillende stoorlagen vrij gegraven in de overgangszone tussen de deklaag en het getijdensand. Dieper in het getijdensand en onder het uittredepunt zijn deze stoorlagen nauwelijks en niet aangetroffen (Figuur 6-16 en Figuur 6-17).



Figuur 6-14: Afgraven deklaag met beschermdop op het uittredepunt



Figuur 6-15: Marc Hijma (Deltares) ontgraaft details

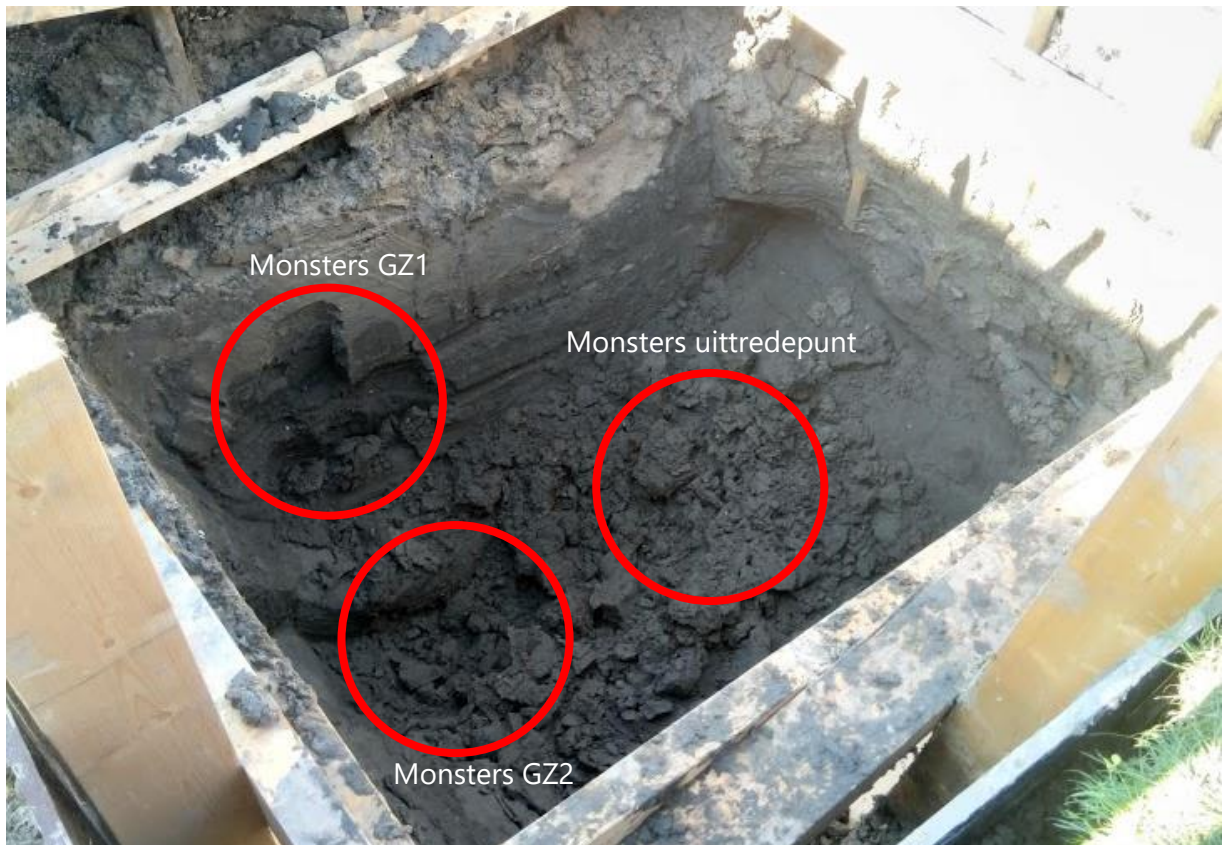


Figuur 6-16: Profiel mengzone en getijdensand 1



Figuur 6-17: Detail stoorlaag van schelpjes

De omstandigheden (een 3 m diep gat) lieten het vanuit een veiligheidsoogpunt niet toe om langdurig onderin de bouwkuip te werken. De visuele observaties bevestigden het beeld dat er geen (grootschalige) horizontale pipegroei heeft plaatsgevonden: er waren geen pipes of holtes zichtbaar. Nadat de deklaag geheel verwijderd was, zijn er verschillende monsters van het getijdenzand genomen (zie 3.3.2 voor resultaten en Figuur 6-18). De fotoboring van het monster direct onder het uittredepunt is weergegeven in Figuur 3-6. Hierin zijn geen afsluitende of stoorlagen aangetroffen, waardoor aangenomen kan worden dat een blokkade door dergelijke lagen bij het uittredepunt niet heeft plaatsgevonden.



Figuur 6-18: Locaties monsternamen CSI

7. Analyses

In dit hoofdstuk worden de analyses gepresenteerd. Er wordt gestart met de bepaling van de minimaal aangetoonde sterktefactor, gevolgd door aanvullende D-Geo Flow modellering om vast te stellen hoe gevoelig deze sterktefactor is voor kleine veranderingen in bijvoorbeeld de doorlatendheid. Het hoofdstuk wordt afgesloten met een analyse van de kleine schaalproeven. Er zijn ook veel analyses gedaan naar de doorlatendheid van het getijdenzand, deze zijn opgenomen als bijlage (Appendix B).

7.1 Minimaal aangetoonde sterktefactor

Eerder is uitgelegd dat we een onderscheid maken tussen opgelegde en gemeten stijghoogte (§6.1). De opgelegde stijghoogte is de waterstand in de infiltratiebuis, de gemeten stijghoogte is de meting van de WSM die tussen de infiltratiebuizen stond. Deze is lager door 3D-effecten (§6.1). Tabel 9 laat zien dat er een behoorlijk verschil in opgelegde en gemeten stijghoogte is, namelijk rond de 1,2 m. Tijdens de piek van fase 2 is het verschil groter (1,4 m) vanwege lekkages binnen het proefvak. Aangezien de WSM (3.1) en ook de peilbuis (PB1) op ongeveer 1 m van de infiltratiebuizen staan, betekent dit dat er een aanzienlijke gradiënt aanwezig is over korte afstand. Voor de berekening van het verval over de kwelweglengte hebben we de keuze gemaakt om het gemiddelde te nemen van de opgelegde en gemeten stijghoogtes.

Tabel 9: Overzicht maximale stijghoogtes, waterpeil uittredepunt en bereikt verval

	Maximaal opgelegde stijghoogte [m NAP]	Maximaal gemeten stijghoogte [m NAP]	Waterpeil uittredepunt [m NAP]	Verval (m) Gemiddeld (min-max)
Fase 1	5,2	4,0	- 0,2	4,8 (4,2-5,4)
Fase 2	5,6	4,4	- 0,55	5,55 (4,95-6,15)
Piek einde fase 2	6,4	5,0	- 0,55	6,25 (5,55-6,95)

Een belangrijke doelstelling van het project is het vaststellen van de extra weerstand van dit type getijdenzand tegen piping. Met de doorlatendheid en anisotropiefactor zoals weergegeven in §3.3.2 en Appendix B is ook een pipinganalyse uitgevoerd met het aangepaste Sellmeijer model en met de uiteindelijk tijdens de proef aanwezige geometrieën. Een eenvoudige weergave van deze extra weerstand is het quotiënt van het gemeten en het berekende kritieke verval, de zogenaamde sterktefactor (zie ook §7.3.6). De verwachting is dat in het stroombeeld, door de open-bak-constructie, in deze proefopzet slechts een beperkt 3D-effect aanwezig is, waardoor de 2D-modeluitkomsten direct met de metingen te vergelijken zijn. Dit is een conservatieve aanpak, omdat in het geval van een 3D-effect er sneller piping zal optreden. Het berekende kritieke verval (met D-Geo Flow) ligt voor de Vijfhuisterdijkproef rond de 2,4 m (zie Tabel 11), terwijl Tabel 9 de gemeten vervallen laat zien. In het berekende kritieke verval is het effect van meerlaagsheid en anisotropie al

meegenomen. Tabel 10 laat zien dat dit een minimale sterktefactor van 2,3-2.6 oplevert. In deze tabel is Fase 1 niet opgenomen, omdat tijdens deze fase het verval lager was.

Omdat tijdens de proef alleen enkele zandmeevoerende welletjes zijn opgetreden en er nog geen doorgaande horizontale pipegroei is ontstaan, zal de daadwerkelijke sterktefactor ruim boven de 2,6 hebben gelegen. Opgemerkt wordt dat de belastingduur van de piek tijdens Fase 2 te kort was om een evenwichtssituatie te verkrijgen. Daarom zal in de conclusies uitgegaan worden van een minimale sterktefactor van $2,3 \pm 0,3$, de minimale sterktefactor tijdens de stabiele fase.

Tabel 10 Gemeten verval, berekend kritiek verval en de afgeleide minimale sterktefactor.

	Gemeten verval (m)	Berekend kritiek verval (m)	Sterktefactor
Fase 2 - stabiel	$5,55^* \pm 0,6$	$2,4 \pm 0,1$	$2,3 \pm 0,3$
Piek einde fase 2	$6,25^* \pm 0,7$	$2,4 \pm 0,1$	$2,6 \pm 0,3$

* Dit is zonder eventuele weerstand in het uittredepunt (zie §8.3 voor discussie hierover).

7.2 Gevoeligheidsanalyse

Er is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd met D-Geo Flow, waarbij de doorlatendheid en/of de anisotropiefactor zijn gevarieerd, waarbij ook een homogene, isotrope situatie is doorgerekend. De berekende kritieke vervallen liggen in het bereik van 2.3-2.55 m (Tabel 11). Het kritieke verval dat gevonden is met de analytische regel van Sellmeijer is wat hoger dan die op basis van D-Geo Flow. Dit heeft waarschijnlijk te maken met de verticale instroom in de proeven; de rekenregel gaat uit van een horizontale instroom. Bij de berekeningen is gewerkt met een modelfactor van 0,89. Deze is geïntroduceerd ten behoeve van consistentie tussen de uitkomsten van D-Geo Flow (rekenkernel DgFlow) en de analytische rekenregel. De rekenregel is afgeleid van MSEEP berekeningen en verschillende schaalproeven. De rekenmethodiek voor het voldoen aan de piping randvoorwaarde is net iets nauwkeuriger in DgFlow dan in MSEEP. Daardoor ontstaan verschillen tussen de uitkomsten van DgFlow en de rekenregel. Om deze verschillen af te dekken is een factor van 0,89 geïntroduceerd. In D-Geo Flow wordt deze factor automatisch meegenomen, in DgFlow gebeurt dit handmatig.

Tabel 11: Gevoeligheidsanalyse kritiek verval. De modelfactor is 0,89, de kwelweglengte is 9,5 m en de d70 is 121 µm. Kh=horizontale doorlatendheid; A=anisotropiefactor en Kv=verticale doorlatendheid.

Analyse	Type	Zandlaag	Kh (m/dag)	A (-)	Kv (m/dag)	Kritiek verval (m)
0	Basis schematisering Meerlaags, anisotroop	GZ1	0.65	4.1	0.16	2.40
		GZ2	1.5	8.9	0.17	
1	Homogeen, isotroop	GZ1/GZ2	1.0	1.0	1.0	2.40
2	Homogeen, anisotroop	GZ1/GZ2	1.0	6.0	0.17	2.35
3	Meerlaags, minder doorlatend	GZ1	0.5	4.1	0.12	2.55
		GZ2	1.2	8.9	0.13	
4	Meerlaags, meer doorlatend	GZ1	0.8	4.1	0.2	2.30
		GZ2	1.5	8.9	0.17	
5	Sellmeijer analytisch	GZ1/GZ2	1.0	1.0	1.0	2.60

Daarnaast is het opvallend dat het kritiek verval voor de berekening met anisotropie ondergrond wat lager is dan het kritiek verval met de isotrope ondergrond. Dit heeft ook te maken met de verticale instroom in de proeven, in combinatie met de afstroming naar het achterland. In de praktijk zal het meenemen van anisotropie vrijwel zonder uitzondering wel tot een verhoging van het kritiek verval leiden, maar bij relatief dunne zandpakketten is de invloed van anisotropie beperkt. De gevoeligheidsanalyse laat zien dat het berekende kritieke verval niet veel varieert met andere doorlatendheids- en anisotropieparameters. Dit betekent dat de berekende sterktefactor robuust is.

7.3 Kleine schaalproeven

Voor de kleine schaalproeven, en uiteindelijk ook voor een medium schaalproef (die binnen het Hedwigeproject uitgevoerd zal worden), zijn twee big bags gevuld met getijdenzand. Eén big bag bevat materiaal uit de top van de getijdenzandlaag (tussen NAP -1 m en -1,5 m), de andere big bag bevat materiaal van tussen NAP -1,5 en -2 m. De big bags zijn naar Deltares (Delft) vervoerd. Beide big bags bevatten dus materiaal uit de bovenste getijdenzandlaag. Materiaal uit de big bag met materiaal tussen NAP -1,5 m en -2,0 m is gebruikt voor de kleine schaalproeven, omdat dit zand homogener was. Dit is gewenst omdat bij de kleine schaalproeven het zand gemengd wordt en bij aanwezigheid van kleilaagjes het percentage fijn materiaal in het zand dan kunstmatig verhoogd wordt: het oorspronkelijke zand tussen de kleilagen had tenslotte minder fijn materiaal dan het gemengde zand. Er zijn twee kleine schaalproeven uitgevoerd en voor beide proeven is de korrelgrootteverdeling bepaald (zie Tabel 12). De verschillen tussen beide korrelgrootteverdelingen zijn klein. De gevonden waarden sluiten goed aan bij de waarden voor deze diepte in Figuur 3-8. De waarden uit onderstaande tabel zijn gebruikt bij de analyse van de kleine schaalproeven.

Tabel 12: Resultaat korrelgrootteverdelingen kleine schaalproeven

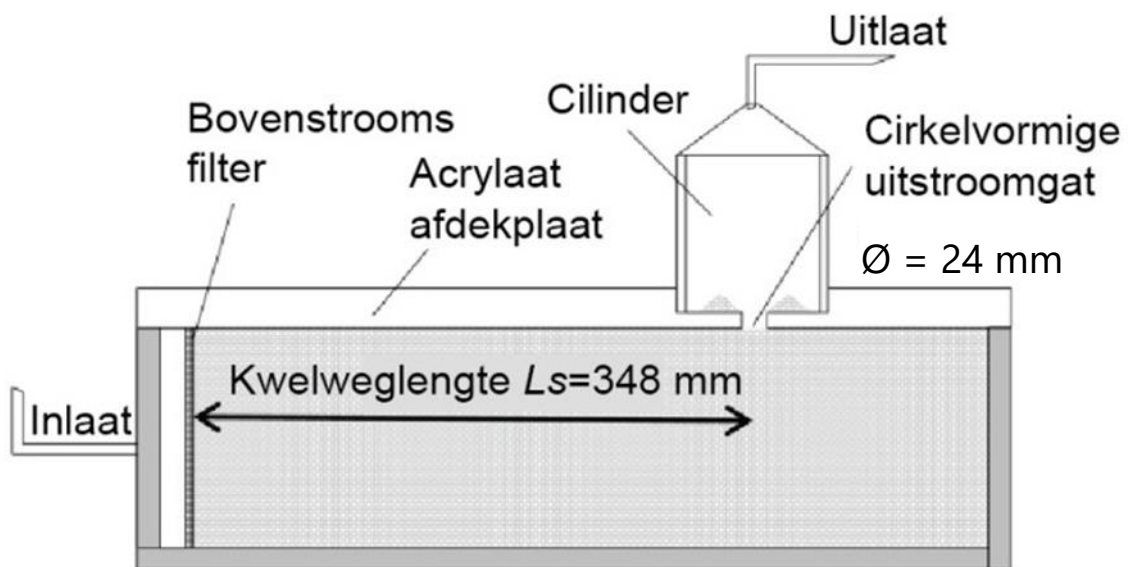
	Aantal proeven [-]	D70 [µm]	D70 zandfractie [µm]	Fijne fractie (< 63 µm) [%]	Slibfractie (< 16 µm) [%]	Lutumfractie (< 2 µm) [%]
Proef 1	1	115	118	14,6	5,4	2,7
Proef 2	1	119	123	14,7	4,6	2,1

De doorlatendheid van het zand is voorafgaand de proef ook bepaald in een doorstroomproef (zie Appendix B). Er is een doorlatendheid van ongeveer $1.2E-05$ m/s vastgesteld, oftewel 1 m/dag.

7.3.1 Opstelling

De proeven zijn uitgevoerd in de kleine schaalproefopstelling van Deltares. De binnenkant van de bak is 483 mm lang, 300 mm breed en 101 mm hoog. Bij de inlaat is een filter aangebracht om het zand in het bakje te houden, daarnaast zorgt het filter voor een gelijkmatige doorstroom van water door het bakje (Figuur 7-1). De slang bij de inlaat is verbonden met een bak water op een constante hoogte en met een constant waterniveau (Figuur 7-2). De bovenkant van het proefbakje bestaat uit een doorzichtige acrylaatplaat die

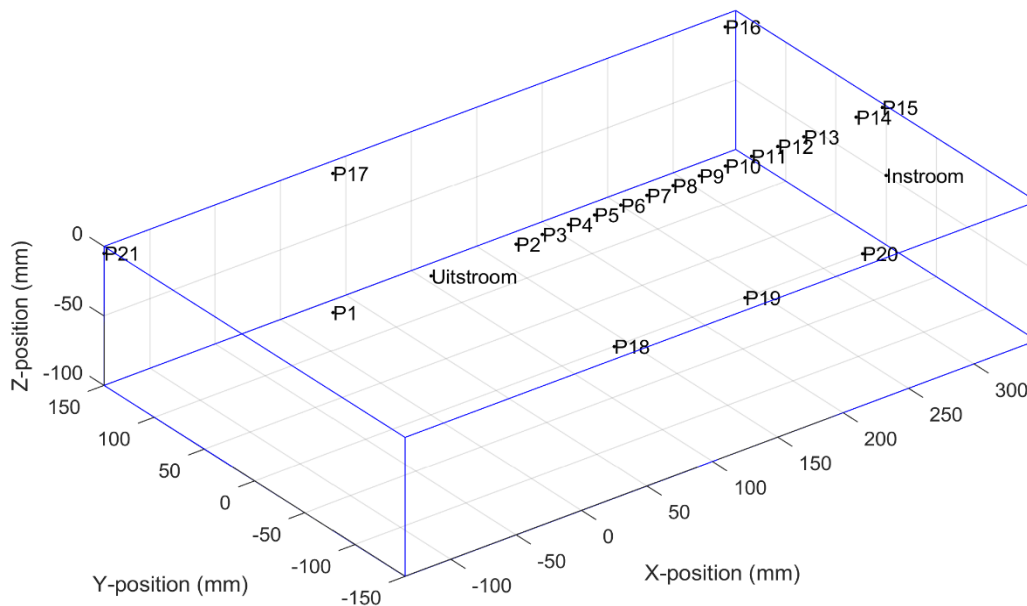
fungeert als cohesieve deklaag en aan de onderkant een siliconengel coating heeft om enige ruwheid te geven. Het cirkelvormige uittredepunt vormt het opbarstkanaal en de proef wordt dus uitgevoerd in een 3D-situatie waarbij opbarsten al heeft plaatsgevonden. De lengte van het opbarstkanaal is 10 mm en zo kort mogelijk gehouden om drukverliezen te voorkomen. Over het uittredepunt is een cilinder geplaatst om het zand op te vangen dat uit de zandmeevoerende wel komt (er ontstaat een zandvulkaan rondom de wel) en om het water weg te laten stromen. De slang aan de cilinder is verbonden met een benedenstrooms communicerend vat dat verlaagd kan worden om een gradiënt over het bakje te genereren. De proef begint zodra dit vat 1 cm verlaagd wordt. Aan het bakje zijn verder 21 stijghoogtemeters verbonden (Figuur 7-3). De stijghoogtes zijn met name van belang om achteraf stijghoogteveranderingen te kunnen koppelen aan geobserveerde pipegroei en om de doorlatendheid van het monster te bepalen.



