



Analys rapport grootschalige pipingproeven Hedwigepolder

Piping in getijdenzand | Hedwigeproject

1220-164143.R06 V2.0 | 1 mei 2023

Definitieve versie

HWBP / Waterschap Hollandse Delta

Documentbeheer

Documentgegevens

Projectnaam	Piping in getijdenzand
Documentnaam	Analyserapport grootschalige pipingproeven Hedwigepolder
Documentnummer.	1220-164143.R06 / Deltares project: 11204565
Versienummer	V2.0
Opgesteld door	Fugro NL Land & Deltares

Klantgegevens

Klant	Waterschap Hollandse Delta
Adres	Postbus 4103, 2980 GC Ridderkerk
Contactpersoon	Hans de Bart
Documentnr. klant	n.v.t.

Versiebeheer

Versie	Datum	Status	Omschrijving	Opgesteld door	Gecontroleerd door	Goedgekeurd door
0.1	5-7-2022	Concept	Eerste concept	Projectteam	GRG/MPH	-
1.0	31-8-2022	Concept definitief	Opmerkingen projectteam verwerkt. Ter beoordeling kennispartners.	Projectteam	GRG/MPH	GRG/APW
2.0	01-5-2023	Definitief	Opmerkingen ENW/AD verwerkt	Projectteam	GRG/MPH	GRG/APW

Projectteam

GRG	Gert-Ruben van Goor	Senior adviseur / projectmanager Waterbouw (Fugro)
MPH	Marc Hijma	Expert geoloog en projectleider (Deltares)
HDB	Hans de Bart	Technisch manager (WSHD)
VVB	Vera van Beek	Adviseur / Onderzoeker Waterkeringen (Deltares)
LVL	Lisa van der Linde	Adviseur Waterbouw (Fugro)
LBA	Luuk Barendse	Adviseur Waterbouw (Fugro)
PVS	Peter van de Stroet	Adviseur Waterbouw (Fugro)
NP	Noor Pruijn	Adviseur geotechniek (WSHD)
JO	Johan Olsthoorn	Technisch adviseur (WSHD)
MK	Marios Karaoulis	Senior adviseur/onderzoeker geofysica (Deltares)
PD	Pieter Doornenbal	Adviseur/onderzoeker geofysica (Deltares)
APW	Ane Wiersma	Afdelingshoofd Toegepaste Geologie en Geofysica (Deltares)

Inhoudsopgave

Documentbeheer		ii
Documentgegevens		ii
Klantgegevens		ii
Versiebeheer		ii
Projectteam		ii
Inhoudsopgave		i
1. Inleiding		1
1.1 Doelstelling		1
1.2 Aanpak op hoofdlijnen		2
1.3 Achtergrond extra sterkte getijdenzand		2
1.4 Leeswijzer		3
2. Analyses proefopbouw, uitvoering en monitoring		4
2.1 Effectbepaling intrillen damwanden		4
2.2 Laboratoriumonderzoek		6
2.3 Waterspanningsmeters (WSM)		12
2.4 Pipegroeisnelheid		14
2.5 Electrical Resistivity Tomography (ERT)		16
2.6 Glasvezel temperatuurmetingen		19
2.7 Infraroodmetingen		23
3. Stromingsanalyse: modelfit		25
3.1 Debieten en waterdrukken		25
3.2 Stromingsanalyse		26
4. Pipinganalyses		31
4.1 Opbarsten, heave en verticale piping		31
4.2 Terugschrijdende (horizontale) erosie		32
5. Aanpak eerder gesignaleerde aandachtspunten		36
6. Conclusies en aanbevelingen		39
6.1 Conclusies		39
6.2 Aanbevelingen		44
7. Referenties		46
Appendix A	Invloed intrillen damwand op verdichting getijdenzand	1
Appendix B	Analyse laboratoriumonderzoek fase 3 pipingproeven	2
Appendix C	Analyse drukgradiënten op basis van WSM data	3

Appendix D	Achtergrondrapportage ERT metingen	4
Appendix E	Achtergrondrapportage AH-DTS metingen	5
Appendix F	Achtergrondrapportage stromings- en pipinganalyse	6
Appendix G	Bepaling debieten en (bulk)doorlatendheid (Darcy)	7
Appendix H	Analyse opbarsten, heave en verticale piping	8

1. Inleiding

Voorliggend rapport geeft een overzicht van de analyseresultaten naar aanleiding van de grootschalige pipingproeven op natuurlijk afgezet getijdenzand in de Hedwigepolder. In september 2021 zijn in deze polder een tweetal pipingproeven (Noord en Zuid) uitgevoerd waarbij terugschrijdende erosie tot stand is gebracht door het simuleren van een hoogwater (zie Figuur 1-1). Na afloop van de belastingfase zijn de pipes blootgelegd en de karakteristieken van de ondergrond nader bepaald tijdens 'forensisch' grondonderzoek (vanaf hier CSI genoemd).

De analyses zijn uitgevoerd op basis van de monitoringsdata en metingen die vooraf, tijdens en na afloop van de pipingproeven zijn uitgevoerd. Een complete beschrijving van de proefopbouw en -uitvoering als ook een overzicht en beschrijving van het monitoringssysteem en -data is opgenomen in het Factual Report van de Hedwigeproeven (1220-164143.R04 d.d. 25-3-2022).



Figuur 1-1: Proefopstelling pipingproeven in de Hedwigepolder.

1.1 Doelstelling

Het project Piping in getijdenzand (Hedwigeproject) heeft tot doel de daadwerkelijke weerstand van getijdenzand tegen piping te bepalen, de sterkte-eigenschappen te karakteriseren en deze kennis toepasbaar te maken voor beoordelings- en versterkingsprojecten.

1.2 Aanpak op hoofdlijnen

Om de doelstelling te bereiken zijn modelstudies en pipingproeven op verschillende schalen uitgevoerd. Er zijn meer dan 30 kleine en medium schaalproeven uitgevoerd in het lab en een drietal op grote schaal in het veld (Hedwigeproeven en eerder de Vijfhuisterdijkproef in Friesland). Het kritiek verval uit de proeven wordt vergeleken met de uitkomst op basis van de vigerende rekenregel van Sellmeijer waarmee in de huidige praktijk de pipingopgave voor het deelmechanisme terugschrijdende erosie wordt bepaald. Deze vergelijking geeft inzicht in hoeveel sterker getijdenzand is ten opzichte van de rekenregel die gefit is op proeven met homogeen rivierzand. Dit wordt tot uitdrukking gebracht door afleiding van een extra sterktefactor op het kritiek verval zoals berekend met de rekenregel.

Dit rapport geeft de uitwerking met betrekking tot de grootschalige proeven in de Hedwigepolder en gaat ook in op de (deel)analyses die hieraan ten grondslag hebben gelegen. De proefresultaten vormen de basis voor een nieuwe aanpak met betrekking tot piping in getijdenzand. Deze nieuwe aanpak zal worden ontsloten door middel van een handreiking Piping in getijdenzand als onderdeel van het Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium (BOI) voor toepassing bij primaire waterkeringen.

1.3 Achtergrond extra sterkte getijdenzand

Verschillende eerdere onderzoeksprojecten, zowel in het veld als in het laboratorium, wijzen in de richting dat getijdenzand meer weerstand biedt tegen piping dan volgt uit de rekenregel. Dat getijdenzand sterker is tegen piping vormde dan ook de werkhypothese bij de start van het Hedwigeproject. Deze extra sterkte wordt toegekend aan de volgende aspecten die aangrijpen op de belasting (a-b) en sterkte (c-e):

- a. meerlaagsheid op basis van doorlatendheidsvariatie tussen grondlagen;
- b. anisotropie in doorlatendheid door gelaagdheid binnen grondlagen;
- c. relatief hoog percentage fijne fractie in het zand dat zorgt voor inbedding van de korrels en cohesie tussen kleideeltjes;
- d. cohesie tussen eerdergenoemde kleideeltjes maar ook door eventuele kleicoating op zandkorrels en biofilms;
- e. doolhofstructuur in de top van het getijdenpakket waarlangs of onder een erosiepijp dient te groeien met name door de aanwezigheid van dunne kleilaagjes. Dit zal vooral effect hebben op de pipegroeisnelheid.

Deze aspecten zijn overigens in meer of mindere mate ook van toepassing op rivierafzettingen, deze vallen vooralsnog buiten de scope van dit onderzoek.

Binnen de huidige praktijk kan, veelal binnen een maatwerkeraanpak, belangrijke aspecten die ingrijpen op de belasting als meerlaagsheid, anisotropie en tijdsafhankelijkheid worden meegenomen. De postdictie van het kritiek verval in de grootschalige proeven is uitgevoerd in D-Geo Flow waarin de meerlaagse en anisotrope bodemopbouw op basis van HPT-AMPT® veldonderzoek is meegenomen. De extra sterktefactor op het kritiek verval, zoals deze volgt

uit de grootschalige proeven, kan daarmee worden toegeschreven aan bovenstaande sterkteonderdelen: c t/m e. Effecten vanwege het tijdsafhankelijke karakter van de belasting, die met name in het getijdengebied spelen, zijn niet meegenomen in de proeven. De proeven zijn stationair uitgevoerd waarbij de belasting incrementeel is verhoogd tot het kritiek verval is bereikt en er sprake is van progressieve pipegroei.

Voor de afleiding van een totale extra sterktefactor voor getijdenzand dienen de proefresultaten in samenhang met de resultaten van de schaalproeven te worden gezien. De resultaten van de schaalproeven is opgenomen in 1220-164143.R07 v2.0 d.d. 01-05-2023.

1.4 Leeswijzer

Voorliggend rapport geeft een overzicht van de analyseresultaten naar aanleiding van de grootschalige pipingproeven op natuurlijk afgezet getijdenzand in de Hedwigepolder. Het document geeft daarbij inzicht in de belangrijkste resultaten en zal voor de verdieping veelal verwijzen naar achterliggende analyserapporten.

Hoofdstuk 2 start met de resultaten van de analyses die vooral betrekking hebben op de proefopbouw, -uitvoering en monitoring. Veelal dienen deze resultaten als input voor de nadere analyses.

Hoofdstuk 3 beschrijft de fit van het stromingsmodel op de monitoringsdata gemeten tijdens de proef. Het stromingsmodel is gebruikt om tot een geijkte ondergrondschematisatie en parametrisering te komen voor toepassing in de pipinganalyses.

Deze pipinganalyses, die zijn uitgevoerd in D-Geo Flow, staan beschreven in hoofdstuk 4. In dit hoofdstuk wordt ook ingegaan op de deelmechanismen opbarsten, heave en verticale piping. Deze onderdelen zijn relevant omdat tijdens de proef bleek dat de pipe zich eerst verticaal ontwikkelde tot ca. 0,5 m onder de uittredesloot, waarna de pipe horizontaal instelde en stroomopwaarts groeide.

Hoofdstuk 5 grijpt terug op de belangrijkste aandachtspunten die, op basis van de proefuitvoering, zijn gegeven in het eerder opgestelde Factual Report van de grootschalige proeven. Dit hoofdstuk geeft aan op welke wijze deze aandachtspunten zijn geadresseerd in de analysefase.

Hoofdstuk 6 geeft de belangrijkste conclusies en aanbevelingen.

2. Analyses proefopbouw, uitvoering en monitoring

Dit hoofdstuk gaat in de op de analyses die zijn uitgevoerd naar aanleiding van de proefopbouw, -uitvoering en monitoringsdata. De uitkomsten bieden in veel gevallen de randvoorwaarden en data voor de nadere analyses zoals in dit rapport opgenomen. Voor een uitgebreide beschrijving van het monitoringssysteem en analyses naar bodemopbouw, zettingen, verzadiging van het getijdenzand en het effect van biochemische processen wordt verwezen naar het Factual Report (1220-164143.R04 d.d.25-3-2022).

2.1 Effectbepaling intrillen damwanden

In 1220-164143.M25 (v2.0 d.d. 11-3-2022; zie Appendix A) is het effect van het intrillen van damwanden op de pakking van het getijdezand van de proefvakken Noord en Zuid onderzocht. Dit omdat de pakking van het zandpakket van invloed kan zijn op de vooraf bepaalde doorlatendheids-variantie en verschil tussen pre- en postdictie van het kritiek verval.

Na installatie van de damwanden zijn per proefvak vier controlesonderingen gemaakt op verschillende afstanden van de damwand. Op basis van het sondeeronderzoek is de (genormaliseerde) conusweerstand, wrijvingsgetal en relatieve dichtheid voor en na installatie vergeleken. Hierbij is het zandpakket opgedeeld in vier lagen, één laag van +/- 20cm rondom de pipe en drie lagen volgens de opbouw beschreven in het ontwerprapport (1220-164143.R02 d.d. 16-6-2021).

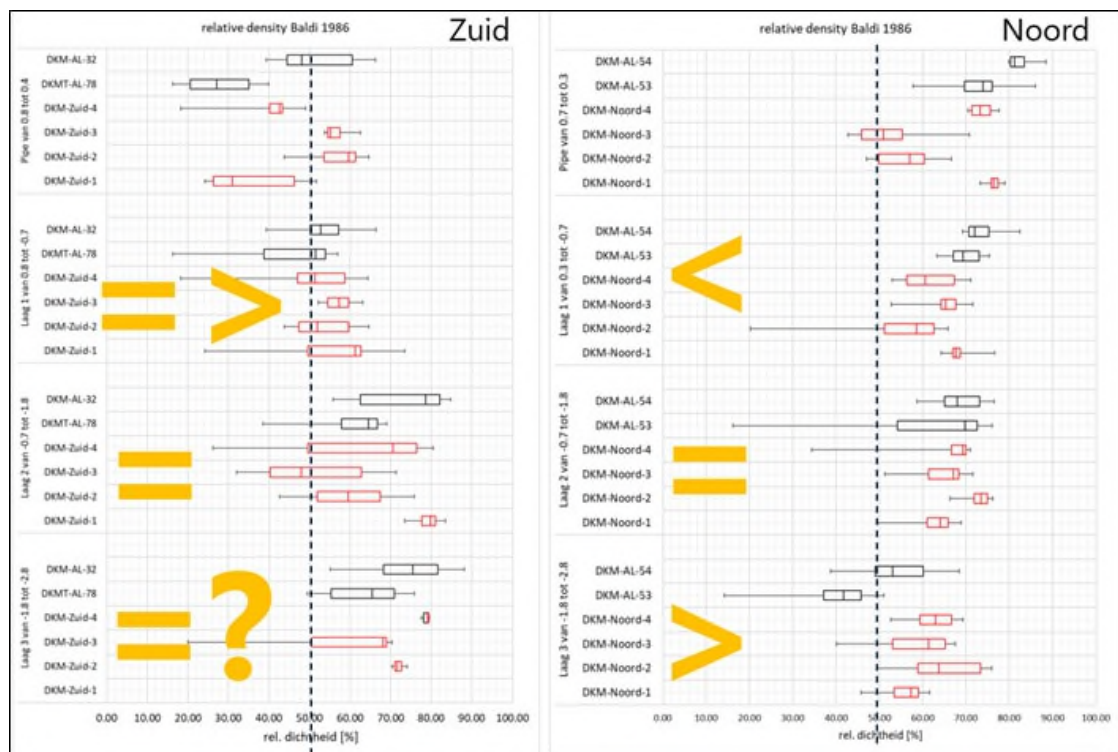
Vanwege de grote (basis)variantie in de gemeten conusweerstand en afgeleide relatieve dichtheid is het trekken van een eenduidige conclusie ten aanzien van het effect van het intrillen van de damwanden lastig. Door de oogharen heen is per onderscheiden zandlaag binnen het getijdenpakket een invloed waarneembaar. Dit effect is niet voor alle lagen gelijk en verschilt ook per proefvak.

Het intrillen van de damwanden heeft lokaal voor een iets hogere dan wel iets lagere pakking gezorgd, afhankelijk van de beginconfiguratie van het korrel skelet. Het lokaal verzakken van de grond in de kassen van de damwandplanken wordt toegeschreven aan de kleef langs de plank die de cohesieve toplaag heeft meegetrokken. Grootschalige zakkingen zijn niet waargenomen.

In het model van Sellmeijer voor terugschrijdende erosie is in de sterktefactor ook een term opgenomen voor de relatieve dichtheid (RD). De aangepaste rekenregel is alleen voor een relatieve dichtheid van groter dan 50% gevalideerd. Zoals uit Figuur 2-1 blijkt wordt aan deze voorwaarde voldaan, in het noordvak meer uitgesproken dan in het zuidelijke vak. De invloed van de relatieve dichtheid op het berekende kritiek verval met het Sellmeijer model lijkt beperkt te zijn. In de rekenregel zelf is de relatieve dichtheid niet opgenomen, dit omdat de parameters lastig te bepalen is en de onzekerheid rondom de invloed van de relatieve dichtheid klein is ten opzichte van de totale onzekerheid van de rekenregel.

Op basis van onderstaand figuur lijkt de relatieve dichtheid rond pipeniveau (en laag 1) voor het zuidelijke proefval gelijk te zijn gebleven of iets te zijn toegenomen, terwijl in het noordelijk proefvak sprake zou zijn van een afname. Op basis van volumegewichtsbepalingen in het laboratorium is ook de relatieve dichtheid afgeleid. Dit is gedaan op monsters uit het vooronderzoek, voor het intrillen van de damwanden, en monsters die daarna zijn genomen tijdens de CSI-fase van de proef. Op basis van die analyse lijkt de relatieve dichtheid in het bereik van ca. NAP -0,5 tot ca. +1 m, dus rondom pipeniveau, te zijn toegenomen van gemiddeld 70% naar 83% (zie 1220-164143.M29 in Appendix B). Effecten als gevolg van de proefafbouw en monsterverstoring die voor extra verdichting hebben kunnen zorgen zijn lastig te kwantificeren.

Uiteindelijk liggen de waarden voor beide proefvakken dicht bij elkaar, zo rond de 60%. Er wordt dan ook geen significant effect van een wijziging in relatieve dichtheid op het resultaat (ΔH_c) verwacht tussen beide proefvakken.



Figuur 2-1: Relatieve dichtheid voor en na intrillen damwanden incl. aanduiding effect en RD=50% grens (stippellijn).

De effecten van een veranderende pakking zullen het meest van invloed zijn op de doorlatendheid als parameter binnen de pipinganalyses. De doorlatendheidsvariatie van het getijdenzandpakket is vastgesteld met HPT-AMPT sondeonderzoek dat eveneens voor en na het intrillen van de damwanden is uitgevoerd. De HPT-resultaten zijn gevalideerd en aangescherpt op basis van een fit van het stromingsmodel (DgFlow) op de gemeten waterdrukken en debieten tijdens de daadwerkelijke proefuitvoering (zie hoofdstuk 3). Eventuele effecten van een veranderende pakking zijn daarin verdisconteerd.

Vanwege de variatie in bodemopbouw op korte afstand wordt aanbevolen om bij toekomstige analyses de controlesonderingen dichter (orde 1m) bij de voor installatie geplaatste sonderingen te plaatsen.

2.2 Laboratoriumonderzoek

Tijdens de proeven is zandmateriaal afgeschept op de wellocaties. Tijdens de CSI-fase zijn gericht geroerde en ongeroerde monsters genomen en beproefd in het geotechnisch laboratorium van Fugro. In 1220-164143.M29 (v3.0; d.d. 15-7-2022), integraal opgenomen in Appendix B, is de wijze van monsternamen, aantallen en herkomst van de monsters en de proefresultaten gedetailleerd beschreven. De laboratoriumresultaten zijn met name gebruikt om de parameterwaarden te bepalen voor toepassing in de pipinganalyses en om het verloop van het pipingproces te kunnen duiden. Waar relevant zullen deze parameterwaarden en herkomst verderop in dit rapport worden beschreven. In onderstaande paragrafen zijn enkele kenmerkende resultaten gegeven waarbij de volgende categorieën, naar herkomst van de monsters, is gehanteerd (zie Tabel 2.1).

Tabel 2.1: Monstercategorieën naar herkomst incl. aantal beproefde monsters.

Herkomst / categorie	Beschrijving	Aantal beproefde monsters [-]
Pipe_naast	Monster genomen binnen >0,10 m en <0,50 m naast pipe.	4
Pipe_onder	Monster genomen binnen >0,10 m en <0,50 m onder pipe.	9
Pipe_CSI	Monster genomen binnen <0,10 m van pipe.	10
Pipe_wel	Monster genomen in of bij wel.	23
Pipe_dak	Monster genomen van dak van pipe.	2
CSI_algemeen	Monster voor algemeen onderzoek.	20

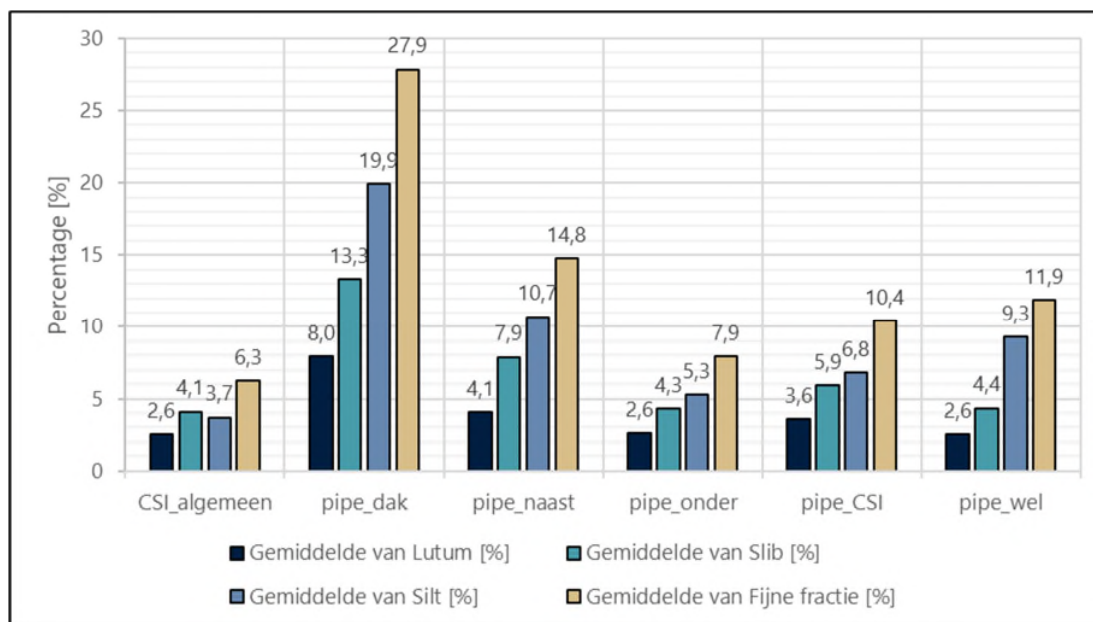
2.2.1 Korrelverdelingen

Op basis van zevingen en hydrometerproeven is inzicht verkregen in het percentage fijne fractie en verdeling hierbinnen volgens de indeling in Tabel 2.2.

Tabel 2.2: Classificatie korrelgroottes (indeling fijne fracties).

Indeling	Minimum [μm]	Maximum [μm]
Lutum	0	2
Slib	0	16
Silt	2	63
Fijne fractie	0	63
Zand	63	2000

Op basis van deze indeling is de gemiddelde korrelgrootteverdeling per monstercategorie gegeven in Figuur 2-2.



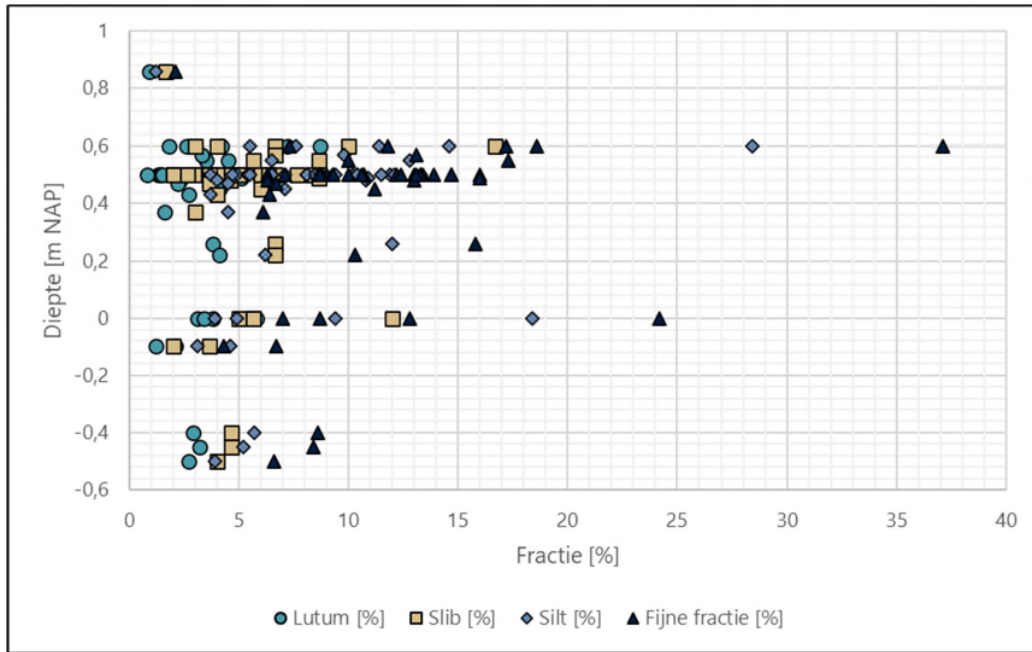
Figuur 2-2: Gemiddelde lutum-, slib- en siltpercentages per monstercategorie. Slib is een subcategorie binnen de kleine fractie (0-63 mu) waardoor de percentages nu optellen tot > 100%.

Wat opvalt is het hoge gehalte aan silt (19,9%), slib (13,3%) en lutum (8,0%) in het dak van de pipe ten opzichte van de andere locaties. Pipe_dak classificeert dan ook juist op het grensvlak van 'klei, sterk zandig (Kz3)' en 'zand sterk siltig (Zs3)'. Het materiaal is cohesief genoeg om als dak voor de pipe te dienen, niet in te storten en weerstand tegen erosie door langsstromend water in de erosiepipe te kunnen bieden.

Uit bovenstaand figuur is af te lezen dat pipe_wel minder lutum en slib bevat in vergelijking met pipe_CSI. Het is aannemelijk dat een deel van het fijnste materiaal is weggevoerd door het uitredend water en verderop is afgezet. CSI_algemeen komt goed overeen met pipe_onder, dit wordt verklaard doordat beide categorieën van monsters over het algemeen relatief diep in het zandpakket zijn genomen.

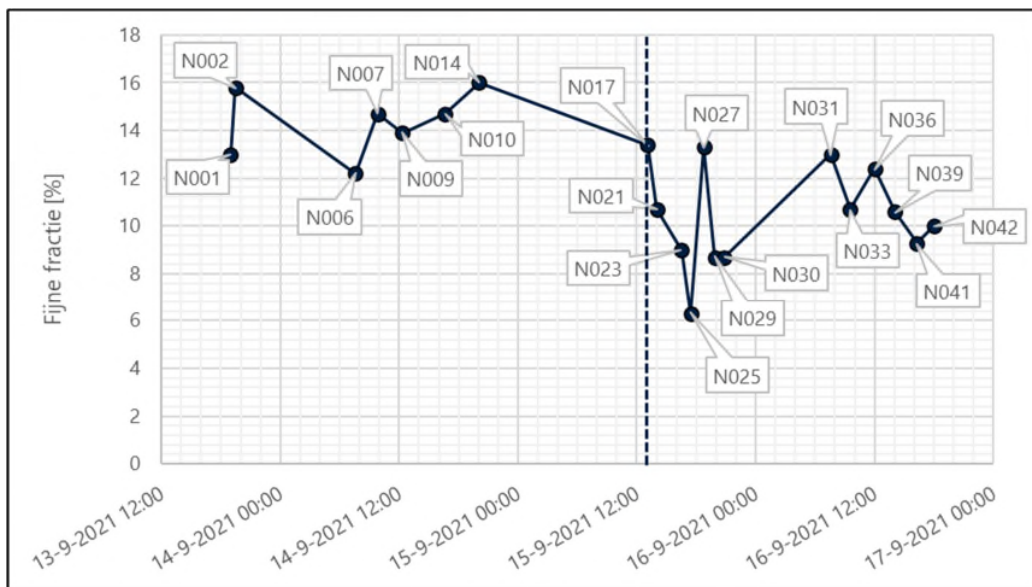
Pipe_naast heeft een relatief hoog percentage aan fijne fractie vergeleken met pipe_CSI en pipe_wel. In lijn met de hypothese van het onderzoek kan dit het pad van de pijp verklaren, de werkhypothese is namelijk dat zand met een relatief hoge fijne fractie meer weerstand heeft tegen piping.

Pipe_onder laat een relatief laag percentage fijne fractie zien in vergelijking met pipe_CSI/wel en -naast. Dat kan verklaard worden door de verschillende opvullingsfasen van de getijdengeul waarbij doorgaans een 'fining-upward'-trend wordt gevonden. Naarmate de geul verzandt neemt de waterstroming af en wordt fijner materiaal afgezet. Ter illustratie van het verloop over de diepte zijn in Figuur 2-3 de verschillende fracties (lutum, slib, silt en de totale fijne fractie) afgezet tegen de diepte. Dit figuur laat zien dat de grond naar boven toe fijner wordt. Het laat een afnemende fijne fractie zien naarmate de diepte toeneemt. Dit duidt ook op het 'fining-upward' proces bij het opvullen van de getijdengeul.



Figuur 2-3: Fijne fracties afgezet over de diepte met fining-upward trend in opgevulde getijdengeul.

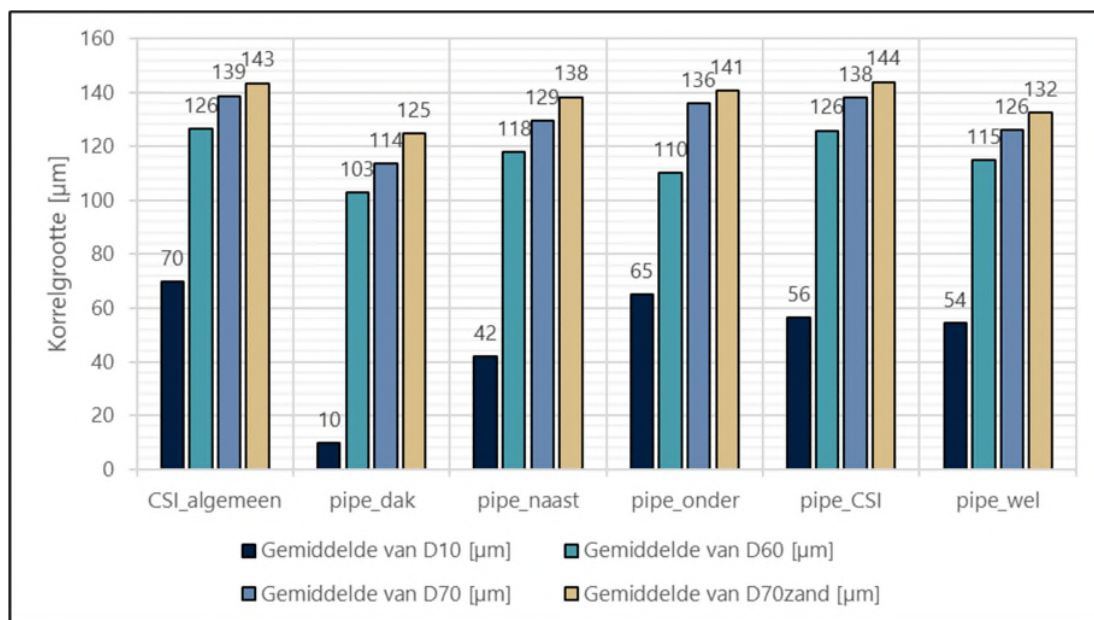
In Figuur 2-4 zijn de fijne fracties die zijn afgescheept bij de zandmeevoerende wel in het Noordelijke proefvak (Figuur 2.6) weergegeven. De horizontale pipegroei in het Noordelijke vak is waargenomen vanaf 15-9 13:00. Vanaf dit tijdstip (N017) is er een duidelijke afname in de fijne fractie te zien. Dit is te verklaren doordat voor die tijd verticale piping optreedt, waarbij de pipe verticaal groeit door het uiterst siltige zand (vergelijkbaar met of siltiger dan pipe_dak). Op het moment dat de pipe horizontaal begint te groeien, wordt minder siltig zand in transport gebracht richting de wel.