Figuur 7-1 Kleine schaalproefopstelling met cirkelvormig uittreepunt



Figuur 7-2 Opzet van kleine schaalproef. Het water in de grijze emmer zorgt voor druk via een slang die aan het bakje verbonden is. Door een communicerend vat aan de uitstroomkant van het bakje stapsgewijs te verlagen, wordt het verval vergroot.



Figuur 7-3 Positie van de 21 stijghoogtebuisjes.

7.3.2 Proefopzet

Er zijn twee proeven uitgevoerd op materiaal uit de big bag met getijdenzand tussen NAP -1,5 en -2 m. Het zand is gemengd aangebracht. Dit houdt in dat het zand eerst gedroogd is en daarna geroerd. Bij het aanbrengen van het zand wordt de proefbak gekanteld en de benedenstroomse zijkant verwijderd. Vervolgens wordt via een slang een dunne laag ontlucht water aangebracht onderin het bakje en in deze dunne laag water wordt zand van bovenaf ingestrooid (conform Van der Poel & Schenkeveld, 1998). Het zand wordt tussendoor aangestampt ter verdichting. Deze dichtheid wordt na de proef nog apart bepaald. Aansluitend worden steeds kleine hoeveelheden water en zand in het bakje gedaan totdat het bakje vol is, waarbij tussendoor steeds aangestampt wordt. Doordat gewerkt wordt met dunne lagen water ontmengt het getijdenzand niet in een fijne en grovere fractie en wordt het zand dus zo goed mogelijk gemengd aangebracht. Desalniettemin is er toch altijd enige gelaagdheid zichtbaar en ook de pipegroei laat zien dat er nog heterogeniteit aanwezig is.

De proeven zijn uitgevoerd door elke vijf minuten het verval over de bak met 1 cm te vergroten. Als er na de vijf minuten nog pipegroei plaatsvindt wordt het verval constant gehouden totdat de pipegroei stopt. Vanaf een verval van 20 cm is gewerkt met stappen van 2 cm, vanaf een verval van 60 cm met stappen van 3 cm. Bij de tweede proef waren de laatste 2 stappen respectievelijk 4 (van 92 naar 96 cm) en 6 cm (van 96 naar 102 cm). De proef is voorbij als de pipe het bovenstroomse filter bereikt. Gedurende de test wordt de volgende data verzameld:

- Stijghoogte van alle 21 stijghoogtemeters wordt elke vijf minuten afgelezen
- Observaties worden genoteerd (pipegroei, pipelengte, grootte zandvulkaan, etc.)
- Foto's (elke 10 seconde)
- Debiet, handmatig verkregen door elke vijf minuten gedurende 1 minuut het uitstromende water op te vangen en te wegen.

7.3.3 Resultaten

Hieronder worden eerst enkele karakteristieken van het gebruikte zand gemeld, gevolgd door een samenvattende tabel en samenvattende figuren, waarbij specifiek ingegaan wordt op de gemeten debieten en doorlatendheden. De discussie van de resultaten en een vergelijk met eerder uitgevoerde proeven volgt in §7.3.4.

Tabel 7.1 Karakteristieken van de testen met gemengd getijdenzand

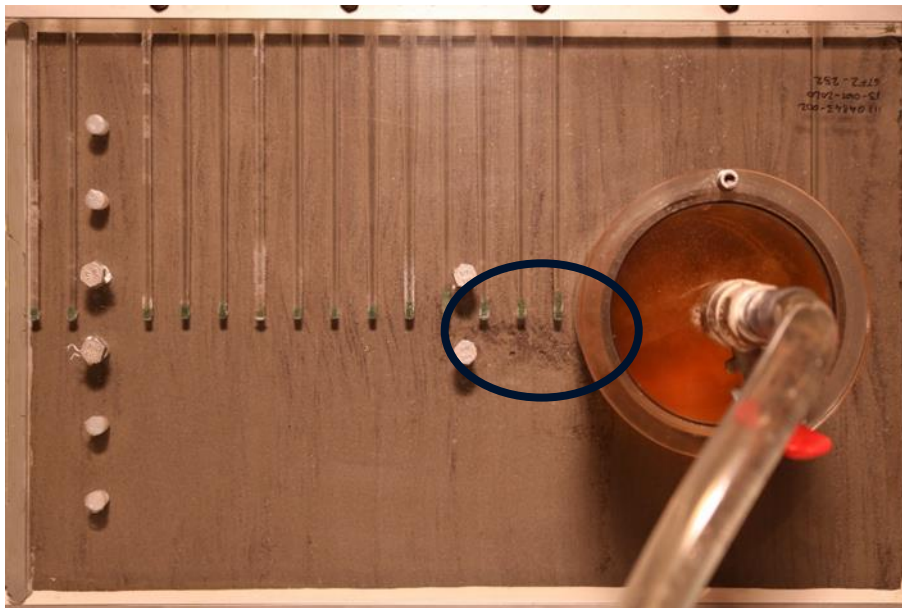
Gebruikt zand	GTFZ (Getijdenzand Friesche Zand)	
Naam proef	GTFZ-251	GTFZ-252
Relatieve dichtheid (% ± 5%)	92	84
Water temperatuur (°C)	21.0	21.2
Porositeit (-)	0.385	0.396
Gebruikte doorlatendheid (m/dag) in Sellmeijer (o.b.v. metingen)	0,5 m/dag	0,5 m/dag
d70/d70 zandfractie (µm)	115/118	119/123
% fijne/slib/lutumfractie	14,6/5,4/2,7	14,7/4,6/2,1
Totaal verval bij doorgaande pipe (cm)	36.9	102
* De doorlatendheid is afgeleid in Appendix B.		

Tabel 7.2 Samenvattende beschrijving van het verloop van de proef. Richting het intredepunt is het westen

Proef	Verloop
GTFZ-251 (gemengd zand) Hc=36.9	Bij een verval van 7 cm begint de eerste pipe te groeien richting het westen (naar links). Zoals bij eerdere proeven is het uitredende water verkleurd (ijzerkleur). Bij een verval van 30 cm is de pipe nog steeds binnen het gebied van de cilinder. Bij 34 cm ontsnapt er een wolk fijn materiaal en daarna begint de pipe snel verder te groeien. Bij een verval van circa 36,9 cm begint doorgaande pipegroei.
GTFZ-252 (gemengd zand) Hc=102 cm	Ook hier weer gekleurd water. Bij een verval van 13 cm begint de wel lichtjes te kolken, bij 18 cm neemt dit verder toe. Bij 44 cm ontsnapt een wolk fijn materiaal, waarna de wel veel sterker zandmeevoerend begint te worden. Bij 50 cm groeit de pipe tot buiten de cilinder, hij groeit naar het zuiden (naar beneden). Bij een verval van 96 cm begint de pipe richting het filter te groeien en bij 102 cm treedt doorgaande pipegroei op.

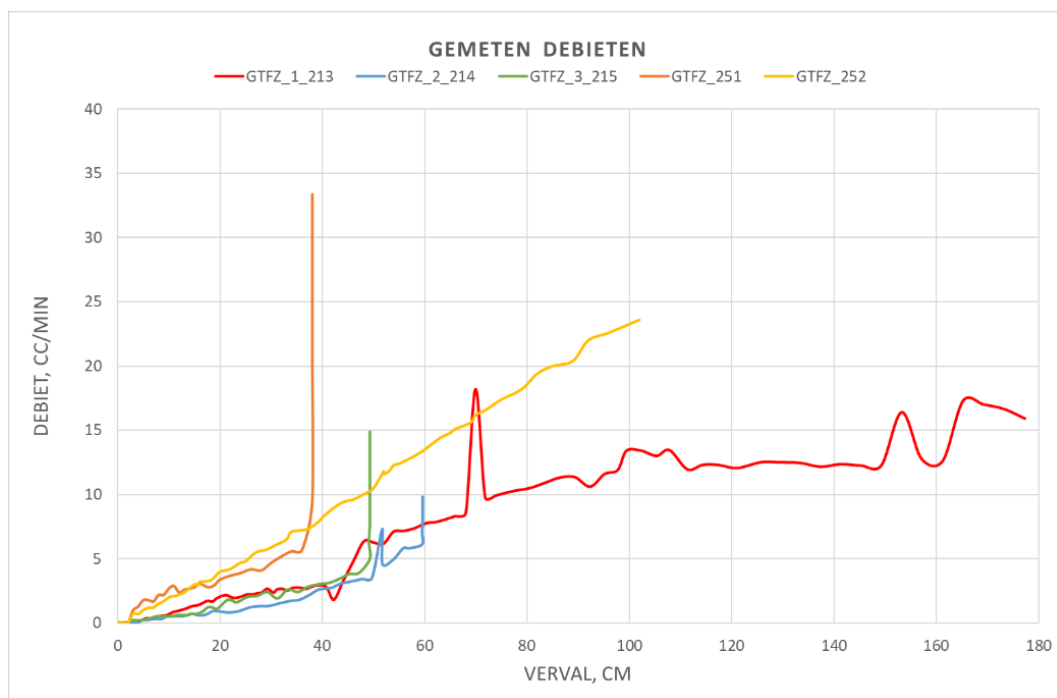


Figuur 7-4 Foto's van de situatie bij proef GTFZ-251 vlak voor het einde van de proef.



Figuur 7-5 Foto's van de situatie bij proef GTFZ-252 vlak voor het einde van de proef. De pipe is zichtbaar binnen de ellips. De pipe groeit hierna heel snel recht door. Er is meer gelaagdheid zichtbaar dan in GTFZ-251.

Figuur 7-6 toont de gemeten debieten tijdens de 2 proeven op gemengd zand van de Vijfhuisterdijk-locatie en 3 eerdere proeven op gemengd zand van nabij de Lontkade (Hijma, 2019). Hierbij valt op dat gemeten debieten van de proeven met zand van de Vijfhuisterdijk-locatie hoger zijn, wat er op duidt dat dit zand een hogere doorlatendheid heeft. De grafiek laat ook zien dat debieten van beide Vijfhuisterdijkproeven aan het begin van de proef vergelijkbaar zijn, dit terwijl de kritieke vervallen voor de beide Vijfhuisterdijkproeven sterk verschillen (zie §7.3.5 voor een nadere duiding van dit verschil).

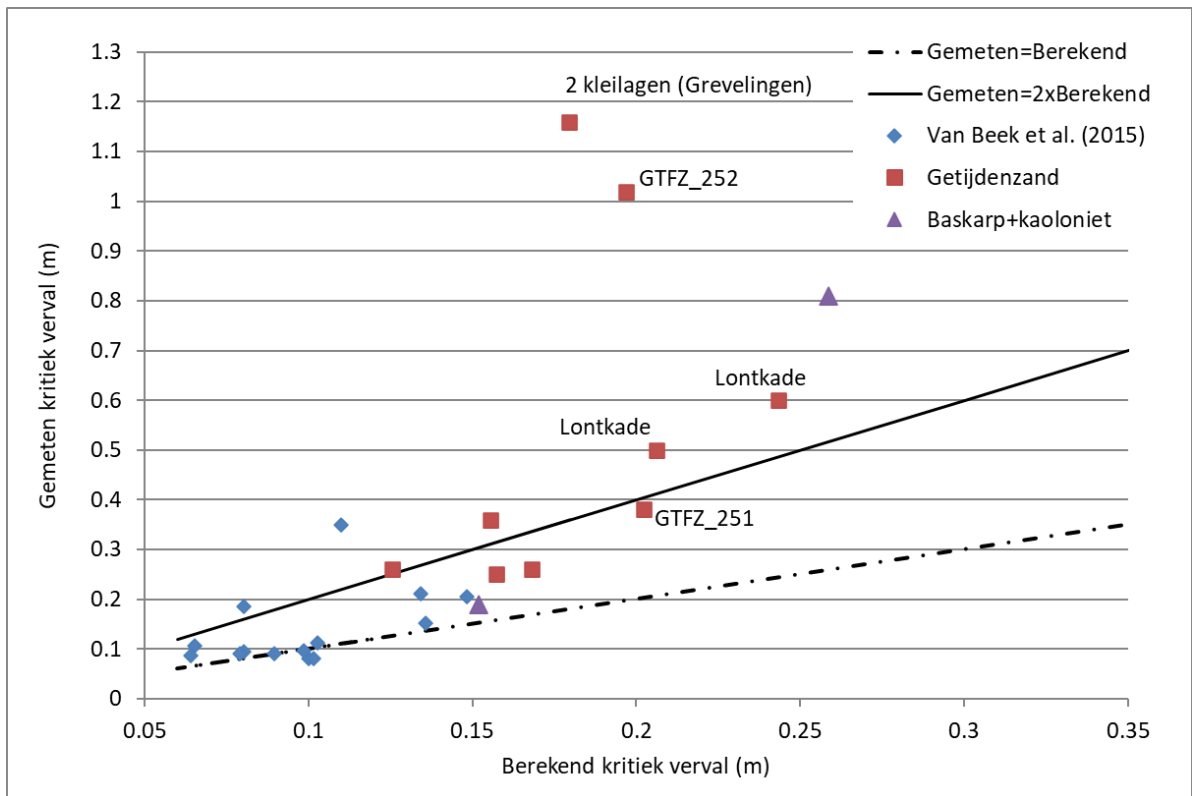


Figuur 7-6 Gemeten debieten tijdens de 2 proeven met zand van de Vijfhuisterdijk (GTFZ_251 en GTFZ_252) en de drie proeven eerder uitgevoerd op materiaal van de Lontkade (Hijma, 2019).

7.3.4 Vergelijk met het model van Sellmeijer en eerdere proeven op getijdenzand

Binnen het WBI wordt momenteel gewerkt met het model van Sellmeijer (2011). In Van Beek et al. (2015) wordt aangetoond dat gemeten kritieke vervallen in kleine schaalproeven goed gereproduceerd worden door het model als de kleine schaalproef een 2D-configuratie heeft (vergelijkbaar met uittredepunt in de vorm van een sloot). In het geval van een 3D-configuratie, zoals gebruikt tijdens de proeven met getijdenzand, zijn de gemeten kritieke vervallen structureel lager dan de berekende kritieke vervallen. Dit wordt veroorzaakt doordat bij een 3D-configuratie de stroom zich concentreert naar 1 uitstroompunt, waardoor de gradiënt bovenstrooms van de pipe groter is en stroomsnelheden in de pipe groter zijn. Volgens Van Beek et al. (2015) zijn de berekende kritieke vervallen ongeveer 2x zo groot als de gemeten vervallen bij 3D labproeven met homogeen opgebouwde monsters op uniform rivierzand. De kleine schaalproeven die in dit rapport beschreven worden hebben allemaal een 3D-configuratie, hoewel het materiaal en de doorlatendheid wel aanzienlijk afwijken van de zanden waarvoor de factor is afgeleid. In afwachting van verdere ontwikkelingen ten aanzien van predictie voor 3D configuraties, zijn in de figuren hieronder de berekende vervallen volgens Sellmeijer daarom met een factor 2 gehalveerd. Een aanvullend aandachtspunt hierbij is dat de d70-waarden voor het getijdenzand uit Friesland lager dan 150 μm zijn en daarmee buiten het opgegeven bereik van de rekenregel van Sellmeijer vallen (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2017). Aangezien er momenteel geen alternatief is voor zand met een d70 lager dan 150 μm , wordt in de praktijk de rekenregel van Sellmeijer ook voor deze zanden toegepast. Het is wel mogelijk om lagere d70-waarden in te vullen, en dat is ook gedaan voor de analyses in dit rapport, maar de rekenregel van Sellmeijer is dus niet gevalideerd voor dit bereik.

Figuur 7-7 laat de gemeten en berekende kritieke vervallen zien voor alle proeven met getijdenzand, de proeven met Baskarpzand en kaoliniet (Hijma, 2019), en de proeven op rivierzand zonder fijne fractie uit Van Beek et al. (2015). Bij alle proeven is dezelfde opstelling gebruikt. De zwarte lijn geeft de lijn aan waarop de punten zouden liggen indien de berekende en gemeten vervallen gelijk zouden zijn. De grafiek is eerder getoond in Hijma (2019), maar nu aangevuld met de twee nieuwe proeven, deze zijn apart gelabeld. In lijn met eerdere proeven tonen ze aan dat getijdenzand minder pipinggevoelig is dan uit de rekenregel van Sellmeijer volgt. GTFZ_251 heeft een gemeten verval dat 1,9x hoger ligt, GTFZ_252 een gemeten verval dat 5,3x hoger ligt.



Figuur 7-7 Berekende kritieke vervallen (model Sellmeijer/2) en gemeten kritieke vervallen. GTFZ zijn de proeven uitgevoerd op materiaal bij de Vijfhuisterdijk.

7.3.5 Verschil tussen beide proeven

Het aanzienlijke verschil tussen GTFZ_251 en GTFZ_252 is opmerkelijk, aangezien exact dezelfde opbouwprocedure is gevolgd en zand uit dezelfde big bag is gebruikt. De debieten en de afgeleide doorlatendheden zijn zeer vergelijkbaar en verschillen in doorlatendheid zijn dus niet de oorzaak geweest. Verder viel op dat bij beide proeven pipegroei sterk versnelde nadat een waarneembare wolk van fijn materiaal uit de wel kwam. Dit duidt op invloed van transport van fijn materiaal en daardoor ontstane verstoppingen.

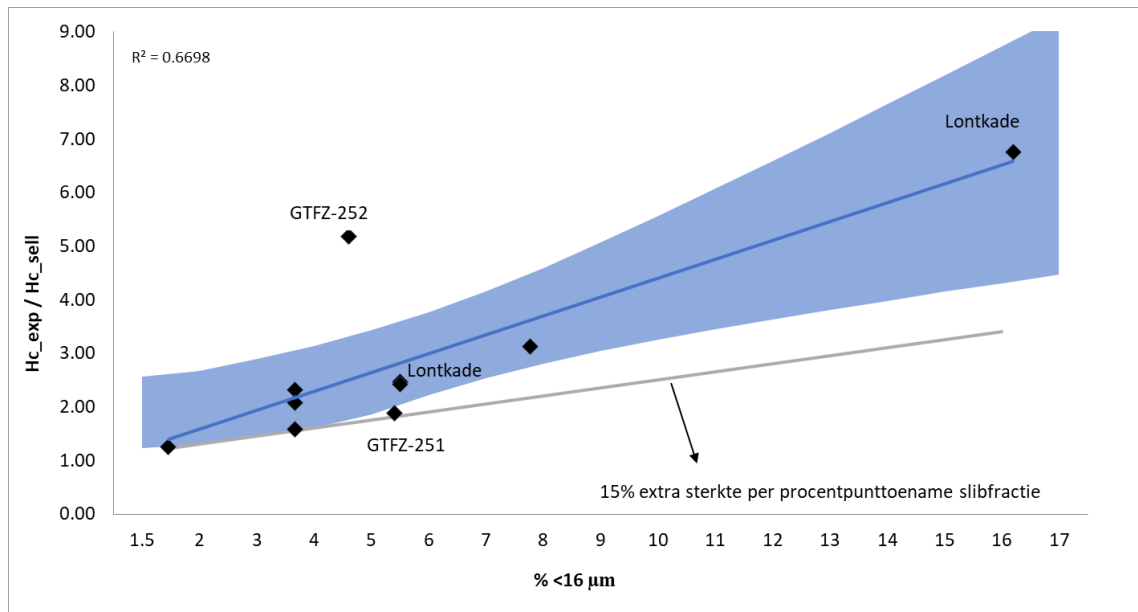
In vergelijking met GTFZ_251 groeide bij GTFZ_252 de pipe heel lang naar de zijkant toe en pas bij een heel hoog verval groeide de pipe weer richting het intredepunt. De zijwaartse groei moet veroorzaakt zijn door een bepaalde vorm van heterogeniteit die een barrière vormde voor groei richting het intredepunt. Op de foto's is er ook meer gelaagdheid zichtbaar in GTFZ_252 dan in GTFZ_251. Dit geeft eens te meer aan dat kleine heterogeniteiten veel invloed kunnen hebben op het pipingproces.

7.3.6 Relatie sterkte getijdenzand en korrelverdeling

In een rapport over piping in getijdenzand (Hijma, 2019) zijn eerder relaties getoond tussen de lutum-, slib- en fijne fractie percentages en gevonden extra sterkte in de kleine schaalproeven. De relaties waren relatief sterk, met name voor de relatie tussen percentage slib en de extra sterkte, maar de dataset was (en is) van beperkte omvang. Wel werd in het

rapport een concreet, maar nog conservatief, handelingsperspectief voorgesteld, waarbij het kritieke verval kon worden verhoogd met een percentage dat gerelateerd is aan het percentage slib (15% toename voor elk procentpunt slib).

Op basis van de 2 nieuw kleine schaalproeven is de grafiek voor de relatie tussen %slib en de extra sterkte opnieuw bepaald, dit keer inclusief het 95% betrouwbaarheidsinterval rondom de lineaire trendlijn door de metingen. GTFZ-251 plot exact op de lijn van conservatieve handelingsperspectief, terwijl GTFZ-252 er ruim boven plot.



Figuur 7-8 Ratio tussen experimentele kritieke vervallen en berekende kritieke vervallen, uitgezet tegen het percentage materiaal dat kleiner is dan 16 μm (slibfractie). De blauwe lijn is de lineaire trendlijn, daarom is het 95% betrouwbaarheidsinterval getekend. De grijze lijn is de in Hijma (2019) voorgestelde minimale extra sterkte die meegenomen zou kunnen worden door de beheerder tijdens de prioritering en/of beoordeling.

Het ligt natuurlijk voor de hand om de resultaten van de kleine schaalproeven te vergelijken met de resultaten van de praktijkproef. Belangrijke verschillen tussen de twee typen proeven zijn de opbouw (homogeen opgebouwd versus natuurlijk opgebouwd) en de schaal, waardoor een vergelijk niet direct zinvol is. Verwacht mag worden dat een natuurlijk opbouw leidt tot hogere sterktefactoren, terwijl de invloed van schaaffecten nog niet duidelijk is. De praktijkproef toonde een minimale sterktefactor van $2,3 \pm 0,3$, terwijl de kleine schaalproeven sterk verschillende factoren lieten zien (1,9 en 5,3). Deze getallen bijten elkaar niet, maar omdat tijdens de praktijkproef geen piping heeft opgetreden is er verder weinig duiding aan te geven. De resultaten van het Hedwigepolderproject zullen veel meer inzicht geven in de verschillen/overeenkomsten tussen de kleine schaalproeven en de praktijkproeven. In dat project zullen namelijk 2 praktijkproeven uitgevoerd en meer dan 10 kleine én medium schaalproeven.

8. Conclusies en aanbevelingen

8.1 Algemeen

De uitgevoerde pipingproef in Friesland was de eerst pipingproef ter wereld op een natuurlijke afzetting en daarbij is een nog niet eerder gebruikte proefopzet gebruikt (zie ook <https://www.youtube.com/watch?v=TpectAXNd7g> voor een film over de proef). De belangrijkste resultaten zijn:

1. Het is gelukt om de uitkomsten van de kleine schaalproeven op getijdenzand te valideren: dit type getijdenzand is minstens 2x zo sterk als volgt uit de rekenregel van Sellmeijer. Voor de proef is namelijk een minimale sterktefactor van $2,3 \pm 0,3$ berekend, waarbij reeds rekening gehouden is met effecten van meerlaagsheid en anisotropie. Door de lekkage kon de druk niet zodanig vergroot worden dat piping op ging treden. Hierdoor is de feitelijke sterkte van het getijdenzand niet vastgesteld. Omdat er nog geen piping optrad moet het daadwerkelijke kritieke verval nog aanzienlijk hoger hebben gelegen dan $2,3 \pm 0,3$.
2. Er is een proefopzet ontwikkeld die ook bruikbaar zal zijn in de Hedwigepolder (en feitelijk overal in de wereld) en er is veel kennis opgedaan om deze opzet in Hedwigepolder nog succesvoller in te zetten.

Door het pionierende karakter van de proef is het niet verwonderlijk dat er ook veel lessen getrokken kunnen worden over het optimaliseren van de proefopzet en de monitoring. Deze lessen zijn uitgebreid beschreven (Appendix C) en worden uiteraard meegenomen richting de volgende proef in de Hedwigepolder.

8.2 Doelstellingen

Hieronder wordt eerst de hoofdvraag van het onderzoek beantwoord, vervolgens worden de antwoorden op de vragen bij de specifieke doelstellingen gegeven.

- Hoofdvraag: Kunnen we op basis van de resultaten van de kleine schaalproeven en de pipingproef aan de Vijfhuisterdijk extra sterkte van het getijdenzand in rekening brengen?

Jazeker en daarmee kan de proef succesvol en geslaagd benoemd worden. De kleine schaalproeven lieten sterk wisselende sterktefactoren zien: tussen 1,9 en 5,3. Daarbij wordt opgemerkt dat de kleine schaalproeven op homogeen zand (zonder natuurlijke gelaagdheid) zijn uitgevoerd en in het veld meer sterkte verwacht mag worden. De Vijfhuisterdijkproef liet een sterktefactor van minimaal $2,3 \pm 0,3$ zien. Bij de aanbevelingen wordt verder ingegaan op de manier waarop met deze extra sterkte omgegaan kan worden bij de beoordeling of het ontwerp van waterkeringen.

Hieronder worden de deelvragen beantwoord:

- Hoe kan het proefzand geotechnisch gekarakteriseerd worden?

De korrelgrootteverdelingen laten een wisselend beeld zien, waarbij het getijdenzand naar beneden toe zandiger wordt. Het kan omschreven worden als uiterst tot zeer fijn, matig tot sterk siltig zand (Zs3/Zs2).

- Tot welke SOS-eenheid behoort het getijdenzand?

Het onderzochte getijdenzand bij de Vijfhuisterdijk is onderdeel van een uitgestrekt, relatief dun zandpakket aan de oostelijke rand van de monding van de voormalige Middellzee. Het kan omschreven worden als een getijdenplaatafzetting en behoort daarmee tot WBI-SOS eenheid H_Mp_zf.

- Welke mate van anisotropie is aanwezig in het getijdenzand?

De anisotropiefactor is ter plaatse bepaald met HPT-AMPT sonderingen en ter indicatie met laboratoriumproeven. Het getijdenzand op de proeflocatie blijkt uit twee sublagen te bestaan waarbij de bovenste laag een lage horizontale doorlatendheid ($\sim 0,65$ m/d) heeft met een anisotropiefactor van ~ 4 . De diepste laag heeft een horizontale doorlatendheid van $\sim 1,5$ m/d en een anisotropiefactor van ~ 9 . Een vergelijking van de HPT-AMPT resultaten met de uit de WSMs afgeleide doorlatendheden laat een goede overeenkomst zien en geeft vertrouwen in deze techniek.

- Hoe is de ontwikkeling van de waterspanningen in getijdenzand?

De ontwikkeling van de waterspanningen is gemeten met een meetnet van waterspanningsmeters en peilbuizen. Met gestabiliseerde verhogingsreeksen van ongeveer 2 uur blijkt dat de waterspanningen zich snel aanpassen aan de verhoogde waterdruk.

- Is de ontwikkeling van de waterspanningen in getijdenzand aanleiding tot het meevoeren van zand binnendijks?

In dit geval nauwelijks, maar verwacht wordt dat in getijdenzand in principe wel piping kan optreden, maar dat dit vooral zal gebeuren in de dikkere getijdengeulafzettingen.

- Wat is de weerstand van het type getijdenzand bij de Vijfhuisterdijk tegen piping?

De weerstand is groot, minstens $2,3 \pm 0,3$ groter dan volgt uit de rekenregel van Sellmeijer. Bij de onlangs gehouden werksessie *Piping in getijdenzand* (voor het Hedwigeproject) werd aanbevolen te onderzoeken of in dit type getijdenzand (getijdenplaat) überhaupt piping kan ontstaan of dat de drukopbouw in dergelijke dunne pakketten nooit voldoende groot zal zijn. Deze aanbeveling zal opgepakt worden binnen het Hedwigeproject.

8.3 Discussie

Het debiet uit het uittredepunt was erg laag (Figuur 6-10). Aangezien het maaiveld rondom het uittredepunt ongeveer 35 cm hoger lag dan de top van het 'schonere' getijdenzand, is het mogelijk dat heave een beperkende factor was, doordat die 35 cm materiaal functioneerde als een remmende kurk en uitstroom verhinderde. Dit zou kunnen verklaren waarom de gradiënten en stijghoogtes relatief hoog waren, zonder dat er veel stroming was. Tijdens de CSI bleek echter dat het materiaal onder het uittredepunt erg zandig was en geen/nauwelijks verstoringen bevatte (Figuur 3-6). Daarnaast zijn er duidelijk zandmeevoerende wellen waargenomen in het uittredepunt (zie Figuur 5-2). Hierdoor is er zeker zandtransport geweest, waarbij een eventuele remmende kurk doorsneden is door een opbarstkanaal. De maximale weerstand over die 35 cm zal dus in de orde van $0,3D$ (10,5 cm), met een bovengrens van $1,0D$ (35 cm) gelegen hebben. Deze weerstand heeft nauwelijks invloed op de berekende sterktefactor, omdat de lengte van het opbarstkanaal klein is en het kritieke verval daardoor relatief beperkt verkleind wordt. De gevonden extra sterkte van het getijdenzand wordt hier dus niet door heave veroorzaakt, maar door extra sterkte van het getijdenzand zelf. De lage uittrededebieten worden dan veroorzaakt door de lage doorlatendheden van het getijdenzand, waardoor zelfs bij grote gradiënten weinig stroming aanwezig is. Dit zal het transport van zand verminderen en daarmee ook de pipegroeisnelheid. Tijdsafhankelijkheid, die gekoppeld is aan pipegroeisnelheid, is daarom zeer waarschijnlijk een belangrijkere factor in getijdenzand dan in rivierzand.

8.4 Aanbevelingen

De resultaten van deze proef zullen worden gebruikt bij de verdere beoordeling van het traject Koehool-Lauwersmeer. Hieronder volgen enkele aanbevelingen voor hoe de opgedane kennis van deze proef kan worden toegepast binnen het dijktraject en feitelijk dijktrajecten op getijdenzand in het algemeen. Deze aanbevelingen gaan specifiek in op het getijdenzand en niet op bijvoorbeeld de invloed van voorlanden en tijdsafhankelijkheid.

- Maak een onderscheid in trajecten met relatief dunne en uitgestrekte zandlagen (1-3 m; zeer waarschijnlijk getijdenplaatafzettingen) en trajecten met zandige getijdengeulafzettingen. Verdeel die laatste in getijdengeulen die in contact staan met het Pleistoceen en in geulen die van het Pleistocene zand gescheiden zijn door een ondoorlatende laag (klei/veen). Deze configuraties kunnen verwerkt worden in Riskeer of eventueel in D-Geo Flow.
- Verkrijg op basis van sonderingen/boringen een beeld van de hoeveelheid kleilagen in het zand. Dit is belangrijk voor de inschatting van de mate van anisotropie. De anisotropie kan niet verwerkt worden in Riskeer, maar wel in D-Geo Flow.
- Verkrijg op basis van de beschikbare korrelgrootteverdelingen een beeld van de verhouding zand, silt en lutum en de daarvan afgeleiden fijne en slibfractie. De verschillen in de bepaalde korrelgrootteverdeling tussen het vooronderzoek en het

proefonderzoek zijn grotendeels toe te schrijven aan de diepte van het monstermateriaal. Het is daarom van belang om gericht onderzoek te doen voor het systeem dat beoordeeld/ ontworpen wordt. Voor piping is de korrelgrootte in de zandlaag direct onder de deklaag van belang, daar dienen ook de proeven uitgevoerd te zijn.

- Gebruik voor een inschatting van de mate van anisotropie en de horizontale doorlatendheid de metingen van de Vijfhuisterdijk en de resultaten van het Spui 20-3 project. Gebruik geen resultaten van doorlatendheid/anisotropie analyses op boorkernen; deze hebben weinig waarde. In het Spui 20-3 project (Fugro et al., 2020) worden richtlijnen gegeven voor anisotropie in getijdenafzettingen. Deze anisotropie en doorlatendheid kunnen vervolgens meegenomen worden in D-Geo Flow sommen, evenals eventuele aanwezige meerlaagsheid.
- Gebruik een sterktefactor bij toepassing van de rekenregel van Sellmeijer. De hoogte hiervan is momenteel nog onderwerp van onderzoek, maar er kan zeker al een factor gebruikt worden. In afwachting van de resultaten uit het Hedwigeproject wordt aanbevolen om de sterktefactor in eerste instantie in te zetten voor prioritering. Ons advies, gebaseerd op voorliggend pipingonderzoek, is om voor getijdenplaten vooralsnog een conservatieve sterktefactor van minimaal 2 te gebruiken en voor getijdengeulen te kijken naar het percentage slib en de informatie uit Figuur 7-8. Voor elk procentpunt slib kan dan bijvoorbeeld een extra sterkte van 15% toegekend worden, in afwachting van verfijning en uitbreiding van de relatie tussen slib en de extra sterkte van getijdenzand. Deze verfijning zal in het Hedwigeproject gaan plaatsvinden, evenals een verdere modelanalyse van plaatafzettingen, waarbij de verwachting bestaat dat een minimaal benodigde dikte voor getijdenafzettingen noodzakelijk is om pipinggevoelig te zijn.
- Maak op grond van bovenstaande stappen een onderscheid in verschillende getijdenzandpakketten, op basis van verschillen in geometrie anisotropie, doorlatendheid, korrelgrootteverdelingen en het percentage slib. Voer aansluitend een consequentie-analyse uit, daarbij ook rekening houdend met de recent ontwikkelde kennis omtrent de overige voorlanden, 3D stroming en tijdsafhankelijkheid. Met deze analyse kan bepaald worden welke aspecten in de vervolgstappen van het project extra aandacht nodig hebben in een maatwerkeraanpak.
- Voor het maatwerk is *in situ* onderzoek en een goede modellering nodig. Bij deze maatwerk analyses wordt aangeraden op basis van de consequentie-analyse gericht onderzoek uit te voeren. In het geval van brede voorlanden ligt extra onderzoek naar deze voorlanden (weerstand) voor de hand. Bij een verwachte sterke gelaagdheid en anisotropie zijn gedetailleerde anisotropie metingen noodzakelijk waarvoor de HPT-AMPT een geschikte techniek is. Specifiek voor getijdenzanden geldt naast gelaagdheid en anisotropie dat specifiek inzicht in de slibfractie, naast de standaard

korrelgrootte, van essentieel belang is. Hiervoor is een standaard zeefanalyse niet voldoende en dient de fijne fractie geanalyseerd te worden. Dit gaat om relatief grote investeringen en zijn niet generiek aan te bevelen. Een locatie specifieke consequentie-analyse is daarom essentieel voor een efficiënte, maar goede analyse.

- Tijdens de proef is er veel geleerd voor de volgende proef (Hedwigeproject). De leerpunten zijn beschreven in de evaluatie (Appendix C). Er wordt aanbevolen om tijdens de bouw van de proefopstelling te allen tijde een eindverantwoordelijke vraagbaak te hebben in het veld. Deze "field manager" zorgt ervoor dat alles volgens plan verloopt en dat er achteraf geen twijfels mogelijk zijn. Een tweede belangrijke leerpunt is dat er meer aandacht dient te zijn voor lekkages. Dit was een bekend risico, maar de maatregelen zijn onvoldoende gebleken. Dichte sloten en nieuwe damwanden zullen essentieel zijn. Daarnaast wordt aanbevolen de infiltratiebuizen verder van de damwanden te plaatsen. Tot slot wordt aanbevolen goede debiet metingen (in en uit) te doen.

9. Referenties

- Deltares, Fugro, Wetterskip Fryslân, 2020. Pipingproef Vijfhuisterdijk - Draaiboek.
- Fugro, 2020. Pipingproef Wetterskip Fryslan - veldwerk - Rapportage geotechnisch onderzoek, Fugro rapport 1319-155912 | 14-04-2020.
- Fugro, Deltares, Waterschap Hollandse Delta, 2020. Onderzoeksproject Anisotropie - Eindrapportage, Fugro rapportnummer 1217-0051-000.R17 | 6-11-2020.
- Hijma, M.P., Oost, A.P., 2018. Getijdenafzettingen en piping: een quickscan - Karakterisatie, inventarisatie en demonstratie, Deltares report 11202560-012-GEO-0001.
- Hijma, M.P., 2019. KvK Piping deelproject 011: Getijdenafzettingen en piping (2) - Proeven, begrijpen, toepassen, Deltares report 11203719-011-GEO-0001.
- Hijma, M.P., 2020a. Geschiktheid ondergrond Vijfhuisterdijk voor pipingproef, Deltares memo 11204843-002-BGS-0001.
- Hijma, M.P., 2020b. Ontwerpnoot pipingproef Vijfhuisterdijk, Deltares memo 11204843-002-BGS-0006.
- Karaoulis, M., Pefkos, M., 2020. Geophysical survey for the piping field test at Vijfhuisterdijk, Friesland Deltares report 11204843-002-BGS-0007.
- Karaoulis, M.C., Kim, J.H., Tsourlos, P.I., 2011. 4D active time constrained resistivity inversion. *Journal of Applied Geophysics*, 73 (1), 25-34. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2010.11.002>.
- Kim, J.-H., Yi, M.-J., 2010. DC3D_PRO', *Geoelectrical Modeling and Inversion, User's Manual*, KIGAM, Korea.
- Methorst, A.J., 2020. Piping in sandy tidal deposits. M.Sc.-thesis, TUDelft/Deltares, pp. 127.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2017. Schematiseringshandleiding piping WBI 2017, Definitief, versie 2.2.
- Revil, A., Karaoulis, M., Johnson, T., Kemna, A., 2012. Review: Some low-frequency electrical methods for subsurface characterization and monitoring in hydrogeology. *Hydrogeology Journal*, 20 (4), 617-658. 10.1007/s10040-011-0819-x.
- Sellmeijer, H., de la Cruz, J.L., van Beek, V.M., Knoeff, H., 2011. Fine-tuning of the backward erosion piping model through small-scale, medium-scale and IJkdijk experiments. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 15 (8), 1139-1154. 10.1080/19648189.2011.9714845.
- Van Beek, V.M., Van Essen, H.M., Vandenboer, K., Bezuijen, A., 2015. Developments in modelling of backward erosion piping. *Géotechnique*, 65 (9), 740-754. 10.1680/geot.14.P.119.
- Van der Kolk, B., 2020. Resultaten 2D en 3D pipinganalyse Vijfhuisterdijk, Deltares memo 11204843-002-BGS-0004.