Figuur 2-4: Gehalte fijne fractie over tijd afgescheept bij de zandmeevoerende wel in het Noordelijke proefvak. De gestippelde verticale lijn geeft het tijdstip van waarneming van horizontale pipegroei weer.

Figuur 2-5 laat de D10, D60 en D70 waarden zien van de verschillende monstercategorieën. De D70 is bepaald op basis van de volledige en enkel de zandfractie. In de 'Schematiseringshandleiding Piping' is opgenomen dat de D70 van enkel de zandfractie bepaald dient te worden als input voor Sellmeijer. Hierin valt op dat er weinig variatie in D70 te zien is in het zandpakket (125-144 µm), met in het dak van de pipe de laagste D70 waarde, dat verklaard wordt door het grotere gehalte aan lutum, slib en silt. De D70 waarden komen overeen met de waarde uit de Ontwerpnota van de grootschalige proeven (1220-163143.R02 d.d. 16-6-2021) waarin op basis van het vooronderzoek een gemiddelde D70 van 132 µm is bepaald.

Opgemerkt wordt dat deze D70 waarde buiten het toepassingsbereik van de rekenregel, die is afgeleid voor zanden met een D70 tussen 150 en 500 µm.

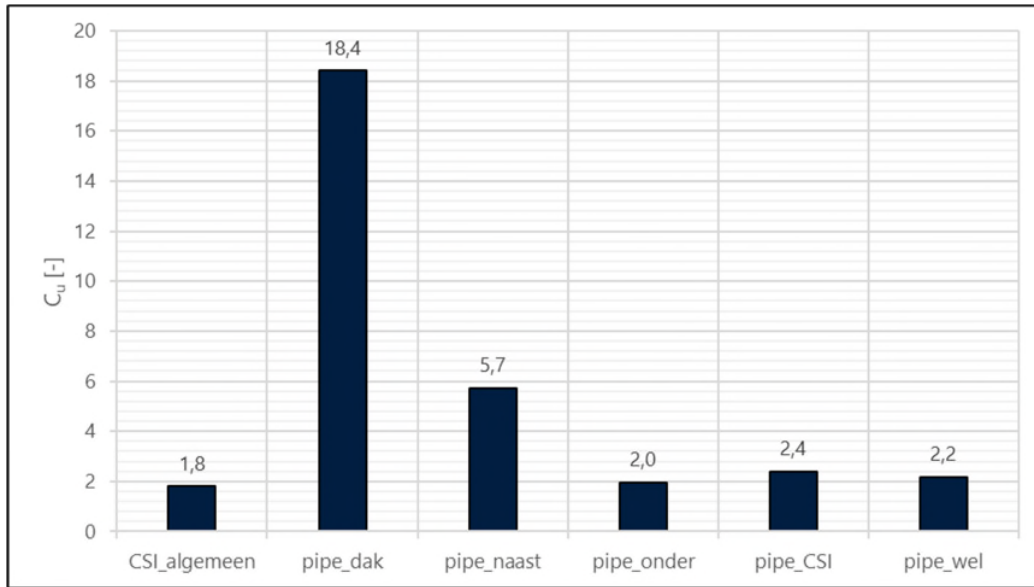


Figuur 2-5: D10, D60 en D70 van de gehele en zandfractie per monstercategorie.

De uniformiteitscoëfficiënt C_u is een ruwe vormparameter en geeft de verhouding weer van D_{60} en D_{10} met:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

In Figuur 2-6 zijn de C_u -waarden per monstercategorie opgenomen. Hierin valt logischerwijs de uniformiteitscoëfficiënt van het dak van de pipe (18,4) weer op. Dit wordt veroorzaakt door met name de lage D_{10} korrelgrootte vanwege het grotere gehalte aan lutum, slib en silt. Zoals eerder opgemerkt is op locaties naast de pipe (> 10 cm) een relatief hoge fijne fractie aangetroffen, dit resulteert eveneens in een relatief hoge C_u waarde. De overige monsters zijn relatief laag en met een C_u van rond de 2 te classificeren als slecht gegradeerde grond (redelijk uniforme korrels) wat ook volgt uit de steile korrelverdelingsdiagrammen.

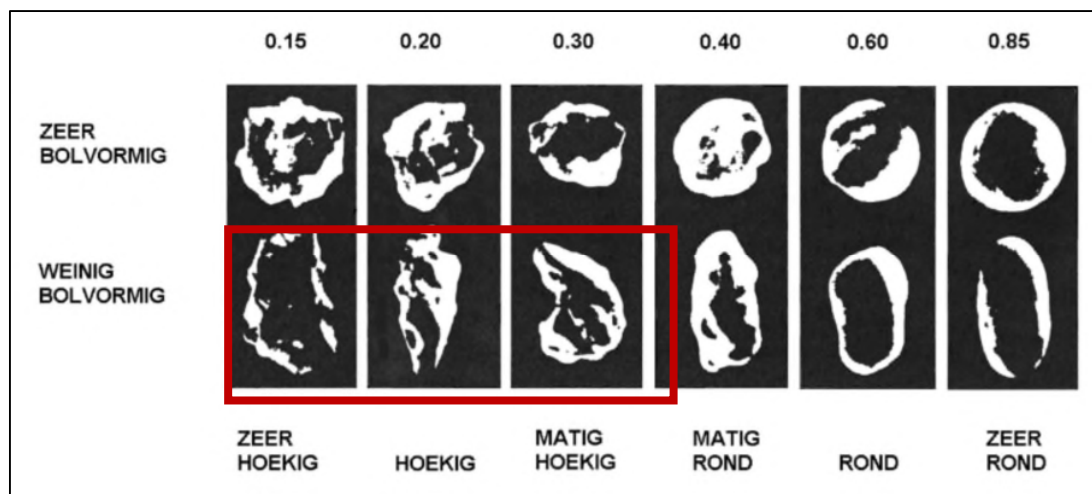


Figuur 2-6: Uniformiteitscoëfficiënt C_u per monstercategorie.

Op basis van verschillende empirische doorlatendheidsformules (Den Rooijen, Hazen en Beijer) zijn de korrelverdelingen ook gebruikt om de doorlatendheid te bepalen. De resultaten laten een grote spreiding zien en verklaren, op basis van specifieke monsterlocaties, niet de locatie van de pipe. Direct onder de pipelocatie is bijvoorbeeld geen duidelijk hogere doorlatendheid bepaald wat een lokale extra toestroom van water (/belasting) zou kunnen verklaren.

2.2.2 Korrelvorm

Van een deelselectie van deze monsters is ook de korrelvorm bepaald, zie Figuur 2-7. Er werden op voorhand geen significante verschillen in korrelvorm verwacht door dezelfde afzettingsgeschiedenis van het zandmateriaal. Alle monsters zijn geïnclassificeerd als weinig bolvormig met een rondheid variërend van zeer hoekig ($R=0,10$) tot matig hoekig ($R=0,30$).



Figuur 2-7: Korrelvorm volgens de indeling van Powers (1953).

Hoewel in het afgeschepte materiaal bij de wel relatief meer matig hoekige zandkorrels zijn aangetroffen ten opzichte van de ander locaties, zijn ook juist op deze hier de meest hoekige korrels gevonden. Er zijn voornamelijk geen eenduidige conclusies op basis van de korrelvorm te trekken.

De hoekigheid van het materiaal duidt op relatief weinig transport van de zandkorrels, aangezien de hoekigheid afneemt bij het veelvuldig rollen van de korrels over elkaar heen. Dit betekent dat het aannemelijk is dat de getijdengeul materiaal heeft aangevoerd dat in de nabije omgeving is 'aangetapt', waarschijnlijk is de bron van het zand het Pleistocene zand onder het veen. Na afzetting binnen de getijdengeul is het zand klaarblijkelijk niet vaak meer omgewerkt en is het zand relatief hoekig gebleven.

2.2.3 Pinholetesten

Indicatief zijn een vijftal pinholetesten op het getijdenzand om de relatieve verschillen in erosiegevoeligheid te bepalen. Ter referentie is ook een proef uitgevoerd op norm-zand zonder fijne fractie. De pinholetesten worden normaliter op kleimateriaal uitgevoerd omdat zand beperkt weerstand biedt tegen erosie door langsstromend water. De pinholetest is namelijk een kwantitatieve erosieproef waarbij water via een vooraf geprikt gat (1 mm in doorsnede) door een grondmonster stroomt, hierbij wordt de mate van het oplossen en het afbrokkelen van het grondmonster bepaald. De verkleuring van het uittredende water door geërodeerd en opgelost materiaal (het eluaat), en de tijdsduur per gedefinieerd volume uittredend water geven inzicht in de erosiebestendigheid van een grondmonster.

Het beproefde zand bleek beperkt erosiebestendig, bij slechts één proef, waarvan het monster op het grensvlak van de pipe en het dak is genomen, konden meerdere belastingtrappen worden opgelegd. Ten opzichte van het norm-zand is het getijdenzand erosiebestendiger gebleken. Dit is conform verwachting op basis van proefervaring, norm-zand bevat geen fijne fractie en is daarom minder erosiebestendig dan het getijdenzand met relatief veel fijne fractie.

Het monster gestoken op de overgang van pipe en dak (Z103) is het meest erosiebestendig waarschijnlijk door een relatief hoog percentage silt en lutum. Op 5-10 cm onder de pipe (Z104) is de erosiebestendigheid een stuk lager (ca. 26x). Z104 bezwijkt ook sneller (ca. 5,5x) dan monster Z105 op weer een iets lager niveau, ca. 25 cm onder pipeniveau. De pipe heeft zich gevormd tussen twee relatief erosiebestendigere lagen. Qua waarde komen de resultaten van Z104 overeen met die van Z2 van het diepst gelegen gereduceerde zandmateriaal. Op basis van deze beperkte set proeven is geen verband vastgesteld tussen de kleur grijs/bruin van het zand (gereduceerd of niet) en erosiebestendigheid.

De pinholetest lijkt geschikt voor kwantitatieve analyses naar piping, dit blijkt ook uit internationaal onderzoek (bv. Romero *et al.* (2011), Dinh *et al.* (2021)). Het is een relatief simpele en snelle test die geïjkt zou kunnen worden aan grootschalige testen om de erosiebestendigheid van grond te onderzoeken.

2.2.4 Overige testen

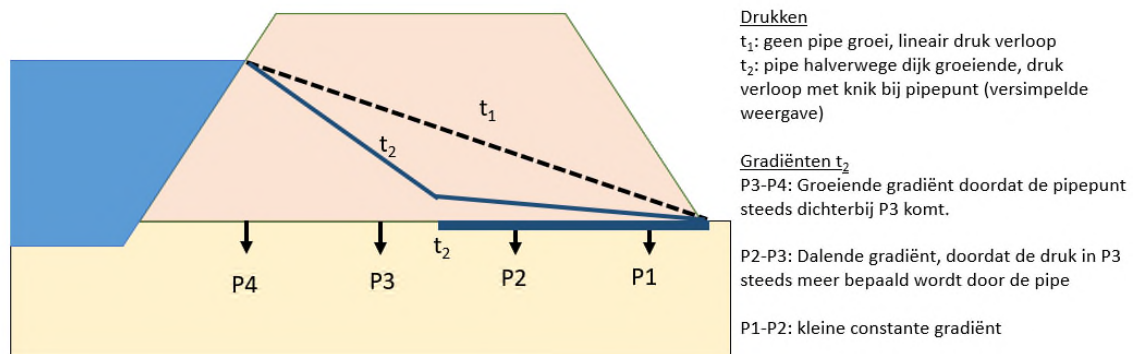
Naast de resultaten zoals in bovenstaande paragrafen beschreven zijn in 1220-164143.M29 (v3.0; d.d. 15-7-2022) de resultaten van de overige proeven en duiding daarvan gegeven, dit zijn:

- nadere beschouwing van de korrelverdelingen incl. resultaten Malvern testen op deelfracties binnen top van het getijdenzandpakket;
- bepaling zout-, organisch stof- en kalkgehalte per monstercategorie en kleur van het basismateriaal;
- volumegewichten (nat/droog) incl. watergehalte en porositeit en afleiding relatieve dichtheid op basis van minimale en maximale dichtheidsbepalingen.

2.3 Waterspanningsmeters (WSM)

Op basis van een groot aantal waterspanningsmeters kon het pipingproces worden gevolgd tijdens beide pipingproeven. Een beschrijving van de monitoringsopzet is gegeven in het Factual Report (1220-164143.R04 d.d.25-3-2022), de analyseresultaten zijn opgenomen in 1220-164143.M24 (v2.0 d.d. 23-3-2022) en integraal opgenomen in Appendix C.

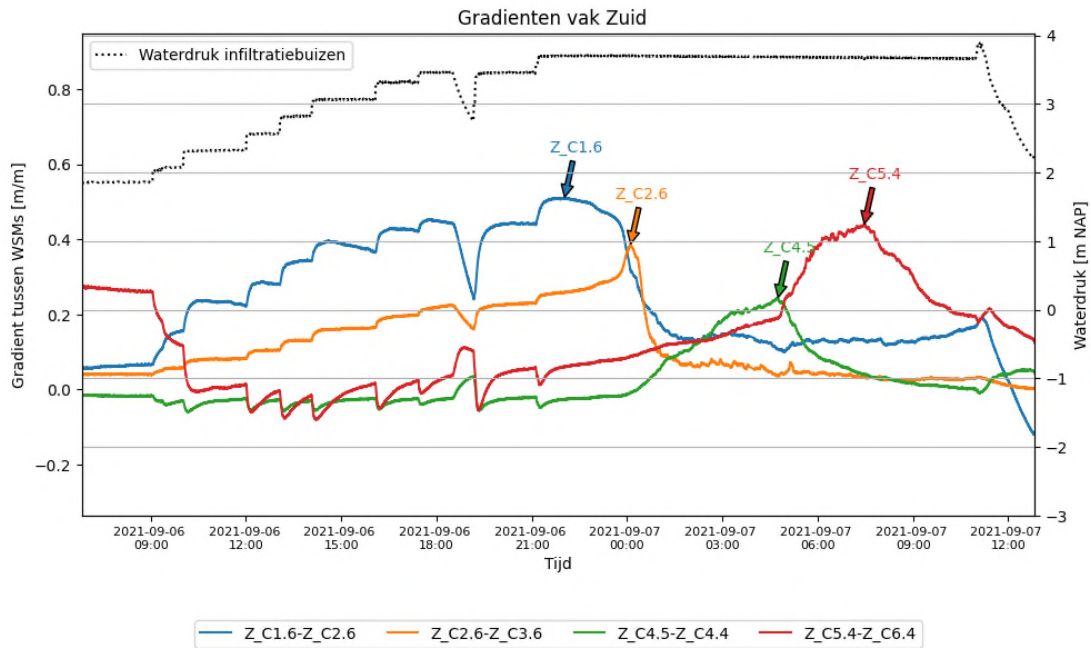
Het pad van de pipe en pipegroeisnelheid is bepaald door de stijghoogtegradiënt in tussen verschillende koppels van waterspanningsmeters te bepalen. Wanneer de pipe de meest benedenstroomse WSM nadert zorgt dit voor een toename in de gradiënt. Wanneer de pipe verder groeit en de meest benedenstroomse WSM passeert is een piek in de gradiënt gemeten die vervolgens daalt wanneer de pipe verder richting de bovenstroomse WSM groeit. Dit proces is toegelicht in Figuur 2-8. Hoewel de meeste WSM's ca. 0,3-0,4 m boven het pipeniveau waren geplaatst, in de meer siltige en gelaagde top van het getijdenzand, kon de stijghoogteverandering als gevolg van pipegroei met voldoende contrast worden gemeten.



Figuur 2-8: Schematische weergave stijghoogte tijdens pipegroei.

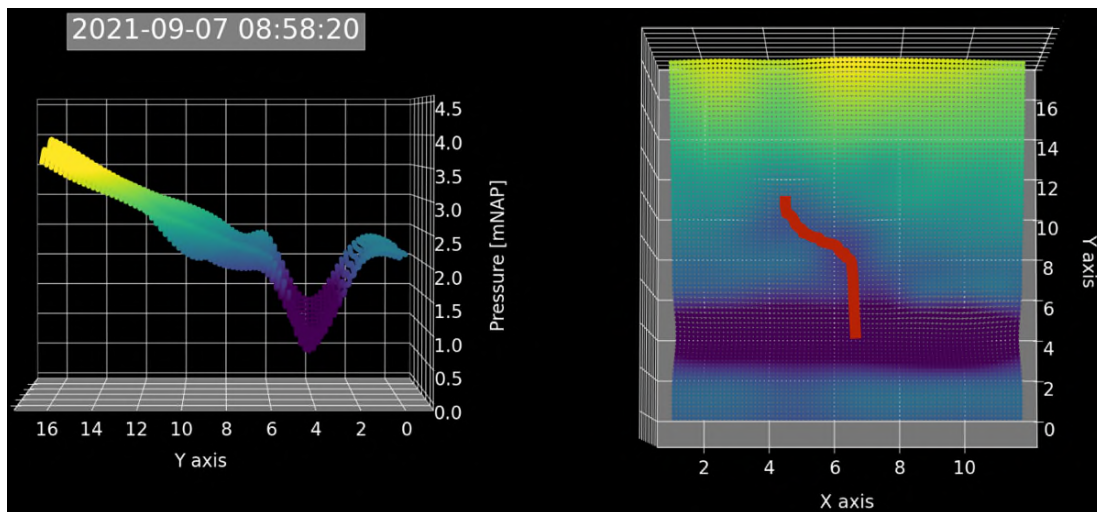
Om het pipepad en -groeisnelheid te bepalen is met name gebruik gemaakt van de 66 waterspanningsmeters die in 6 raaien binnen monitoringsvak C in een 1x1 m grid vanaf de uittredesloot waren geplaatst.

Figuur 2-9 geeft een voorbeeld van de stijghoogtegradiënten tussen de gebruikte WSM-koppels in proefvak Zuid. Eenzelfde analyse is uitgevoerd voor proefvak Noord. In de volgende paragrafen is nader ingegaan op het pad en groeisnelheid van de pipe.

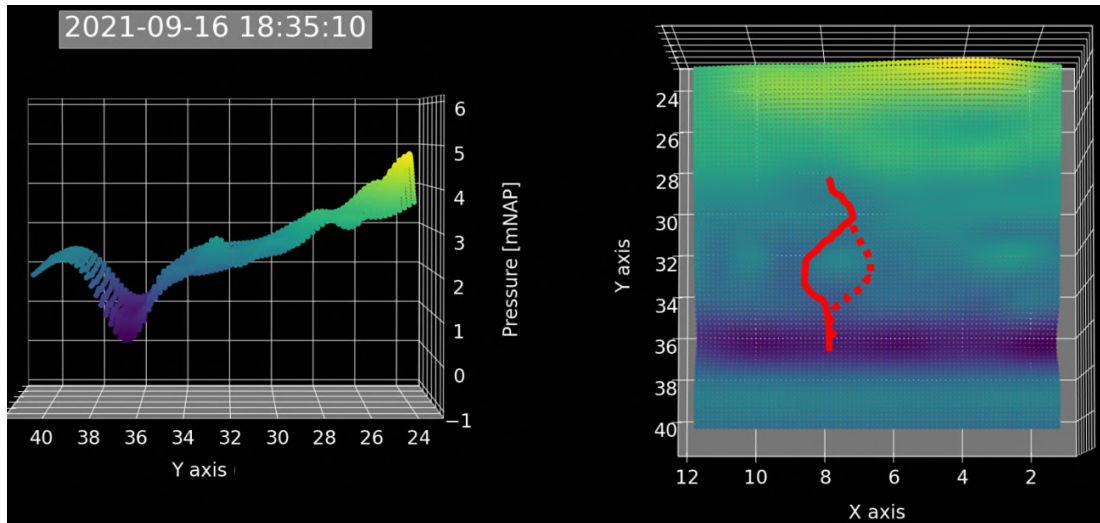


Figuur 2-9: Gradiënten proefvak Zuid. Op 06-09-2021 rond 19:00 is er een stroomstoring geweest, dit heeft geresulteerd in een verlaging van de waterstanden. De gradiëntenkoppels zijn steeds zo gekozen dat ze haaks op de (globale) stroomrichting van het pad van de pipe staan.

Op basis van de gradiëntenanalyse en door de stijghoogteverandering binnen het proefvak uit te zetten is het pad van de pipe bepaald. Dit pad is voor beide proeven weergegeven in onderstaande figuren.



Figuur 2-10: Overzicht pipegroei in proefvak Zuid, interpolatie van de gemeten waterspanningen.

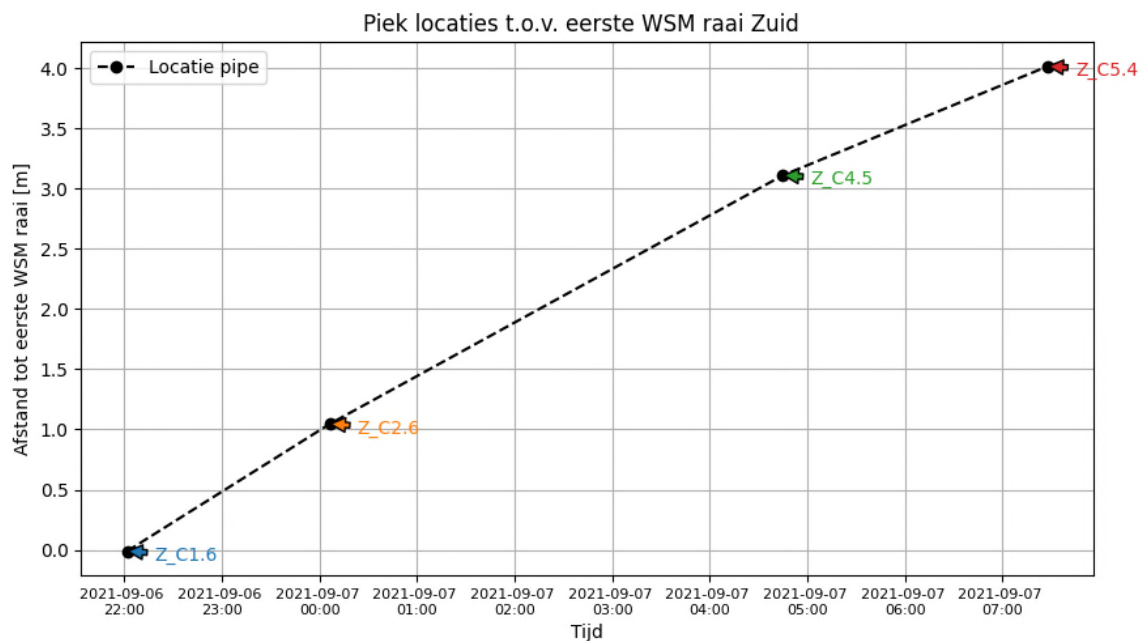


Figuur 2-11: Overzicht pipegroei in proefvak Noord, interpolatie van de gemeten waterspanningen.

Het pad van de pipe dat op basis van de WSM data is bepaald is geverifieerd met de daadwerkelijke ligging van de blootgelegde pipe(s) tijdens de CSI fase van het onderzoek. Deze kwamen met elkaar overeen. De WSM data is erg bruikbaar gebleken als stuurinformatie tijdens de proef waarbij onder andere gecontroleerd is of een stationaire situatie na iedere belastingstap is behaald en de ligging van de pipe te bepalen.

2.4 Pipegroeisnelheid

Door de locatie van de pipepunt (bij de eerste WSM in het koppel) uit te zetten tegen het tijdstip van de piek, is te bepalen met welke snelheid de pipe groeit. Deze verplaatsing van de pipepunt (piek van het koppel) is voor proefvak Zuid weergegeven in Figuur 2-12.



Figuur 2-12: Pipe progressie in de tijd binnen proefvak Zuid.

De pipe lijkt zich met een redelijk constante snelheid door het proefvak te verplaatsen. De afgeleide pipegroeisnelheden zijn in Tabel 2.3 weergegeven. De groeisnelheid van de totale pipe is bepaald door de meanderende pipelengte (afstand WSM 1.6 tot het einde van de pipe waar deze is opgegraven) te delen door de tijd tussen de eerste waarneming van horizontale pipegroei (06-09-2021 22:00) en het einde van de proef (07-09-2021 11:00).

Tabel 2.3: Pipegroeisnelheid proefvak Zuid.

Pipe segment	Snelheid [mm/s]	Opmerkingen
Koppel C1.6-C2.6	0,14	-
Koppel C2.6-C4.5	0,09	-
Koppel C4.5-C5.4	0,14	-
Totale meanderende pipe	0,18	(9-0,6) m / 13 uur
Pipe haaks op uittredesloot	0,11	(5,6-0,6) m / 13 uur

Voor proefvak Noord zijn op eenzelfde wijze de pipegroeisnelheden bepaald zoals opgenomen in Tabel 2.4.

Tabel 2.4: Pipegroeisnelheid proefvak Noord.

Pipe segment	Snelheid [mm/s]	Opmerkingen
Koppel C1.4-C2.4	0,22	-
Koppel C2.4-C3.4	0,10	-
Koppel C3.4-C5.3	0,06	Gecorrigeerd voor belastingverlaging
Totale meanderende pipe	0,20	(15,5 – 0,6) m / 21 uur, incl. correctie verlaging
Pipe haaks op uittredesloot	0,12	(10 – 0,6) m / 21 uur, incl. correctie verlaging

De resultaten tussen beide proefvakken zijn in overeenstemming met elkaar. De pipegroeisnelheid langs het meanderende pad van de pipe is ca. 0,2 mm/s en loodrecht over de afstand tussen uittredesloot en infiltratiebuizen (buitenwater) ca. 0,12 mm/s.

Deze groeisnelheden liggen ruim onder de snelheid van 2 mm/s zoals deze binnen een eenvoudige tijdsafhankelijke beoordeling kan worden uitgevoerd wanneer eerdere pipegroei in het verleden kan worden uitgesloten. Deze laatste voorwaarde is overigens een belemmering voor beheerders om deze eenvoudige beoordeling toe te passen.

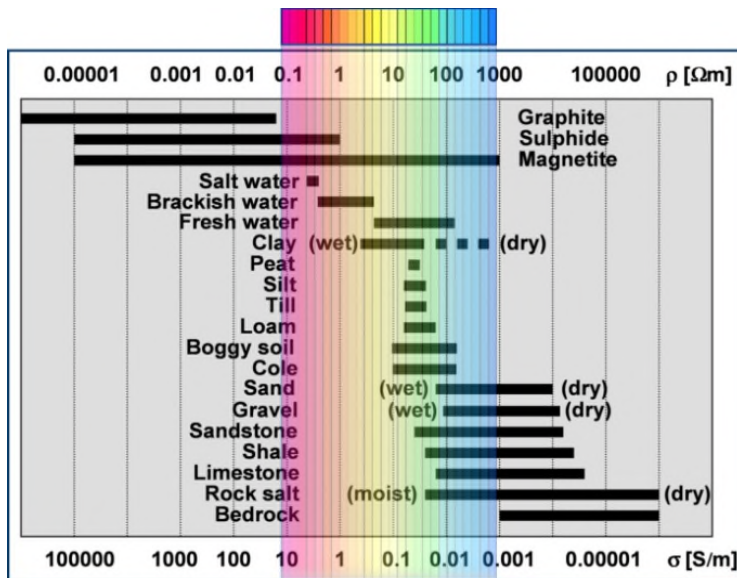
Bovenstaande resultaten zijn in Appendix C vergeleken met de resultaten uit breder onderzoek. Des resultaten passen binnen de bredere dataset (0,05-3 mm/s) waarbij de bandbreedte kan worden verklaard door de schaal van het experiment en of de proef initiatie gedomineerd is waarbij in een 2D opstelling een relatief hoge pipegroeisnelheid is gevonden.

De resultaten op basis van de Hedwigeproeven kunnen worden gebruikt in nader onderzoek naar het tijdsafhankelijk rekenen aan piping. Bij de afleiding van de extra sterktefactor op het kritiek verval speelt de pipegroeisnelheid en tijdsafhankelijkheid geen rol.

2.5 Electrical Resistivity Tomography (ERT)

2.5.1 Achtergrond

Elektrische weerstandsmetingen (hier verder ERT genoemd: Electrical Resistivity Tomography) van de ondergrond geven informatie over de opbouw van de ondergrond, maar ook over de waterkwaliteit van het grondwater: elke type materiaal (klei, silt, zand) geleidt de stroom anders (Figuur 2-13), en de elektrische geleiding van water varieert met de temperatuur en de chemische samenstelling, waarbij het zoutgehalte een belangrijke rol speelt.



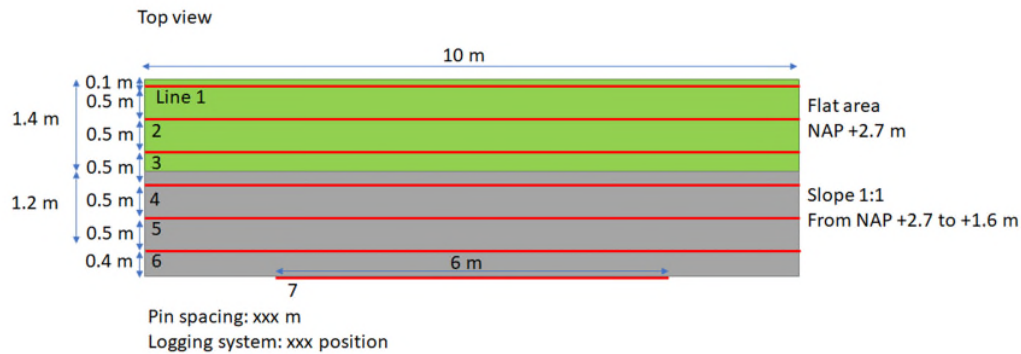
Figuur 2-13: Elektrische geleidbaarheid van verschillende typen materiaal.

Bij pipe-ontwikkeling verandert de samenstelling van de ondergrond ter plaatse van de pipe: waar eerst zand met water zat, zit nu alleen water. Een pipe is echter klein (mm-cm schaal) en deze verandering zal daarom, zeker in het begin van pipe-ontwikkeling, niet direct waarneembaar zijn met ERT. Als het waarneembaar is, zou dit leiden tot een lagere gemeten weerstand. Maar in het gebied met pipe-ontwikkeling zal waarschijnlijk ook de verzadiging toenemen (lagere weerstand) en zal er meer, en mogelijk ander bijvoorbeeld zouter, grondwater toestromen en ook deze aspecten hebben invloed op de ERT-metingen (lagere of hogere weerstand). Het doel van de ERT-metingen in de Hedwigepolder was daarom het testen of pipe-ontwikkeling inderdaad met ERT gemonitord kan worden. Hieronder wordt een samenvatting van de analyse gegeven, de details van de analyse zijn te vinden in Appendix D.