- Van der Poel, J.T., Schenkeveld, F.M., 1998. A preparation technique for very homogeneous sand models and CPT research. In: J. Kimura, T. Kusakabe, O. Takemura (Eds.), Proceedings of the International Conference Centrifuge 98. Balkema, Rotterdam, The Netherlands., pp. 149-154.
- Wetterskip Fryslân, 2020. Pipingproef Vijfhuisterdijk - Plan van Aanpak voor het uitvoeren van praktijkonderzoek naar het faalmechanisme piping in getijdenzand.

Appendix A Logboek

Legenda:

-1	niet goed te bezichtigen / geen waarneming
9	aangenomen gelijk te zijn aan laatste vermelding
0	Geen wel
1	Watersvoerende wel, maar geen kokend zand
2	Watersvoerende wel, kokend zand, niet zandmeevoerend
3	Zandspoor, geen zichtbaar koken of zand transport, geen verandering in grootte, geen stofwolk
4	Zandspoor, geen zichtbaar koken van zand of zandtransport, wel geleidelijke groei
5	Zandspoor, geen zichtbaar koken van zand of zandtransport, wel een stofwolk zichtbaar
6	Zandmeevoerende wel
s#	afscheppen van # soeplepels zand (circa 180 gram zand, gelijk bij pipingproef 4 in 2009, houdt rekening met 30% foutmarge)
s#*8	afscheppen van # schoppen met zand, bestaande uit naar schatting 8 soeplepels zand.
x	afscheppen zonder volume-indicatie

Logboek piping proef Vijfhuisterdijk						Observaties en opmerkingen	
datum	tijd	Uur	verval	debiet	Diameter uitredepunt	Observatie	Opmerkingen
2020	hh:mm	uur	m	liter/min	(m)		
14-Sep	11:00	0.0	1.20		0.14	0	
14-Sep	12:00	1.0	1.20		0.14	0	
14-Sep	12:30	1.5	1.20		0.14	0	
14-Sep	13:00	2.0	1.80		0.14	0	
14-Sep	14:30	3.5	1.80		0.14	0	
14-Sep	15:30	4.5	2.40		0.14	0	
14-Sep	16:30	5.5	2.40		0.14	0	
14-Sep	17:00	6.0	2.40		0.14	0	
14-Sep	18:35	7.6	3.00		0.14	0	stap van 0.6 m gemaakt
14-Sep	20:30	9.5	3.60		0.14	0	stap van 0.6 m gemaakt
14-Sep	22:00	11.0	4.00		0.14	0	
15-Sep	07:30	20.5	4.50		0.20	0	s nachts WSM stabilisatie. In bouwkuip stroomt water vanuit zijkant lijkt het.
15-Sep	09:30	22.5	5.00		0.20	0	Lekkage langs damwand, veel water. Kuil gegraven rond 10 uur. Af en toe leegpompen
15-Sep	11:00	24.0	5.00		0.20	0	
15-Sep	12:30	25.5	5.50		0.20	0	per ongeluk 2x0.5 m verhoogd. Veel lekkage langs de wanden. Weer 1 m verlaagd naar en daarna gestabiliseerd.
15-Sep	14:30	27.5	5.00		0.20	0	Lekkage neemt toe, verder verlaagd naar 5.2 m (Van Tongeren niveau)
16-Sep	12:00	49.0	4.50		0.20	0	Lekkage niet afgenomen door injecties van SealTech. Verder verlagen voor uitgraven uitredepunt
16-Sep	13:15	50.3	3.50		0.20	0	Verder verlagen
16-Sep	16:00	53.0	3.00		0.20	0	Stabiliseren voor start proef, uitredepunt is verder uitgegraven (met buis van 0.5 m diameter) om verval te vergroten
16-Sep	16:15	53.3	3.50		0.50	0	Opgelegd verval is circa 4.2 m. Werkelijk verval (uit peilbuis en put)=2.5+1+3.5 m
16-Sep	19:05	56.1	4.00		0.50	0	Halve meter water weggepompt en pomp neergelegd op stuk hout in buis
16-Sep	20:30	57.5	3.30		0.50	1	LET OP: vanaf hier staat bij verval de stand in de Van Tongeren-buis. Moet later gecorrigeerd met peilbuisdata! Water weggepompt, daarna welletje gezien! VT op 3.3. Eigenlijk wrsl 3.7 m NAP (zit een fout van 0.4 m bij hen). Water staat op -0.8 m in bouwkuip. Daarom opgelegd verval van circa 4.5 m NAP
16-Sep	21:00	58.0	3.80		0.50	1	Water weggepompt
16-Sep	21:30	58.5	3.80	0.40	0.50	1	Wellen verdwijnen bij stijgend water.
16-Sep	21:45	58.8	3.80	0.40	0.50	1	
16-Sep	22:26	59.4	3.80		0.50	1	Afgepompt ca 15 cm water. Pomp laten lopen zodat buis droog is. 4 welletjes waargenomen
16-Sep	22:45	59.8	3.80		0.50	1	Klein beetje zandtransport, pomp uit
16-Sep	23:08	60.1	4.20		0.50	1	Waterstand in waterbuis verhoogd naar 4.2
16-Sep	23:30	60.5	4.20		0.50	1	Pomp gewisseld in put. Waterspanningen lopen nog steeds op.
16-Sep	23:45	60.8	4.20		0.50	1	Nog steeds kleine welletjes
17-Sep	06:50	67.8	4.20		0.50	1	Gat leeggepompt en pomp verwisseld.
17-Sep	07:00	68.0	4.70		0.50	1	Nog steeds 4 dezelfde welletjes
17-Sep	07:25	68.4	4.70		0.50	1	Weer pompen
17-Sep	08:00	69.0	4.70		0.50	6	Duidelijk 2 ZMW, 1 met vulkaantje van 4 cm
17-Sep	08:37	69.6	4.70		0.50	6	Stijghoogte piek door lopen van mensen in raai van WSM 1.3
17-Sep	09:05	70.1	5.20		0.50	6	Geul graven bovenaan talud
17-Sep	09:15	70.3	5.20		0.50	6	Start inbouwen zelfregulerende pomp uitredepunt
17-Sep	10:50	71.8	5.20		0.50	6	Bouwen pomp klaar
17-Sep	11:50	72.8	5.20		0.50	6	Zand begint 90 cm onder rand buis. Buis is 1 m lang
17-Sep	11:55	72.9	5.20		0.50	6	
17-Sep	13:00	74.0	5.70		0.50	6	Welletjes minder actief geworden, drukverlies naar buiten neemt toe, middelste buis vult niet meer goed bij
17-Sep	13:20	74.3	5.70		0.50	6	
17-Sep	14:00	75.0	5.70		0.50	6	Toevoer naar buizen op max gezet (was beetje geknepen), wateraanvoer vanuit vaart naar container aangezet
17-Sep	18:45	79.8	5.70		0.50	6	Water middelste buis komt niet meer op hoogte. Van Tongeren komt met spullen
17-Sep	19:35	80.6	5.70		0.50	6	Alles stabiel, weer verhoogd
17-Sep	20:49	81.8	5.90		0.50	6	20 cm omhoog om te kijken hoe het gaat
17-Sep	20:54	81.9	6.20		0.50	6	Alles gaat goed, 30 cm erbij
17-Sep	21:30	82.5			0.50	0	Pompdruk stabiel maar te laag (6.2, 5.7 en 5.9 over de buizen). Wel leeggepompt om 21:15 en 21:30
17-Sep	22:30	83.5			0.50	0	Einde proef, druk gaat niet meer omhoog

Appendix B Vaststellen doorlatendheid

Een van de bepalende factoren voor piping conform de methode van Sellmeijer is de doorlatendheid van het watervoerend pakket. Voor het ontwerp van de proef is de doorlatendheid daarom zeer nauwkeurig bepaald waarbij ook aandacht is geweest voor de mate van anisotropie. In het vooronderzoek is de doorlatendheid met zowel laboratoriumonderzoeken als de HPT-AMPT® bepaald. Tijdens de proefuitvoering is met meerdere waterspanningsmetingen de stijghoogte in het getijdenzand gemeten ten gevolge van de opgelegde druk met infiltratiebuizen. Op basis van deze responsmetingen is de doorlatendheid ingeschat (analytisch en numeriek). Tot slot is na de proef tijdens de CSI materiaal gestoken voor laboratoriumonderzoek. In totaal gaat het om de volgende proeven (Tabel B-1) die in deze bijlage zijn uitgewerkt.

Tabel B-1: Overzicht proeven voor doorlatendheid

Type	Vooronderzoek	Proefonderzoek	Proefonderzoek (CSI)
Laboratoriumproef (falling head)	6x		6x
HPT-AMPT	3x		
Responsanalyse (analytisch)		1x	
Responsanalyse (numeriek)		1x	
Piping schaalproef			2x
Doorstroomproef			1x

Het doel van deze bijlage is het vaststellen van de doorlatendheid van het getijdenzand bij de Vijfhuisterdijk. Hiervoor zijn de verschillende methoden geanalyseerd en vergeleken. De resultaten van de laboratoriumproeven, de HPT-AMPT®, responsemetingen (de numerieke en analytische bepaling) en de kleine schaalproeven zijn in onderstaande paragrafen beschreven, uitgewerkt en gepresenteerd.

1. Laboratoriumproef (falling head)

In het laboratorium zijn in twee fases proeven voor de doorlatendheid gedaan. In de eerste fase (vooronderzoek) is dit uit boormonstermateriaal uit het gebied gedaan. De tweede fase is op de locatie van het uitgegraven uittredepunt uitgevoerd (CSI / proefonderzoek). De richting van de doorlatendheid (horizontaal en verticaal) is afhankelijk van de richting waarin het monster gestoken is. Voor de anisotropie zijn daarom twee afzonderlijke monsters nodig. Hiervoor zijn in het vooronderzoek monsters die direct onder elkaar liggen gebruikt waardoor dit mogelijk een net andere sublaag geweest is. In het CSI-onderzoek (na uitgraven) zijn de monstersets opgebouwd uit direct naast elkaar gelegen monsters.

De resultaten zijn beschreven in de laboratoriumrapportages en Tabel B-2. Uit het onderzoek blijkt dat de splitsing van het watervoerend pakket in twee pakketten met een grens rond NAP -2,0 m (op basis van HPT-AMPT®-metingen), in het laboratoriumonderzoek niet duidelijk naar voren komt. De horizontale doorlatendheid is zeer variabel, maar de anisotropie is wel significant hoger voor het diepere getijdenzand.

Het onderzoek in fase 2 (CSI) is alleen uitgevoerd in de bovenste laag (getijdenzand 1, GZ1). Het verschil tussen de twee onderzoeksfases is niet noemenswaardig voor de anisotropie. De doorlatendheid verschilt een factor 2. Dit komt doordat de hoeveelheid onderzoek beperkt is ten opzichte van de spreiding, waardoor grote verschillen mogelijk zijn.

Tabel B-2: Resultaat laboratoriumproeven voor doorlatendheid

Diepte [m NAP]	Zandlaag	Fase	Kh [m/d]	Kv [m/d]	A [-]
-0.67	GZ1	CSI	0.04	0.03	1.1
-0.82	GZ1	CSI	0.02	0.01	3.4
-0.97	GZ1	CSI	0.10	0.10	1.1
-1.15	GZ1	CSI	0.13	0.05	2.4
-1.3	GZ1	CSI	0.02	0.00	5.6
-1.45	GZ1	CSI	0.70	0.20	3.6
-1.52	GZ1	Proefontwerp	0.08	0.02	3.4
-1.84	GZ1	Proefontwerp	0.10	0.05	2.1
-1.94	GZ1	Proefontwerp	0.29	0.13	2.3
-2.02	GZ2	Proefontwerp	0.01	0.00	11.3
-2.72	GZ2	Proefontwerp	0.59	0.03	17.1
-3.14	GZ2	Proefontwerp	0.70	0.04	16.8
Mediaan	GZ1 en GZ2	Totaal	0,10	0,03	3,83
Standaarddeviatie	GZ1 en GZ2	Totaal	0,27	0,06	5,87
Mediaan	GZ1 en GZ2	Proefontwerp	0,15	0,02	6,14
Standaarddeviatie	GZ1 en GZ2	Proefontwerp	0,29	0,04	7,15
Mediaan	GZ1	Proefontwerp	0,13	0,05	2,54
Standaarddeviatie	GZ1	Proefontwerp	0,12	0,05	0,73
Mediaan	GZ2	Proefontwerp	0,18	0,01	14,81
Standaarddeviatie	GZ2	Proefontwerp	0,37	0,02	3,29
Mediaan	GZ1	CSI	0,07	0,03	2,39
Standaarddeviatie	GZ1	CSI	0,27	0,07	1,72

Ondanks dat de spreiding in de resultaten zeer groot is, is het te zien dat er een splitsing aanwezig kan zijn binnen het watervoerend pakket, waarbij de anisotropie toeneemt met de diepte. Wat verder opvalt is dat de doorlatendheid zeer laag is voor een zandige grond. Dit is (deels) te verklaren door het schaaleffect (kleine proeven resulteren in een lage doorlatendheid).

2. HPT-AMPT

Voor de analyse van de HPT-AMPT sonderingen zijn de resultaten van het factual report in de veldwerkrapportage (Fugro, 2020) gebruikt. De meest nauwkeurige horizontale doorlatendheid wordt bepaald wanneer de resultaten van de HPT en de AMPT worden gecombineerd. Op deze manier is de grote spreiding van de resultaten van de afzonderlijke AMPT's gekoppeld aan de van nature aanwezige variaties. Dit is in de veldwerkrapportage gedaan om de doorlatendheidsgrafieken op te stellen.

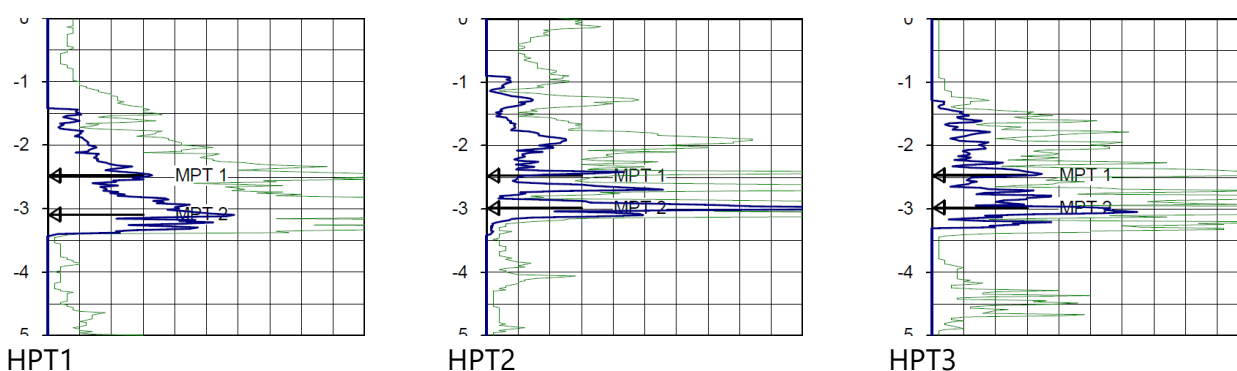
De anisotropiemetingen zijn in een relatief dunne getijdenzandlaag uitgevoerd waardoor de metingen beïnvloed zijn door de afsluitende kleilagen. Om dit effect goed mee te nemen zijn Plaxis (2D assymetrisch) berekeningen uitgevoerd waarin een tweelaags systeem is toegepast. Voor iedere getijdenzandlaag is een beste fit van de metingen tijdens de HPT-AMPT bepaald waarbij de anisotropie, berging en doorlatendheid gevarieerd zijn. De verhouding tussen de horizontale doorlatendheid van de twee lagen staat vast op basis van de HPT-sondering. Per AMPT is hierdoor zowel een anisotropie (A) voor het bovenste deel als het onderste deel van het pakket bepaald. De gehele bodem is immers gemodelleerd. Uit het HPT-AMPT onderzoek blijkt dat getijdenzand opgedeeld kan worden in twee lagen, GZ1 en GZ2, zie Tabel B-3.

Tabel B-3: Resultaat HPT-AMPT voor doorlatendheid

HPT	Zandlaag	Kh [m/d]	A _{GZ1} [-]	A _{GZ2} [-]	A _{totaal} [-]
1	GZ1	0,8	8,0	14,0	8,0
1	GZ2	1,8	4,2	8,4	5,2
2	GZ1	0,7			
2	GZ2	1,5	13,1 *	52,4 *	15,3 *
3	GZ1	0,5	8,9 *	53,4 *	11,7 *
3	GZ2	1,2	2,0	6,0	4,2
Gemiddelde	GZ1	0,67	4,7		5,8
Mediaan	GZ1	0,65	4,1		5,6
Standaarddeviatie	GZ1	0,15	3,0		2,0
Gemiddelde	GZ2	1,50		9,5	5,8
Mediaan	GZ2	1,48		8,9	5,6
Standaarddeviatie	GZ2	0,30		4,1	2,0

* Op basis van het stappenplan van het anisotropieonderzoek zijn de extreme waarden van de anisotropie weggelaten

De opsplitsing in twee lagen blijkt een beter resultaat op te leveren dan slechts één laag. Dit komt doordat een deel van de anisotropie door de variatie in horizontale doorlatendheid komt. Bij HPT2 en HPT3 is er mogelijk een zeer hoge anisotropie berekend doordat binnen de onderste laag veel variatie in doorlatendheid aanwezig is. Deze variatie is verdisconteerd (door tweelaags Plaxis) in de anisotropie van de onderste laag. De extreem hoge anisotropie is daardoor eigenlijk een verticale weerstand van een stoorlaag/ kleilens. In de HPT grafieken is deze stoorlaag bij HPT2 duidelijk te zien (Figuur B-1).



Figuur B-1: Resultaat horizontale doorlatendheid HPT met een sterke gelaagdheid in de onderste grondlaag

3. Responsemeting (analytisch)

Ten gevolge van een opgelegde stijghoogte uit de infiltratiebuizen is de respons gemeten in de ondergrond. Hieruit is een verhang te berekenen. De doorlatendheid op basis van responsmetingen is ingeschat met de wet van Darcy:

$$Q = Ki = kAi \rightarrow k = \frac{Q}{Ai}$$

Met:

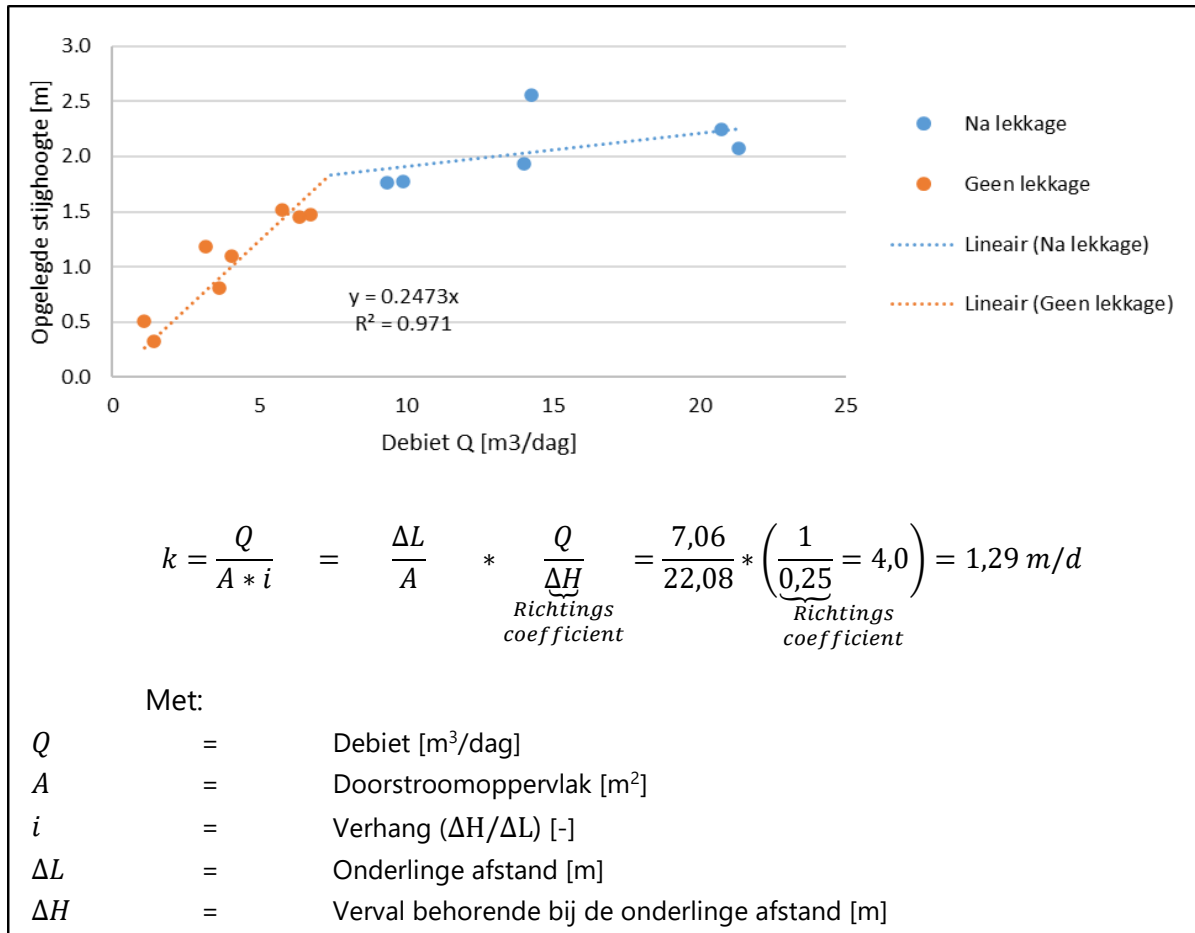
- Q = Debiet [m^3/d]
- K = Doorlatendheid [m^3/d]
- i = Verhang [-]
- k = Doorlatendheid [m/d]
- A = Doorstroomoppervlakte [m^2]

Met een totale laagdikte van 2,3 m en een breedte tussen de damwanden van 9,6 m is het doorstroomoppervlak (A) 22,1 m^2 . Het verval is bepaald uit het gemiddelde van de infiltratiebuizen en de daarnaast geplaatste WSM en PB1 en Raai 2 van de WSM's. Hierdoor is de afstand en het verval maximaal waardoor de invloed van verstoringen het kleinst is. De afstand met raai 1 zou groter zijn, maar in die raai is een holling door 3D stroming aanwezig. De onderlinge afstand (ΔL) bedraagt 7,06 m.

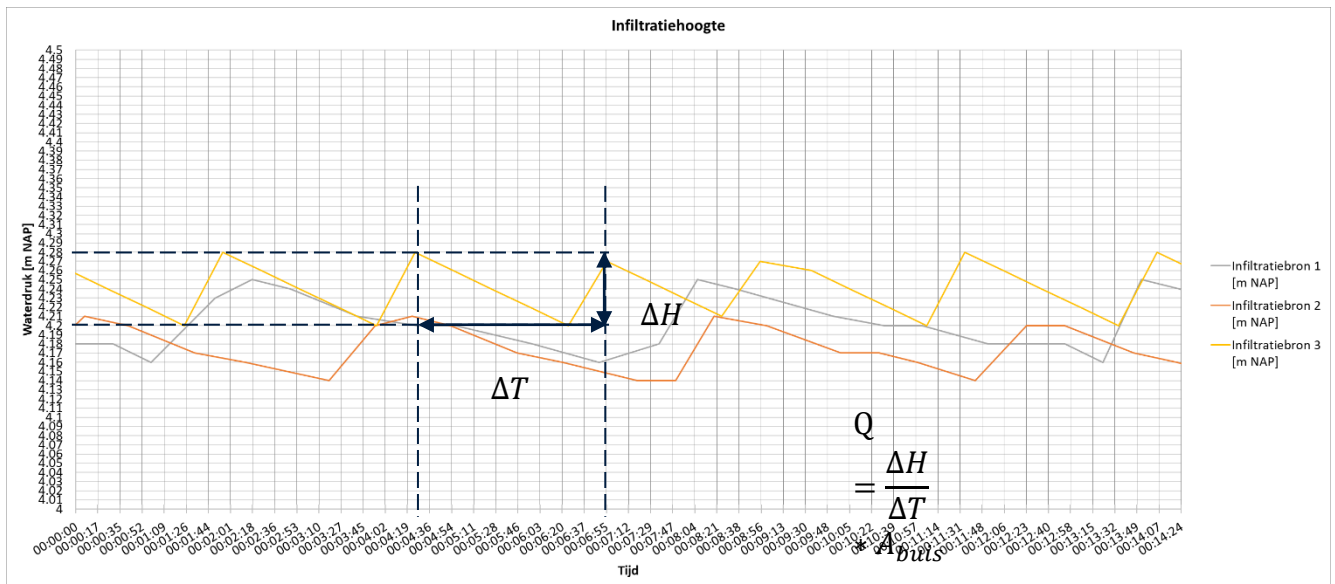
Het verhang is bepaald met de waterspanningsmeters in het proefvak. Binnen het proefvak zijn 20 waterspanningsmeters in 4 raaien aanwezig. Daarnaast zijn tussen de infiltratiebuizen en achter het uittredepunt nog 2 waterspanningsmeters beschikbaar. Het is daardoor mogelijk op meerdere manieren het verhang te bepalen. Door 3d werking is ervoor gekozen alleen de raaien midden in het proefvak te gebruiken. Deze liggen 7,06 m uit elkaar. Tussen deze raaien zijn ook waterspanningsmeters aanwezig. Deze zijn niet gebruikt omdat door de relatief korte afstand de meetonzekerheden relatief groot zijn. Om het effect van meetonzekerheden nog verder te verkleinen is de gemiddelde stijghoogte van de raaien gebruikt.

Door de vorm van de proef (stapsgewijs ophogen) is er per stap een gradiënt af te leiden. Per stap is daarmee ook een doorlatendheid te berekenen. Dit is voor iedere stap berekend. Bij hogere waterstanden in de infiltratiebuizen is er kortsluiting opgetreden waardoor de debieten relatief hoog zijn. De doorlatendheid van het zand is daarom bepaald bij de lagere opgelegde stijghoogtes. In Figuur B-2 is een duidelijk knippunt te zien door lekkages.

Het debiet is bepaald door de metingen uit de infiltratiebuizen te analyseren. Hier is namelijk geen directe debietmeting gedaan. Het debiet is ingeschat door de zakking van de waterstand in de infiltratiebuizen over de tijd te bepalen. Dit is in stappen gedaan doordat het vullen van de buizen discreet is uitgevoerd (vullen tot bepaalde hoogte, leeg laten lopen tot bepaalde hoogte en weer vullen) en het daardoor mogelijk is deze inschatting heel vaak te maken (zie Figuur B-3).



Figuur B-2 Berekening en trend in de debiet-verval-relatie



Figuur B-3 Voorbeelddata en rekenmethode infiltratiedebieten

Op deze manier blijkt de horizontale bulkdoorlatendheid, zonder lekkages, 1,29 m/dag te zijn. Dit is in goede overeenstemming met de waarde die volgen uit de HPT-AMPT metingen. De spreiding is met een standaardafwijking van ongeveer 0,2 echter groot.

4. Responsmeting (numeriek)

Tijdens en voor de proef zijn veel metingen uitgevoerd en monsters genomen om zoveel mogelijk informatie te verkrijgen over zaken als de bodemopbouw, de doorlatendheid en het verloop in de waterspanningen. Hier zijn modelanalyses beschreven die na afloop van de proef zijn uitgevoerd (postdictie). Hierbij is voortgeborduurd op de modellering die voorafgaand aan de proef is uitgevoerd ter onderbouwing van de proefopzet (predictie). De uiteindelijke proefopzet is hierbij zo nauwkeurig mogelijk nagebootst in het model en vervolgens zijn de gemodelleerde waarden (voor waterspanningen en gradiënten) vergeleken met de gemeten waarden. Doelen hierbij zijn 1) het kunnen begrijpen wat zich tijdens de proef in de ondergrond heeft afgespeeld en 2) het nader bepalen van het kritieke verval (in aanvulling op de predicties van het kritiek verval voorafgaand aan de proef). Dit laatste is nodig om de minimale sterktefactor te bepalen (zie hierboven).

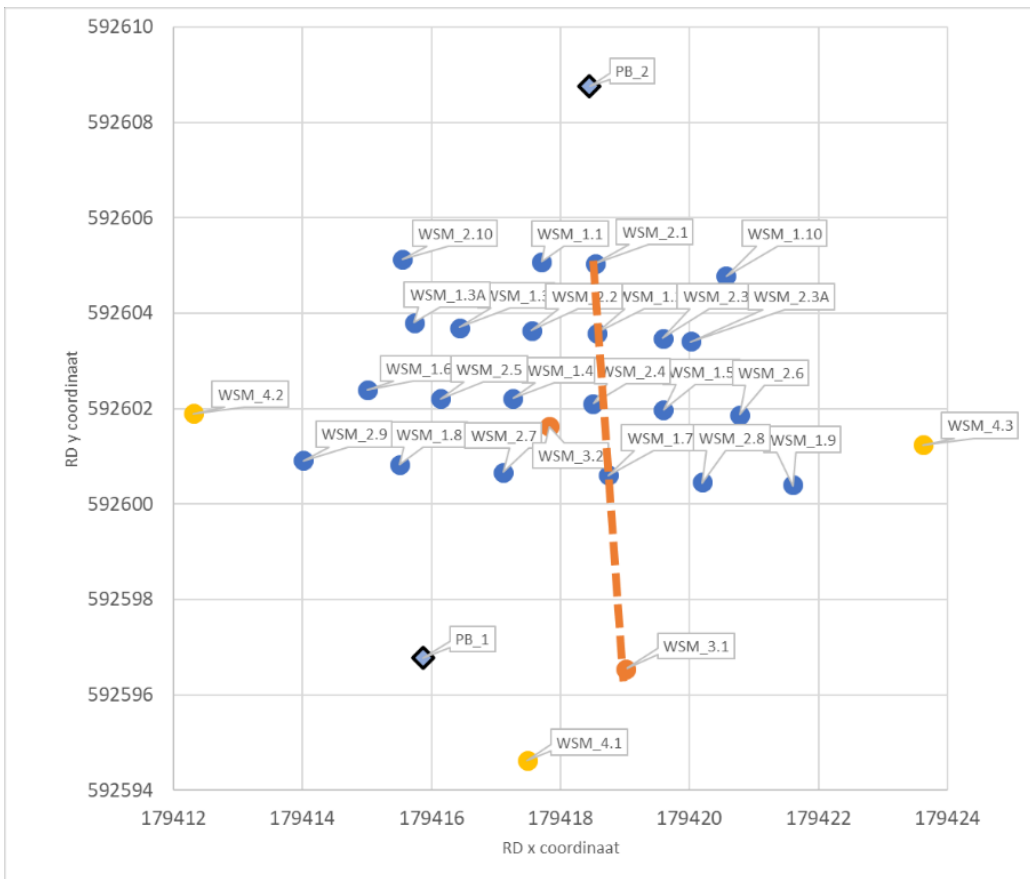
Dit onderdeel start met de onderbouwing van de keuze voor een bepaald tijdstip waarvoor metingen en modeluitkomsten met elkaar vergeleken worden. Vervolgens zijn de metingen en modeluitkomsten voor de gradiënten, de doorlatendheden, de mate van anisotropie en de debieten met elkaar vergeleken. Afgesloten wordt met een berekening van het kritieke verval.

Gebruikte data en tijdstip

Voor de analyses is gebruik gemaakt van de raai met waterspanningsmeters WSM 2.1, WSM 1.2, WSM 2.4, WSM 1.7 en WSM 3.1. Dit is de enige raai met een WSM (3.1) ter hoogte van de infiltratiebuizen. In Figuur B-4 is de locatie van alle WSM's weergegeven. De infiltratiebuizen staan niet in de figuur, maar zijn geplaatst in dezelfde lijn als PB_1 en WSM_3.1 (zie ook Tabel B-4). Het uittredepunt ligt 2,17 meter benedenstrooms van WSM 2.1. Bij de analyse van de WSM's is aangetoond dat bij een hogere stijghoogte er een 3D werking is richting het uittredepunt. De berekeningen zijn daarom niet

uitgevoerd bij een maximale stijghoogte. Hier is het 3D effect te verwaarlozen en is toch voldoende contrast in de meetdata.

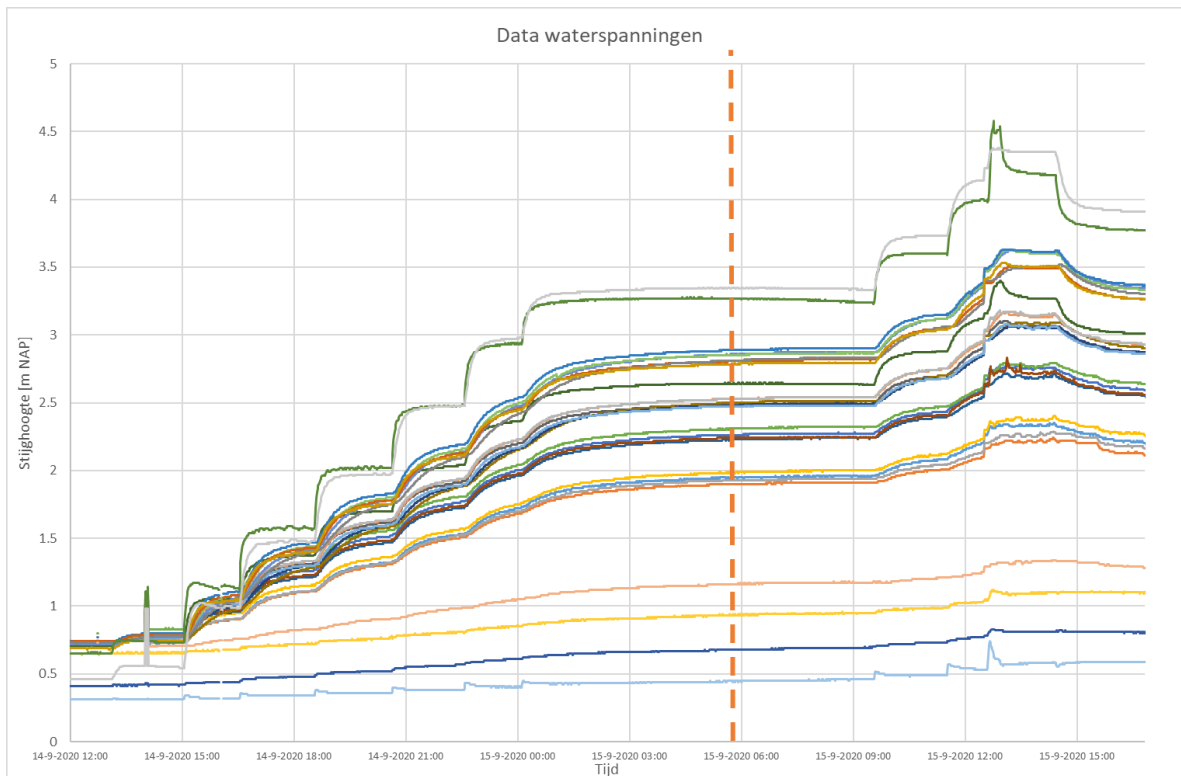
Zoals eerder beschreven kan de proef worden onverdeeld in twee fases. Voor het terugrekenen van parameters is Fase 1 het meest bruikbaar, omdat er toen nog relatief weinig verstoringen (lekkages) waren opgetreden. Gekozen is voor het tijdstip 5:48 op 15-09-20. Dit tijdstip valt tijdens een stap met een lang verloop waardoor er een evenwichtssituatie aanwezig is. Figuur B-5 geeft de gemeten waterspanningen tijdens de eerste fase van de proef weer. In Tabel B-4 zijn de gemeten stijghoogtes ter plaatse van de gebruikte waterspanningsmeters weergegeven.



Figuur B-4 Locaties van de waterspanningsmeters en peilbuizen en de gekozen raai voor analyse weergegeven als stippellijn.