2.5.2 Methode

7 ERT-kabels zijn in beide proefvakken parallel aan de uitredesloot uitgerold op het talud tussen de sloot en de eerste rij Big Bags (zie Figuur 2-14 en Figuur 2-15). De afstand tussen de kabels was 0,5 m en de afstand tussen de elektrodes 0,25 m. Onderstaande figuren laten de positie van de kabels zien.

De ERT-metingen zijn ruim voor de start van de proef begonnen, zodat een goed beeld van de uitgangssituatie wordt verkregen en veranderingen kunnen worden gedetecteerd. Bij de analyse wordt niet alleen ERT-data gebruikt, maar ook WSM-data. Door het combineren van deze data (data-fusie) wordt meer informatie verkregen over de pipe-ontwikkeling.



Figuur 2-14: Bovenaanzicht van de ERT-kabels (rode lijnen).

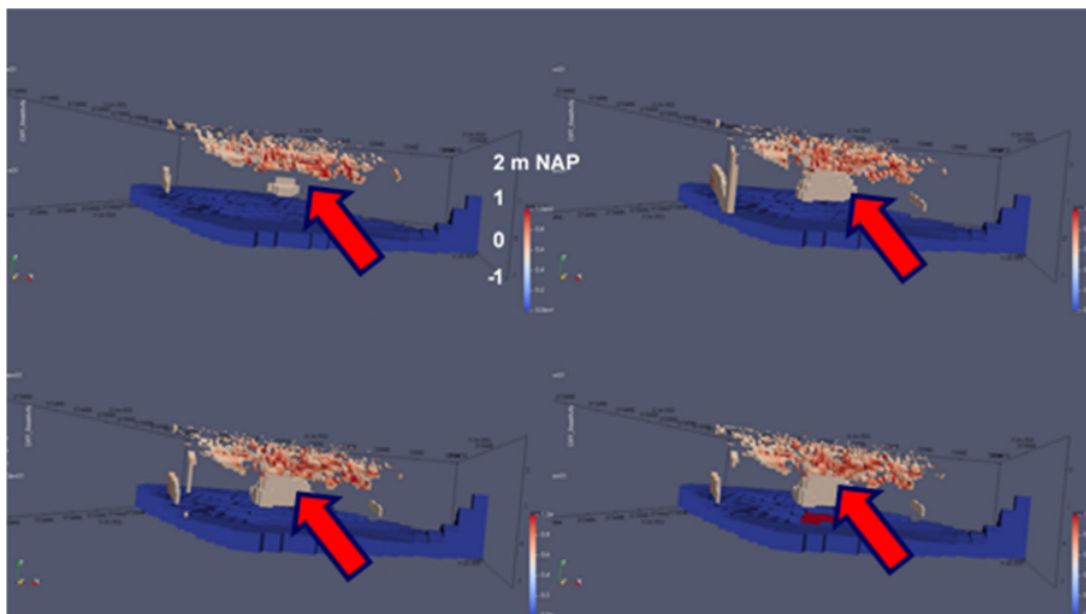


Figuur 2-15: Links: Dwarsdoorsnede met de positie van de ERT-kabels langs het talud ten opzichte van de sloot en de pipe. Rechts: De kabels zijn zwart en de elektrodes (haringen zijn zichtbaar langs de kabels).

2.5.3 Resultaten

Proefvak Zuid

In de onderstaande figuur is het blauw-rode vlak gebaseerd op de WSM-data. Als in de WSM-data een drukdaling te zien is, betekent dat hier pipe-ontwikkeling. Gebieden met drukdaling zijn rood gekleurd, de overige gebieden blauw. De andere zichtbare data zijn gebaseerd op de ERT-data en laten zien waar de elektrische weerstand toeneemt. Afgezien van ruis aan het oppervlak is een duidelijk 3D-vorm zichtbaar op dezelfde locatie als waar de WSM-data pipe-ontwikkeling detecteren. De start en ontwikkeling van de zandmeevoerende wel, voorafgaand aan horizontale pipevorming, is zichtbaar in de ERT-data, niet in de WSM-data.



Figuur 2-16: Pipe-ontwikkeling gemeten met ERT en WSM-data (proefvak Zuid). De rode pijlen geven aan waar de pipe-ontwikkeling plaatsvindt. Tijdstippen van linksboven naar rechtsonder: 06-Sept-14:59, 6-Sept16:59, 06-Sept 21:26, 06-Sept-23:26.

Om de relatie tussen pipe-ontwikkeling en de ERT-data beter te begrijpen is Dynamic Time Warp Analysis gebruikt, een techniek om patronen zichtbaar te maken, waarbij de data onderverdeeld wordt in clusters van gelijk gedrag. Deze analyse laat zien dat ter plaatse van de pipe-ontwikkeling de weerstanden toenemen en niet zoals eerst verwacht afnemen. In §2.5.4 wordt hier nader op ingegaan.

Proefvak Noord

Voor proefvak Noord zijn dezelfde analyses uitgevoerd. Ook hier is de pipe zowel met ERT- als WSM-metingen zichtbaar op dezelfde plek. De toename in weerstand in het gebied met piping is minder uitgesproken dan in proefvak Zuid.

2.5.4 Discussie en conclusie

De analyses laten zien dat met ERT pipe-ontwikkeling gedetecteerd en gevolgd kan worden. De ERT-data is vlakdekkend en iets dichterbij de sloot uitgevoerd en 'ziet' daardoor eerder dan de WSM-puntdata waar de zandmeevoerende wel zich vormt en pipe-ontwikkeling begint. Tijdens dit onderzoek zijn pipinggerelateerde veranderingen in elektrische weerstand uren eerder zichtbaar dan in de WSM-data.

De starthypothese was dat pipe-ontwikkeling zichtbaar zou worden in de ERT-data door een afname van de elektrische weerstand. Deze afname zou veroorzaakt moeten worden doordat ter plaatse van de pipe getijdenzand vervangen is door een water-zand mengsel, en wellicht ook omdat het zand rondom de pipe meer verzadigd is en mogelijk deels verweekt. In de praktijk nam de weerstand echter toe, de oorzaak hiervoor wordt nog niet goed begrepen.

Een verklaring wordt gezocht in complexe interacties tussen het zoete en relatief warme infiltratiewater (drinkwater) en het koudere grondwater dat bovendien van boven naar beneden van vrijwel zoet naar brak gaat, en met de diepte ook nog kouder wordt. Met andere woorden: het grondwater is gelaagd. Het infiltratiewater wordt over de hele diepte van het zandpakket geïnfiltreerd, dit betekent eveneens dat het gehele gelaagde grondwater in beweging komt. Ter plaatse van de uittredesloot komt het grondwater omhoog, waarbij ook het diepere grondwater in beweging komt. Ter plaatse van de wel en de pipe zal deze opwaartse stroming sterker zijn dan in verder weggelegen delen, waardoor de omgeving van de pipe relatief afkoelt door het diepere en koudere grondwater. Dit leidt tot een hogere weerstand bij gelijkblijvende saliniteit. Een andere mogelijkheid voor het verhogen van de weerstand is uitspoeling van fines uit het zand rondom de pipe, maar dit effect is een stuk kleiner dan een verhoogde weerstand door een afname in temperatuur.

Bij een hoogwater in de rivier of langs de kust kan pipe-ontwikkeling mogelijk op een andere manier zichtbaar zijn in de ERT-data, door mogelijk minder grote verschillen in typen grondwater. Maar als opwellend, kouder grondwater de reden is voor de gemeten verhoogde weerstand in de Hedwigepolder dan is het ook mogelijk dat het signaal vergelijkbaar is.

Een ander verschil met daadwerkelijke hoogwaters is dat de drukopbouw meestal meer geleidelijk zal gaan, waardoor kleine veranderingen in weerstand beter waarneembaar zullen zijn en piping wellicht juist zichtbaar wordt door een meetbare daling in weerstand. Om dit verder te onderzoeken zal het nodig zijn om voor en tijdens een hoogwater ERT-metingen uit te voeren bij een zandmeevoerende wel.

2.6 Glasvezel temperatuurmetingen

Met glasvezelkabels kan nauwkeurig de temperatuur van de omgeving gemeten worden (Distributed Temperature Sensing: DTS). Temperatuur kan ook gebruikt worden als proxy voor grondwaterstroming. Er wordt dan gebruik gemaakt van het creëren van een temperatuursprong (actieve opwarming - Active Heating: AH) en het volgen van de temperatuurontwikkeling in de tijd. Op de locatie waar er een sterkere grondwaterstroming is, wordt verondersteld dat er een lagere temperatuurontwikkeling is dan op locaties waar een zwakkere grondwaterstroming is, en ook dat na opwarming de kabel weer sneller afkoelt. Op de locaties waar een pipe ontstaat, wordt ervan uitgegaan dat de toegevoerde energie wordt meegenomen door de grondwaterstroming in de pipe waardoor er een lagere temperatuur gemeten wordt dan op locaties waar geen pipe aanwezig is. Het hoofddoel van de temperatuurmetingen in de Hedwigepolder was daarom het testen of pipe-ontwikkeling met glasvezeltemperatuurmetingen gemonitord kan worden. Hieronder wordt een samenvatting van de analyse gegeven, de details van de analyse zijn te vinden in Appendix E.

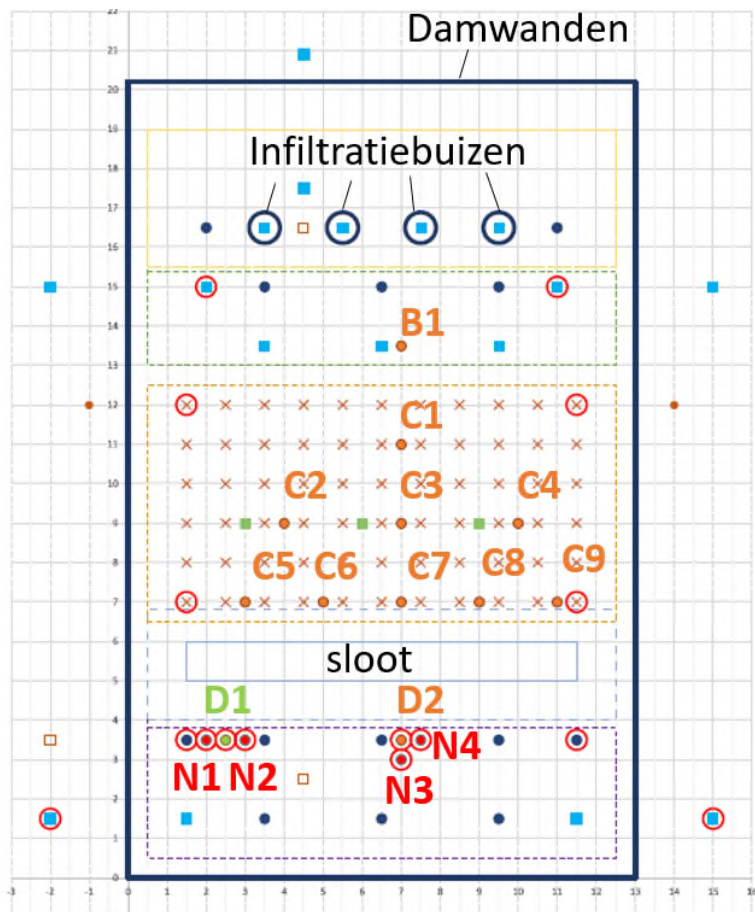
2.6.1 Methode

In proefvak Noord zijn door Fugro en Deltares op 12 locaties AH-DTS glasvezelkabels geplaatst om de temperatuur te meten.

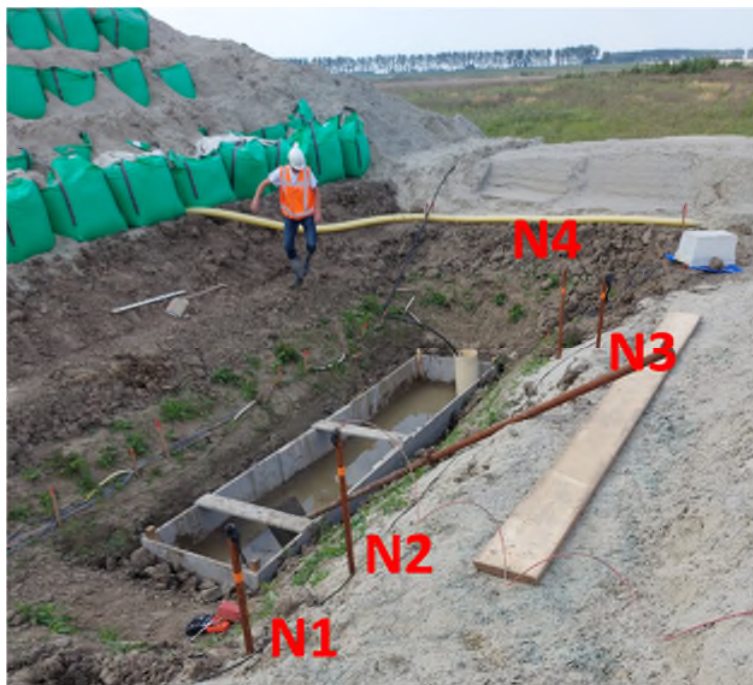
De actieve AH-DTS kabels B1, C1 t/m C9 en D1 zijn tot op de veenlaag onder het getijdenzand op NAP -2,8 m geïnstalleerd. De actieve AH-DTS kabel D2 is geplaatst tot een diepte van NAP -7,8 m. De AH-DTS glasvezelkabel zijn gesondeerd met een verloren punt. Daarnaast zijn er ook nog vier sondeerstangen geplaatst (N1 t/m N4) om de passieve temperatuurmetingen met een glasvezelkabel in uit te voeren. De volledige benaming van deze meetlocaties is NDT1-4, maar zijn in Figuur 2-17 en Figuur 2-18 afgekort tot N1 t/m. N4. In de verdere tekst wordt telkens gesproken over NDT1-NDT2-NDT3 en NDT4. Deze meetlocaties zijn achter de uittredesloot gekozen zodat de sondeerstangen het pipingproces niet zouden beïnvloeden.

De kabels die verwarmd konden worden zijn elk half uur 4 minuten opgewarmd, waarna ze 26 minuten afkoelden. Door de tijd heen resulteert dit in een dataset per kabel die steeds snelle opwarming laat zien en daarna een geleidelijke afkoeling. De data van deze kabels is op onderstaande wijze geanalyseerd om piping te kunnen detecteren:

1. Middels een algoritme worden alle piektemperaturen in de data herkend.
2. Vanaf elke piek wordt de afkoelcurve apart geanalyseerd.
3. De afkoelcurves worden genormaliseerd, omdat voor de verschillende kabels en dieptes de piektemperaturen niet hetzelfde zijn.
4. De helling van de afkoelcurves wordt berekend.
5. Deze data wordt geanalyseerd op patronen en veranderingen, zowel in de piektemperatuur als in de afkoelcurve.



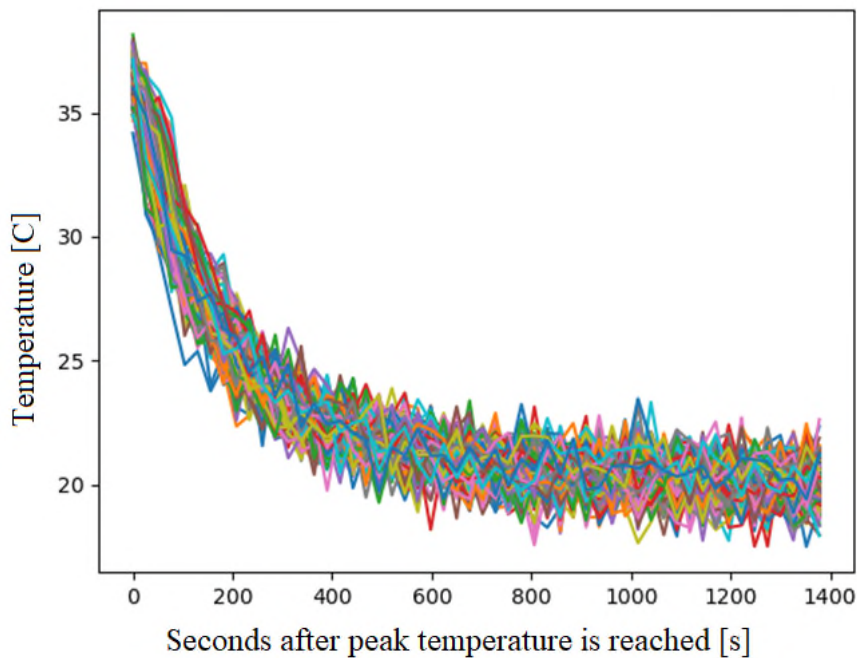
Figuur 2-17: Grondplan overzicht monitoring – noordelijk vak. De AH-DTS locaties B1, C1 t/m C9 en D1 en D2. N1 t/m N4 om de passieve temperatuurmetingen in een sondeerstang uit te voeren.



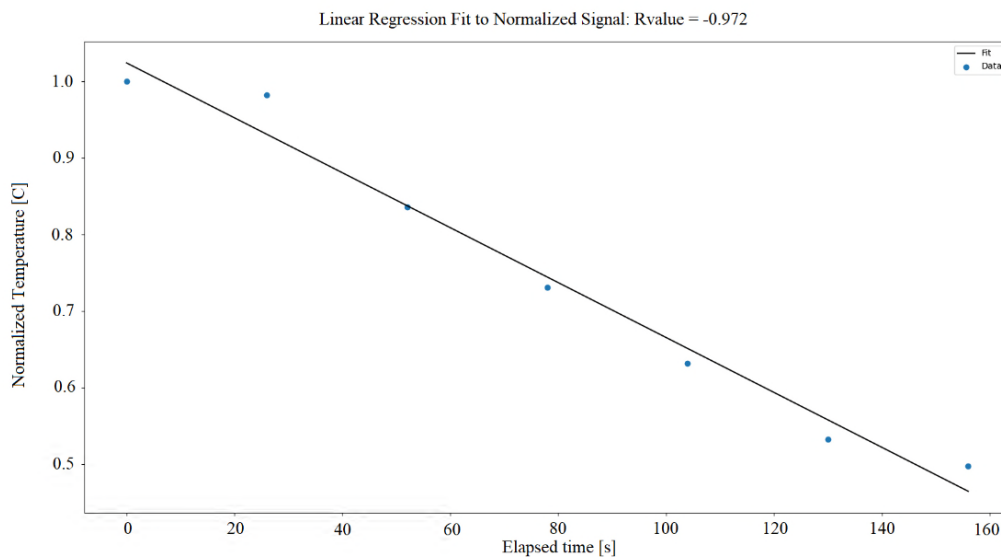
Figuur 2-18: Sondeerstangen N1 t/m N4.

2.6.2 Resultaten

Figuur 2-19 geeft een voorbeeld van de afkoelcurves, waarin duidelijk zichtbaar is dat er veel variatie of ruis aanwezig is en dat de piektemperatuur ook behoorlijk kan verschillen. Normalisatie zorgt ervoor dat de curves onderling beter vergelijkbaar zijn, een voorbeeld wordt getoond in Figuur 2-20.

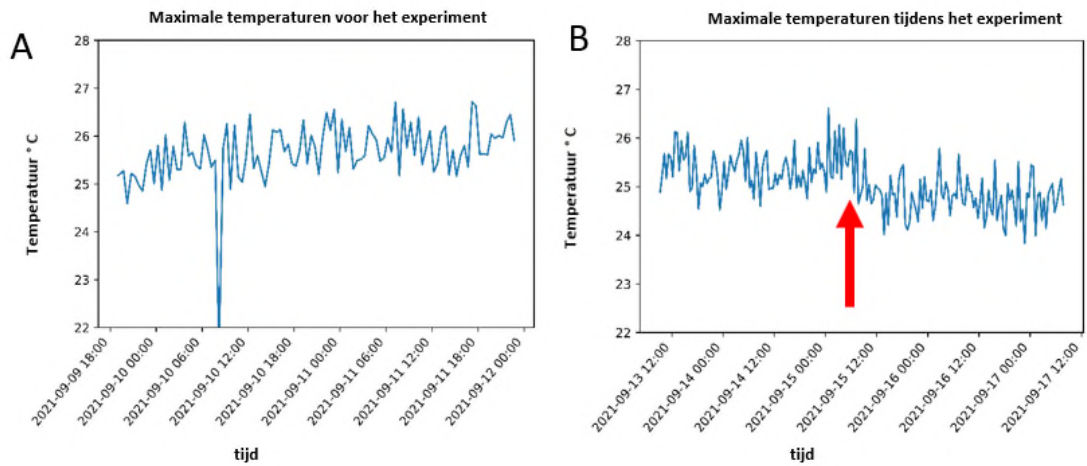


Figuur 2-19: Overzicht van alle afkoelcurves voor een bepaalde diepte.



Figuur 2-20: Lineaire regressie fit op het genormaliseerde signaal.

In data van de glasvezelkabel die het dichtst bij de pipe zat (C6, op 15 cm) is het moment van pipegroei zichtbaar door abrupte afname in de piektemperatuur, zie Figuur 2-21. Het tijdstip waarop dit gebeurt komt goed overeen met de pipe-ontwikkeling volgend uit de WSM-data.



Figuur 2-21: Visualisatie van de maximale temperaturen tijdens opwarmcurves voor locaties C6 op een diepte van NAP +0.5 m voor het experiment (links, paneel A) en tijdens het experiment (rechts, paneel B). Duidelijk te zien is de afname van de maximale temperatuur van 1 °C bij de rode pijl.

2.6.3 Conclusies glasvezel temperatuurmetingen

Het optreden van piping kan door temperatuurmetingen worden aangetoond, al is deze toepassing nog in ontwikkeling. Een aantal conclusies zijn:

- Uit de AH-DTS maximale temperaturen is voor locatie C6 de pipe te detecteren, dit is op een afstand van ca. 15 cm van de pipe.
- Het vereist een erg dicht netwerk om de pipe-route goed te kunnen vervolgen.

2.7 Infraroodmetingen

Tijdens de proef zijn infraroodmetingen uitgevoerd bij de uittredesloten. Deze metingen zijn gebruikt om wellen in de uittredesloten te detecteren en te controleren op eventuele lekkages in de directe omgeving.

De infraroodbeelden zijn in overeenstemming met de visuele waarnemingen tijdens de proef waarbij de wellocaties duidelijk herkenbaar zijn. Afhankelijk van de temperatuur van het water in de uittredesloot is warmer of kouder uittredend water uit de wel duidelijk zichtbaar. Bij gelijke temperaturen is er geen contrast en is de IR-data op dat moment niet bruikbaar.

Op basis van de infraroodmetingen zijn geen waterstromen / lekkages waargenomen buiten de uittredesloten. Omdat de infraroodmetingen vooralsnog geen informatie geven over het pipingproces zelf, zijn de resultaten verder niet nader geanalyseerd binnen dit project.

3. Stromingsanalyse: modelfit

Voor de uiteindelijke pipinganalyse is het belangrijk om de ondergrond goed te kennen. Daarom zijn grondwaterstromingsberekeningen uitgevoerd om vast te stellen voor welke opbouw van de ondergrond en doorlatendheid de beste fit wordt verkregen met de gemeten waterspanningen en debieten. Uitgangspunt vormde de meerlaagse en anisotrope doorlatendheidsvariatie van het getijdenzand zoals bepaald op basis van HPT-AMPT® onderzoek uitgevoerd voorafgaand en na de proefuitvoering.

In onderstaande paragrafen is kort ingegaan op de meetdata waar het stromingsmodel op is gefit en de uitkomsten van de stromingsanalyses zelf. Berekeningen en achtergronden zijn nader toegelicht in het achtergrondrapport in Appendix F.

3.1 Debieten en waterdrukken

Het stromingsmodel is gefit op basis van de gemeten stijghoogten en debieten tijdens de pipingproeven. Hiervoor zijn per proef meetreeksen gebruikt van een relatief lange periode (6 uur voor vak Noord en 3 kwartier voor vak Zuid) waarin een stationaire toestand is bereikt voorafgaand aan pipevorming. Dit omdat een pipe de stijghoogte en daarmee grondwaterstroming sterk beïnvloedt.

In beide proefvakken is de stijghoogte op een groot aantal locaties en op verschillende diepten gemeten. Per meetraai heeft een kwaliteitstoets plaatsgevonden (zie Factual Report; 1220-164143.R04 d.d. 25-3-2022) en zijn op basis van de geselecteerde waterspanningsmeters gemiddelde waarden afgeleid en vergeleken met het berekende stijghoogteverloop uit het stromingsmodel.

Naast een fit op de gemeten stijghoogten is nagaan welke scenario's het best aansluiten bij de gemeten debieten. De infiltratiedebieten zijn op twee verschillende manieren bepaald, namelijk op basis van 1) gecorrigeerde debietmeterdata en 2) op basis van het stijghoogteverloop in de infiltratiebuizen. Doordat het getijdenzand aan alle kanten was ingesloten door de gesloten damwandkuip, onderliggend meter-dikke veenlaag en proefterp met kleibasis bovenop is aangenomen dat het geïnfiltreerde water enkel via de uittredesloot kon uitstromen. Direct buiten de proefvakken is ook geen verhoging van de stijghoogtes gemeten.

De berekende debieten kennen een relatief grote onzekerheid door een geïmproviseerde correctie, omdat de opstelling van de debietmeters leidde tot een overschatting van het debiet. Terugstromend water richting de watercontainer werd namelijk niet meegenomen in de metingen. Beide methoden komen, voorafgaand aan het moment van pipegroei, redelijk met elkaar overeen (zie Tabel 3.1). Vanaf het moment dat de pipe horizontaal begon te groeien wordt het verschil groter waarbij de methode op basis van de infiltratiebuizen een onderschatting van het ingaande debiet lijkt te geven (verschil > 5 L/min). De gecorrigeerde debietmeterdata lijkt vanaf het moment van horizontale pipegroei een beter beeld te geven dat ook aansluit bij de handwaarnemingen van het uitgaande debiet.

Zie het Factual report (1220-164143.R04 d.d. 25-3-2022) voor een gedetailleerde beschouwing van de debietregistratie. In 1220-164143.M28 d.d. 14-6-2022 (Appendix G) is ingegaan op de debietbepaling op basis van de infiltratiebuizen en een eerste inschatting van de bulkdoorlatendheid van het zandpakket op basis van een geïdealiseerde aanpak op basis van Darcy.

Tabel 3.1: Debietbepaling voorafgaand aan moment horizontale pipegroei.

Proef	Tijdperiode	Debiet infiltratiebuizen [L/min]	Debiet debietmeters [L/min]
Noord	14-09-2021 00:00 – 14-09-2021 06:00	2,34	3,37
Zuid	06-09-2021 11:00 – 06-09-2021 11:45	4,65	4,83

Verklaring van het relatief grote verschil in debiet tussen het noordelijke en zuidelijke proefvak wordt gevonden in 1) het dikkere watervoerend pakket, 2) relatief minder silt- en kleilaagjes in de top van het zandpakket en 3) het grotere aantal wellen in de uittredesloot van het zuidelijke proefvak.

3.2 Stromingsanalyse

De stromingsanalyses zijn uitgevoerd in DgFlow en PLAXIS, beide modellen geven vergelijkbare resultaten. Vanwege de proefopzet met een viertal infiltratiebuizen en een uittredesloot die niet over de gehele breedte aanwezig was, zijn zowel 2D als 3D analyses uitgevoerd. 3D berekeningen zijn uitgevoerd om vast te stellen of een 2D berekening volstaat voor de analyse van doorlatendheid, gegeven de vier infiltratiekolommen en de sloot die niet over de gehele breedte aanwezig is, die voor 3D effecten zouden kunnen zorgen. Uit de analyse blijkt dat de 2D grondwaterstromingsberekeningen een vergelijkbaar stijghoogteverloop geven als de 3D berekeningen voor de situatie voorafgaand aan pipevorming (zie analyses in Appendix F) en zijn dus een goed uitgangspunt voor de scenario-analyse waarmee een modelfit is gemaakt. Met behulp van de 3D berekeningen is er een effectieve breedte bepaald op basis waarvan de berekende debieten uit de 2D analyses kunnen worden gecorrigeerd voor 3D effecten. Op basis van deze correctie zijn de 2D berekeningen ook gebruikt om de beste fit op de gemeten debieten te beoordelen.

Een uitgebreide beschrijving van de 2D berekeningen die gemaakt zijn om de doorlatendheid van de ondergrond te bepalen is eveneens gegeven in Appendix F. Voor zowel proef Noord als proef Zuid is een moment gekozen waarvoor de data gefit is. Om tijdsafhankelijke effecten buiten beschouwing te laten is het noodzakelijk om de analyse uit te voeren op een lange, constante en stabiele meetreeks. Daarnaast is het van belang dat er nog geen piping is opgetreden, omdat piping de waterspanningen en stroming sterk beïnvloedt.

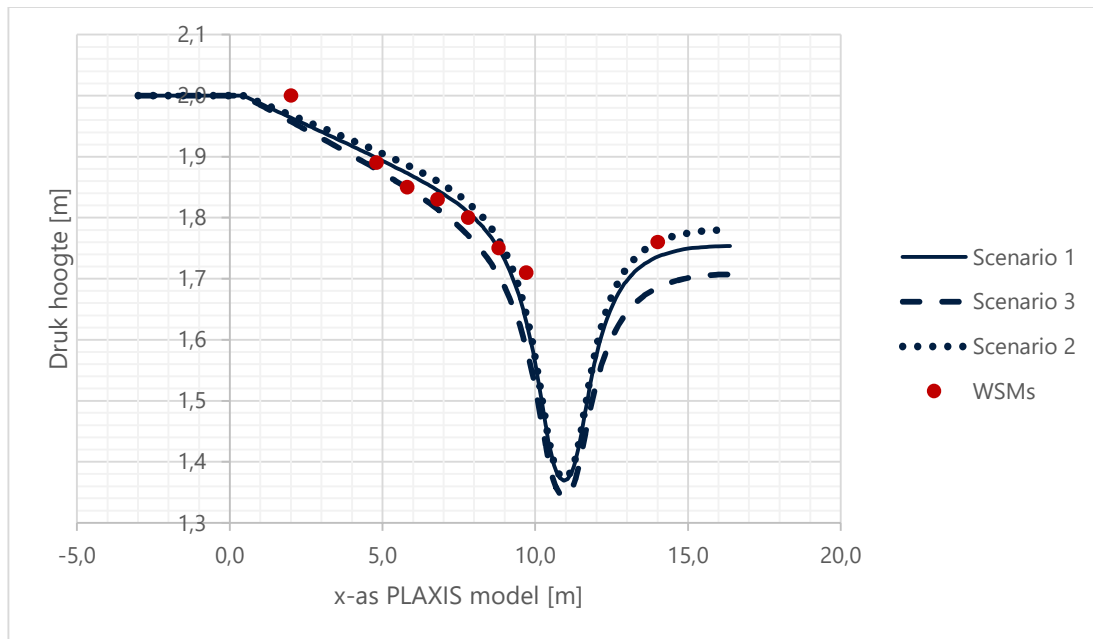
Voor proef Noord is gekozen voor de nacht tussen de eerste en tweede proefdagen (14-09-2021 00:00 tot 14-09-2021 06:00), waarin de waterstand constant is gehouden voor meerdere uren zonder dat er horizontale pipegroei is waargenomen. Voorafgaand aan deze meetreeks waren er al wel kleine en ondiepe zandmeevoerende wellen in de uittredesloot waargenomen als gevolg van het verticaal groeien van de pipe.