Tabel B-4 Geregistreeerde waterspanning op tijdstip 15-09-20 5:48 (10020 seconden na start)

	WSM_2.1	WSM_1.2	WSM_2.4	WSM_1.7	WSM_3.1
Afstand t.o.v. uittredepunt (m)	2.17	3.62	5.1	6.6	10.68
Stijghoogte (m NAP)	1.93	2.31	2.47	2.89	3.27

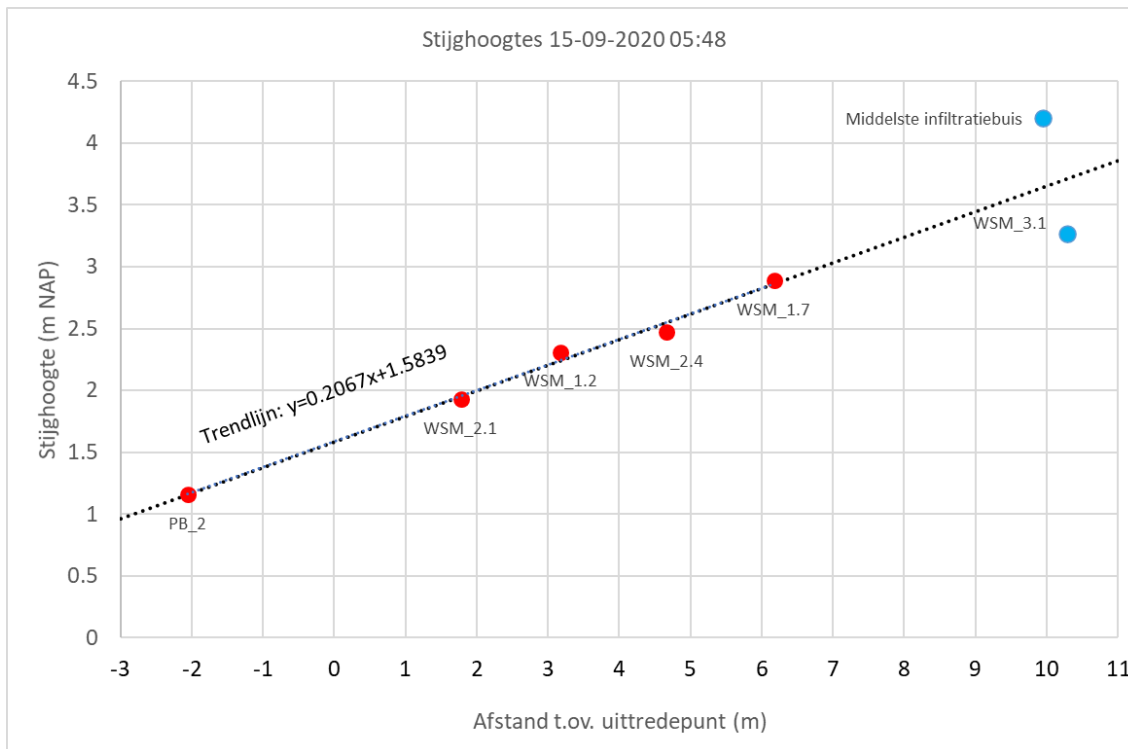


Figuur B-5 Gemeten waterspanning tijdens fase 1 en gekozen moment t.b.v. analyses (stippellijn)

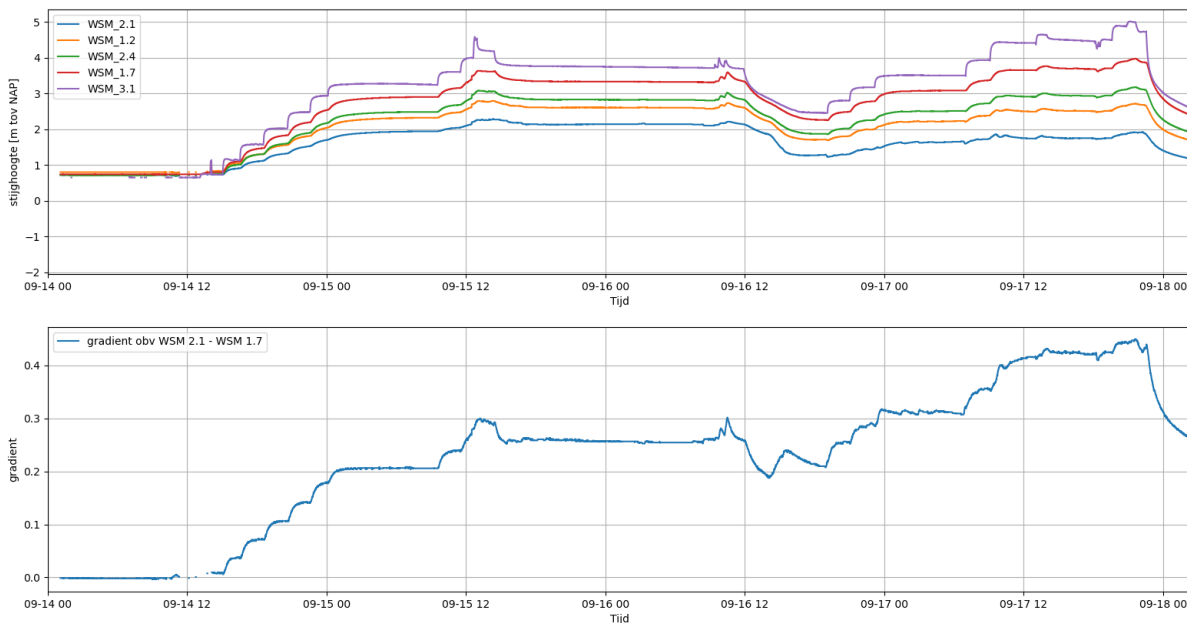
Opgetreden gradiënten

Van de gekozen set waterspanningsmeters is de gradiënt bepaald tussen de WSM's 2.1 tot 1.7. WSM 3.1 wordt hierbij genegeerd, vanwege mogelijk lekkage, wat de relatief lage stijghoogte zou kunnen verklaren. De gradiënt, van de genoemde raai, is door middel van lineaire regressie bepaald (Figuur B-6). De figuur laat duidelijk zien dat WSM 3.1 niet in lijn ligt met de overige metingen. Extrapolatie van de regressielijn tot de positie van de infiltratiebuis laat zien dat de stijghoogte die gebruikt zou moeten worden voor het bepalen van het opgetreden verval vrijwel in het midden ligt tussen de opgelegde stijghoogte (in de infiltratiebuis) en de gemeten stijghoogte (WSM 3.1). Er is daarom voor gekozen om het gemiddelde te nemen van de opgelegde en gemeten stijghoogte bij de bepaling van de minimale sterktefactor.

Figuur B-7 geeft zowel de gemeten waterspanningen in de tijd weer (bovenste gedeelte) als de gradiënt in de tijd (onderste figuur). Er is dus voor elk tijdstip een gradiënt bepaald op basis van de bij dat tijdstip behorende waterspanningen. De maximale gradiënt in fase 1 bedroeg circa 0,21.



Figuur B-6 Meetwaarden met regressielijn. Duidelijk zichtbaar is dat de regressielijn door het midden van de gemeten stijghoogtes bij WSM_3.1 en de middelste infiltratiebuis loopt.



Figuur B-7 Opgetreden gradiënten in de tijd voor raai met WSM 2.1 t/m WSM 1.7

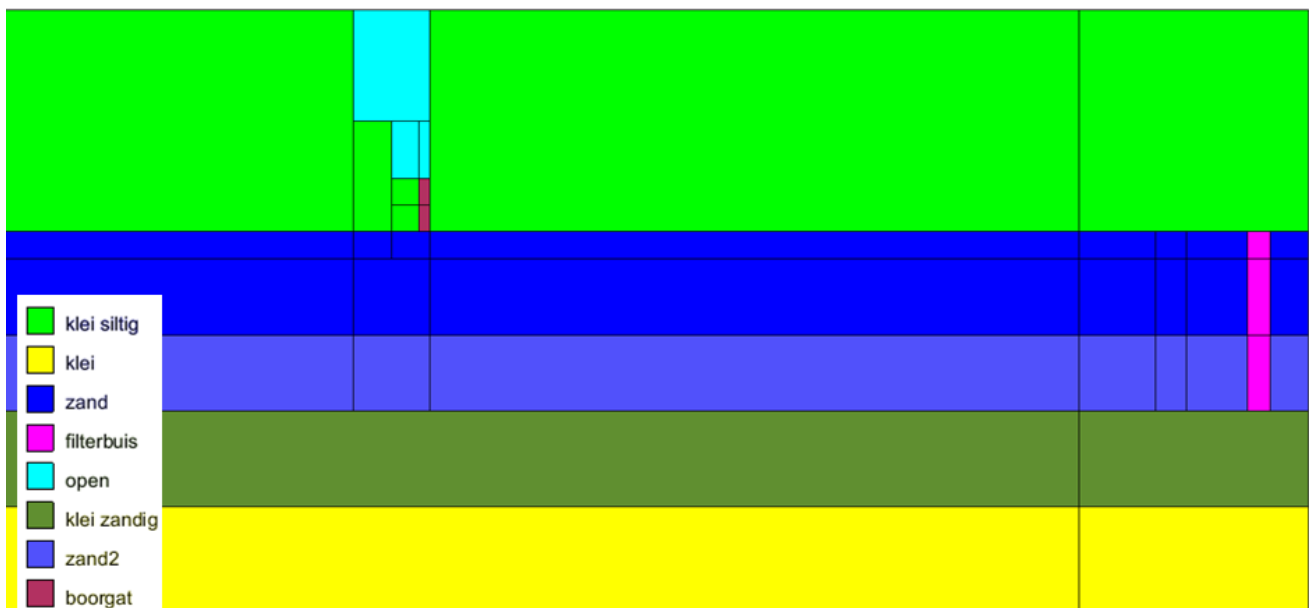
In het stuk tussen WSM 2.1 en het uittredepunt moet de gradiënt fors hoger (5x) zijn dan in het middenstuk tussen WSM 2.1 en 1.7 doordat de stijghoogte bij het uittredepunt veel lager is dan de trendlijn van de stijghoogte (Figuur B-6). De gradiënt naar het uitstroompunt is van belang omdat die gradiënt uiteindelijk voldoende groot moet zijn om piping te initiëren. Ondanks de forse gradiënt treedt er geen pipevorming op en zijn de uitstroomdebieten erg laag. Dit geeft eens te meer aan dat er veel sterkte aanwezig is in getijdenzandafzettingen.

Analyse doorlatendheid en anisotropie

Met behulp van een 2D model is in DgFlow getracht om de doorlatendheid en anisotropie zo goed mogelijk te fitten op de gemeten waterspanningen. Vervolgens kan dit 'gefitte' model gebruikt worden om met behulp van de Sellmeijer formule de kritieke stijghoogte uit te rekenen.

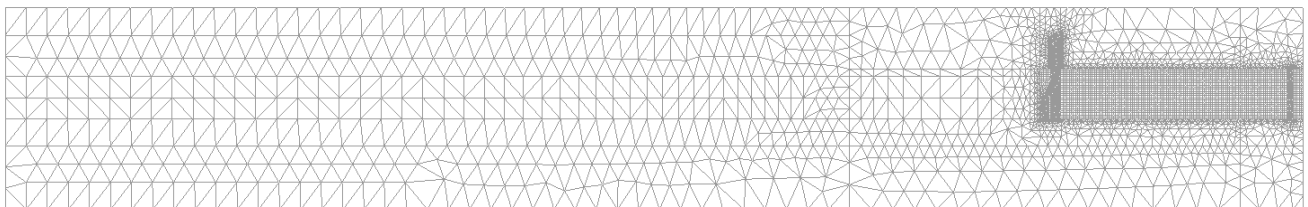
Model

De berekeningen zijn uitgevoerd met DgFlow en met behulp van interface software GiD is het model opgezet. In de volgende figuren is het model weergegeven, achtereenvolgens is weergegeven de laagopbouw (Figuur B-8 detail), de mesh (Figuur B-9, totaal overzicht, Figuur B-10 detail) en de locatie van de randvoorwaarde (opgelegde stijghoogtes; Figuur B-11). De gehanteerde bodemopbouw is weergegeven in Figuur B-8.

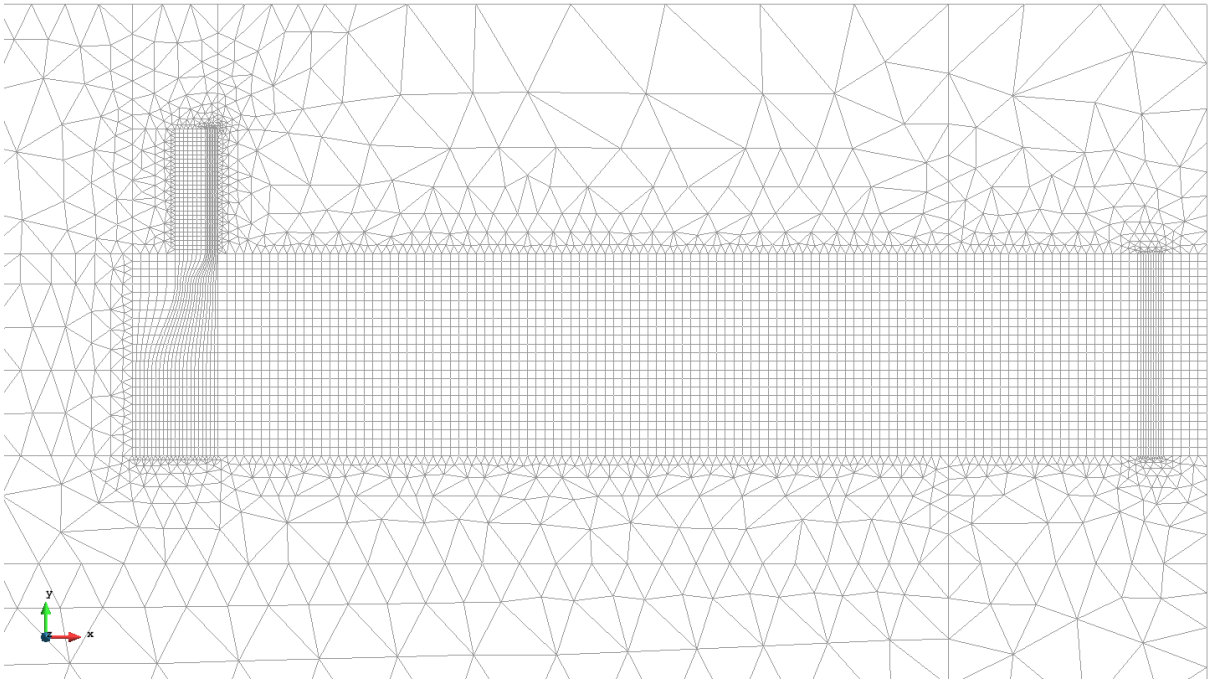


Figuur B-8 Detail model rondom intredepunt (rechts) en uitredepunt (midden links).

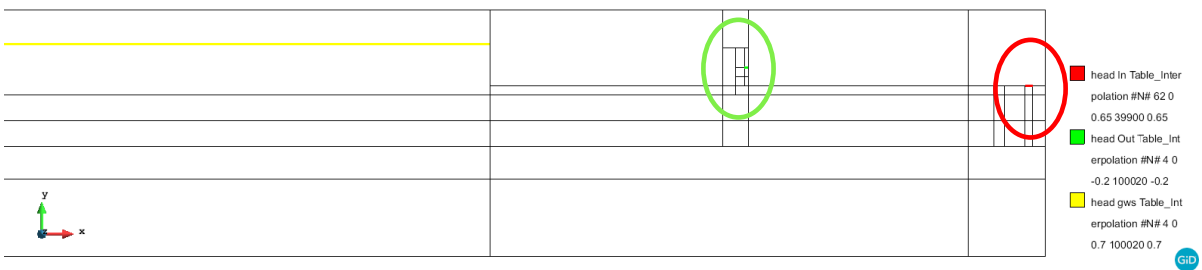
Buiten het interessegebied is de mesh zo grof als mogelijk gemaakt om rekentijd en bestandsgrootte te beperken. In het interessegebied is de mesh zo fijn als nodig gemaakt, met de afweging dat voor het bepalen van het kritieke verval er ook niet teveel meshpunten ter plaatse van de pipe gewenst zijn, omdat daardoor de rekentijd te groot wordt.



Figuur B-9 Mesh, hele model



Figuur B-10 Detail mesh rondom uittredepunt



Figuur B-11 Locaties randvoorwaardes (rood, infiltratie, rechts; groen uittredepunt, midden; geel, grondwaterstand)

Doorlatendheid

In de analyses hieronder zijn de doorlatendheden en anisotropie voor de getijdenzandlagen gebruikt die volgen uit de HTP-AMPT sonderingen (Tabel B-5), voor de overige lagen zijn onderstaande expert-judgement waardes gehanteerd.

Tabel B-5: Gebruikte doorlatendheid en anisotropie

	Grondsoort	Kh [m/d]	Kv [m/d]	A [-]
GZ1	Zand	0.65	0.156	4.1
GZ2	Zand	1.5	0.169	8.9
Deklaag	Klei	0.005	0.005	1
1 ^e meter onder getijdenzand	Klei	0.05	0.05	1
Daaronder	Klei	0.005	0.005	1
Stijghoogte uittredepunt		0.2 m NAP		

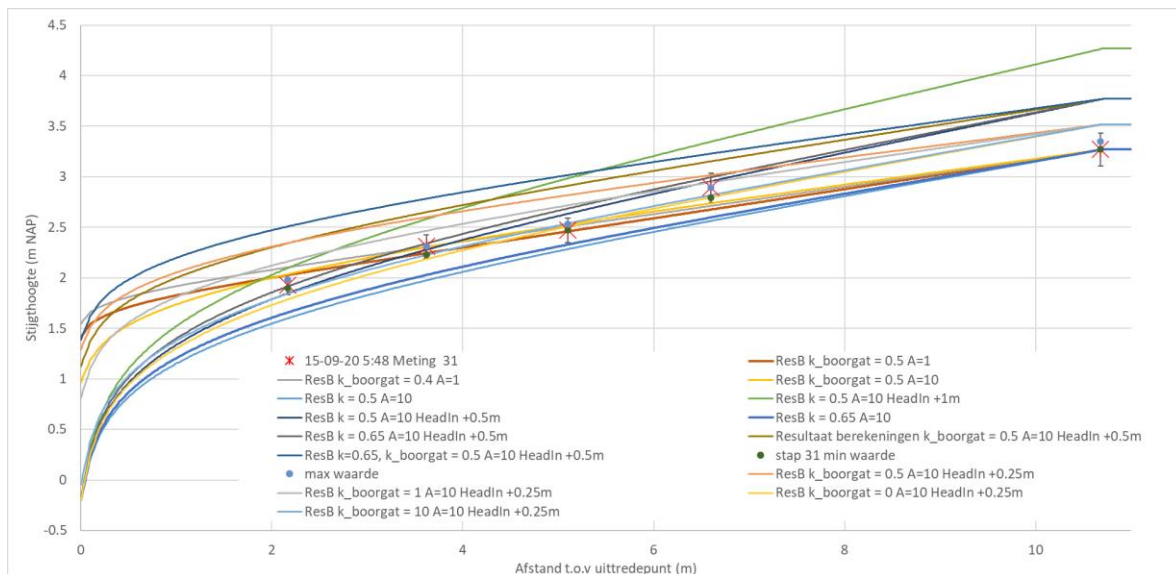
Hydraulische randvoorwaarden

Alle randvoorwaarden zijn ingevoerd als constant head boundary.

- Instroom t.p.v filterbuizen: op basis van WSM 3.1, maar ook verhoogd om een betere fit te krijgen.
- Uitstroom t.p.v uitstroomvlak: -0.2 m t.o.v. NAP (bovenkant boorgat)
- Grondwaterstand: 0,7 m t.o.v. NAP

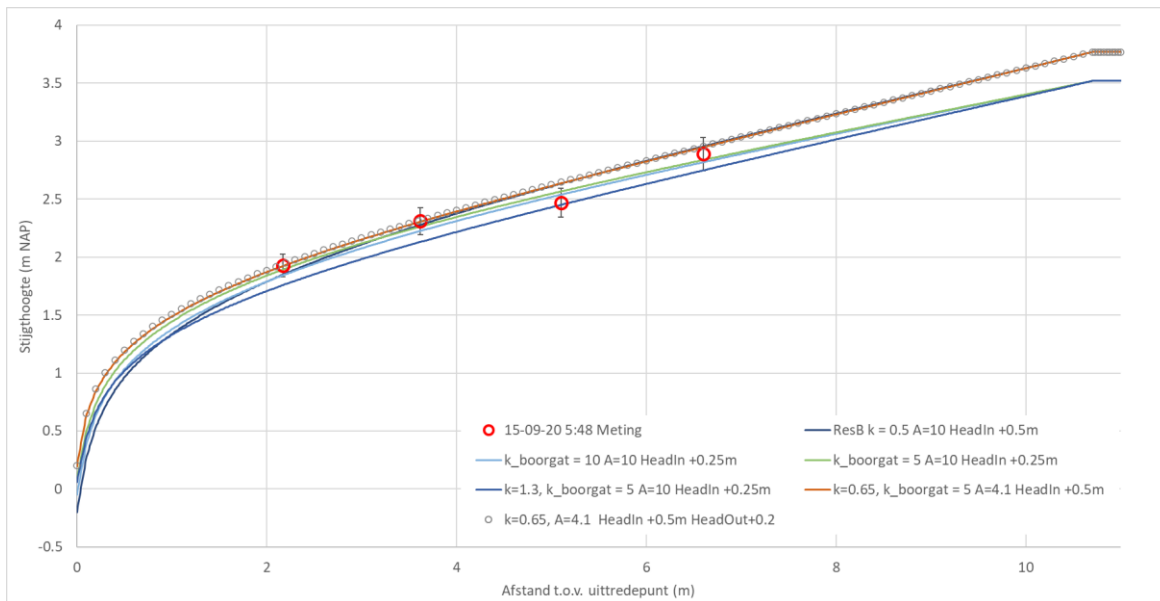
Fit

In Figuur B-12 is ter illustratie het stijghoogteverloop voor het gekozen moment (15-09-20 5:48) tijdens fase 1 weergegeven, waarbij verschillende parameters zijn gevarieerd. Waarneembaar is dat er meerdere oplossingen zijn die redelijk de gemeten waterspanningen fitten. Ook zitten er oplossingen tussen die overduidelijk niet fitten. Ook hier valt op dat de meting van WSM 3.1 niet goed in lijn ligt met de andere metingen en dat als de lijn redelijk door de overige metingen fit er een hogere stijghoogte ter plaatse van WSM 3.1 benodigd is. Ook de weerstand van het boorgat (0,3D of 0,6D) en eventueel achtergebleven materiaal in het boorgat beïnvloedt de vorm van de fit.