Het effect van deze wellen op het stromingsbeeld is onderzocht. In het zuidelijke proefvak is geen nachtreeks beschikbaar, omdat in de eerste nacht al horizontale piping is opgetreden. Om toch de doorlatendheid in het zuidelijke proefvak te analyseren is een relatief stabiele meetreeks van tijdens de ophoogstappen in de ochtend gebruikt. Deze meetreeks loopt van 11:00 tot 11:45. De stijghoogtemetingen zijn gemiddeld over de tijdsperiode en per raai, waarbij de minder goed reagerende opnemers zijn verwijderd uit de dataset. Voor het debiet is het gemiddelde genomen over de tijdreeks en is uitgegaan van de waarde afgeleid uit de infiltratiebuizen. Voorafgaand aan de pipegroei komen debietmeterdata en infiltratiebuisdata vrij goed overeen. De verschillen hebben vooral effect op de bepaling van de slootbodendoorlatendheid, die vrijwel geen invloed heeft op het kritiek verval.

De meerlaagse en anisotrope bodemopbouw bepaald op basis van het HPT-AMPT[®] onderzoek uit fase 2 (proefontwerp) en 3 (proefuitvoering/CSI), zijn als startpunt gebruikt voor de modellering. In de modellering zijn verschillende scenario's doorgerekend waarin de doorlatendheid binnen een bandbreedte van relatief hoge en lage doorlatendheid incl. een best guess schatting is gevarieerd. De mate van anisotropie in doorlatendheid is voor de verschillende getijdenzandlagen is constant gehouden ($A = 3,5[-]$). Als gevolg van het verticale pipingproces in de laag direct onder de uittredesloot is hier lokaal de anisotropiefactor wel gevarieerd.

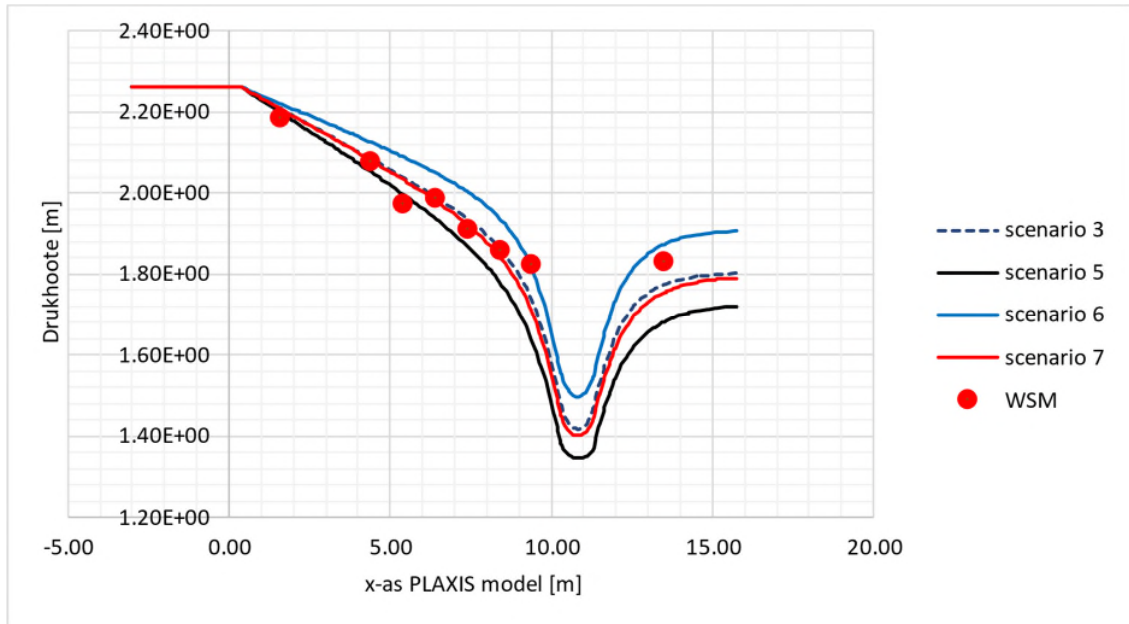
Een extra variabele is de doorlatendheid van de laag direct onder de sloot: hier de slootbodem genoemd. Omdat de slootbodem mogelijk beïnvloed is door de aanwezigheid van de wellen, heeft deze niet meer dezelfde doorlatendheid als de toplaag (laag 0), waar de slootbodem deel van uitmaakt. Door de relatief grote weerstand ten opzichte van de dieper gelegen zandlagen heeft deze laag incl. slootbodem veel invloed op de stijghoogte en het debiet voorafgaand aan pipevorming.

De beste fit is op basis van vergelijk tussen gemeten en berekende stijghoogte en debiet gekozen. Op basis van de combinatie van stijghoogte en debiet (gemeten debiet is 2,34 L/min) lijkt voor proefvak Noord het scenario met een relatief hoge doorlatendheid (scenario 3) voor de zandlagen (berekend debiet 2,3 L/min) het beste overeen te komen met de proefdata (Figuur 3-1). De scenario's met de meest waarschijnlijke doorlatendheid (scenario 1) en minimum doorlatendheid (scenario 2) leiden tot een vergelijkbaar stijghoogteverloop, maar afwijkend debiet (resp. 1,7 en 1,1 L/min). Een twee keer zo hoge doorlatendheid van de slootbodem leidt ook niet tot veel afwijking in de stijghoogte, maar wel tot een hoger debiet, waardoor de fit uit scenario 3, met hoge doorlatendheid van het zandpakket en intacte slootbodem, de beste fit oplevert. Het is echter mogelijk dat door verdere optimalisatie en door meer te variëren met de doorlatendheden en anisotropie in de lagen een andere goede fit gevonden wordt. Op basis van het debiet en de observaties met beperkte welvorming is een relatief hoge bulkdoorlatendheid i.c.m. slootbodendoorlatendheid gelijk aan die van laag 0 wel aannemelijk.



Figuur 3-1: Drukhoogtes scenario 1, 2 & 3 (resp. best guess, minimum en maximum doorlatendheid). Doorsnede op NAP +0,9 m, de diepte van de meeste WSMs. De gemiddelde stijghoogte achter de sloot lijkt minder goed aan te sluiten omdat de WSMs hier op een dieper niveau zijn geïnstalleerd. De waterstand in de infiltratiebuizen bedroeg tijdens de gekozen meetreeks ca. NAP +2,0 m.

Voor proef Zuid was het gemeten debiet 4,65 L/min. Voor deze proef geven de basisscenario's met de meeste waarschijnlijke en hoge doorlatendheid i.c.m. intacte slootbodem een te laag debiet. Gezien het hoge gemeten debiet lijkt het scenario met de hoge doorlatendheid wel het meest aannemelijk. In deze proef was tijdens de geselecteerde meetreeks de slootbodem niet meer intact. Er zijn daarom variaties met meer doorlatende slootbodem doorgerekend (zie Figuur 3-2), waarbij scenario 3 (met licht vergrootte slootbodemdoorlatendheid) en 7 (hoge slootbodemdoorlatendheid) een goede fit op de gemeten stijghoogten geven. De uitstroomdebieten van scenario's 3 en 7 verschillen van elkaar (respectievelijk 3,6 L/min en 4,6 L/min). Op basis van de combinatie van debiet en stijghoogte komt scenario 7 het best overeen met de observaties tijdens de proef. Scenario 7 is het scenario met een verminderde slootweerstand ($K_v = 0,5$ m/d, in plaats van 0,14 m/d voor een intacte slootbodem) en relatief hoge waarden voor de doorlatendheid van de getijdenzandlagen.



Figuur 3-2: Drukhoogtes voor verschillende scenario's: scenario 3: best guess doorlatendheid i.c.m. intacte slootbodern, scenario 5,6, 7: Gevoeligheid slootbodern bij maximum ondergronddoorlatendheid en variërende slootbodern (scenario 5: kv 1 m/d, scenario 6: kv 0,2 m/d, scenario 7: kv 0,5 m/d).

Tabel 3.2 en Tabel 3.3 geven de meest waarschijnlijke laagopbouw (scenario 3 voor vak Noord en scenario 7 voor vak Zuid) en doorlatendheid op basis van de modelfit voor beide proeven. De beste fit voor de doorlatendheid is dus verkregen voor de variaties met maximale doorlatendheid voor het watervoerend pakket voor zowel proefvak Noord als vak Zuid en daarbij een verhoogde doorlatendheid voor de slootbodern voor vak Zuid. De verhoogde doorlatendheid voor de slootbodern, waarschijnlijk veroorzaakt door het grotere aantal en dieper gelegen wellen en de meer zandige slootbodern, verklaart het hogere debiet en de lagere stijghoogten in deze proef. De doorlatendheid van de slootbodern is voor de (horizontale) pipinganalyse overigens van ondergeschikt belang. De weerstand in dit verticale deel van het uittredepunt is wel meegenomen in de pipinganalyse.

Tabel 3.2: Laagopbouw Noord- en Zuidproef.

Laag	Proefvak Noord			Proefvak Zuid		
	Top [m NAP]	Onderkant [m NAP]	Dikte [m]	Top [m NAP]	Onderkant [m NAP]	Dikte [m]
getijdenzand laag 0	1,1	0,5	0,8	1,1	0,55	0,75
getijdenzand laag 1	0,5	-0,7	1,2	0,55	-0,7	1,25
getijdenzand laag 2	-0,7	-1,8	1,2	-0,7	-1,9	1,2
getijdenzand laag 3	-1,8	-2,7	0,8	-1,9	-3,0	0,8

Tabel 3.3: Eigenschappen van de verschillende lagen op basis van modelfit met proefdata (Kh: horizontale doorlatendheid; A: anisotropie in doorlatendheid (Kh / Kv).

	Kh max [m/d]	A
getijdenzand laag 0	0,6	3,5
getijdenzand laag 1	2,5	3,5
getijdenzand laag 2	4,5	3,5
getijdenzand laag 3	3,6	3,5
Slootbodem Z*	0,7	1,4
*Slootbodem Noord is gelijk aan laag 0.		

4. Pipinganalyses

Tijdens de grootschalige pipingproeven in de Hedwigepolder heeft terugschrijdende erosie plaatsgevonden, waarbij een erosiepipe in het getijdenzand is gevormd. De proefopstelling is ontworpen met een uittredesloot die insnijdt tot de top van het pipinggevoelige zandpakket waardoor de deelmechanismen opbarsten en heave geen rol zouden spelen. Tijdens de proefuitvoering bleek dat zich toch eerst een verticaal uittredekanaal ontwikkelde waarna de pipe, op een dieper niveau, horizontaal verder groeide richting de infiltratiebuizen. In zowel proefvak Noord als Zuid is de slootbodem aangelegd op NAP +1,1 m, de horizontale pipe lag op een niveau tussen NAP +0,45 en +0,6 m. Ter plaatse van het uittredepunt lag het pipeniveau gemiddeld op ca. NAP +0,55 m in beide proefvakken, dit is 0,55 m onder de slootbodem. Vanwege dit gegeven en de observaties in het zuidelijke proefvak, waarbij de slootbodem deels leek te worden opgedrukt, zijn analyses uitgevoerd naar de mate van opdrijven/-barsten, heave en verticale piping. De belangrijkste resultaten met betrekking tot deze deelmechanismen zijn in §4.1 gegeven. §4.2 gaat in op het horizontale proces van terugschrijdende erosie op basis waarvan een extra sterktefactor is afgeleid. Voor een gedetailleerde beschrijving van het proefverloop en de ligging van de pipes wordt verwezen naar het Factual Report (1220-164143.R04 d.d. 25-3-2022).

4.1 Opbarsten, heave en verticale piping

De analyses en berekeningen naar de deelmechanismen opbarsten, heave en verticale piping zijn opgenomen in de Appendix H. Onderstaand zijn de belangrijkste conclusies gegeven.

Hoewel overwegend zandig in samenstelling werd de bodem onder de uittredesloot van het zuidelijke proefvak opgedrukt tijdens de proefbelasting. Wanneer de grond tussen slootbodem en horizontaal pipeniveau als deklaag wordt beschouwd is aangetoond dat opdrijven en gedeeltelijk opbarsten van deze grond, voorafgaand aan de vervolgprocessen (heave, verticale piping en terugschrijdende erosie), aannemelijk is. Een eventuele verstoring in de deklaag als gevolg van het opdrijven of lokaal opbarsten kan, boven op de inherente heterogeniteit van de grond, hebben bijgedragen aan een geconcentreerde uitstroom van water op de waargenomen wellocaties.

Bij het ontstaan van de zandmeevoerende wellen tijdens de proefbelasting was de stijghoogtegradiënt over de deklaag voldoende om een heavesituatie te creëren waarbij korrelspanningen wegvallen. De grond fluidiseert (lokaal) en het stromende water zorgt voor verdergaande verticale piping. Het mechanisme verticale piping is op een theoretische wijze benaderd op basis van de vergelijking van Stokes waaruit bleek dat de stroomsnelheid van het grondwater groter was dan de bezinksnelheid van de geïdealiseerde bolvormige zandkorrels. Analyse van de korrelverdelingen van het afgeschepte zandmateriaal op de wellocaties tonen aan dat er sprake is geweest van verticale piping, waarbij het erosiefront zich in de verticaal, naar beneden gericht ontwikkelde. De korrelverdelingen laten namelijk een geleidelijke afname in fijne fractie gezien, gelijk met de opbouw van de toplaag van het getijdenzand die ook steeds iets minder fines bevat over de diepte (zie ook §2.2.1).

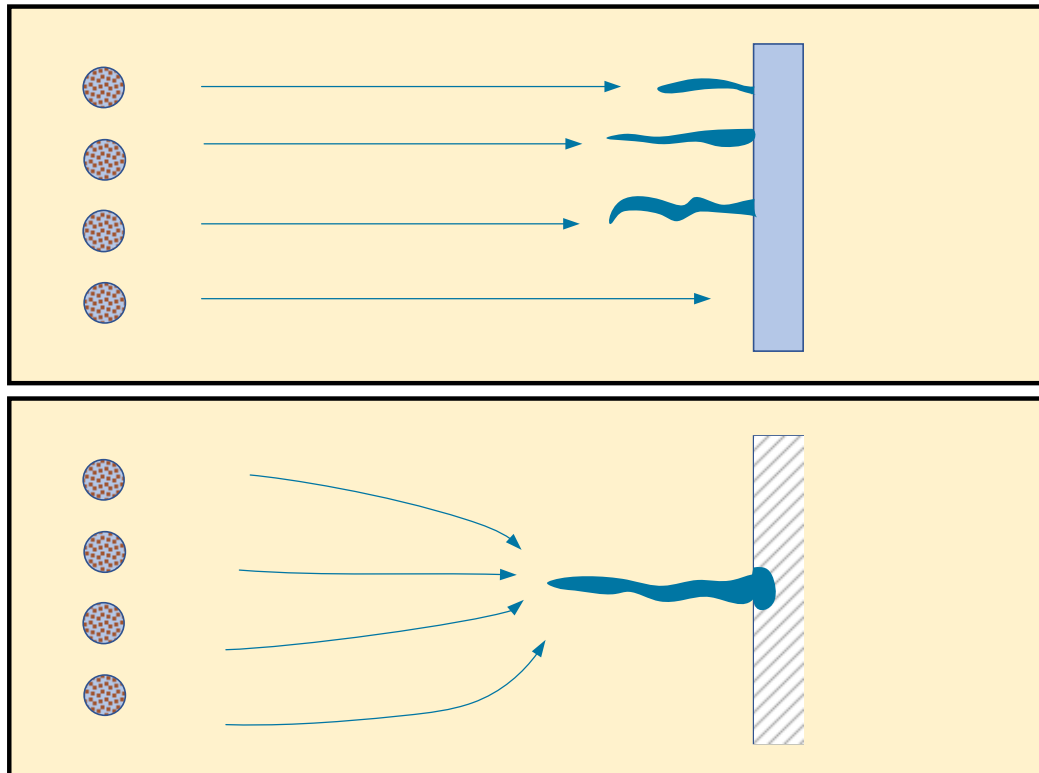
Het is daarom niet aannemelijk dat dieper gelegen zand, gelegen op het horizontale pipeniveau, zich direct via een opbarstkanaal heeft afgezet op de wellocaties.

Verder volgt uit de analyses naar opbarsten, heave en verticale piping dat de belasting voor het optreden van deze deelmechanismen lager is dan die voor terugschrijdende, horizontale pipegroei. Van een 'overshoot', waarbij de belasting voor bovengenoemde initiële mechanisme groter is dan die voor horizontale pipegroei, is geen sprake. Dit volgt eveneens uit het proefverloop waarbij de (horizontale) pipegroei bij een belasting lager dan het kritiek verval stagneerde. Het kritiek verval voor dit laatste mechanisme is bepaald op ca. 2,4-2,5 m, terwijl de grenspotential, kritieke heavegradiënt en de geconcentreerde stromingsbelasting voor verticale piping eerder is bereikt.

4.2 Terugschrijdende (horizontale) erosie

In hoofdstuk 3 is op basis van een grondwaterstromingsanalyse vastgesteld welk scenario qua doorlatendheidsvariatie binnen het getijdenzandpakket het meest waarschijnlijk is. Op basis van deze resultaten is met behulp van DgFlow een pipinganalyse uitgevoerd met het model van Sellmeijer. Hiervoor zijn zowel 2D berekeningen als 3D berekeningen uitgevoerd. Daarnaast zijn ook berekeningen met de rekenregel van Sellmeijer uitgevoerd, waarbij meerlaagsheid en anisotropie uiteraard niet kunnen worden meegenomen. Achtergronden bij de pipinganalyses zijn beschreven in Appendix F.

De proef is ontworpen met een 2D configuratie, met uitstroming van water over de gehele breedte van de sloot (zie Figuur 4-1, boven). Onderzoek heeft aangetoond dat het 2D Sellmeijer model goede predicties voor het kritiek verval geeft voor proeven met een 2D uitstroom (Van Beek et al., 2022). Tijdens uitvoering van de proef is echter gebleken dat dat pipe op een dieper (circa 0,5 m dieper) niveau ontwikkelde dan initieel gedacht. Een verticale pipe is ontstaan door de slootbodem heen totdat de pipinggevoelige laag is bereikt. Hierdoor is de uitstroming geconcentreerd naar enkele uitstroompunten en was van 2D uitstroming door de sloot geen sprake meer. Er is daardoor toch een 3D situatie ontstaan (zie Figuur 4-1, onder). Het 2D Sellmeijer model kan het kritiek verval in deze situatie niet goed voorspellen. Onderzoek heeft aangetoond dat het kritiek verval ongeveer een factor 2 lager is dan het model van Sellmeijer voorspelt in experimenten met een 3D configuratie waarin de uitstroom gesloten is, met uitzondering van een enkel gat (Van Beek et al., 2015). Het is onduidelijk hoe deze factor extrapoleert naar de praktijk of naar situaties waarin de deklaag niet volledig afsluit. Daarom zijn er, naast de reguliere 2D Sellmeijer berekeningen, ook 3D berekeningen uitgevoerd om het effect van een gedeeltelijk doorlatende slootbodem op het stromingspatroon en het kritiek verval te begrijpen.



Figuur 4-1: Oorspronkelijk ontwerp (boven), uitgaande van een pipe-patroon en 2D uitstroom, resulterend in een situatie waarvoor het Sellmeijer model is ontwikkeld en situatie tijdens de proeven (onder), met een enkele pipe en belemmerde uitstroom door de sloot, door de verdiepte pipe-ligging.

Onderstaande tabel geeft de sterktefactoren voor beide proefvakken op basis van de berekende (op basis van 2D model) en gemeten kritieke vervallen, voor het scenario, met doorlatendheden voor de verschillende lagen in de ondergrond, die op basis van de stromingsanalyse het meest waarschijnlijk wordt geacht. Hierbij is uitgegaan van de hoge doorlatendheden, waarvoor de beste fit was bereikt op basis van de velddata. De berekende kritieke vervallen met de Sellmeijer regel zijn terug te vinden in Appendix F. Doordat hierin meerlaagsheid en anisotropie niet kan worden meegenomen en wordt uitgegaan van een horizontaal instroomvlak, geeft de regel een minder accurate waarde voor het kritiek verval en is daarom niet toegepast voor de bepaling van de sterktefactor.

Er is een netto kritiek verval ($H_{c, \text{netto proef}}$) bepaald door rekening te houden met een drukval in het uittredekanal (de gemeten gradiënt was ca. 0,25 in de Noordproef). Hieruit volgt een sterktefactor van gemiddeld 1,4 [-]. Zoals hieronder wordt toegelicht kan deze waarde als een ondergrens beschouwd worden als gevolg van de 3D configuratie van de proef waarin de belasting groter is dan berekend op basis van het 2D pipingmodel.

Tabel 4.1: Overzicht berekende en gemeten kritieke vervallen en sterktefactoren.

Proefvak	$\Delta H_{c, \text{proef}}$ [m]	$H_{c, \text{netto proef}} (\Delta H_{c-0,25d})$ [m]	$H_{c, \text{model}}$ [m] -2D DgFlow	Sterktefactor [-] (ondergrens)
Noord	2,5	2,35	1,65	1,42
Zuid	2,4	2,26	1,65	1,37

Om grip te krijgen op het effect van een 3D configuratie in de Hedwigeproeven zijn, naast de reguliere 2D Sellmeijer berekeningen, ook 3D berekeningen uitgevoerd om het effect van een gedeeltelijk doorlatende slootbodembodem (zoals aanwezig in de proeven) op het stromingspatroon en kritiek verval te begrijpen. De 3D analyses wijzen uit dat de slootbodembodemdoorlatendheid vrijwel geen invloed heeft gehad op het kritiek verval. De configuratie is desondanks wel van belang, doordat ten gevolge van de minder doorlatende slootbodembodem slechts één pipe vormde. Op basis van de analyses wordt geconcludeerd dat de situatie bij de proef sterk vergelijkbaar is met een volledige 3D situatie, dit heeft met name te maken met het ontwikkelen van één dominante, relatief lange pipe waardoor de uitstroombodemconfiguratie (open, gesloten) het kritiek verval slechts beperkt beïnvloedt. In Appendix F is dit aspect uitgebreid toegelicht.

Het 3D effect wordt dus voornamelijk veroorzaakt door de vorming van een enkele pipe. Om een idee te krijgen hoe het kritiek verval beïnvloed zou kunnen worden door een patroon van pipes, waarvoor het 2D Sellmeijer model wel geldig is, zijn berekeningen uitgevoerd met een kleinere modelbreedte. De kleinere breedte simuleert de situatie voor een enkele pipe (gesimuleerd als lijn) waarbij de stroming in het zandpakket is verdeeld over meerdere pipes. Voor een model met halve breedte van 0,20 m, representatief voor een proef met pipepatroon met afstand tussen de pipes van ca. 0.40 m, blijkt het kritiek verval een factor 1,8 hoger dan voor de ontwikkeling van een enkele pipe (Figuur 4-2). Ter vergelijking, in de Deltagootproeven is de afstand tussen de pipes ca. 0,20 – 0,50 m. De factor van 1,8 ligt in dezelfde orde grootte als de factor van ca. 2 die gevonden werd door Van Beek et al. (2015) waarbij het verschil tussen kritieke vervallen op basis van de 2D regel en 3D proeven met uniform zand is beschouwd.



Figuur 4-2: Effect van toestroomgebied naar de pipe op het kritiek verval: bij een halve modelbreedte van 6,5 m is het model volledig 3D, een halve modelbreedte van 0,2 m simuleert een pipe patroon met pipes op afstand van 0,40 m van elkaar.

Hoewel in een situatie met 3D grondwaterstroming het kritiek verval met het 2D Sellmeijer model nog steeds niet goed te voorspellen is, zou toepassing van de 3D-factor van 2 voor de Hedwigeproeven resulteren in een sterktefactor rond 2,8 [-]. Hieruit volgt wel dat het vigerende 2D Sellmeijer model geschikt is voor situaties met een 2D uitstroom én een korte kritieke pipelengte en/of wanneer er sprake is van een patroon van pipes. In situaties waarin sprake is van een concentratie van stroming naar een enkel uittredepunt of pipe is de belasting hoger en wordt het kritiek verval op basis van het 2D Sellmeijer model onderschat. Welke factor gehanteerd zou moeten worden voor het 3D effect in veldsituaties, in dit geval met name veroorzaakt door het ontstaan van een enkele pipe en in mindere mate door de afstroming naar de sloot, is nog onduidelijk. De berekende sterktefactor van gemiddeld 1,4 op basis van de grootschalige proeven in de Hedwigepolder, waarbij feitelijk sprake bleek te zijn van een volledig 3D configuratie, vormt dan ook de ondergrens.

5. Aanpak eerder gesignaleerde aandachtspunten

In het Factual Report van de grootschalige proeven (1220-164143.R04 d.d. 25-3-2022) is, naar aanleiding van het proefverloop, een overzicht van aandachtspunten voor de analyses gegeven. Dit overzicht van aandachtspunten en de wijze waarop deze zijn meegenomen in de analyses is onderstaand gegeven.

Tabel 5.1: Overzicht aandachtspunten na proefuitvoering en wijze van adressering in analysefase

Aandachtspunt (uit Factual Report)	Aanpak in analyses
<p>1. Er is sprake geweest van een 2-fasen pipingproces met eerst de ontwikkeling van een verticaal uittredekanaal tot op ca. 0,5 m onder het verwachte pipingniveau en daarna horizontale pipegroei. Het uittredekanaal is daardoor ook ca. 0,5 m diep en er dient rekening te worden gehouden met een drukval in dit kanaal.</p>	<p>In de pipinganalyses is een netto kritiek verval berekend door rekening te houden met de gemeten drukval in het opbarstkanaal (0,25d, zoals gemeten in het veld).</p>
<p>2. Het proefontwerp had tot doel om een nagenoeg uniforme 2D grondwaterstroming te verkrijgen van infiltratiebuizen naar de uittredesloot, zonder concentratie van stroming en daardoor verhoogde belasting door 3D stromingseffecten. Door het ontstaan van een verticaal uittredekanaal is dit ontwerpuitgangspunt niet langer valide: er zal meer water radiaal zijn toegestroomd naar het uittredekanaal. Dit heeft veel invloed op de grondwaterstroming en de gradiënten rondom de pipe en is een belangrijk punt van aandacht tijdens de analyse.</p>	<p>3D effecten zijn uitvoerig onderzocht in de modelstudies. De doorlatendheid van de slootbodem speelt daarbij een ondergeschikte rol. Vanwege de ontwikkeling van één dominante pipe is sprake van een nagenoeg volledige 3D configuratie dat voor een hogere belasting op de pipe heeft gezorgd tijdens de proeven. Bij het vergelijken met de 2D rekenregel is hiervoor niet gecorrigeerd. Dergelijke 3D configuraties zijn in de praktijk goed mogelijk, bijvoorbeeld ook bij kopsloten of lokale zwakke plekken in de deklaag. De afgeleide sterktefactoren vormen dan ook de ondergrens. Vertaald naar 2D situatie nemen de sterktefactoren, op basis van experimenten op lab-schaal, ca. met een factor 2 toe. De geadviseerde sterktefactor (in op te stellen Handreiking) verdisconteert eventuele 3D effecten die in het veld aanwezig kunnen zijn niet. De beheerder dient alert te zijn op 3D effecten die voor een toename van de belasting op de pipe kunnen zorgen.</p>
<p>3. Hoewel in beide proefvakken het maximale verval waarbij doorgaande pipegroei optrad overeenkomt (2,4 / 2,5 m) dient het definitieve kritieke verval nog vastgesteld te worden. Bij de bepaling van het kritiek verval moet er rekening mee worden gehouden dat de pipe op een dieper niveau horizontaal is gaan groeien. De volgende zaken zijn daarbij relevant:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Heave (drukval) in verticaal uittredekanaal; b) 3D stromingseffecten richting de pipe; c) Geringere effectieve dikte zandpakket dat bijdraagt aan de belasting; d) Gewijzigde doorlatendheidsconfiguratie van het getijdenezandpakket met slechter doorlatend pakket boven pipeniveau; e) Aandacht voor welk doorlatendheidscontrast relevant is voor het grensvlak waarlangs de pipe gaat groeien; 	<p>Ad a) en b) Zie bovenstaand.</p> <p>Ad c) Dit is per proefvak meegenomen in de ondergrondschematisatie.</p> <p>Ad d) Dit houdt verband met het voorgaande punt waarbij de meerlaagse doorlatendheidsvariatie opnieuw is bepaald door een fit van stromingsmodellen op de gemeten waterdrukken en debieten tijdens de proef.</p> <p>Ad e) Niveau van de pipe komt goed overeen met de top van het traject waarin de conusweerstand en doorlatendheid toenemen. In het vooronderzoek was hier geen HPT-(A)MPT data van beschikbaar vanwege de relatief lage grondwaterstand (onder pipeniveau). HPT resultaten van direct na de proefuitvoering, bij verzadigd pakket laten toename rond/onder pipeniveau zien (zie ook Factual Report).</p> <p>Ad f) Deelmechanismen opbarsten, heave en verticale piping zijn beschouwd. Er is geen indicatie dat er een 'overshoot'-situatie is opgetreden waarbij de</p>

Aandachtspunt (uit Factual Report)	Aanpak in analyses
<p>f) 2-fasen pipingproces met in proefvak Zuid geen evenwicht in pipegroei (progressieve pipegroei);</p> <p>g) Mogelijk effect van drainagebuizen op pipegroei. In proefvak Zuid lagen deze drains in het pakket boven pipeniveau en hebben zij geen invloed gehad op het pipingproces. In proefvak Noord is vastgesteld dat de pipe onder minimaal 1 drainagebuis incl. omliggende verharde ijzerconcreties moest groeien. Mogelijk houdt dit verband met de geobserveerde stagnatie in pipegroei waarna het verval is verhoogd.</p> <p>h) Verschil in debieten tussen beide proefvakken.</p>	<p>benodigde belasting voor de initiërende mechanismen groter zou zijn geweest dan voor horizontale pipegroei. De proef in vak Zuid is gestaakt nadat de pipe de achterste rij WSMs (ca. 6,5 m afstand van sloot) heeft bereikt. Een evenwicht in pipegroei wordt na dat moment niet meer verwacht gezien de positie van de pipe (al over de helft van de afstand tussen sloot en infiltratiebuizen) en de nagenoeg constante groeisnelheid van de pipe over de tijd.</p> <p>Ad g) De drainagebuis in proefvak Noord is op relatief grote afstand van de uitredesloot gelegen, achter monitoringsvak C. De pipe heeft al een afstand van 10,55 m afgelegd. Moment van kritiek verval is bereikt voordat de pipe bij de drainagebuis is aangekomen. Op de laatste proefdag is het verval verder opgevoerd om kortsluiting van de pipe met de infiltratiebuizen te forceren.</p> <p>Ad h) Het debiet in proefvak Zuid lag aanmerkelijk hoger dan in proefvak Noord. Via het stromingsmodel en ondergrondschematisatie is dit meegenomen. Oorzaken voor het verschil in debiet worden gevonden in 1) het dikkere watervoerend pakket, 2) relatief minder silt- en kleilaagjes in de top van het zandpakket en 3) het grotere aantal wellen in de uitredesloot van het zuidelijke proefvak.</p>
<p>4. Op basis van de waterspanningsmeters (WSM) kon de pipegroei goed worden gevolgd tijdens de proefuitvoering, hierbij dient rekening gehouden te worden de 'doofheid' van sommige WSM's. Voor detailanalyses is het goed te realiseren dat de meeste WSM's in vak C voor het volgen van de pipe, uiteindelijk ca. 0,3 m boven het daadwerkelijke pipeniveau zijn geplaatst. Mogelijk is dit van invloed op de bepaling van relevante parameters zoals de kritieke drukgradiënt tussen WSM-paren.</p>	<p>Op basis van een kwaliteitscontrole heeft er een selectie plaatsgevonden van waterspanningsmeters met een duidelijk, betrouwbaar signaal. Vanwege uiteenlopende redenen (te hoge plaatsing in bv. een stoorlaagje, lokale luchtinsluiting en eventuele beschadiging van de sensor bij installatie en/of proefuitvoering) kunnen WSMs een afwijkende waarde hebben gegeven. De uitgebreide monitoringsopzet en hoge kwaliteit metingen maakt dat enig uitval gemakkelijk was op te vangen. Drukverandering als gevolg van het groeien van de pipe was duidelijk herkenbaar.</p>
<p>5. Onnauwkeurigheid in de debietopnemers die aangesloten waren op de pompen (in en uit) hebben een alternatieve aanpak op basis van 1) handmatige metingen, 2) correcties d.m.v. een druksensor in de watercontainer en 3) analyse op basis van stijghoogtes in de infiltratiebuizen nodig gemaakt. Op basis van de beschreven aanpak is vervolgens een nauwkeurig beeld van de debieten verkregen.</p>	<p>Op basis van de metingen in de watercontainer is de debietmeterdata gecorrigeerd. Daarnaast is de waterstand in de infiltratiebuizen beschouwd om het instromende debiet te bepalen. Beide methoden komen, voorafgaand aan het moment van pipegroei, redelijk met elkaar overeen. Vanaf het moment dat de pipe horizontaal begon te groeien wordt het verschil groter waarbij de methode op basis van de infiltratiebuizen een onderschatting van het ingaande debiet lijkt te geven (verschil > 5 L/min). De gecorrigeerde debietmeterdata lijkt vanaf het moment van horizontale pipegroei een beter beeld te geven dat ook aansluit bij de handwaarnemingen van het uitgaande debiet. In de stromingsanalyse is gebruik gemaakt van de methoden op basis van de</p>

Aandachtspunt (uit Factual Report)	Aanpak in analyses
	waterstand in de infiltratiebuizen, omdat daar het moment voor pipegroei is beschouwd zou toepassing van de gecorrigeerde debietmeterdata niet tot significant andere resultaten leiden.
<p>6. In de analysefase zullen de doorlatendheden en anisotropie zoals bepaald op basis van het HPT-AMPT onderzoek uit het vooronderzoek en de CSI fase worden gevalideerd op basis van een modelfit op de gemeten waterdrukken en debieten afzonderlijk. Deze fit wordt voor zowel proefvak Noord als Zuid uitgevoerd. In afwachting van deze modelfit kan de meerlaagse en anisotrope bodemopbouw zoals gegeven in paragraaf 4.3 (Factual Report) worden gebruikt voor de eerste analyses.</p>	<p>HPT-(A)MPT resultaten (meerlaagse en anisotrope ondergrondschematisatie) zijn gebruikt als vertrekpunt bij de fit van het stromingsmodel met de gemeten waterdrukken en debieten. In de modellering zijn verschillende scenario's doorgerekend waarin de doorlatendheid binnen een bandbreedte van relatief hoge en lage doorlatendheid incl. een best guess schatting is varieerd. De resultaten van de modelfit zijn in lijn met de bandbreedtes volgend uit het HPT-(A)MPT onderzoek. De best guess inschattingen sluiten goed aan op de gemeten drukken, om ook aan te sluiten bij de relatief hoge debieten levert de schematisatie met relatief hoge doorlatendheden voor de verschillende lagen de beste fit op. Onzekerheden rondom debietmetingen en invloed van de slootbodembodem (laag direct onder de sloot) spelen hierbij ook een rol.</p>
<p>7. De pipes zijn in het zandige getijdenzand gegroeid zonder kleilaag als plafond. Het bovenliggende zandpakket had voldoende sterkte om als dak te dienen, waarschijnlijk door de relatief hoge fijne bijmenging. De invloed van de geoxideerde (wortel)zone is nog niet duidelijk, dit zal mogelijk voor enige cementatie in het pakket zorgen.</p>	<p>Uit de laboratoriumresultaten blijkt dat het dak van de pipe inderdaad een verhoogd percentage lutum bevat. Voldoende om net als klei te worden geclassificeerd en voldoende cohesief om de pipe niet te laten instorten of (significant) uit te schuren door langsstromend water. Pipeniveau is onder het niveau van de wortelzone gelegen. De kleilaag was echter dun (cm-schaal), met daarboven een afwisseling tussen silt/zand en kleilagen tot aan de dikkere kleilaag rond 1,1 m NAP.</p>
<p>8. De pipe in het veld heeft relatief forse dimensies (2-5 cm) tot aan het einde van de pipe. De pipe lijkt abrupt te stoppen. Dit in tegenstelling tot de literatuur waar veelal wordt gesproken over de aanwezigheid van kleine kanaaltjes tot aan de doorbraak.</p>	<p>In dit analyserapport niet nader beschouwd. Hier speelt mogelijk ook een schaaffect tussen veld en schaalproeven. De vorm van de pipe is mogelijk anders door erosie van het dak van de pipe. De erodeerbaarheid van de deklaag zou in de praktijk kunnen variëren, maar in de laboratoriumproeven is dergelijke erosie uiteraard niet mogelijk. Resultaten uit de Hedwigeproeven kunnen gebruikt worden in nader onderzoek naar het pipingproces in het algemeen.</p>
<p>9. Algemeen geldt dat in de postdicties de as-built situatie zoals beschreven in hoofdstuk 2 als basis gebruikt dient te worden voor het bepalen van proefopzet en -dimensies.</p>	<p>As-built situatie is overgenomen in de modellering en verdere analyses.</p>

6. Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

In de Hedwigepolder zijn twee grootschalige pipingproeven uitgevoerd om de weerstand van getijdenzand tegen piping te onderzoeken. Door onder andere de aanwezigheid van fijn materiaal biedt dit type zand meer weerstand tegen piping dan uniform zand zonder fijne fractie waarop de vigerende rekenregel is gebaseerd. Vergelijk van de proefresultaten met de uitkomsten van deze rekenregel geven een (extra) sterktefactor op het berekende kritiek verval waarbij progressieve, terugschrijdende erosie (piping) optreedt.

De uitvoering van de grootschalige in situ pipingproeven in de Hedwigepolder is succesvol verlopen. Het proefontwerp is robuust opgesteld, waarbij de leerpunten van de eerdere pipingproef langs de Vijfhuisterdijk zijn gebruikt. Hoewel het pipeniveau vooraf hoger in het zandpakket was ingeschat, deed de proefopstelling wat het moest doen: op een veilige en gecontroleerde wijze kon de belasting worden opgevoerd en piping is opgetreden. Op basis van het monitoringssysteem kon de proef nauwkeurig worden aangestuurd, kon de meetdata live en op afstand worden bekeken en was de pipegroei onder de proefdijk te volgen. De CSI is een waardevolle aanvulling gebleken om 1) pipegroei en ondergrond beter te kunnen onderzoeken en 2) predicties en meetdata te verifiëren en daarmee 3) de proefresultaten te kunnen duiden.

Onderstaande conclusies richten zich op de gevonden sterktefactor in beide proeven en geven daarnaast een overzicht van de overige inzichten op basis van de proefuitvoering en analyses.

6.1.1 Sterktefactor op basis van grootschalige pipingproeven

Pipinganalyses zijn uitgevoerd in DgFlow. In dit rekenmodel is de meerlaagse en anisotrope bodemopbouw, zoals in het veld bepaald en gevalideerd met stromingsmodellen met een fit op de gemeten waterdrukken en debiet tijdens de proef, meegenomen in de schematisatie.

Na correctie voor de gemeten weerstand in het opbarstkanaal is het gemeten kritiek verval uit de proeven vergeleken met het berekende kritiek verval uit de pipingsommen in DgFlow. DgFlow combineert een stromingsmodel om de belastingen te bepalen met het sterktemodel volgens het rekenmodel van Sellmeijer. Het kritiek verval zoals gevonden in de proeven lag, zoals verwacht, hoger dan het berekende kritiek verval. De vergelijking resulteert in een gemiddelde, minimale sterktefactor van 1,4 [-] op het berekende kritiek verval.

Hierbij worden de volgende zaken opgemerkt:

- De sterktefactor is bepaald op basis van proeven met een sterke 3D configuratie waarbij de grondwaterstroming radiaal naar één dominante pipe toestroomde. Deze configuratie zorgt voor een extra grote belasting op de pipe in vergelijking met een 2D configuratie waarvoor de rekenregel van Sellmeijer is afgeleid.

De sterktefactor van 1,4 kan dan ook als ondergrens voor 2D situaties worden beschouwd. Zie meer over dit aspect in de onderstaande aanbevelingen (§6.2.2).

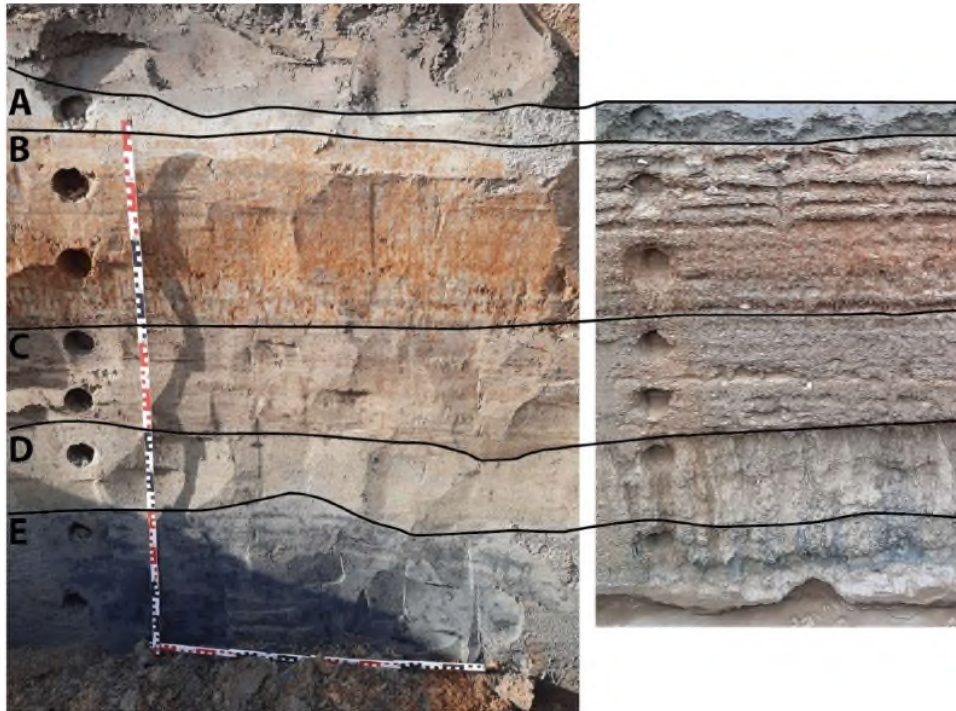
- De sterktefactor is aanvullend op het gunstige effect van de meerlaagse en anisotrope bodemopbouw van het getijdenzand. De lokale doorlatendheidsvariatie is gedetailleerd onderzocht op basis van de HPT-AMPT techniek en meegenomen in de DgFlow schematisatie. Getijdenzanden kenmerken zich door relatief grote doorlatendheidscontrasten tussen en binnen onderscheidende zandige lagen. Het meenemen van een meerlaagse en anisotrope bodemopbouw kan een forse aanvullende optimalisatie inhouden.
- De sterktefactor is aanvullend op het gunstige effect van het meenemen van tijdsafhankelijkheid. Met name in getijdengebieden met veelal storm-gedomineerde belasting en relatief grote stromingsweerstand in de ondergrond kunnen tijdsafhankelijke analyses een forse optimalisatie inhouden. Zowel de proeven als het DgFlow model zijn stationair uitgevoerd waarbij de belasting incrementeel wordt verhoogd tot het kritiek verval is gevonden.
- In de praktijk van beoordelen en versterken wordt de rekenregel van Sellmeijer toegepast met gebruik van veilige, karakteristieke waarden om onzekerheden af te dekken. In de pipinganalyses die in dit project zijn uitgevoerd is gerekend met gemiddelde waarden om het pipingproces zo goed mogelijk te kunnen voorspellen (ontwerpfase) en te kunnen narekenen/vergelijken (postdictie). Daarnaast is uitgebreid onderzoek uitgevoerd op de proeflocatie waarmee de onzekerheden in de parameterbepaling incl. ruimtelijke variatie beperkt is.

6.1.2 Overige inzichten

Naast de afleiding van de sterktefactor hebben de pipingproeven de volgende inzichten opgeleverd:

- **Bepalen pipeniveau / onderkant deklaag**
Ondanks grondig vooronderzoek op basis van geotechnisch veld- en labonderzoek en visuele waarnemingen in proefkuilen was het pipeniveau vooraf op een hoger niveau ingeschat. De relatief lage grondwaterstand, waarboven (HPT-)sonderingen geen nauwkeurig beeld geven, en grote variatie in de samenstelling van het top van het getijdenzand in het (brede) onderzoeksgebied lagen hieraan ten grondslag. Tijdens de CSI-fase en na afspoeling van een profielwand kon de diepere ligging van de pipe duidelijk verklaard worden door de positie van laagjes met verhoogde percentages silt en lutum (zie Figuur 6-1). Op basis van de korrelverdeling uit het vooronderzoek is de grond boven het pipeniveau als geheel niet geclassificeerd als klei (lutumpercentage max. 5,8%). Ook op basis van de (HPT) sonderingen die direct na afloop van de proef zijn gezet in het inmiddels verzadigde pakket, is de ligging van de pipe te verklaren in een traject met toenemende conusweerstand en doorlatendheid.

In de praktijk dient men zich bewust te zijn van dit aspect waarbij de onderkant van de deklaag (lees: pipeniveau) niet altijd eenduidig is vast te stellen. Dit speelt met name in getijdengebieden waar laagjes met verhoogde silt en lutumpercentages in de top van het zandige pakket veel voorkomen.



Figuur 6-1: Profielwand nabij infiltratiebuis 3 in proefvak Zuid. De pipe is in laag D gegroeid (overgenomen uit Factual Report 1220-164143.R04 d.d. 25-3-2022).

- **2-fasen pipingproces: verticale en horizontale piping**

Binnen beide proefvakken heeft zich één dominante pipe ontwikkeld die vanuit de uittredesloten richting de infiltratiebuizen is gegroeid. Er is sprake geweest van een 2-fasen pipingproces waarbij de erosiepipe eerst verticaal is gaan groeien richting het niveau waarop uiteindelijk horizontale pipegroei heeft plaatsgevonden (ca. 0,6 m dieper; zie Figuur 6-2). Dit maakt verticale piping een relevant proces en raakt aan bovengenoemd aandachtspunt bij het bepalen van de onderkant deklaag cq. bepalen van horizontaal pipeniveau. In het geval van een duidelijke cohesieve deklaag van klei of veen zal opbarsten en heave moeten optreden voordat verticale pipegroei kan plaatsvinden.

Het mechanisme verticale piping is op een theoretische wijze benaderd op basis van de vergelijking van Stokes waaruit bleek dat de stroomsnelheid van het grondwater groter was dan de bezinksnelheid van de geïdealiseerde bolvormige zandkorrels. Analyse van de korrelverdelingen van het afgeschepte zandmateriaal op de wellocaties tonen aan dat er sprake is geweest van verticale piping, waarbij het erosiefront zich in de verticaal, naar beneden gericht, ontwikkelde. Verticale pipegroei is bij een relatief laag verval (ca. 0,85 m) waargenomen.

Lokale heterogeniteit vanwege doorlatendheidsvariatie en verstoringen door bijvoorbeeld opbarsten kunnen lokaal tot hogere stroomsnelheden en daarmee fluïdisatie zorgen. Het erosiefront dat zich naar beneden beweegt zal voor een toenemende, geconcentreerde stroming en progressieve (verticale) erosie leiden. De complexiteit van het verticale pipingproces laat zich qua belasting en sterkte lastig vatten in de beschikbare modellen.



Figuur 6-2: Uittredekanal in proefvak Noord opgevuld met egaline. Overgang naar horizontale pipe is goed te zien (overgenomen uit Factual Report 1220-164143.R04 d.d. 25-3-2022).

■ Monitoringsopzet

Er is gebruik gemaakt van een uitgebreid monitorsysteem om de pipe-ontwikkeling (live) te kunnen volgen. De ERT, infrarood, temperatuur- en waterspanningsmetingen zijn grotendeels in lijn met elkaar en geven informatie over het moment van pipegroei en de ontwikkeling van de pipe in het proefvak. Op basis van deze data is de proef aangestuurd en de meetreeksen vormen de basis voor de analyses. Door het grote aantal waterspanningsmeters, live registratie en continue bemensing kon de pipe-ontwikkeling continu worden gemonitord. Hoewel de meeste waterspanningsmeters ca. 30 cm boven het uiteindelijke niveau van de pipe waren geplaatst kon het proces goed worden gevolgd door te letten op veranderende stijghoogtes.

Voor toepassing in de dagelijkse (beheer)praktijk om pipes op te sporen en te volgen lijkt een dergelijke opzet niet haalbaar. Infraroodmetingen kunnen in dit kader wel zinvol worden toegepast voor weldetectie. Hierbij vormen het kunnen waarnemen van temperatuurcontrasten tussen uitstromend water en omgeving (slootwater) een belangrijk aandachtspunt.

- **Pipepad en groeisnelheid**

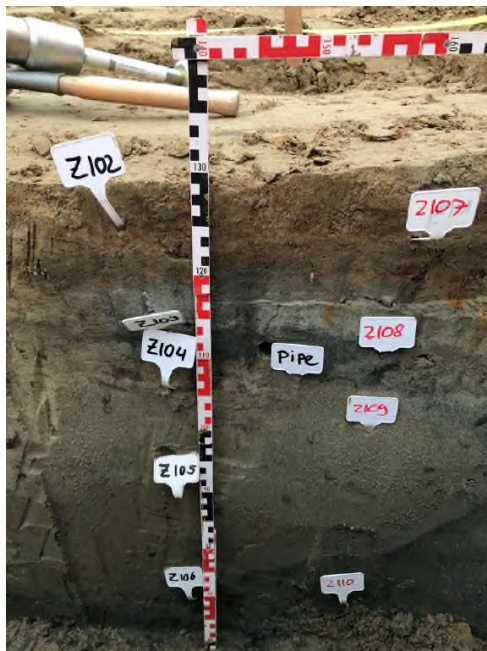
Op basis van de waterspanningsdata en het blootleggen van de pipe tijdens de CSI-fase is het pad van de pipe en groeisnelheid bepaald. Vanaf het uittredepunt is de pipe gevolgd tot aan het eind van de pipe. In het noordvak heeft het team de pipe laten doorgroeien tot aan de infiltratiebuizen; in proefvak Zuid is de proef eerder gestaakt nadat de pipe de laatste raai waterspanningsmeters in het pad van de pipe had genaderd.

De blootgelegde pipes waarin veelal rond van vorm met een gemiddelde doorsnede van 2-3 cm. Soms is de pipe ook juist breed en plat. De pipe stopt vrij abrupt zonder eerst te versmallen. In beide proefvakken meandert de pipe waarbij de totale pipelengte een factor 1,2 tot 1,5 groter is dan de kortste afstand gemeten haaks op de stroomrichting (zie Tabel 6.1). De hoogteligging van de pipe was vrij constant over beide proefvakken.

Tabel 6.1: Pipelengte en afgelegde afstand haaks op stroomrichting

Proefvak	Pipelengte [m]	Afstand loodrecht tussen uittredepunt en pipefront [m]	Factor grotere pipelengte [-]
Noord	15	10,2	1,5
Zuid	7	5,7	1,2

Tijdens het blootleggen van de pipes is getracht te achterhalen wat de oorzaken zijn voor het meanderen en optreden van vrij scherpe bochten in het pipepad. Tijdens het veldwerk konden hier geen duidelijke aanwijzingen voor worden gevonden. Wel waren de kleurverschillen van de grond opvallend waarbij de pipe veelal, maar niet uitsluitend, groeide op het grensvlak van geoxideerd en gereduceerd zand (zie Figuur 6-3).



Figuur 6-3: Zijaanzicht van de pipe op ca. de helft van de route (Zuidvak).

Op basis van de analyse van de korrelverdelingen valt op dat het materiaal op korte afstand naast de pipe een hoger percentage fijne fractie heeft (ca. 15%; Cu: 5,7) dan het materiaal dat is afgescheept op de wellocaties en pipelocaties zelf (ca. 11%; Cu: 2-2,2). In lijn met de hypothese van het onderzoek kan dit het pad van de pijp verklaren, de hypothese is namelijk dat zand met een relatief hoge fijne fractie meer weerstand heeft tegen piping.

De groeisnelheid van de pipe is bepaald door de positie van het pipefront over de tijd te bepalen op basis van de stijghoogtegradiënt tussen opeenvolgende waterspanningsmeters. De pipegroeisnelheid is voor beide proeven redelijk constant en vergelijkbaar. De groeisnelheid bedraagt langs het meanderende pad van de pipe ca. 0,2 mm/s en loodrecht over de afstand tussen uittredepunt en infiltratiebuizen ca. 0,12 mm/s. Deze groeisnelheden liggen ruim onder de snelheid van 2 mm/s zoals deze binnen een eenvoudige tijdsafhankelijke beoordeling kan worden uitgevoerd wanneer eerdere pipegroei in het verleden kan worden uitgesloten.

6.2 Aanbevelingen

Na het uitvoeren van de grootschalige veldproeven is het ontwerp en de uitvoering van de proef geëvalueerd door het projectteam van Deltares, Fugro en WSHD. De resultaten van deze evaluatie zullen als leerpunten en aanbevelingen op een later moment worden gebundeld en opgenomen in de eindevaluatie van het project. Deze punten hebben veelal betrekking op de meer operationele zaken rondom de proeven. Onderstaand is op de belangrijkste aanbevelingen ingegaan gericht op de vertaling van de nieuwe inzichten naar de praktijk.

6.2.1 Relevantie rivierafzettingen

De grootschalige proeven wijzen op een extra sterkte als gevolg van de aanwezigheid van een fijne fractie ($< 63 \mu\text{m}$) dat voor een inbedding van de zandkorrels zorgt en cohesie tussen kleideeltjes en met klei gecoate zandkorrels. De rekenregel van Sellmeijer is gekalibreerd op basis van proeven op homogeen, zeer goed gesorteerd zand zonder fijne fractie. Ook in rivierafzettingen is het zandpakket vaak niet homogeen van samenstelling en zeker in de bovenste delen van het zandpakket zal regelmatig een fijne fractie aanwezig zijn. Hoewel in absolute percentages het gemiddelde aandeel fijne fractie lager kan zijn in vergelijking met getijdensand, is hier wel winst te behalen, zowel in het toekennen van een verhoogde weerstand tegen piping als in het vaststellen van de dikte van de deklaag.

Mede op basis van de resultaten van dit onderzoek naar piping in getijdensand kan nader onderzoek worden gedaan naar de extra weerstand in rivierzand als gevolg van fines.

6.2.2 2D / 3D effecten

De rekenregel van Sellmeijer en de berekeningen met D-Geo Flow zijn passend voor 2D situaties met een 2D grondwaterstroming en de ontwikkeling van een patroon van pipes, waardoor ook na pipevorming de grondwaterstroming zich gelijkmatig verdeeld (2D stroming). De opzet van de pipingproeven in de Hedwigepolder resulteerde in een volledige 3D configuratie waarbij waterstroming geconcentreerd uitstroomde en vervolgens naar een enkele dominante pipe toestroomde. Dit zorgt voor een extra belasting op de pipe waardoor een relatief laag kritiek verval is gevonden in de proeven. Vergelijk tussen de proeven (3D) en de rekenregel (2D) levert daarmee een ondergrens van de sterktefactor. Op labschaal (in voorgaand onderzoek uitgevoerde kleine schaalproeven op uniform zand) is aangetoond dat het 3D effect resulteert in een ca. 2 maal lager kritiek verval dan in experimenten met een 2D configuratie. Het is onbekend of deze factor ook op veldschaal van toepassing is. Daarom is veiligheidshalve de gevonden sterktefactor niet gecorrigeerd. Op basis van deze factor 2 tussen 2D en 3D zou de sterktefactor gevonden in de grootschalige proeven 2,8 [-] bedragen.

In de praktijk zal de situatie ergens tussen volledig 2D (rekenregel) en sterk 3D (Hedwigeproeven) in liggen. Dit geldt overigens voor alle relevante type afzettingmilieus, waarbij de mate van een 3D-effect waarschijnlijk afhankelijk is van de uitstroomconfiguratie, de lokale heterogeniteit in de ondergrond waardoor stromingsconcentratie wel of niet kan plaatsvinden en het al dan niet ontwikkelen van een enkele of meerdere pipes onder de dijk. Zo is het de verwachting dat bij kopsloten of bij lokale zwakke plekken in de deklaag de situatie nagenoeg volledig 3D zal zijn. De rekenregel past niet goed op deze situatie en zou het kritiek verval overschatten, dus niet veilig genoeg zijn. Dit roept om een algemene reflectie op de toepassing van de rekenregel in het licht van de situaties waarvoor deze is afgeleid en de veelal complexe praktijk. Het zondermeer toepassen van een extra belastingfactor van 2 voor 3D situaties lijkt op voorhand niet acceptabel.

Nader onderzoek op veldschaal naar het 2D en 3D effect wordt daarom aangeraden.

7. Referenties

Dinh. B.H., Nguyen. A., Jang. S., Kim. Y. (2021). Evaluation of erosion characteristics of soils using the pinhole test. International journal of Geo-Engineering (2021) 12:16.

Nadal-Romero. E., Verachtert. E., Maes. R., Poesen. J. (2011). Pinhole test for assessing the piping erosion susceptibility of soils. Geographical research letters. Vol 37, no 1.

Van Beek. V.M., Essen. H.M., Vandenboer. K., Bezuijen. A. (2015). Developments in modelling of backward erosion piping. Géotechnique 65. No. 9, 740-754.

Van Beek. V.M. Robbins. B.A., Rosenbrand. E., Van Esch. J. (2022). 3D modelling of backward erosion piping experiments. Geomechanics for Energy and the Environment 31. June 2022.

Appendix A

Invloed intrillen damwand op
verdichting getijdenzand

Pipingproef Hedwige

Naar: Projectteam Hedwige

Van: Marijn Hop, Gert-Ruben van Goor

Datum: 11 maart 2022

Ref nr.: 1220-164143.M25 (v2.0)

Onderwerp: Invloed intrillen damwand op verdichting getijdezand

Inleiding

In voorliggende memo is de invloed van het intrillen van de damwanden op de pakking van het getijdezand beschouwd van proefvakken Noord en Zuid van de pipingproef in de Hedwigepolder. De pipingproef is in een gesloten systeem uitgevoerd, dit gesloten systeem is gecreëerd door het plaatsen van damwanden. Het intrillen van damwanden kan de pakking van het zand beïnvloeden. Om dit effect in kaart te brengen zijn voorafgaand aan het intrillen van de damwanden sonderingen uitgevoerd ter plaatse van de proeflocatie. Vervolgens zijn na installatie van de damwanden controlesonderingen uitgevoerd op verschillende afstanden tot de damwand. Per proefvak zijn de relevante parameters beschreven en het effect op de verdichting van het getijdezand bepaald.

Referenties

- [1] Rapportage geotechnisch onderzoek veldwerk fase 1b, Fugro, 1319-155778-21-R02-v1.0, 9 november 2020
- [2] Rapportage geotechnisch onderzoek veldwerk fase 2, Fugro, 1319-155778-21-R03-v1.0, 19 februari 2021
- [3] Ontwerprapport grootschalige pipingproef, Fugro (1220-164143.R02), Deltares (11204565), 16 juni 2021

Methode

Allereerst is de variatie in de ondergrond voor plaatsing damwand in kaart gebracht. Dit om eventuele trends in het proefvak te ontdekken. Vervolgens zijn de 'voor- en na-sonderingen' visueel beschouwd, hierbij is gekeken of er een verandering van conusweerstand, wrijving of pakking zichtbaar is. De pakking van het getijdezand is bepaald met de relatieve dichtheidsmethode van Baldi 1986, een empirische relatie op basis van onder andere de conusweerstand en effectieve korrelspanningen. In dit geval wordt nagegaan of er een toename of afname van de relatieve dichtheid is opgetreden na installatie damwanden.

Proefvak Noord

Gegevens proefvak

Proefvak Noord is ca. 13 bij 20 m lang. Voor het aanbrengen van de damwanden zijn een groot aantal sonderingen uitgevoerd en na inbrengen 4 controle sonderingen (_noord extensie), zie figuur 2 voor de locaties. De damwand is trillend aangebracht en is van het type AZ-18-700 met een lengte van 8m. De damwand is waterdicht gemaakt door het toepassen van een bitumineuze afdichting. De kop van de damwand is aangebracht op een hoogte van NAP+2,2m bij een maaiveldhoogte van gemiddeld NAP+1,6m. Er is gebruik gemaakt van een hoogfrequent trilblok met variabel moment (Type PVE 35VM-01). Tijdens het intrillen van de damwanden zijn de volgende zaken opgevallen:

1. Relatief grote zakkingen in de kassen van de damwanden. Dit is lokaal opgetreden omdat de damwand waarschijnlijk lokaal grond mee omlaag trekt tijdens het inbrengen, zie figuur 1 (links).
2. Op een aantal locaties is slotafdichting op het maaiveld aangetroffen, figuur 1 (rechts).
3. Tijdens inbrengen heeft de heibaas aangegeven dat het maaiveld in een omtrek van 3m rond de damwand begon te trillen.
4. Na inbrengen zijn scheurtjes in het oppervlak van het maaiveld aangetroffen tot ca. 1,8m vanaf de damwand. De scheurtjes hadden een geringe grootte, zie figuur 1 (midden).

Zakking grond kassen



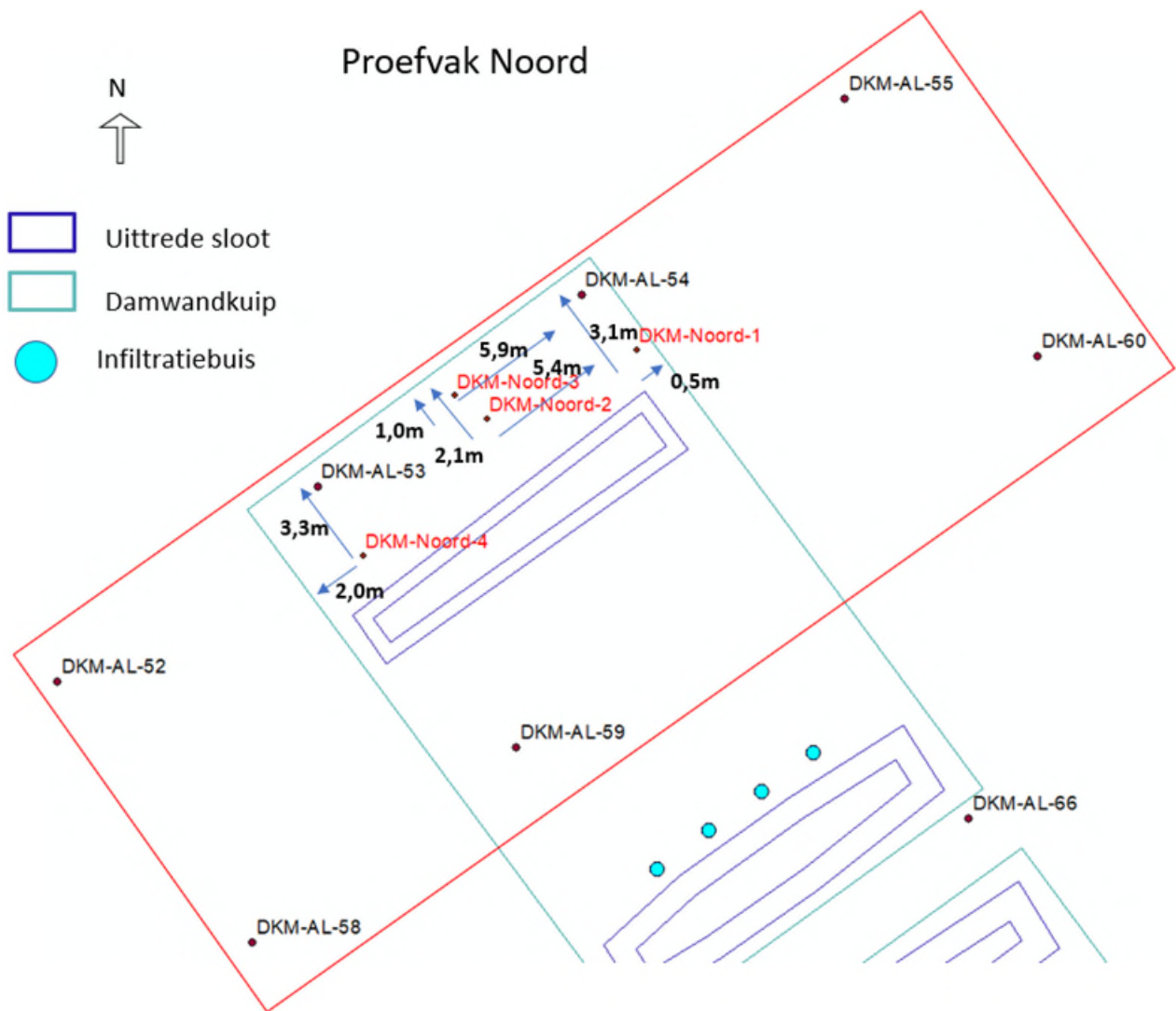
Scheuren maaiveld



Slotafdichting maaiveld



Figuur 1: Diverse foto's genomen direct na inbrengen damwand.