Figuur B-12 Resultaat diverse fit pogingen

Er is een selectie gemaakt van berekening die het beste passen bij de metingen van het gekozen tijdstip. Deze selectie is weergegeven in Figuur B-13.



Figuur B-13 Selectie van best passende fit resultaten

De resultaten laten zien dat er aan verschillende parameters gedraaid kan worden om tot ongeveer dezelfde resultaten te komen. Ook kan de weerstand ter plaatse van het uittredepunt worden gemodelleerd door middel van een verhoogde stijghoogte in het boorgat of door middel van toepassen van een doorlatendheidsparameter in het boorgat.

Er wordt een goede fit gevonden als de doorlatendheid en anisotropie afkomstig uit de HPT-AMPT worden gehanteerd (bolletjes) en een verhoogde stijghoogte (tot NAP 0,2 m) bij het uittredepunt aangenomen wordt. Dit laatste kan wellicht verklaard worden door de weerstand die aanwezig was in het materiaal direct onder het uittredepunt.

Debiten

Op basis van alleen stijghoogtes kan niet bepaald worden wat de doorlatendheidsparameters van het model moeten zijn. Deze debieten zijn in de 2D-modellering bepaald door de zogenaamde VolFlux die uit de berekening volgt te vermenigvuldigen met de breedte van het zandbed binnen de damwanden (9,6 meter) en het aantal seconden in een dag.

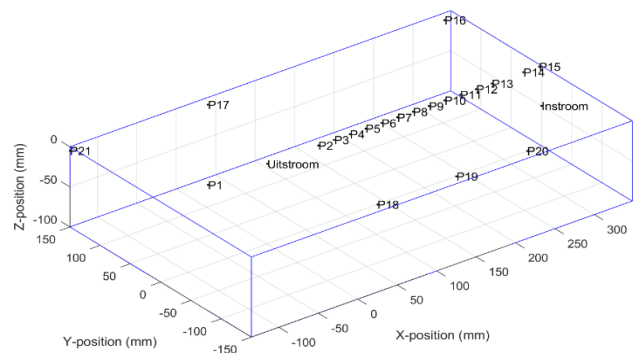
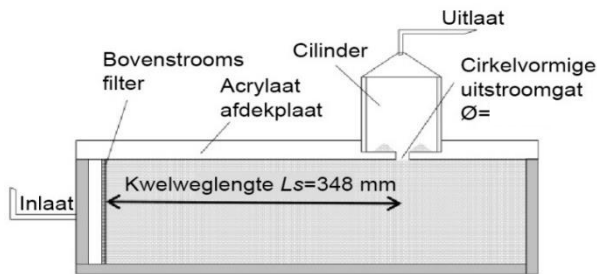
- Berekend instroom debiet met model: 6,7 m³/dag of
- Berekend uitstroom debiet (t.p.v. boorgat): 0,03 m³/dag

Het berekende instroomdebiet ligt in dezelfde orde als in de berekende infiltratiedebieten volgens de analytische methode (6,7 tegenover 7,06 m³/dag). Het berekende uitstroomdebiet is moeilijk te vergelijken met de uitstroomdebieten tijdens de proef, omdat deze sterk verstoord zijn door de lekkages.

5. Piping kleine schaalproef

Voor de kleine piping schaalproeven zijn twee big bags gevuld met getijdenzand. Eén big bag bevat materiaal uit de top van de getijdenzandlaag (tussen NAP -1 m en NAP -1.5 m), de andere big bag bevat materiaal van tussen -1.5 en -2 m NAP. Beide big bags bevatten dus materiaal uit de bovenste getijdenzandlaag (GZ1). Met dit materiaal zijn kleine schaalproeven opgebouwd waarmee de pipinggevoeligheid bepaald is. Tijdens de proef zijn ook het debiet en de bijbehorende stijghoogte bepaald waarmee de doorlatendheid is geschat.

De proef wordt in een 3D-situatie uitgevoerd, waarbij opbarsten al heeft plaatsgevonden. Dit is vormgegeven met een cirkelvorming uitstroomgat. De lengte van het opbarstkanaal is zo kort mogelijk gehouden om drukverliezen te voorkomen. Met behulp van 21 stijghoogtemeters in de acrylaat afdekplaat (zie Figuren B-14 en B-15) zijn veranderingen in de stijghoogte gekoppeld aan de geobserveerde ontwikkelingen (ook achteraf). Er is naast het debiet en de stijghoogte gekeken naar de pipegroei, pipelengte en de grootte van de zandvulkaan.



Figuur B-14 Proefopstelling met cirkelvormig uittreepunt

Figuur B-15 Positie van de 21 stijghoogtebuisjes

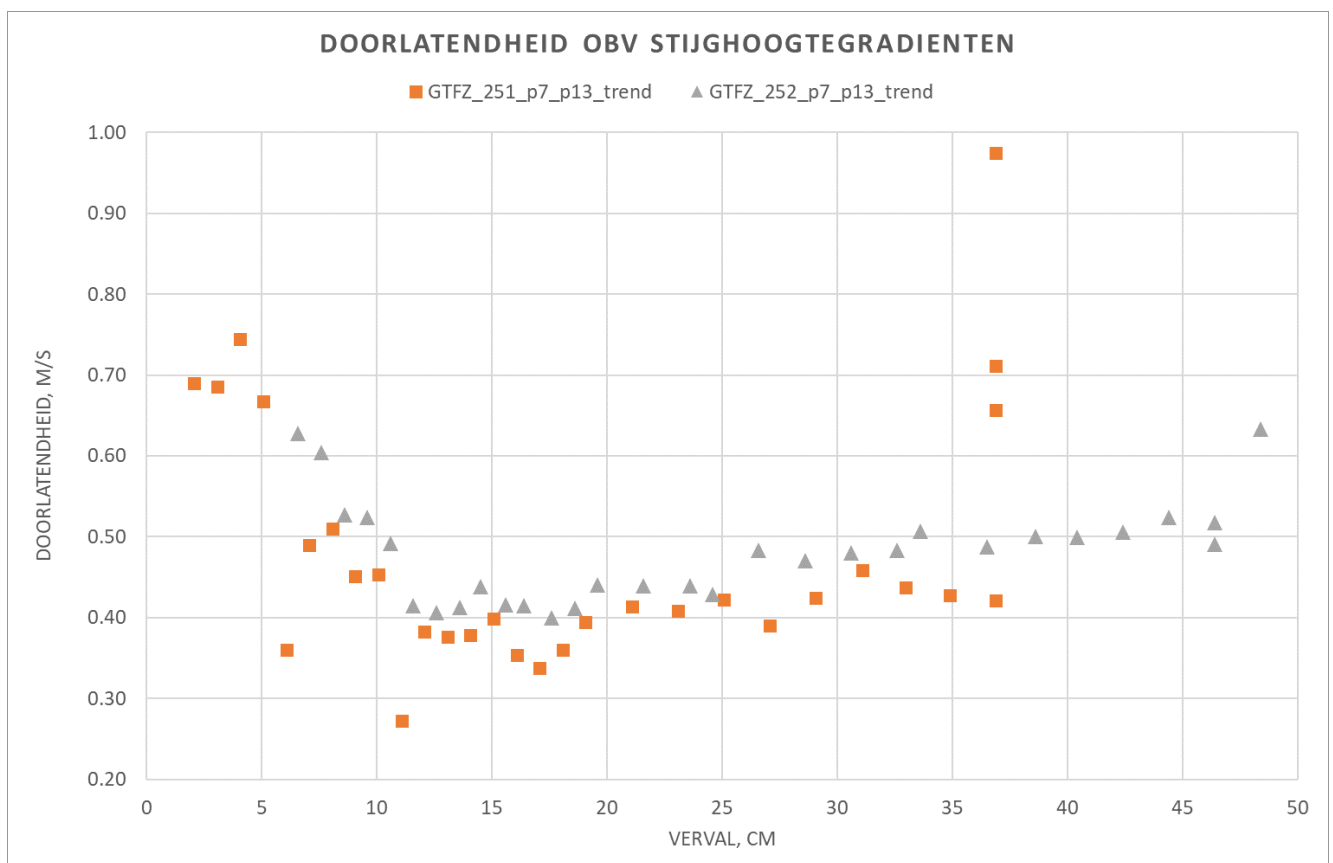
De proeven zijn uitgevoerd door elke vijf minuten het verval over de bak met 1 cm te vergroten. Als er na de vijf minuten nog pipegroei plaatsvindt wordt het verval constant gehouden totdat de pipegroei stop. Vanaf een verval van 20 cm is gewerkt met stappen van 2 cm, vanaf een verval van 60 cm met stappen van 3 cm. Gedurende de test wordt de volgende data verzameld:

- Stijghoogte van alle 21 stijghoogtemeters wordt elke vijf minuten afgelezen
- Observaties worden genoteerd (pipegroei, pipelengte, grootte zandvulkaan, etc.)
- Foto's (elke 10 seconde)
- Debiet, handmatig verkregen door elke vijf minuten gedurende 1 minuut het uitstromende water op te vangen en te wegen.

Met behulp van het gemeten debiet tijdens de proef en de gemeten gradiënten tussen stijghoogtemeters kunnen de debieten tijdens de schaalproeven ook geschat worden. Op deze manier bepaalde doorlatendheden zijn bij eerdere kleine schaalproeven gebruikt bij een vergelijk met de uitkomsten van het model van Sellmeijer (Van Beek et al., 2015). Onderstaande figuren laten voor de twee proeven de berekende doorlatendheden zien op basis van gemeten debieten en gradiënten. Hierbij is gebruik gemaakt van de gemiddelde gradiënt over de paren p6-p13, waarmee de bovenstroomse doorlatendheid aan de bovenkant van de bak wordt berekend. Er zijn meestal een paar buisjes die niet goed reageren (verstopping): deze buisjes worden buiten beschouwing gelaten voor het bepalen van de gemiddelde gradiënt. Bij het begin van de proef mag aangenomen worden

dat er bij het instroomfilter nog 2D-stroming aanwezig is: er is nog geen pipe en uittredepunt is relatief ver weg. Hierdoor kan in principe een goede schatting van de bulkdoorlatendheid verkregen worden. Bij het groeien van de pipe wordt de stroming ook bij het instroomfilter steeds meer 3D en kan de bulkdoorlatendheid niet betrouwbaar meer worden bepaald. Aan het begin van de proef zijn de debieten echter klein, waardoor meetonzekerheden een relatief grote rol spelen. Bij vervallen tussen 5-10 cm zijn de debieten echter al aardig op gang gekomen, is er nog nauwelijks pipegroei en geven berekende doorlatendheden een goede indruk van de bulkdoorlatendheid.

Figuur B-16 laat zien dat de bulkdoorlatendheden voor beide proeven sterk vergelijkbaar zijn en bij vervallen tussen 5-10 cm schommelen rond 0,5-0,6 m/dag, waarbij er 1 duidelijke uitbijter naar beneden is bij proef GTFZ_251 (bij een verval van 6 cm). Bij vervallen hoger dan 10 cm nemen de berekende doorlatendheden verder af en stabiliseren rond 0,4 m/dag en nemen dan weer langzaam toe. Bepaalde waarden rond 10 cm verval worden als de meest betrouwbare indicator voor de doorlatendheid beschouwd, omdat de stroming dan nog vrijwel 2D verloopt en er nog weinig migratie van fijn materiaal opgetreden zal zijn. Deze waarden zijn wel een stuk lager dan volgde uit de doorstroomproef waar een waarde van ~1 m/dag gemeten werd (zie hoofdstuk 6). Bij een volgende serie kleine schaalproeven moet dit verschil nader onderzocht worden door middel van herhaalproeven met de doorstroomproef. Bij de verdere analyses in dit rapport is voor beide proeven een doorlatendheid van 0,5 m/dag gebruikt.



Figuur B-16 Berekende doorlatendheden voor proeven GTFZ_251 en _252 op basis van zowel de gradiënten tussen het uittrede- en intredepunt en tussen h5 en h13.

6. Doorstroomproef

De doorlatendheid van het zand is voorafgaand de proef ook bepaald in een doorstroomproef. Hierbij wordt het zand opgebouwd in een kolom en wordt de doorlatendheid gemeten (Figuur B-17). De bereikte relatieve dichtheid kan afwijken van de die tijdens de kleine schaalproef zelf, waardoor er (meestal kleine) verschillen in doorlatendheid kunnen optreden. Er is een doorlatendheid van ongeveer $1,2E-05$ m/s vastgesteld, oftewel 1,0 m/dag.



Figuur B-17 Gebruikte opstelling voor het meten van de doorlatendheid

Discussie en conclusie

De doorlatendheid van het getijdenzand is op verschillende manieren bepaald. Niet alleen zijn er meerdere meettechnieken gebruikt, er is ook in verschillende fases (voor, tijdens en na de proef) gemeten. In dit hoofdstuk is een overzicht gegeven van de resultaten van de proeven en zijn de resultaten verder geduid.

Het beste en meest nauwkeurige resultaat wordt verkregen met de HPT-AMPT. Hierin zijn nauwkeurige waarden vastgesteld voor de horizontale doorlatendheid en de anisotropie. Ook is aangetoond dat het pakket hydraulisch in twee lagen opgesplitst kan worden. De horizontale doorlatendheid is (ter controle) afgeleid met een analytische responsmeting welke, ondanks de grote spreiding, qua orde grootte goed overeenkomt. Uit een aanvullende numerieke berekening is gebleken dat de resultaten van de HPT-AMPT metingen zeer goed aan sluiten bij de responsmetingen van de WSM's tijdens de pipingproef. De anisotropie is echter lastig vast te stellen uit de responsmetingen door de instroming via de infiltratiebuizen en de minder betrouwbare inschatting van het infiltratiedebiet. Op basis van de metingen is er geen reden om te twijfelen aan de juistheid van de HPT-AMPT metingen.

In overeenstemming met de ervaring is de doorlatendheid (horizontaal) uit laboratoriumproeven (ongeroerd) relatief laag door het schaaffect. Ook voor dit onderzoek ligt het voor de hand deze proeven daarom niet te gebruiken voor de pipinganalyses. Een overzicht van de doorlatendheden staat in Tabel B-6.

Tabel B-6 Overzicht doorlatendheden

Type Proef	Mediaan Kh [m/d]			Mediaan Kv [m/d]			Mediaan anisotropie [-]		
	GZ1	GZ2	Totaal	GZ1	GZ2	Totaal	GZ1	GZ2	Totaal
Laboratorium voor	0,13	0,18	0,15	0,05	0,01	0,02	2,54	14,81	6,14
Laboratorium na	0,07	-	-	0,03	-	-	2,39	-	-
HPT-AMPT	0,65	1,48	0,98	0,16	0,17	-	4,1	8,9	5,6
Responsmeting (analytisch)	-	-	1,29	-	-	-	-	-	-
Responsmeting (numerieke)	0,65	1,5	-	0,16	0,17	-	4,1	8,9	-
KSP piping	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-
Doorstroomproef	1,0	-	-	-	-	-	-	-	-

De kleine schaalproeven (KSP) voor piping die zijn uitgevoerd zijn opgebouwd met geroerd materiaal uit voornamelijk het eerste getijdenzand (GZ1). Deze laag is relatief slecht doorlatend met een lage d70-waarde. In een kleine schaalproef is het lastig de complexe werkelijkheid na te bouwen, maar de bepaalde doorlatendheden liggen redelijk in lijn met HPT-AMPT metingen.

Niet alle kolommen in tabel zijn ingevuld. Dit komt doordat niet iedere waarde is bepaald in het onderzoek. Zo is in het laboratoriumonderzoek na de pipingproef (falling head, schaalproeven en doorstroomproef) alleen de bovenste laag beproefd. Daarnaast is met de HPT-AMPT alleen de horizontale doorlatendheid en de anisotropie gemeten. Hieruit is wel een verticale doorlatendheid in

te schatten, maar is deze afhankelijk van de statistische aannames die worden gedaan. Uit de analytische responsmeting is alleen de horizontale doorlatendheid afgeleid hoewel numeriek ook de anisotropie is ingeschat.

Aanbevelingen

- Voor de pipinganalyses van de grote schaalproef wordt aanbevolen de resultaten van de HPT-AMPT te gebruiken. De pipinganalyses voor het onderzoek zijn het meest nauwkeurig indien de doorlatendheid, anisotropie en gelaagdheid uit de HPT-AMPT worden toegepast. De horizontale bulkdoorlatendheid blijkt goed aan te sluiten bij de meest fundamentele analytische methode (Darcy). Een aanvullende berekening (numeriek) waarin de HPT-AMPT als input dient om de responsmetingen tijdens de pipingproef na te bootsen, levert ook geen resultaten op waardoor er aan de metingen getwijfeld moet worden. Voor vervolprojecten (Hedwigepolder) wordt desalniettemin aangeraden extra WSM's te plaatsen om ook de anisotropie achteraf goed te kunnen modelleren. Daarnaast wordt aangeraden om, eventueel achteraf, HPT-AMPT metingen uit te voeren in het proefvak.
- Voor een goede vergelijking en trendanalyse wordt aanbevolen extra kleine schaalproeven voor piping uit te voeren. Deze dienen in zowel doorlatendheid als korrelgrootte gevarieerd te worden zodat de grote schaalproeven goed vergeleken kunnen worden. Dit zal binnen het Hedwigeproject opgepakt worden.
- De methoden om de (horizontale) doorlatendheid te bepalen zijn onderling verschillend. Uit het anisotropieonderzoek is hiervoor een verklaring gevonden in de vorm van het schaaleffect. Ook in dit project lijkt het schaaleffect (bijna factor 10) aanwezig te zijn. Er wordt daarom afgeraden met laboratoriumproeven voor doorlatendheid te werken.
- Door de sterke gelaagdheid is de spreiding in anisotropie relatief hoog. Er lijken op een aantal locaties klei insluitingen aanwezig te zijn. Deze zijn verdisconteerd in de anisotropie van de getijdenzandlaag. Bij het ontwerp en beoordelen dient rekening te worden gehouden met deze grote spreiding ($\pm 30\%$). In lijn met het anisotropieonderzoek ligt het voor de hand om met (een uitmiddeling rondom) de mediaan te rekenen en uitbijters (door bijvoorbeeld kleilensen) buiten beschouwing te laten.
- In tegenstelling tot de methodiek voor ontwerp en beoordelen met anisotropie uit AMPT onderzoek wordt aangeraden uitbijters in dit pipingonderzoek wel mee te nemen. Deze zijn namelijk mogelijk aanwezig binnen het proefveld en beïnvloeden de pipinggevoeligheid van de beproefde grond. Aangeraden wordt om dit te doen door in een gevoeligheidsanalyse een kleiafsluiting in het getijdenzand te modelleren. Er is relatief veel onderzoek uitgevoerd op een klein oppervlak waardoor de kans groot is dat de kleilagen daadwerkelijk over het proefvak aanwezig zijn. Bij ontwerpen en beoordelen gaat het onderzoek over grote strekkingen waar een dergelijke stoorlaag niet gebiedsdekkend aanwezig zal zijn en alleen zeer lokaal voor extra sterkte zal zorgen.