Figuur 2: Overzicht relevante sonderingen Noordvak [1], damwand (turquoise), sloot (blauwe lijn), de sonderingen met toevoeging 'Noord' zijn de achteraf uitgevoerde controlesonderingen [2]. De pijlen geven de afstand van de controlesonderingen t.o.v. damwand weer.

Figuur 2 geeft de locaties van de uitgevoerde sonderingen en de damwand weer. Hierbij zijn DKM-AL-53 en DKM-AL-54 vooraf uitgevoerd op ca. 0,7-0,8 m van de beoogde damwand locaties. De sonderingen DKM-Noord 1 t/m 4 zijn de uitgevoerde controle sonderingen tussen de uittredesloot en de achterste damwand in. Zoals te zien zijn de controlesonderingen op verschillende afstanden t.o.v. de damwand geplaatst om de invloed van afstand op de verdichting te kunnen bepalen. In tabel 1 is de afstand tot de damwand van de verschillende controlesonderingen weergegeven en de dichtstbijzijnde sondering die vooraf is gemaakt.

Tabel 1: Overzicht van relevante sonderingen incl. afstand tot dichtstbijzijnde damwand / de kortste afstand tot de damwand haaks op de dichtstbijzijnde damwand proefvak Noord.

Controlesondering achteraf	Afstand tot damwand [m]	Dichtstbijzijnde sondering vooraf
DKM-Noord-1	0,5 / 3,1	DKM-AL-54
DKM-Noord-2	2,1 / 5,4	DKM-AL-54/ DKM-AL-53
DKM-Noord-3	1,0 / 5,9	DKM-AL-54/ DKM-AL-53
DKM-Noord-4	2,0 / 3,3	DKM-AL-53

Tussen het maken van de initiële sonderingen en de controlesonderingen is naast het aanbrengen van de damwand ook een afdekkende eerste kleilaag aangebracht ten behoeve van de proefuitvoering. De sonderingen vooraf zijn uitgevoerd vanaf een maaiveld van ca. NAP +1,6 m. De controlesonderingen bij een maaiveld van ca. NAP +2,25 m. Hieruit volgt dat er een kleilaag van ca. 0,75 m is aangebracht. De chronologie van de ophoogwerkzaamheden is opgenomen in tabel 2. Bij de bepaling van de relatieve dichtheid volgens de methode van Baldi is de effectieve korrelspanning benodigd. Deze wordt o.a. bepaald door de waterstand tijdens uitvoering van de sondering, deze is op basis van peilbuisdata bepaald en eveneens weergegeven in tabel 2.

Tabel 2: Chronologie sonderingen en damwandinstallatie incl. relevante grondwaterstand

Sondering	Waterstand [m+NAP]	Datum uitvoering
DKM-AL-53 & -54	0,3	1-2-2021
Damwandinstallatie	-	16 tot 21-6-2021
Zandpakket verzadigd	-	23-6-2021
Aanbrengen afdekkende kleilaag (ca. 0,75m)	-	28/29-6-2021
DKM-Noord 1-4	1,3	27-7-2021

De bodemopbouw wordt gekarakteriseerd door de aanwezigheid van getijdenzand en aan de onderkant een afsluitende veenlaag. De geschematiseerde bodemopbouw is in tabel 3 weergegeven. De bodemopbouw is conform de bodemopbouw geschematiseerd in de ontwerprapportage[3].

Omdat de grondwaterstand tijdens het uitvoeren van de controlesonderingen verschilt (NAP+0,3 vs. NAP+1,3 m) zijn alleen de lagen onder de laagste grondwaterstand geanalyseerd. De pipe ligt op een hoogte van NAP+0,5 m, dit ligt boven de laagste grondwaterstand. De vergelijking van de sondeerresultaten voor en na de installatie van de damwanden ter hoogte van de pipe zijn indicatief toegevoegd maar zijn door verschil in grondwaterstanden niet betrouwbaar.

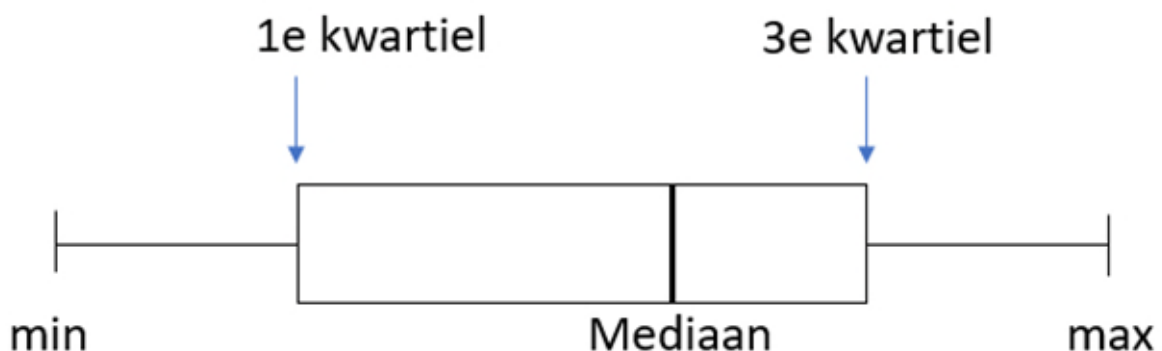
Tabel 3: Grondopbouw proefvak Noord [3].

Bovenkant laag [m NAP]	Laagdikte [m]	Bodembeschrijving
+1,65	0,55	Deklaag
+1,1	1,8	Getijdezand met stoorlaagjes laag 1
-0,7	1,1	Getijdezand met stoorlaagjes laag 2
-1,8	1,0	Getijdezand met stoorlaagjes laag 3
-2,8	1,0	Veen

De controlesonderingen zijn ruim een maand na het intrillen van de damwanden uitgevoerd, wateroverspanningen ten gevolge van het intrillen hebben ruim voldoende tijd gehad om aan te passen. Ook de wateroverspanningen als gevolg van het aanbrengen van de eerste kleilaag zijn volledig gedissipeerd op het moment van het uitvoeren van de controlesonderingen. Het aanbrengen van de kleilaag heeft invloed op de verticale spanningen waarbij een hogere effectieve verticale spanning tot een hogere pakking leidt.

Variatie ondergrond voor installatie

De locatie van de proefvakken noord en zuid is gebaseerd op zeer veel grondonderzoek. Dit grondonderzoek geeft inzicht in de mate van variatie in de bodemopbouw op korte afstanden. Om het effect van het inbrengen van de damwanden beter in kaart te brengen wordt vooraf de variatie van de ondergrond in kaart gebracht. Hierbij worden de conusweerstand, wrijvingsgetal, genormaliseerde conusweerstand, genormaliseerde wrijvingsgetal en relatieve dichtheid beschouwd. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de laagindeling zoals weergegeven in tabel 3, met als aanvulling een laag +/-0,2 m rond het traject van de pipe (NAP+0,5m). Voor het weergeven van de variatie in de data wordt gebruik gemaakt van verschillende boxplots. De boxplots bestaan uit een mediaan, 1^e en 3^e kwartiel en "whiskers" tot de maximale en minimale waarde, zie figuur 3.

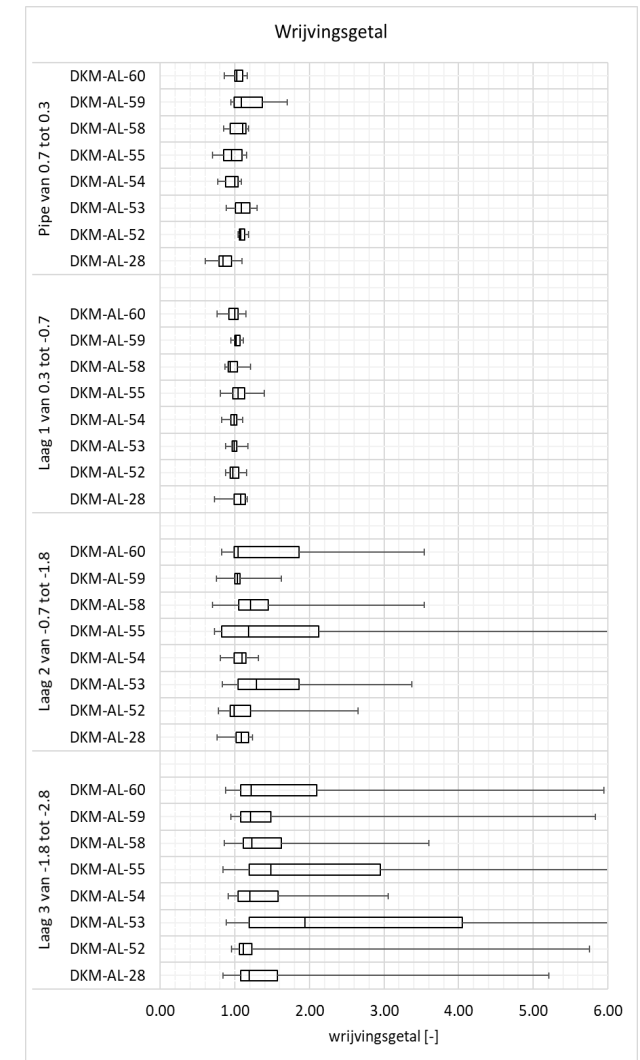
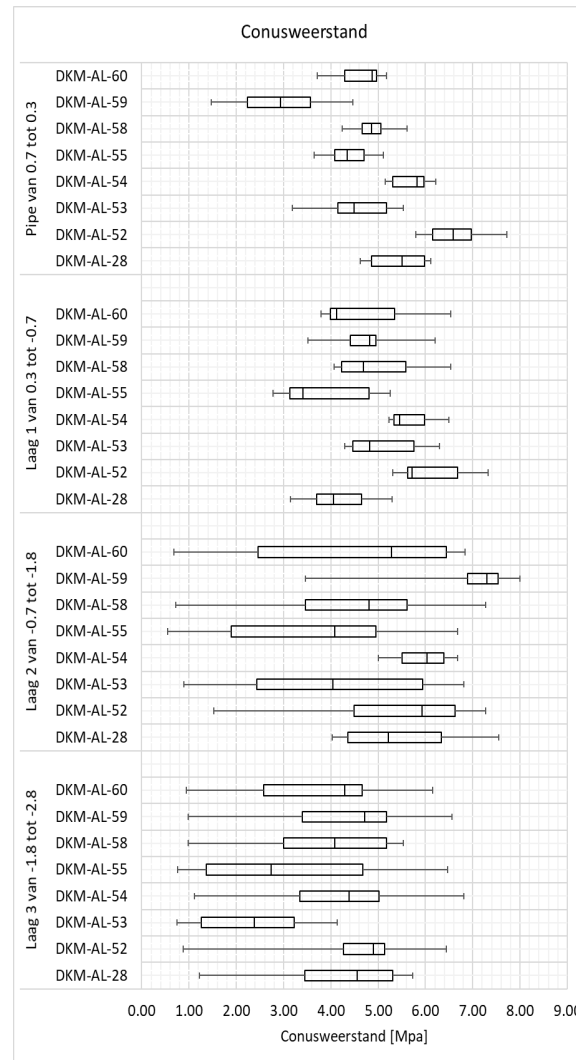
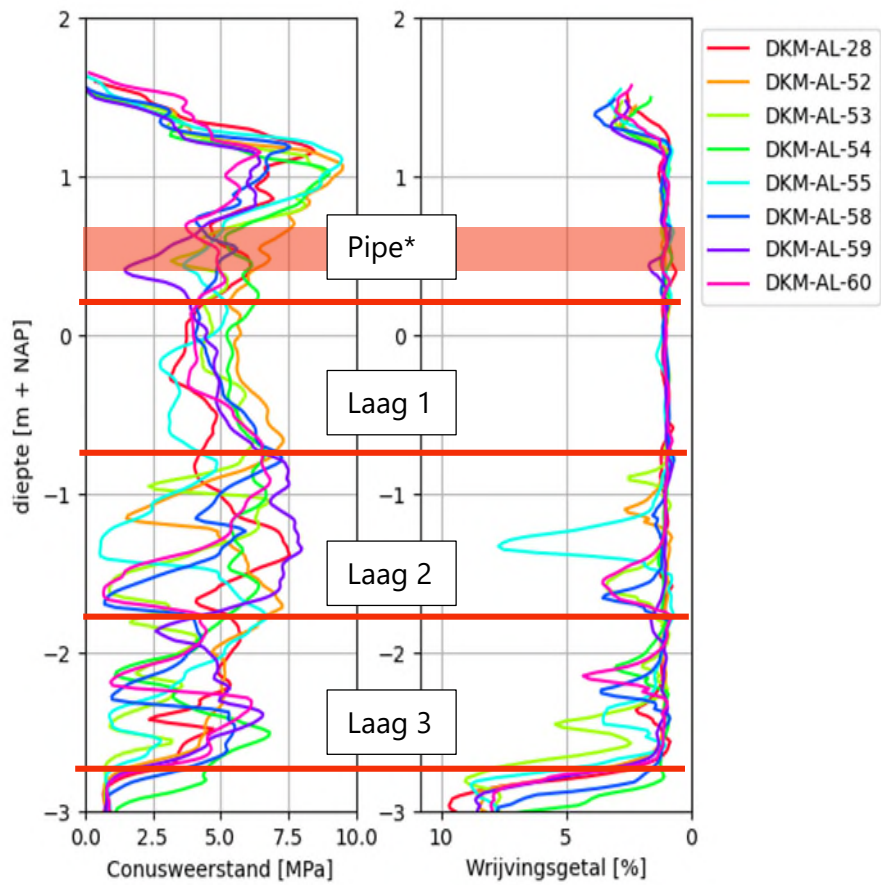


Figuur 3: Gehanteerde schematisatie boxplot.

In figuur 4 is links de conusweerstand (q_c) en wrijvingsgetal (f_s) weergegeven en rechts de respectievelijke spreiding van de meetgegevens binnen de verschillende lagen. De laagscheidingen van laag 1, 2 en 3 zijn vanuit praktisch oogpunt voor alle sonderingen gelijk zijn gehouden. Vanwege de relatief korte afstand tussen de sonderingen zal dit nauwelijks effect hebben op de resultaten. Enkel voor de onderste laag, laag 3, kan het meenemen van de top van het onderliggende veenpakket tot relatief grote uitschieters zorgen in q_c en f_s . Op basis van de figuur worden de volgende constatering gedaan:

1. De conusweerstand rondom de pipe varieert sterk, waarbij vooral sondering AL-52 een hogere en AL-59 een lagere conusweerstand laat zien vergeleken met de rest.
2. In laag 1 is er weinig variatie in het wrijvingsgetal, sondering AL-52 en AL-54 laten een gemiddeld hogere conusweerstand zien.
3. In laag 2 is een grote variatie te zien in de conusweerstand en wrijvingsgetal. Binnen de hele laag komen stoorlagen voor.
4. In laag 3 is de situatie gelijk aan laag 2, veel variatie in conusweerstand en wrijvingsgetal. Er komen een aantal stoorlagen voor.
5. In de resultaten is geen duidelijke ruimtelijke trend tussen de verschillende sondering zichtbaar.

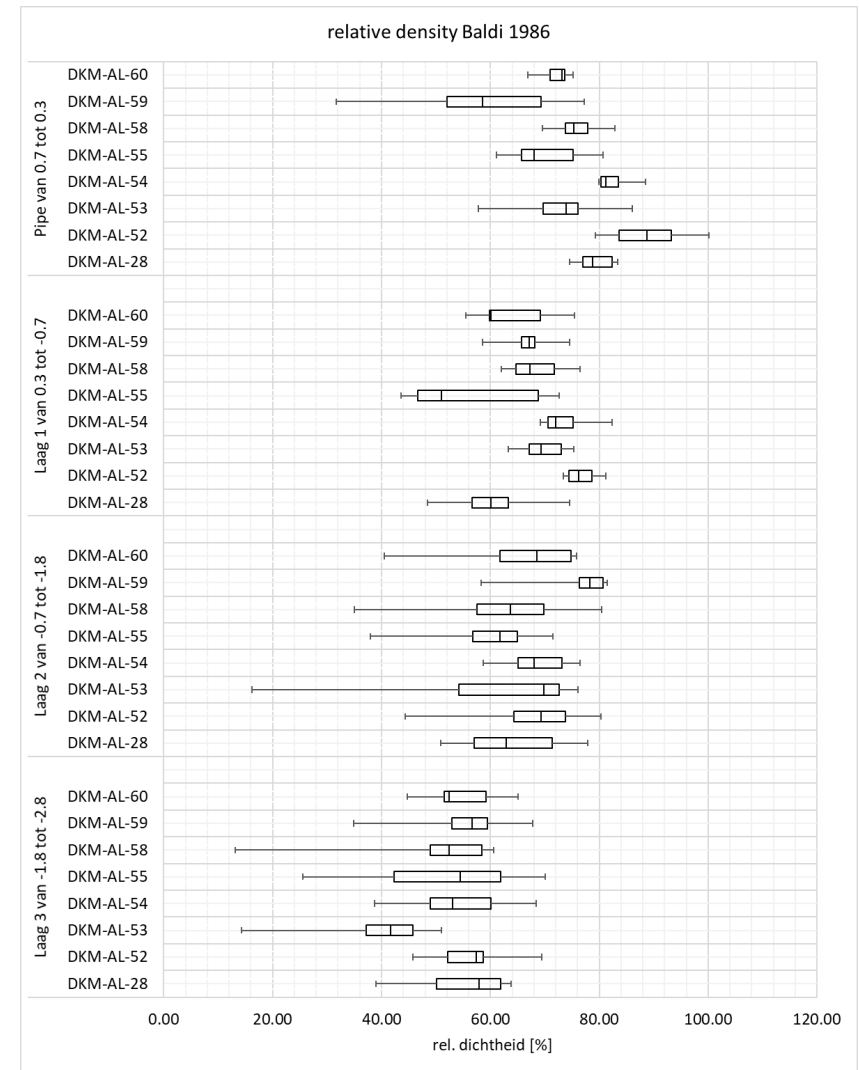
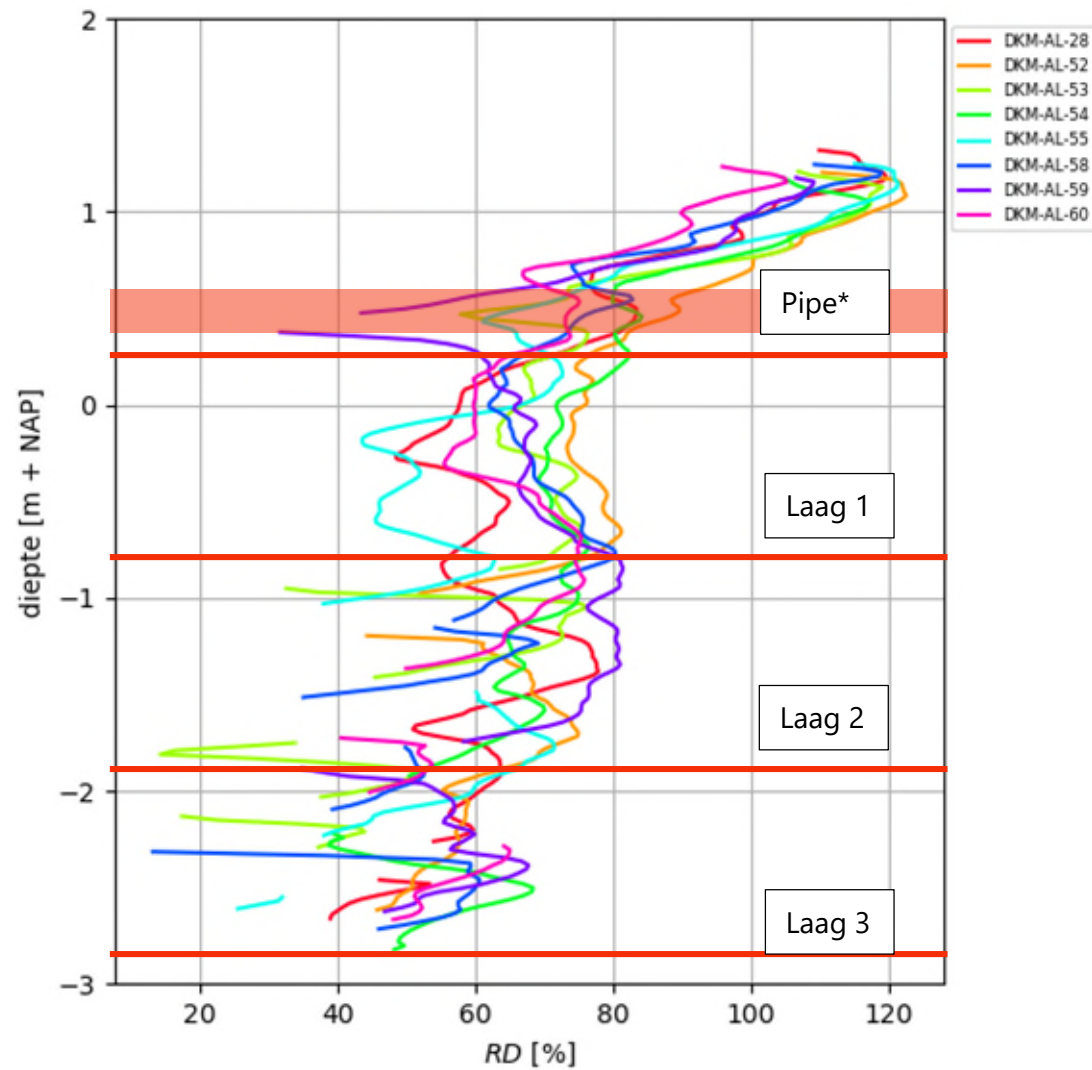
De laagscheiding van laag 3 (NAP-2,8) is iets te laag voor sondering AL-53 waardoor er een gedeelte van de afsluitende veenlaag is meegenomen.



Figuur 4: Natuurlijke variatie in conusweerstand en wrijvingsgetal in en rondom de proefvakken voor installatie van de damwanden.

In figuur 5 is links de relatieve dichtheid weergegeven, rechts is de spreiding gevisualiseerd. Op basis hiervan worden de volgende constatering gedaan:

1. De relatieve dichtheid rondom de pipe bevindt zich tussen 60-80%. Sondering AL-52 wijkt het meest af met een relatieve dichtheid tussen 80 en 100%. Sondering AL-59 laat gemiddeld de laagste waarde zien. Dit wordt vooral veroorzaakt door een lokale stoorlaag ter hoogte van de pipe.
2. In laag 1 is te zien dat de relatieve dichtheid tussen de 60 en 80% ligt. Waarbij AL-52 licht afwijkt met een relatief hoge relatieve dichtheid.
3. In laag 2 is de relatieve dichtheid lager dan in laag 1. Het is goed zichtbaar dat hier enkele stoorlagen aanwezig zijn.
4. In laag 3 is de relatieve dichtheid nog iets lager dan in laag 2, de pakking lijkt over de diepte af te nemen. Binnen deze laag zijn ook stoorlagen aanwezig die de gemiddelde relatieve dichtheid verlagen.
5. In de resultaten is geen duidelijke ruimtelijke trend tussen de verschillende sondering zichtbaar.



Figuur 5: Vergelijking variatie ondergrond vooraf (links) de relatieve dichtheid en (rechts) de spreiding van de relatieve dichtheid binnen de laag.

Vergelijking voor en na installatie damwand

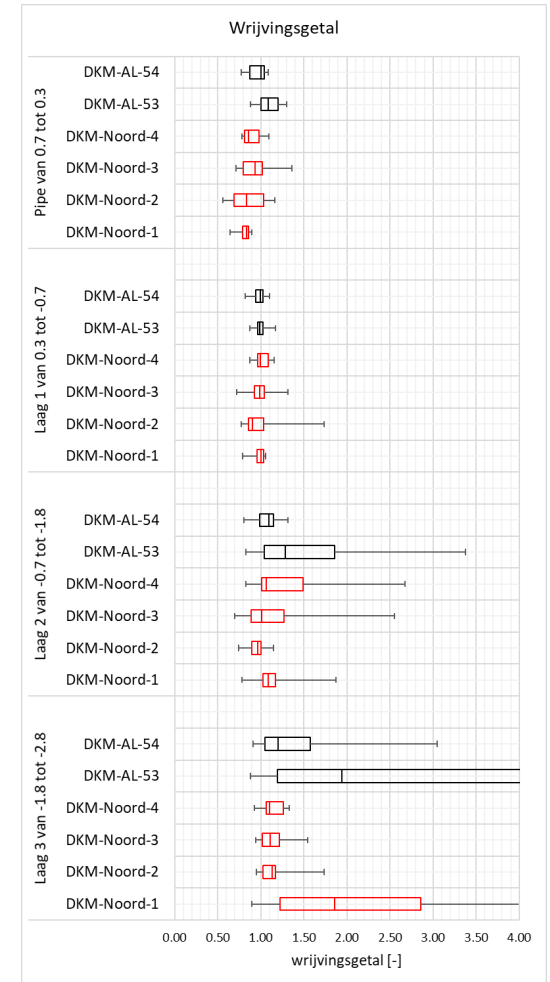
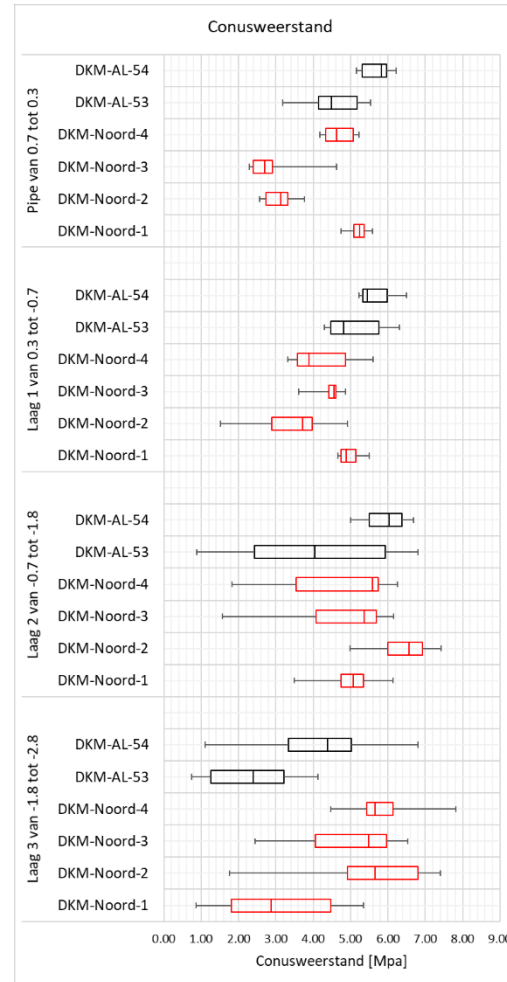
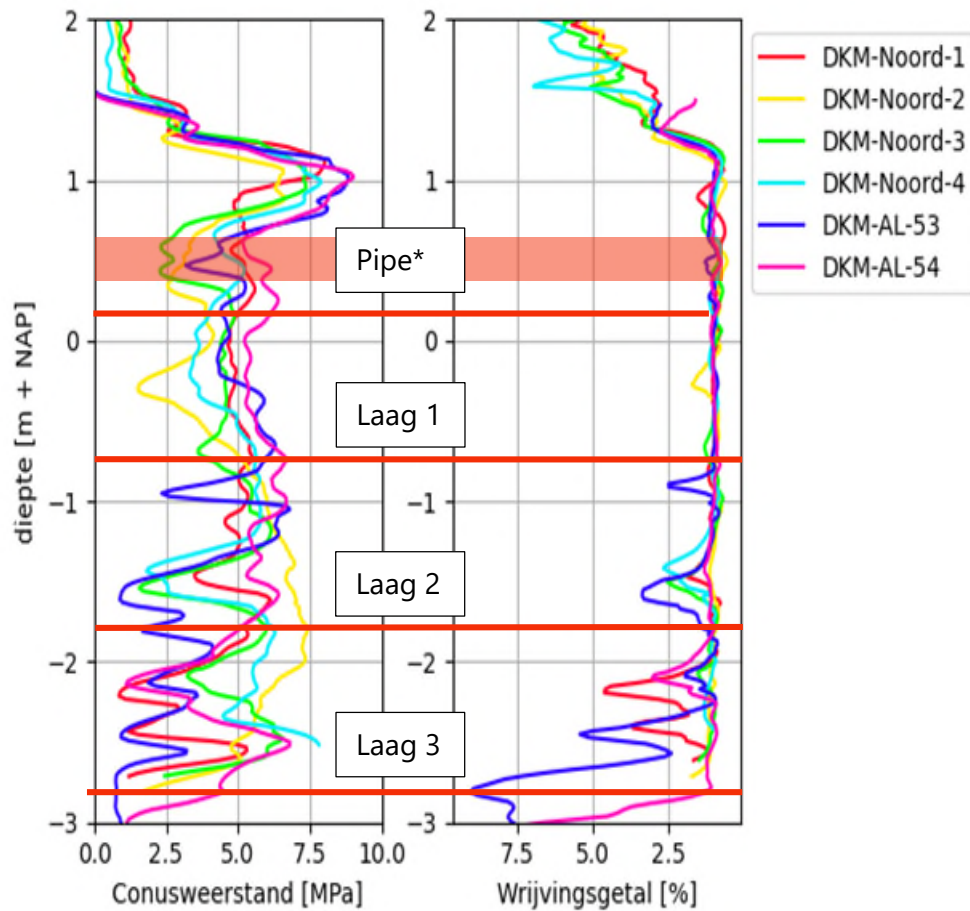
Na installatie van de damwanden en het aanbrengen van de extra kleiafdichting zijn er vier sonderingen uitgevoerd binnen het proefvak tussen de sloot en de damwand op verschillende afstanden. Door de sonderingen voor en na uitvoering te vergelijken kan de impact van de uitvoering op de pakking van het getijdezand achterhaald worden. Hierbij wordt dezelfde methodiek gehanteerd als in voorgaande paragraaf is toegepast. Door de (genormaliseerde) conusweerstand, (genormaliseerde) wrijvingsgetal voor en na installatie van de damwanden te vergelijken. Hierbij worden de voorsonderingen in de bouwkuip gehanteerd (AL-53, AL-54). Het normaliseren van de conusweerstand en wrijvingsgetal hebben tot doel het effect van grondwaterstandsverschillen en het tussentijds aanbrengen van de kleilaag op de resultaten te verminderen.

In figuur 6 is links de conusweerstand en wrijvingsgetal weergegeven en rechts de respectievelijke spreiding van de meetgegevens binnen de verschillende lagen. Op basis hiervan worden de volgende constatering gedaan:

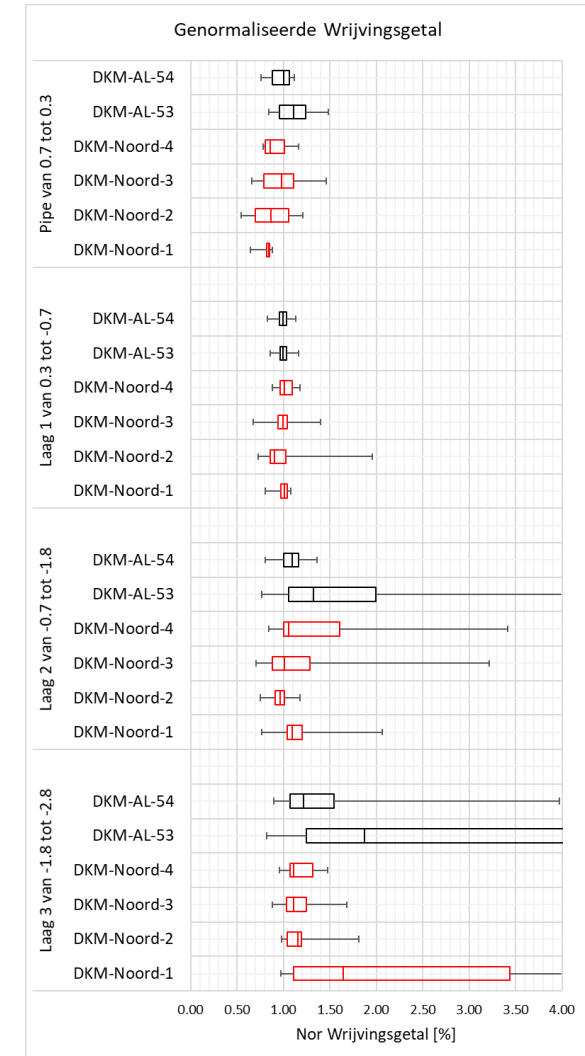
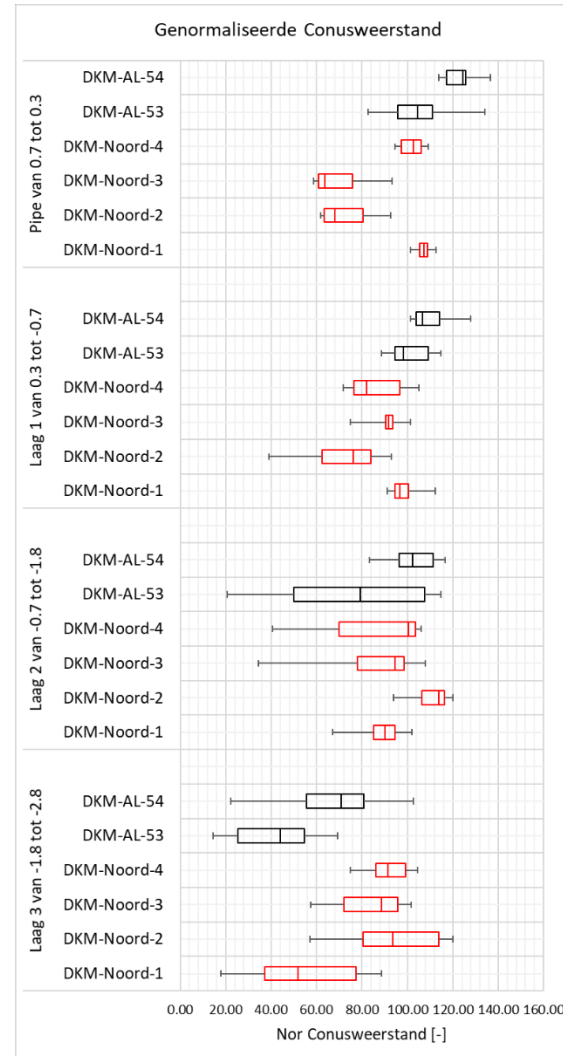
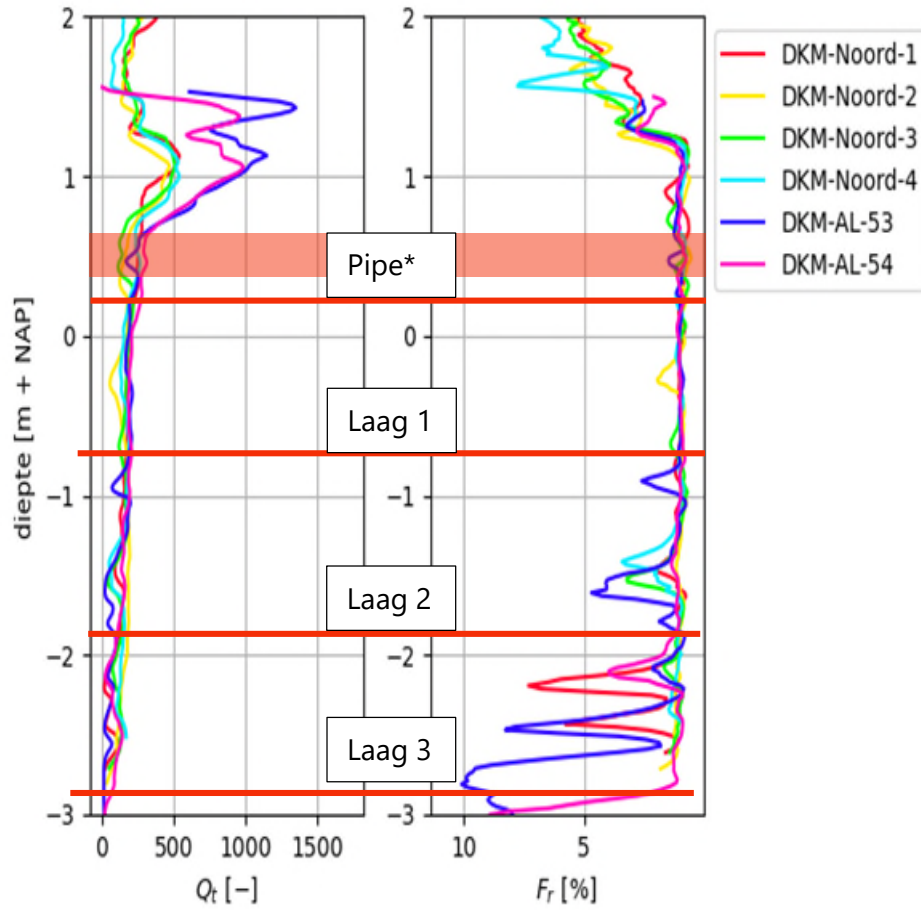
1. De controle sonderingen DKM-Noord 2 en 3 laten een significant lagere conusweerstand en iets lager wrijvingsgetal rondom het pipeniveau zien. Vooral DKM-2-Noord valt hierbij op omdat deze relatief ver van de damwand is uitgevoerd (2,1/5,4m). Indien afstand een rol speelt zou sondering DKM-1-Noord-1 het grootste effect moeten laten zien omdat deze op de kortste afstand van de damwand is uitgevoerd (0,5/3,1m).
2. In laag 1 is te zien dat over het algemeen de conusweerstand is afgenomen.
3. In laag 2 is minder duidelijk sprake van een toe- of afname in conusweerstand of wrijvingsgetal. Door de oogharen heen lijkt er sprake van een lichte toename in conusweerstand hoewel tussen sonderingen AL-53 en AL-54 al sprake is van een grote spreiding.
4. In laag 3 is behalve in sondering DKM-1-Noord de conusweerstand toegenomen.

De genormaliseerde conusweerstand en wrijvingsgetal en de spreiding in de lagen van deze parameters is weergegeven in figuur 7. Door te normaliseren wordt het effect van de extra kleiophoging en het verschil van grondwaterstanden gecompenseerd. Op basis hiervan worden de volgende constatering gedaan:

1. In de resultaten is hetzelfde effect zichtbaar als in figuur 6. Rondom de pipe en in laag 1 is een afname zichtbaar en in laag 3 een toename.



Figuur 6: Vergelijking parameters voor en na uitvoering met (links) de conusweerstand en het wrijvingsgetal en (rechts) de spreiding van de conusweerstand en wrijvingsgetal binnen de laag (in rood de controle sonderingen). *Let op: door verschil in grondwaterstand van het voor- (NAP+0,3 m) en na-sonderen (NAP+1,3 m) ligt de pipe in een overgangszone en zijn de resultaten ter indicatie.



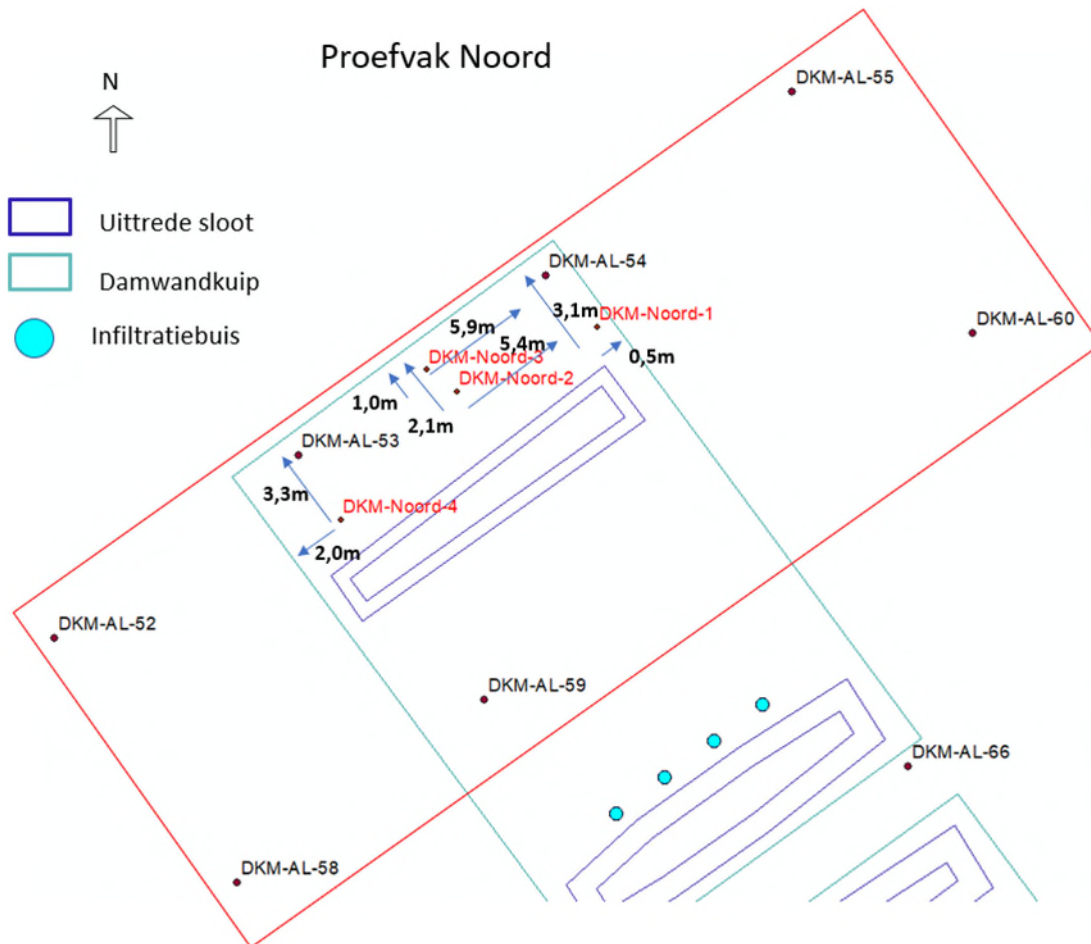
Figuur 7: Vergelijking parameters voor en na uitvoering met (links) de genormaliseerde conusweerstand en het wrijvingsgetal en (rechts) de spreiding van de genormaliseerde conusweerstand en wrijvingsgetal binnen de laag (in rood de controle sonderingen). *Let op: door verschil in grondwaterstand van het voor- (NAP+0,3 m) en na-sonderen (NAP+1,3 m) ligt de pipe in een overgangszone en zijn de resultaten ter indicatie.

In Figuur 8 is voor het interpreteren van de resultaten nogmaals de locatie van de verschillende sonderingen weergegeven. In figuur 9 is links de relatieve dichtheid weergegeven, rechts is de spreiding gevisualiseerd. Op basis hiervan worden de volgende constatering gedaan:

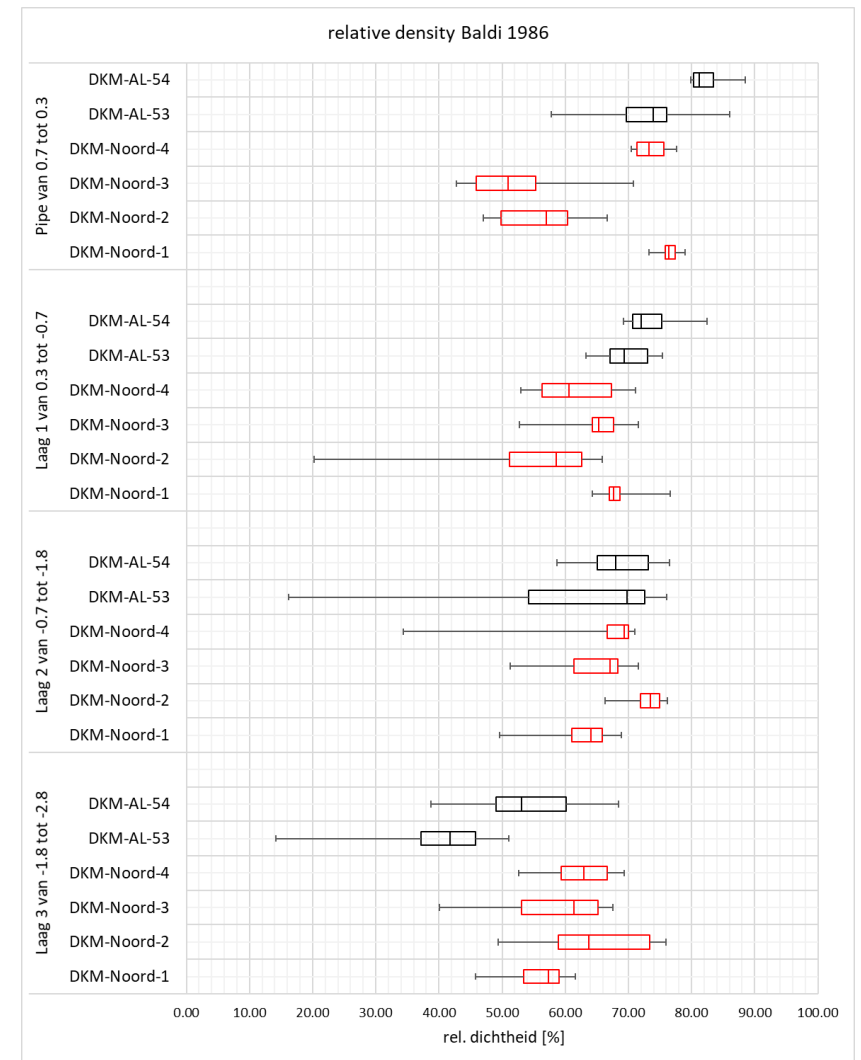
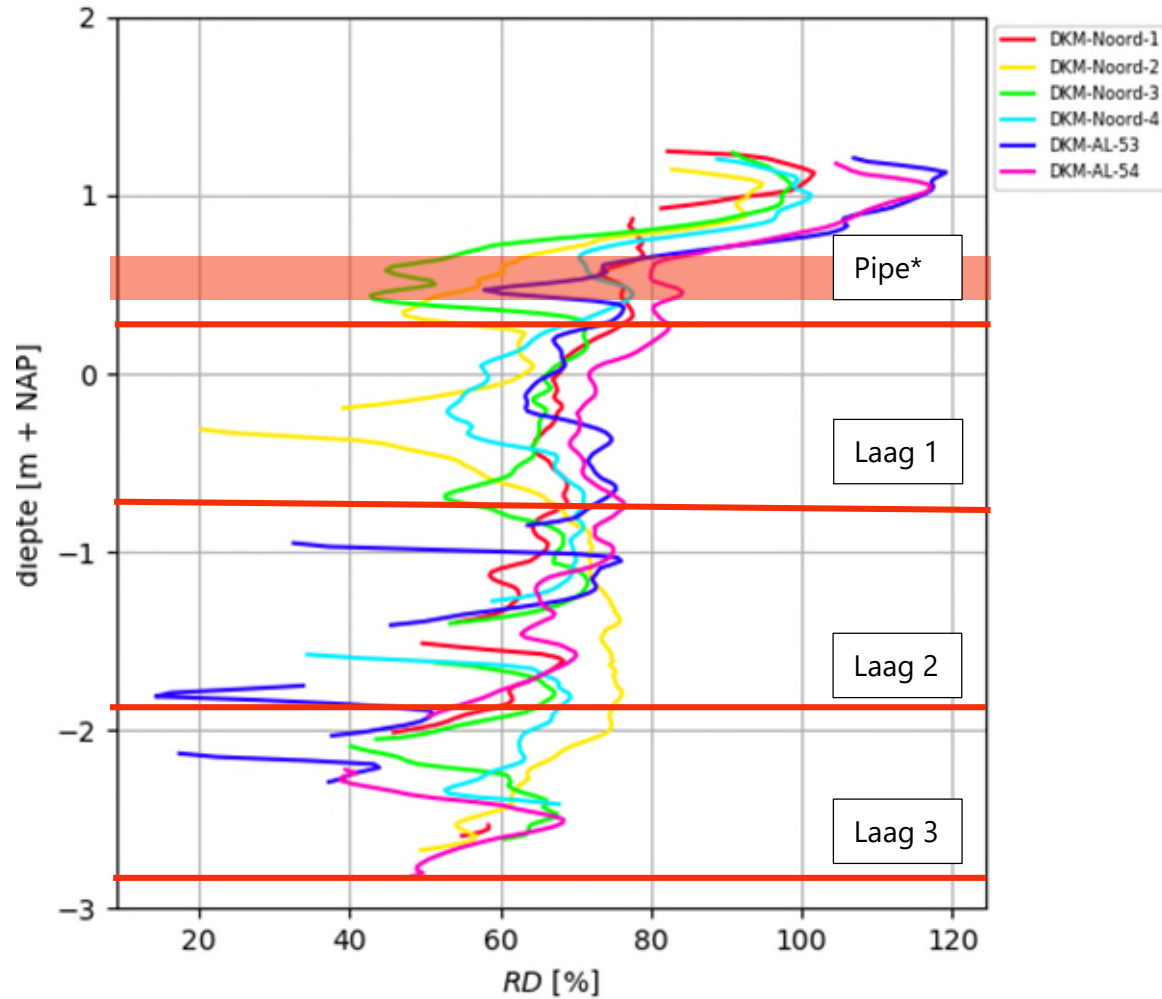
1. In de resultaten is hetzelfde effect zichtbaar als in figuur 6 en figuur 7. Rondom de pipe en in laag 1 is een afname zichtbaar en in laag 3 een toename.

In figuur 10 is links de relatieve dichtheid weergegeven van alle sonderingen (voor en na), rechts is de spreiding gevisualiseerd. Op basis hiervan worden de volgende constatering gedaan:

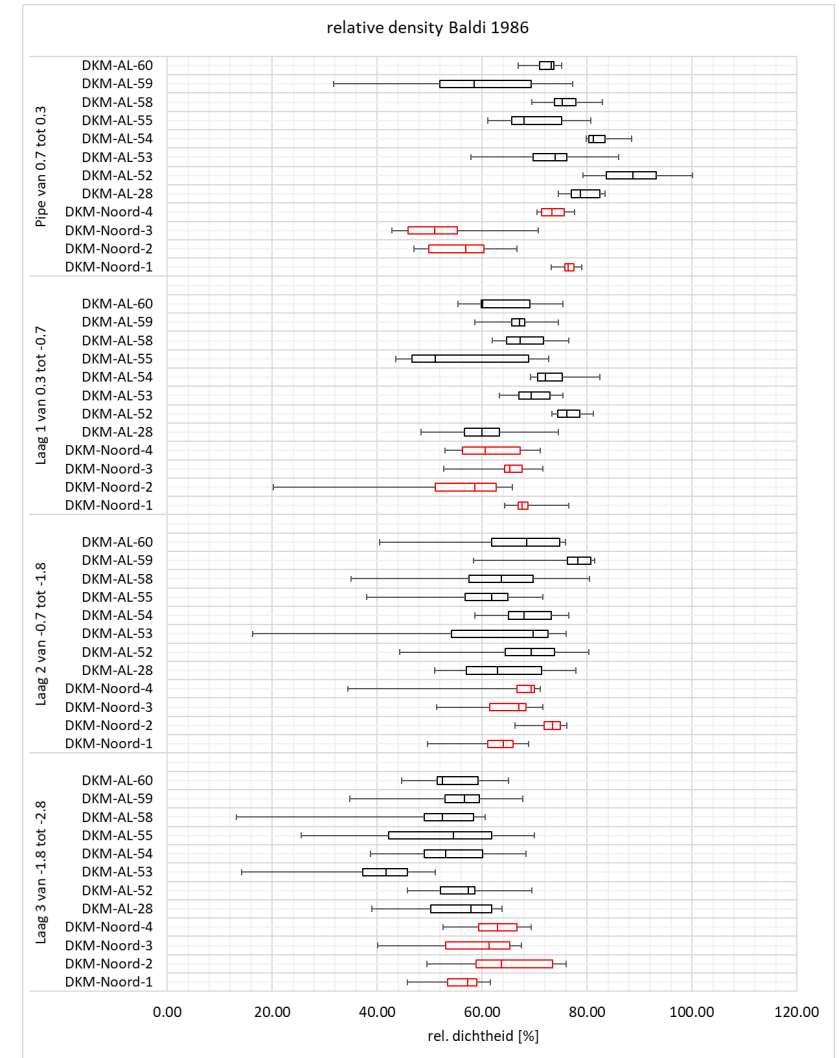
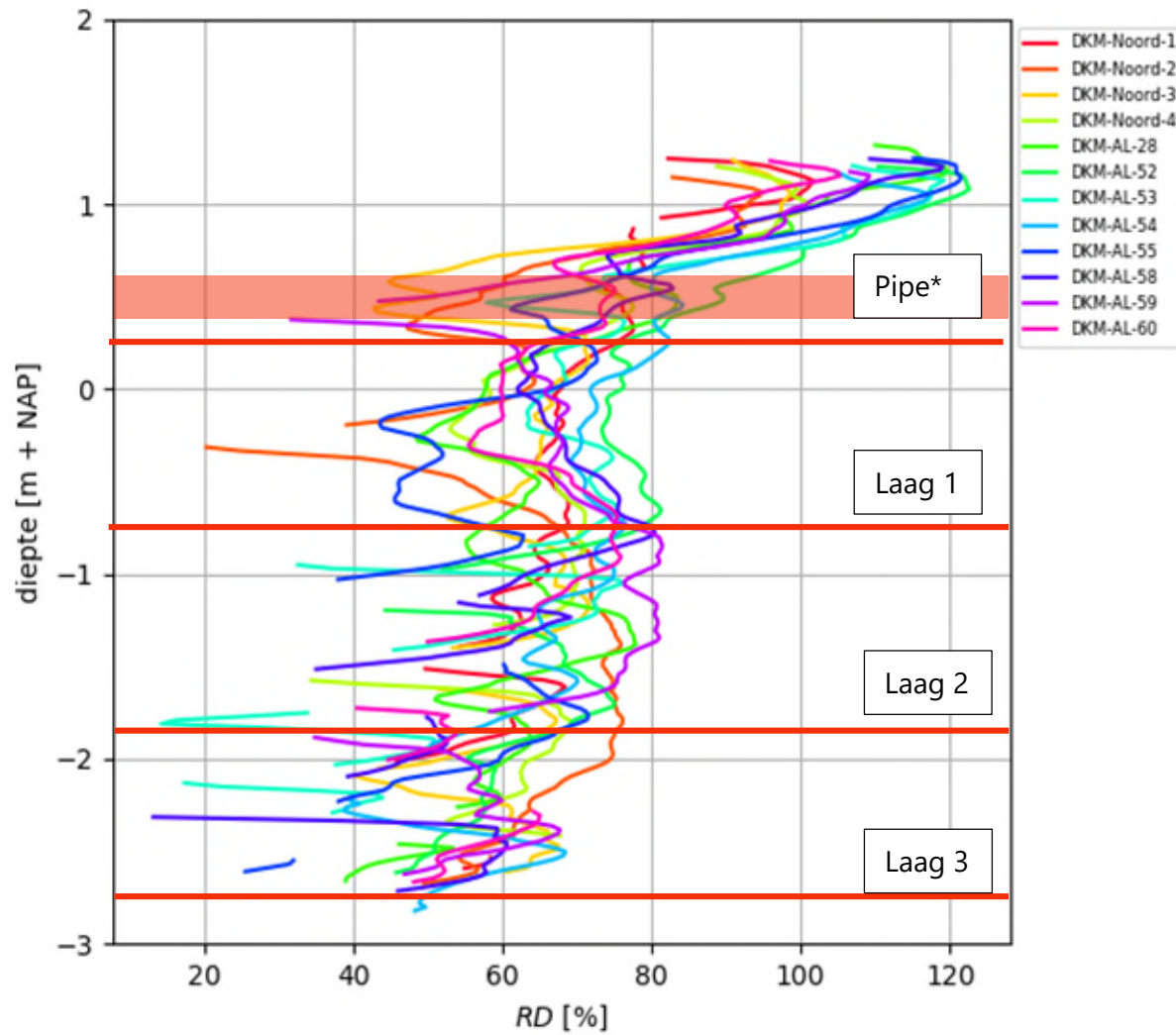
1. Vergeleken met de resultaten in figuur 9 is de afname minder goed zichtbaar omdat andere sonderingen die vooraf gemaakt zijn buiten de damwandkuip ook lagere dichtheden laten zien. Echter de resultaten van de controle sondering liggen gemiddeld iets lager.
2. De toename van de relatieve dichtheid in laag 3 is goed zichtbaar.



Figuur 8: Overzicht relevante sonderingen Noordvak [1], damwand (turquoise), sloot (blauwe lijn), de sonderingen met toevoeging 'Noord' zijn de achteraf uitgevoerde controlesonderingen [2]. De pijlen geven de afstand van de controlesonderingen t.o.v. damwand weer.



Figuur 9: Vergelijking parameters voor en na uitvoering met (links) de relatieve dichtheid (rechts) de spreiding van de relatieve dichtheid binnen de laag (in rood de controle sonderingen). *Let op: door verschil in grondwaterstand van het voor- (NAP+0,3 m) en na-sonderen (NAP+1,3 m) ligt de pipe in een overgangszone en zijn de resultaten ter indicatie.

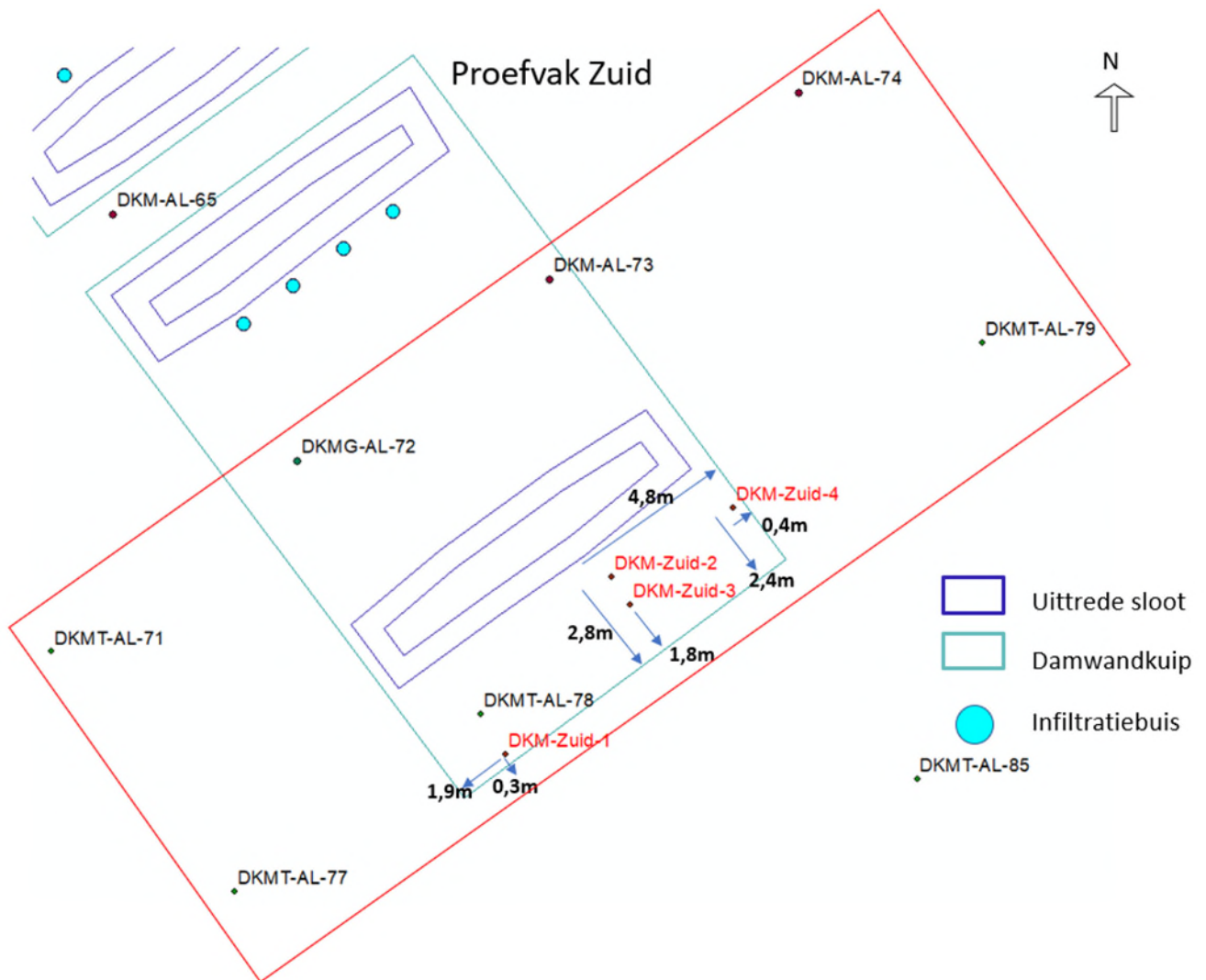


Figuur 10: Vergelijking parameters voor en na uitvoering met (links) de relatieve dichtheid (rechts) de spreiding van de relatieve dichtheid binnen de laag voor alle beschouwde sonderingen (in rood de controle sonderingen). *Let op: door verschil in grondwaterstand van het voor- (NAP+0,3 m) en na-sonderen (NAP+1,3 m) ligt de pipe in een overgangszone en zijn de resultaten ter indicatie.