Appendix C Leerpunten en evaluatie

Onderdeel van de afronding van het onderzoeksproject is een uitgebreide evaluatie waarin aandachts- en leerpunten gedefinieerd zijn. Hoewel dit voor ieder project nuttig is, geldt dat voor deze proef vanzelfsprekend meteen. Begin 2021 wordt een soortgelijke vervolgproef ontworpen waarin de geleerde lessen van essentieel belang zijn. Een uitgebreid verslag van de evaluatie is aan het eind van deze bijlage gepresenteerd.

Vorbereiding

- De voorbereiding was zeer uitgebreid waardoor in een vroeg stadium al voor een nieuwe locatie (Vijfhuisterdijk in plaats van Lontkade) gekozen is. Dit uitgebreide onderzoek en de durf om tijdens de voorbereidingen van locatie te veranderen heeft zich zeker uitbetaald. Voor de proef is relatief veel ruimte nodig en voor de opbouw zijn grote machines nodig die een goede bereikbaarheid vereisen.
- Er zou echter meer aandacht besteed moeten zijn aan de samenstelling van het kleidepot. In combinatie met de droge periode voor de proef was hier veel scheurvorming. Hoewel het onwaarschijnlijk is dat dit van invloed is geweest op de proef heeft het de werkzaamheden in veld bemoeilijkt doordat het maaiveld slechter begaanbaar is. Ook is het lastig gebleken de bron van de lekkages te achterhalen.
- In de voorbereiding is veel aandacht geweest voor de proefafmetingen en eisen van de proef door bijvoorbeeld stabiliteits- en grondwaterstromingsberekeningen uit te voeren. Zo is bepaald welke zaken gemeten en bijgehouden dienen te worden tijdens de proef. Toch is achteraf gebleken dat bepaalde informatie onvoldoende gedetailleerd bepaald was (debiet instroming en uitstroming). De volgende proef heeft baat bij een goed uitgedachte debietmeting bij de in- en voornamelijk uitstroming.

Proefopbouw

De proefopbouw vond plaats direct na de bouwvak. Dit maakte de voorbereiding op de opbouw ingewikkeld. De ingeplande kick-off in het veld kon bijvoorbeeld niet plaatsvinden. Voor de volgende proef zou hier in de planning beter naar gekeken moeten worden om misverstanden in het veld tussen de tekentafel en de praktijk te voorkomen. Hier zou een bouwopzichter in het veld gedurende de gehele voorbereiding en bouwfase bij kunnen helpen. Deze houdt in de gaten of de eisen voor de proef nageleefd worden om twijfel achteraf te voorkomen. De volgende zaken verdienen hierbij extra aandacht:

- Afdichting boorgaten
- Afwerking bouwkuip dient waterdicht te zijn

- Gebruik ongebruikte (goed sluitende) damwanden en deze in de sloten vullen
- Goede debietmetingen in de infiltratiebuizen en bij het uittredepunt
- Infiltratiebuizen dienen ver genoeg van de damwanden te staan
- Het uittredepunt in de vorm van een buis werkt beter dan een boorgat

Proefuitvoering en monitoring

- Het vullen van de infiltratiebuizen en de bijbehorende responsmetingen in de ondergrond waren ruim voldoende voor de proef. Opgemerkt wordt dat doordat er geen doorgaande pipe is ontstaan de metingen hier niet op getest zijn. Een aandachtspunt voor de monitoring is dat deze robuust dient te zijn. Hoewel het niet de bedoeling is dat er veel gelopen wordt door het veld, gebeurt dit wel veelvuldig. Met name de ERT is hier gevoelig voor gebleken. Daarnaast dient de kwetsbare ERT apparatuur buiten het proefvak geplaatst te worden waarvoor langere kabels nodig zullen zijn.
- De analyse van de WSM's gedurende de proef verliep moeizaam door de matige internetverbinding. Voor een volgende proef is het daarom belangrijk om goed internet te hebben of een goede directe analysetool beschikbaar te hebben die geen internet nodig heeft.
- Voor de proef in de zomer van 2020 leek Corona op zijn retour te zijn. Hierdoor is er te weinig aandacht geweest voor de mogelijke gevolgen die hernieuwde Corona-maatregelen gehad zouden kunnen hebben. Er was namelijk niet veel marge. De begeleiding tijdens de proef lag bij slechts 2 werknemers. Een eventuele besmetting in die situatie had grote gevolgen kunnen hebben. In het vervolg zal hier een goede plan voor moeten liggen om ook met tegenslagen of nieuwe maatregelen rekening te kunnen houden. Hierbij kan gedacht worden aan meerdere shifts die onderling geen contact hebben. Hierbij is het ook van belang dat er geen tot weinig bezoek komt binnen de proeflocatie.

Analyse en resultaten

- In de voorbereiding, tijdens de uitvoering, tijdens CSI en achteraf zijn verschillende proeven, onderzoeken en analyses uitgevoerd. In de voorbereiding zijn voorspellingen gemaakt met de data die op dat moment beschikbaar waren van buiten het proefvak. Dit is gedaan om het vak niet te verstoren. Naderhand is gebleken dat de voor piping relevante eigenschappen van het zand, zoals korreleigenschappen, variabel zijn waardoor het onderzoek naderhand anders was. De uiteindelijke extra sterktefactor wijkt daardoor af. Het is dus van belang voor de proef zo goed mogelijk onderzoek te doen en dit achteraf ook verifiëren. Met name de doorlatendheid bleek lastig exact vast te kunnen stellen. Extra HPT-AMPT in of zeer dichtbij het proefvak na de proef hadden hierbij kunnen helpen.

- Door de aanwezigheid van een dikke deklaag op natuurlijk afgezet materiaal zijn bij de proef meerdere effecten in een keer beproefd. De analyse achteraf maakt het daardoor moeilijk om te achterhalen waar welke winst precies vandaan komt. Dit is bijvoorbeeld het geval bij de fijne fractie of heave verschijnselen in de ondergrond. Aangeraden wordt daarom de proef zo uitgekleeft mogelijk op te zetten waarbij zo min mogelijk effecten in een keer worden beproefd. Denk hierbij aan een uittredepunt op zandniveau (zeker geen heave) en een doorgaand uittredepunt (geen 3D effecten).
- De kleine schaalproeven zijn erg belangrijk, maar de resultaten zijn gevoelig voor de manier van opbouwen. Bij het Hedwigepolderproject zullen ook veel kleine en medium schaalproeven uitgevoerd gaan worden. Hier moet ruim van tevoren een goede strategie voor opgesteld worden.

Er is bij de proef veel goed gegaan. Er zijn echter verbeterpunten en die zullen er altijd zijn. Het is daarom van essentieel belang dat er ruimte moet zijn om aanpassingen in het veld te kunnen maken. Ook hier is een eindverantwoordelijke voor nodig.

Evaluatie Project Pipingproef Vijfhuizen

Bedrijfsnaam:	Fugro, Deltares, Henk van Tongeren, Jelle Bijlsma, Wetterskip Fryslân
Omschrijving van de opdracht:	Pipingproef Vijfhuisterdijk
Bestek:	-
OW nummer van de opdracht:	OW.11502A
Aanwezig: Rick van Tilborg, Gert-Ruben van Goor, Sander Medendorp, Jasper Heijmans (Fugro); Bernard van der Kolk, Marc Hijma (Deltares); Wietze Weening (Henk van Tongeren); Bieuwe Couperus, Kevin van der Giessen, Ido Boonstra (Wetterskip Fryslân)	
Aspect:	Toelichting
Was het voor iedereen duidelijk wat de doelstelling was van het project?	<p>In de communicatie richting Jelle Bijlsma en/of zijn onderaannemers is het niet altijd duidelijk genoeg gecommuniceerd wat de bedoeling was. Het intact houden van de bodemopbouw was cruciaal. Bij het plaatsen van de damwand is dit bijna misgegaan. De inzet van Van Tongeren (met name Wietze Weening) was bijzonder goed: er kon direct op de omstandigheden worden ingesprongen.</p> <p>Aandachts-/leerpunten:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Kick off organiseren inclusief onderaannemers (Sterk). -Hierbij goed de uitvoering en gewenste situatie doorleven. -Een projectleider voor de voorbereiding en praktische uitvoering (of toezichthouder welke echt inhoudelijk goed op de hoogte is) ontbrak tijdens de voorbereidende werkzaamheden -De vakantieperiode blijft lastig om zoiets te organiseren. Er zijn verspreid over de tijd altijd mensen afwezig. Dit zorgt ervoor dat informatie niet altijd goed overgedragen wordt of dingen bij elkaar langs gaan. -Zorg ervoor dat specialisten achter de hand zijn om bij te sprengen als dit nodig is (Van Tongeren).
Was de voorbereiding toereikend? Zijn de juiste onderzoeken uitgevoerd?	<p>De onderzoeken van de ondergrond/grondopbouw was absoluut voldoende. Er was voldoende inzicht in de bodemstructuur/samenstelling om de proef goed uit te kunnen voeren. Er is mogelijk in het voortraject te weinig stilgestaan bij de opbouw van het bovenliggend kleidepot en de mogelijk scheurvorming van de klei, door droogte. Dit is mogelijk een oorzaak van de grote waterlekkages van de diepere zandlaag naar het oppervlak.</p>

	<p>Aandachts-/leerpunten:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Houd rekening met droogte (en de mogelijk ongewenste effecten daarvan). -Mogelijk is uitvoering eerder in het jaar, of in het najaar op dit vlak althans, gunstiger. -Niet alleen focus op de te onderzoeken grondlagen, maar naar de gehele grondopbouw.
<p>Was de locatie geschikt voor de proeven? Wat had beter gekund?</p>	<p>A). Er was behoorlijk waterlekage langs of door de sloten van de damwand.</p> <p>Aandachts-/leerpunten:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Niet meer gebruikte damwandplanken gebruiken, maar nieuwe. -De sloten met een vulmiddel behandelen. -Het probleem voorleggen aan de aannemer welke de planken aanbrengt. -Eerst damwanden zetten en dan een depot ertegen aan zetten/aanbrengen -Damwanden statisch aanbrengen en niet trillend, indien mogelijk -Na injecteren met grout, langs de gehele damwand. -Voer een kleine pilot uit met een stuk damwand voordat de gehele damwand wordt geplaatst. <p>B). Daarnaast was er ook lekkage langs de Waterspanningsmeters (WSM's). er is besloten omwille van de ERT metingen de buizen in kunststof uit te voeren i.p.v. metaal. Ook is de diepte/hoogte gewijzigd omdat het niet lukte om ze dieper aan te brengen. Ze zijn aangebracht door eerst voor te boren, omwille van de kosten. Het boren zou tot boven de zandlaag moeten zijn gebeurd, het laatste stuk is met de hand verder doorgedrukt. Dit is allemaal volgens plan uitgevoerd. Mogelijk dat met handmatig aanbrengen er een beter gevoel bij is dan i.p.v. met de kraan.</p> <p>Aandachts-/leerpunten:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Voortaan aanbrengen d.m.v. grondverdringing. -Kunnen ze handmatig aangebracht worden. -Zorg ervoor dat er iemand bij aanwezig is met specifieke kennis van zaken, die eventueel in kan grijpen/adviseren. (projectleider uitvoering/toezichthouder) -Wees er zeker van dat er niet tot in de zandlaag geboord wordt, maar stop er ruimschoots boven. -Het is onbekend of verdringing beter is voor de afdichting rond de WSM's, of dat zwelklei toch beter is. De verdringing is maar beperkt. <p>C).Overig: Er zijn twijfels of de zwelklei (rond wsm's en infiltratiebuizen) voldoende is gezwollen. De klei is tussendoor vochtig gemaakt, maar of dit allemaal afdoende is geweest is onduidelijk.</p> <p>Aandachts-/leerpunten</p>

	<p>-Voldoende tijd en aandacht schenken aan de zwelklei. Voldoende nat maken tussendoor. Neem hier de tijd voor, je weet niet wanneer het zwelproces klaar is.</p> <p>-Kijken of grouten ook een optie is om rond de buizen af te dichten.</p> <p>D) Scheurvorming in klei depot</p> <p>Dit wordt gezien als één van de oorzaken van de vele waterlekkages. Bij Hedwigepolder is het idee om een depot aan te leggen, na het aanbrengen van de damwanden.</p> <p>Aandachts-/leerpunten</p> <p>-Breng dit in lagen aan en verdicht het tussendoor goed.</p>
Had deze proef ook uitgevoerd kunnen worden op de eerste beoogde locatie?	<p>Gezien de bereikbaarheid en omstandigheden (in februari) mogen we na de tijd blij zijn dat dit niet door is gegaan.</p> <p>Aandachts-/leerpunten</p> <p>-Houd voldoende aandacht voor aan- en afvoer materialen, maar ook voor een werkbare locatie. Er gebeurt heel veel op een klein oppervlak.</p>
Is de aanpak van de proef de juiste geweest? Wat had beter gekund?	<p>Tijdens de uitvoering zijn een hoop zaken goed gegaan, sommige zaken liepen anders dan van te voren was bedacht. De lekkage van het water langs WSM. Infiltratiebuizen en damwanden is daar een voorbeeld van. Maar ook het uittrede punt is tijdens het werk aangepast.</p> <p>Daarnaast werden er vraagtekens geplaatst bij de bouwkuip. Er was veel lekkage langs de kuip, de put in. Ook waren er twijfels over de kwaliteit/veiligheid.</p> <p>Aandachts-/leerpunten</p> <p>-Het is goed om bij een volgende proef een nauwkeurigere debietmeting toe te passen, in aan en afvoer van het water.</p> <p>-Deel het meetplan eerder, met de diverse disciplines. Zo kan er breder worden meegedacht over de opzet.</p> <p>-Werk met het uittredepunt niet meer met een boorgat, maar met een buis. Zorg voor een groter oppervlak van de bodem, welke mooi vlak is.</p> <p>-Breng indien mogelijk de infiltratiebuizen op grotere afstand van de damwanden aan. Dit voorkomt mogelijk beter grote lekkage langs de damwanden.</p> <p>-De ERT installatie zou mogelijk wat robuuster uitgevoerd kunnen worden. Het was nu wel gevoelig voor schade ivm de vele bewegingen op het terrein.</p> <p>-de computers van de ERT zouden buiten het proefveld geplaatst moeten worden.</p> <p>-Denk de volgende keer goed na over een bouwkuip, over het materiaal, de plaatsing en de afdichting.</p> <p>-Overig: zorg voor voldoende capaciteit wat betreft de elektriciteitsvoorziening en aansluitpunten</p>

Was de (project)organisatie tijdens de uitvoering de juiste?	<p>De coördinatie in het veld was van te voren niet goed doorgenomen. Tijdens de opbouw en uitvoering zou het handigere zijn als er een (uitvoerings) projectleider/toezichthouder is die goed op de hoogte is van de proeven, en toe kan zien op de correct aanleg en uitvoering van zaken. Nu werd dat door een ieder er wat bij gedaan, of was er niet altijd iemand van het projectteam aanwezig.</p> <p>Daarnaast was er sprake van onverwachte aanloop in de tent: mensen waren nieuwsgierig naar wat er onderzocht werd.</p> <p>Als laatste is Corona mogelijk toch wat onderbelicht.</p> <p>Aandachts-/leerpunten</p> <ul style="list-style-type: none"> -Stel een project coördinator/toezichthouder aan tijdens de voorbereiding en uitvoering, welke verantwoordelijk is voor aanleg, installatie en uitvoering. Overige projectteamleden kunnen zich dan op de eigen taak richten. -Plaats borden met "melden bij uitvoerder" -Zorg voor risicospreiding wat betreft Corona. Werk bijvoorbeeld in shifts. -Zorg ervoor dat de meetwaarden in NAP getoond worden. Dat geeft meer inzicht tijdens de uitvoering. 	
Hoe verliep de interne communicatie tijdens de uitvoering? Externe communicatie?	<p>De vakantieperiode zorgde ervoor dat er veel parallel afgestemd moest worden. Dit verhoogt de kans op miscommunicatie of dat er zaken bij elkaar langs gaan. Ondanks dat wist men wel de juiste lijntjes te leggen.</p> <p>Aandachts-/leerpunten</p> <ul style="list-style-type: none"> -bij voorbaat niet in/rond de vakantieperiode uitvoeren. 	
Hoe verliep de samenwerking?	<p>De samenwerking is als goed ervaren. De grote inzet van een ieder, en de hoge mate van flexibiliteit zorgden ervoor dat het project, ondanks tegenslagen en onverwachte gebeurtenissen, toch veel informatie heeft opgeleverd en dat het als een succes mag worden beschouwd.</p>	
Hoe verliep de risico beheersing tijdens de uitvoering?	<p>Door de hoge mate van flexibiliteit zijn er altijd oplossingen gevonden voor opgetreden risico's.</p> <p>Aandachts-/leerpunten</p> <ul style="list-style-type: none"> -Zorg ervoor dat er voldoende mankracht/capaciteit is om onverwachte gebeurtenissen op te kunnen vangen. 	
Is de doelstelling van het project gehaald?	<p>Het doel was om (te proberen) om een pipe op te wekken en vast te kunnen stellen onder welke omstandigheden dit gebeurt. Dit is niet behaald: door de grote waterlekkages kon de druk niet voldoende opgebouwd worden. Wel is er sprake geweest van welvorming en enige zanduitspoeling. Ook is</p>	

		<p>de waterdruk dermate oog opgevoerd dat er voldoende bruikbare informatie uit gedestilleerd kan worden. Ook al zou de druk opgevoerd zijn zoals was voorzien, dan wil het nog niet zeggen dat er daadwerkelijk een pipe was opgetreden.</p> <p>Al met al heeft de proef voldoende informatie opgeleverd om de bestaande rekenmethodieken aan te passen, of bij te stellen.</p>
	Zijn er andere punten waar we wat van kunnen leren?	<p>De inzet van de betrokken mensen was groot: dankzij deze inzet, creativiteit,, vakmanschap en flexibiliteit mogen de proeven als geslaagd beschouwd worden.</p> <p>Zonder uitzondering verdient een ieder hier de complimenten voor</p> <p>Aandachts-/leerpunten</p> <p>-Een compliment voor alle betrokkenen.</p>

[This is the bookmark for the end of the main section. Do not put content past this point]