Proefvak Zuid

Gegevens proefvak

Proefvak Zuid is eveneens ca. 13 bij 20 m lang. Voor het aanbrengen van de damwanden zijn een groot aantal sonderingen uitgevoerd en na het inbrengen 4 controlesonderingen (_zuid extensie), zie figuur 11 voor de locaties. De damwand is trillend aangebracht en is van het type AZ-18-700 met een lengte van 8m. De damwand is waterdicht gemaakt door het toepassen van een bitumineuze afdichting. De kop van de damwand is aangebracht op een hoogte van ca. NAP+2,2m.



Figuur 11: Overzicht relevante sonderingen Zuidvak, damwand (turquoise), sloot (blauwe lijn), de sonderingen met toevoeging 'Zuid' zijn de achteraf uitgevoerde controlesonderingen

Figuur 11 geeft de locaties van de uitgevoerde sonderingen en de damwand weer. Hierbij zijn DKM-AL-53 en DKM-AL-54 vooraf uitgevoerd op ca. 0,7-0,8m van de beoogde damwand locaties. De sonderingen DKM-Zuid 1 t/m 4 zijn de controlesonderingen. De controle sonderingen zijn op verschillende afstanden t.o.v. de damwand geplaatst om de invloed van afstand op de verdichting te

kunnen meten. In tabel 4 is de afstand tot de damwand van de verschillende controle sonderingen weergegeven en de dichtstbijzijnde sondering die vooraf is gemaakt.

Tabel 4: Overzicht van relevante sonderingen incl. afstand tot dichtstbijzijnde damwand / de kortste afstand tot de damwand haaks op de dichtstbijzijnde damwand proefvak Zuid.

Controlesondering achteraf	Afstand tot damwand [m]	Dichtstbijzijnde sondering vooraf
DKM-Zuid-1	0,3 / 1,9	DKMT-AL-78
DKM-Zuid-2	2,8 / 4,8	-
DKM-Zuid-3	1,8 / 4,8	-
DKM-Zuid-4	0,4 / 2,4	DKM-AL-32

Tussen het maken van de initiële sonderingen en de controlesonderingen is naast het aanbrengen van de damwand ook een afdekkende kleilaag is aangebracht ten behoeve van de proefuitvoering. De sonderingen vooraf zijn uitgevoerd vanaf een maaiveld van ca. NAP +2,0 m. De controlesonderingen bij een maaiveld van ca. NAP +2,30 m wat duidt op een kleilaag van ca. 0,3m. De chronologie van de werkzaamheden is opgenomen in tabel 5. Bij de bepaling van de relatieve dichtheid conform de methode van Baldi is de effectieve korrelspanning benodigd. Deze wordt o.a. bepaald door de waterstand tijdens uitvoering van de sondering, deze is op basis van peilbuisdata bepaald en eveneens weergegeven in tabel 5.

Tabel 5: Chronologie sonderingen en damwandinstallatie incl. relevante grondwaterstand.

Sondering	Waterstand [m+NAP]	Datum uitvoering
DKM-AL-32 & -78	0,75	4-2-2021
Damwandinstallatie	-	16 tot 21-6-2021
Verzadiging zandpakket	-	23-6-2021
Aanbrengen afdekkende kleilaag (ca. 0,75m)	-	28/29-6-2021
DKM-Zuid 1-4	1,5	26-7-2021

De bodemopbouw wordt gekarakteriseerd door de aanwezigheid van getijdezand en aan de onderkant een afsluitende veenlaag. De bodemopbouw is in tabel 6 weergegeven. De bodemopbouw is overgenomen uit de ontwerprapportage [3]. Omdat de grondwaterstand tijdens het uitvoeren van de controlesonderingen verschilt (NAP +0,75 vs. NAP+1,5 m) zijn alleen de lagen onder de laagste grondwaterstand geanalyseerd.

Tabel 6: Grondopbouw proefvak Zuid [3].

Bovenkant laag [m NAP]	Laagdikte [m]	Bodembeschrijving
+2,0	0,7	Deklaag
+1,3	2,0	Getijdezand met stoorlaagjes laag 1
-0,7	1,1	Getijdezand met stoorlaagjes laag 2
-1,8	1,2	Getijdezand met stoorlaagjes laag 3
-2,8	1,0	Veen

De controlesonderingen zijn ruim een maand na het intrillen van de damwanden uitgevoerd, wateroverspanningen ten gevolge van het intrillen hebben ruim voldoende tijd gehad om aan te passen. Ook de wateroverspanningen als gevolg van het aanbrengen van de eerste kleilaag zijn volledig gedissipeerd op het moment van het uitvoeren van de controlesonderingen. Het aanbrengen van de kleilaag heeft invloed op de verticale spanningen waarbij een hogere effectieve verticale spanning tot een hogere pakking leidt.

Na uitvoeren van de pipingproef is de ligging van de pijp in kaart gebracht. Voor proefvak Zuid bevond de pijp zich op een hoogte van ca. NAP+0,6m. Bij ontgraving na de proef is geconstateerd dat de laag boven de pipe cohesief materiaal bevat. Het effect hiervan is duidelijk zichtbaar in **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**

Variatie ondergrond voor installatie

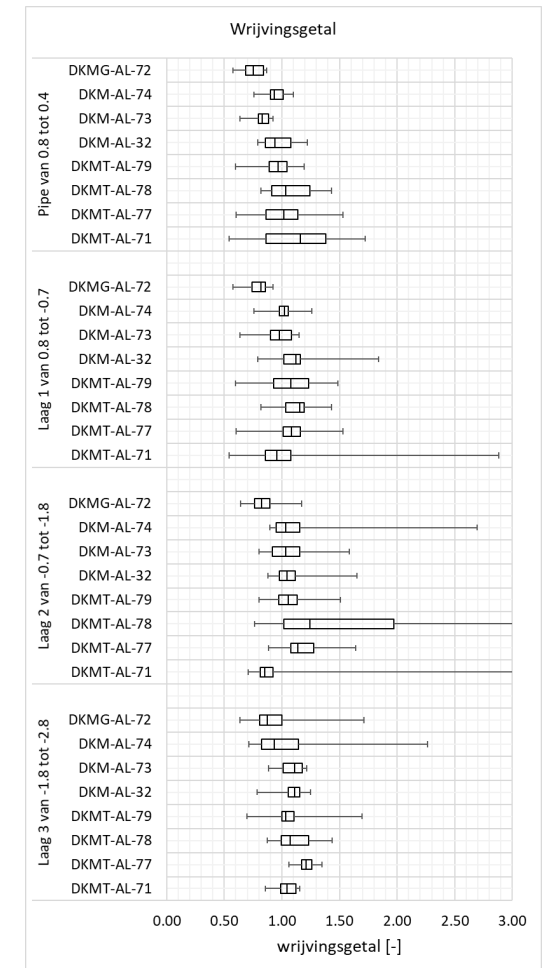
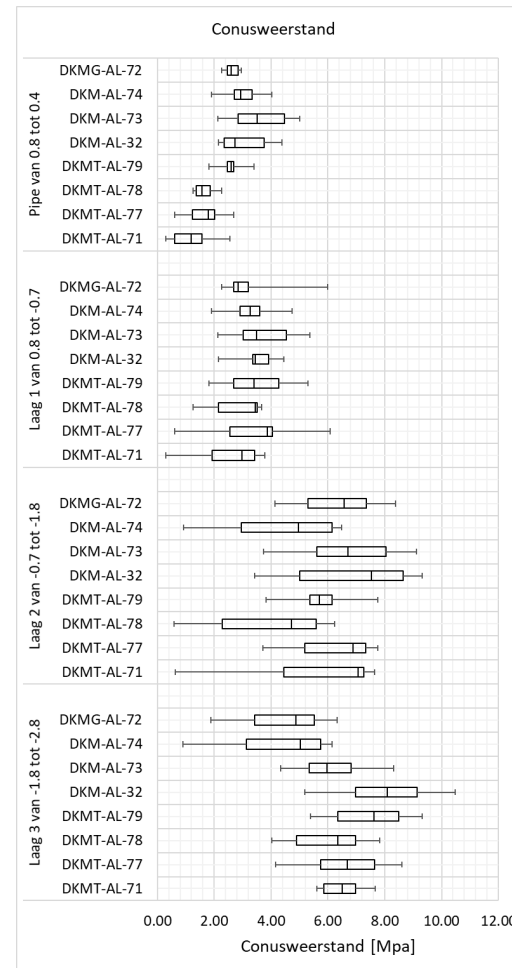
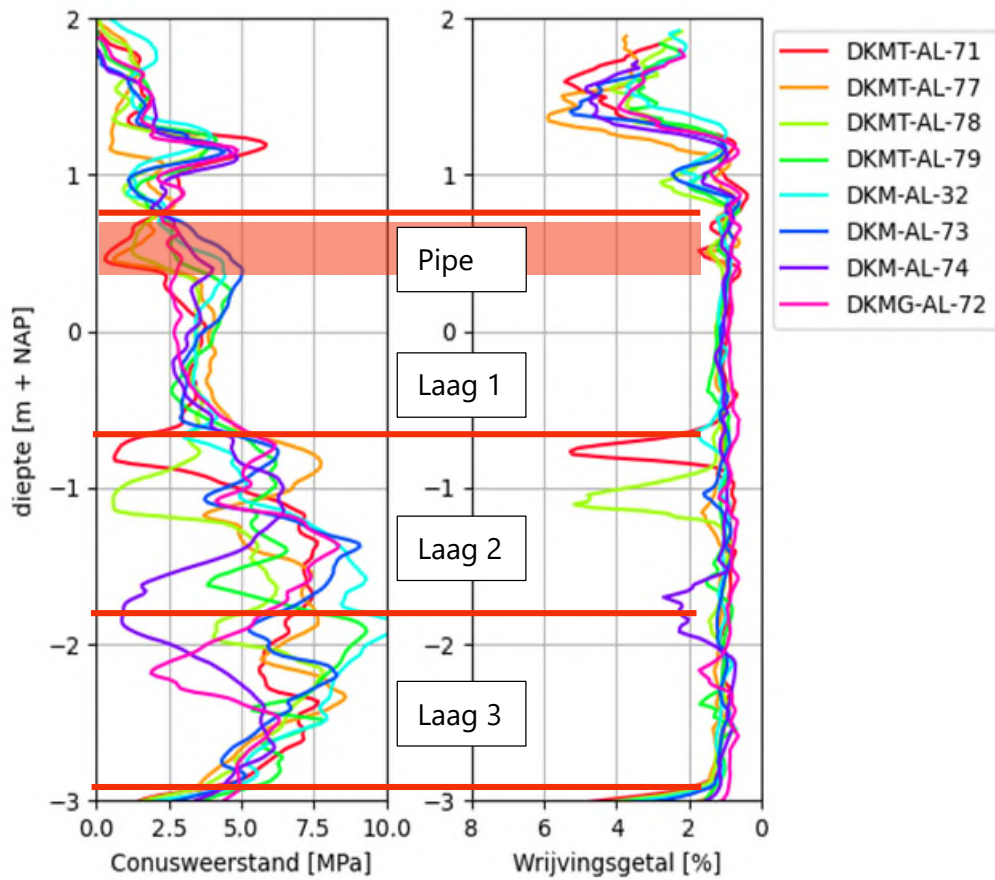
Net als voor het noordelijke proefvak is de basisvariatie in beeld gebracht. Hierbij is gebruik gemaakt van de laagindeling zoals weergegeven in tabel 6, met als aanvulling een laag +/-0,2 m rond het traject van de pipe (NAP+0,6m). Ook hier is wederom gebruik gemaakt van boxplotjes bij het presenteren van de resultaten.

In figuur 12 is links de conusweerstand en wrijvingsgetal weergegeven en rechts de respectievelijke spreiding van de meetgegevens binnen de verschillende lagen. Op basis hiervan worden de volgende constatering gedaan:

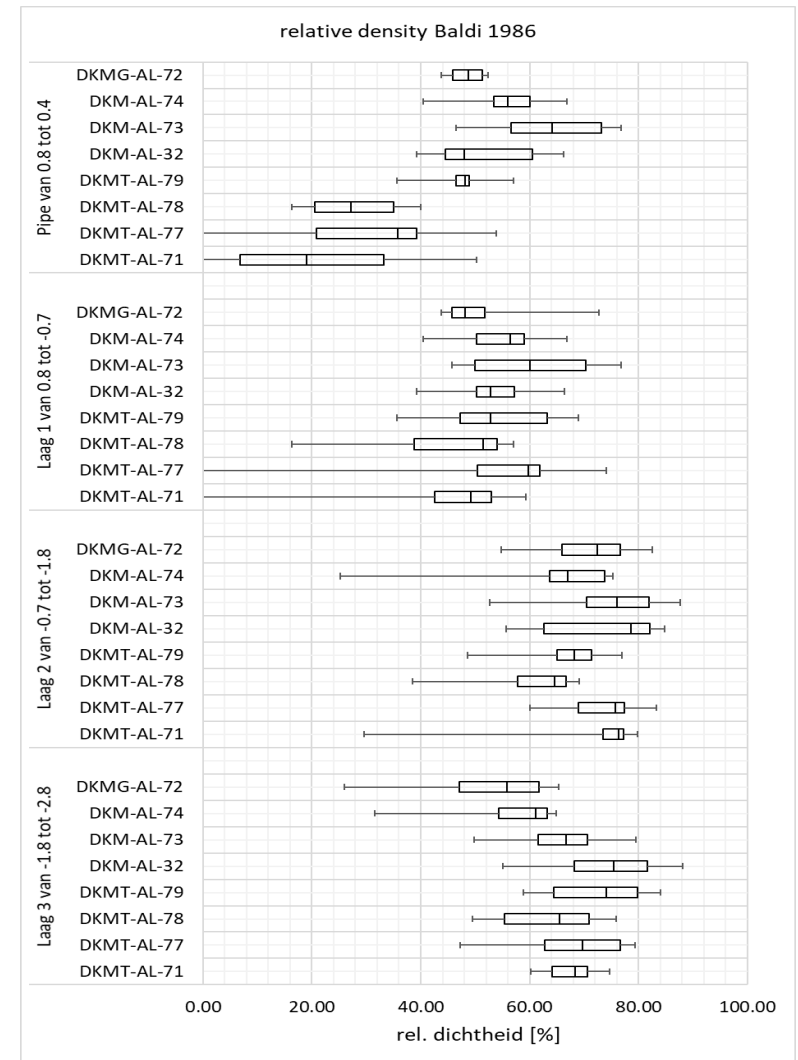
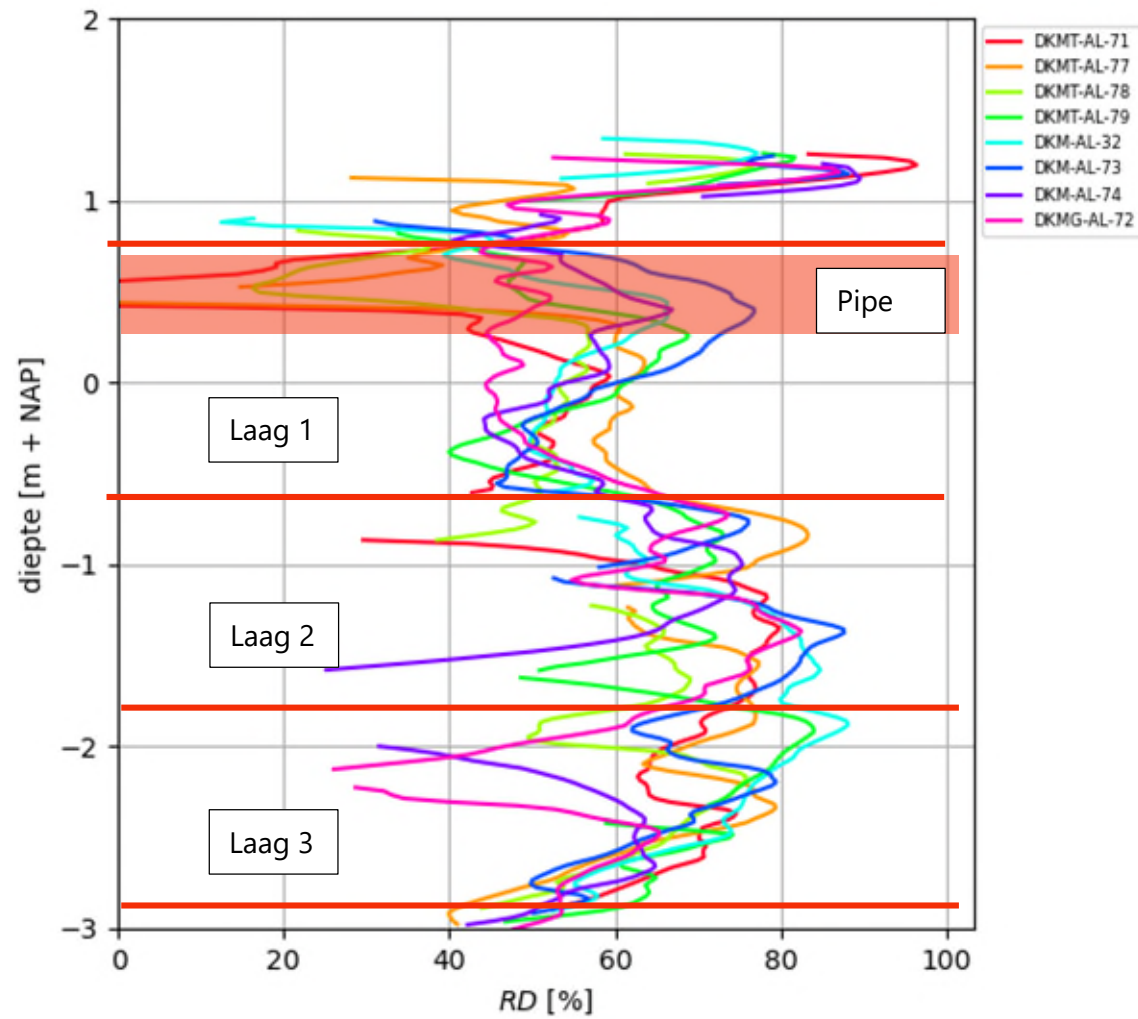
1. De conusweerstand rondom de pipe varieert sterk, vooral sonderingen DKMT-AL-71 en AL- 77 vallen op omdat die in deze zone een kleilaag aangeven. De conusweerstand van AL-71,77,78 laten een lagere conusweerstand zien dan de rest, deze drie sonderingen liggen in de zuidhoek van de damwandkuip.
2. In laag 1 is de variatie niet heel groot, vooral rond de zone van de pipe is enige variatie waardoor de minimale en maximale waarde door beïnvloed worden. In deze laag laten de sonderingen AL-71, 77 en 78 geen grote verschillen zien met de rest.
3. In laag 2 is de variatie veel groter vergeleken met laag 1. Vooral sonderingen AL-71 en AL-78 vallen op vanwege de aanwezigheid van een kleilaag.
4. In laag 3 is de variatie minder vergeleken met laag 2. Hier vallen vooral sondering AL-72 en AL-74 op omdat deze een lagere conusweerstand hebben vergeleken met de rest.

In figuur 13 is links de relatieve dichtheid weergegeven, rechts is de spreiding gevisualiseerd. Op basis hiervan worden de volgende constatering gedaan:

1. Sonderingen AL-71 en AL-78 laten in de zone rondom de pipe een kleilaag zien. De spreiding in deze zone is relatief groot.
2. In laag 2 komen weer verschillende stoorlagen naar voren. In zone 3 is de conusweerstand en relatieve dichtheid groter vergeleken met laag 2.
3. Er zijn geen duidelijke ruimtelijke trends zichtbaar, anders dat de lokale variatie groot is.



Figuur 12: Vergelijking variatie ondergrond vooraf (links) de conusweerstand en het wrijvingsgetal en (rechts) de spreiding van de conusweerstand en wrijvingsgetal binnen de laag.



Figuur 13: Vergelijking variatie ondergrond vooraf (links) de relatieve dichtheid en (rechts) de spreiding van de relatieve dichtheid binnen de laag.

Vergelijking voor en na installatie damwand

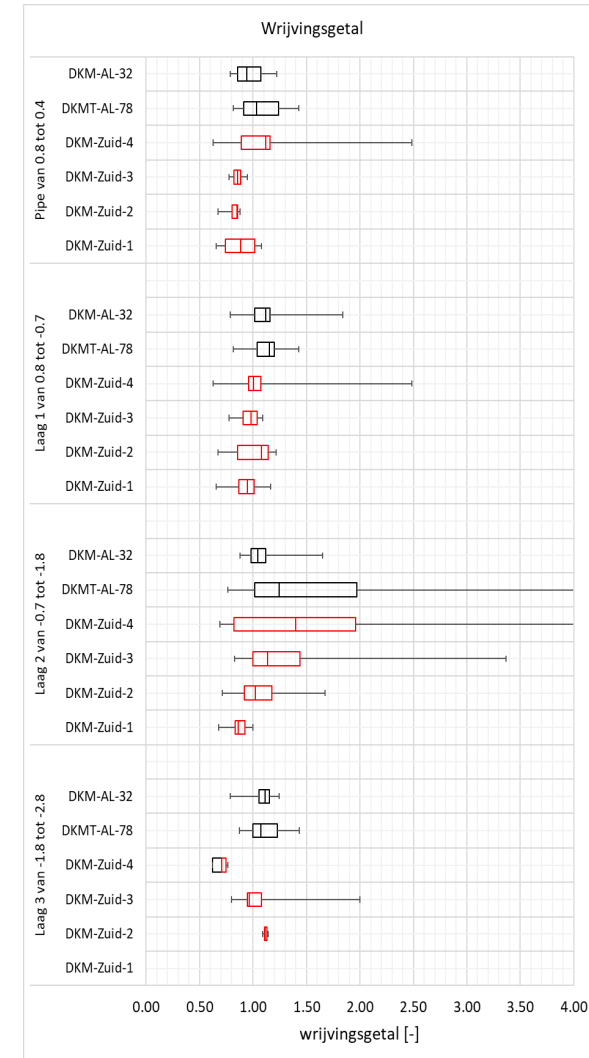
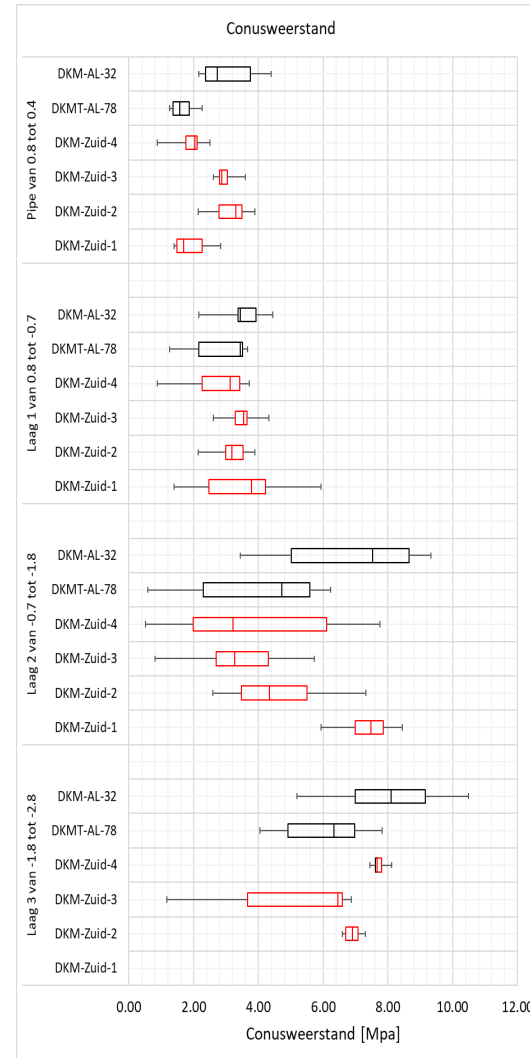
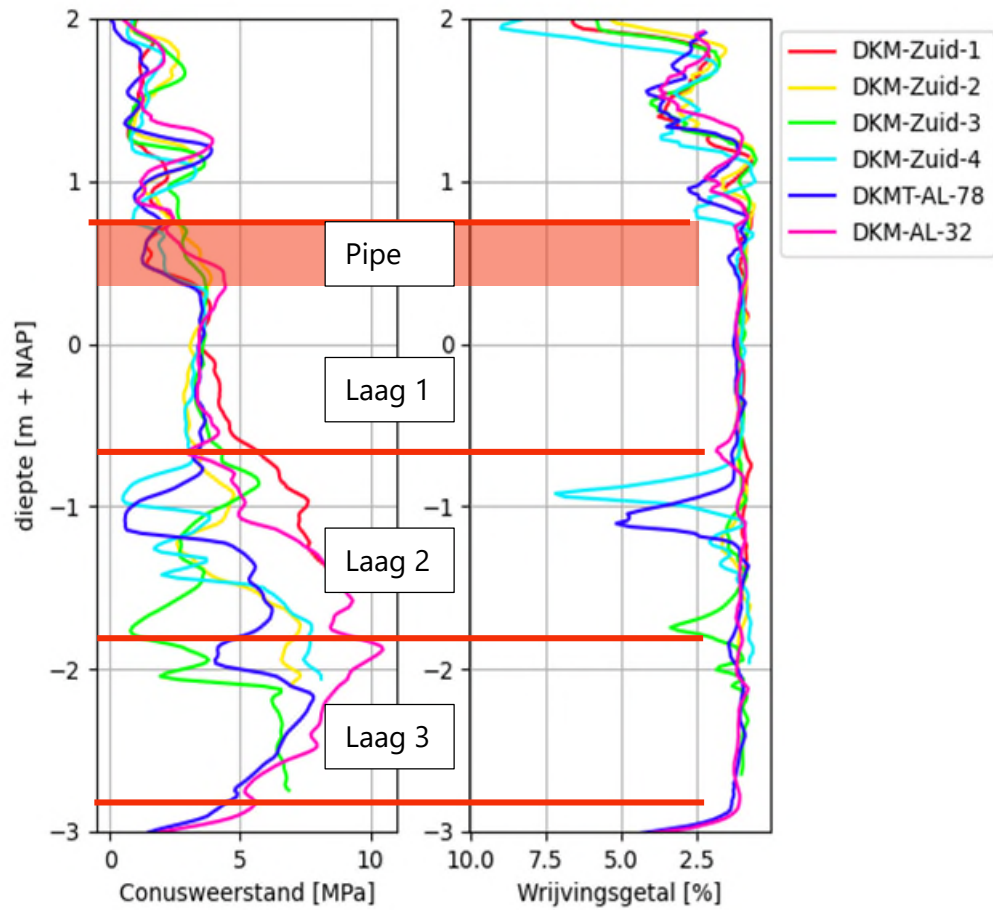
Na installatie van de damwanden en het aanbrengen van de extra kleiafdichting zijn er vier sonderingen uitgevoerd binnen het proefvak tussen de sloot en de damwand op verschillende afstanden. Door de sonderingen voor en na uitvoering te vergelijken kan de impact van de uitvoering op de pakking van het getijdezand achterhaald worden. Hierbij wordt dezelfde methodiek gehanteerd die in voorgaande paragraaf is toegepast. Hierbij worden de voorsonderingen in de bouwkuip gehanteerd (AL-53, AL-54). De controle sonderingen zijn niet over de gehele diepte van laag 3 uitgevoerd. Dit omdat de sondeerrupsen niet verankerd mochten worden in het proefvak. Daardoor was de uitvoeringsdiepte beperkt door de maximale drukkracht van het apparaat. De beperkte data leidt tot zeer smalle boxplotjes. Behalve bij sondering Zuid-3 die bijna over de gehele laag is uitgevoerd.

In figuur 14 is links de conusweerstand en wrijvingsgetal weergegeven en rechts de respectievelijke spreiding van de meetgegevens binnen de verschillende lagen. Op basis hiervan worden de volgende constatering gedaan:

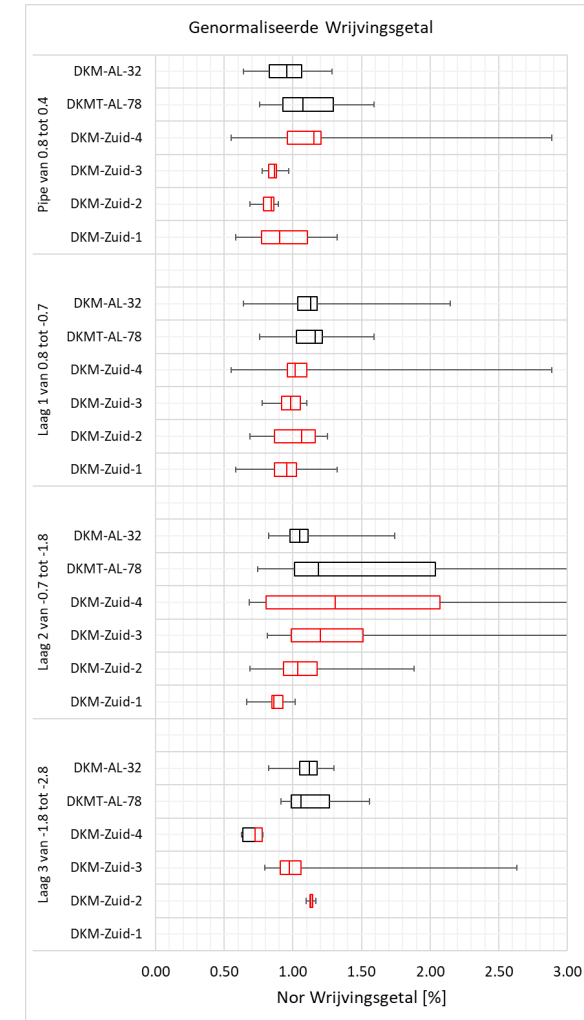
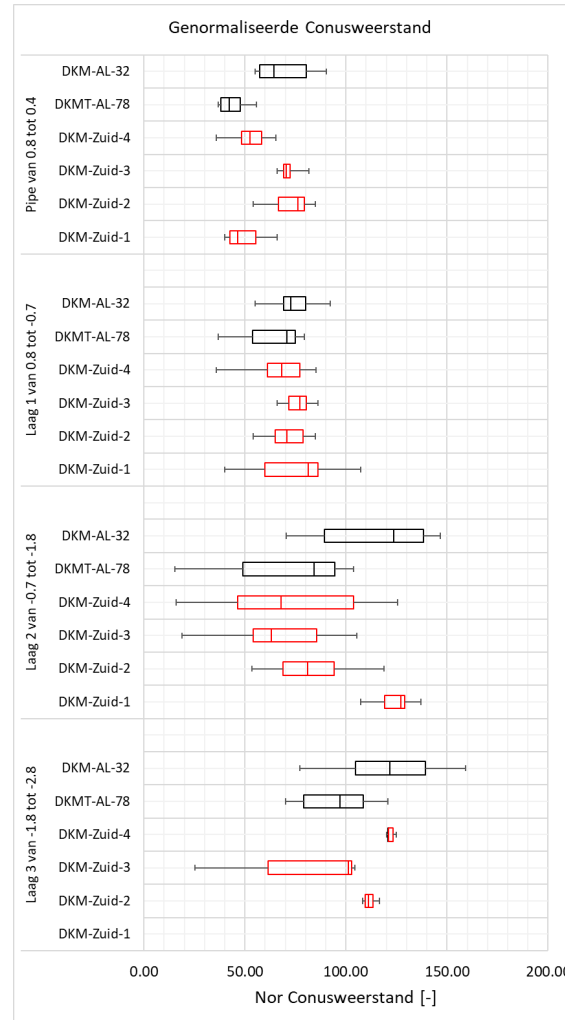
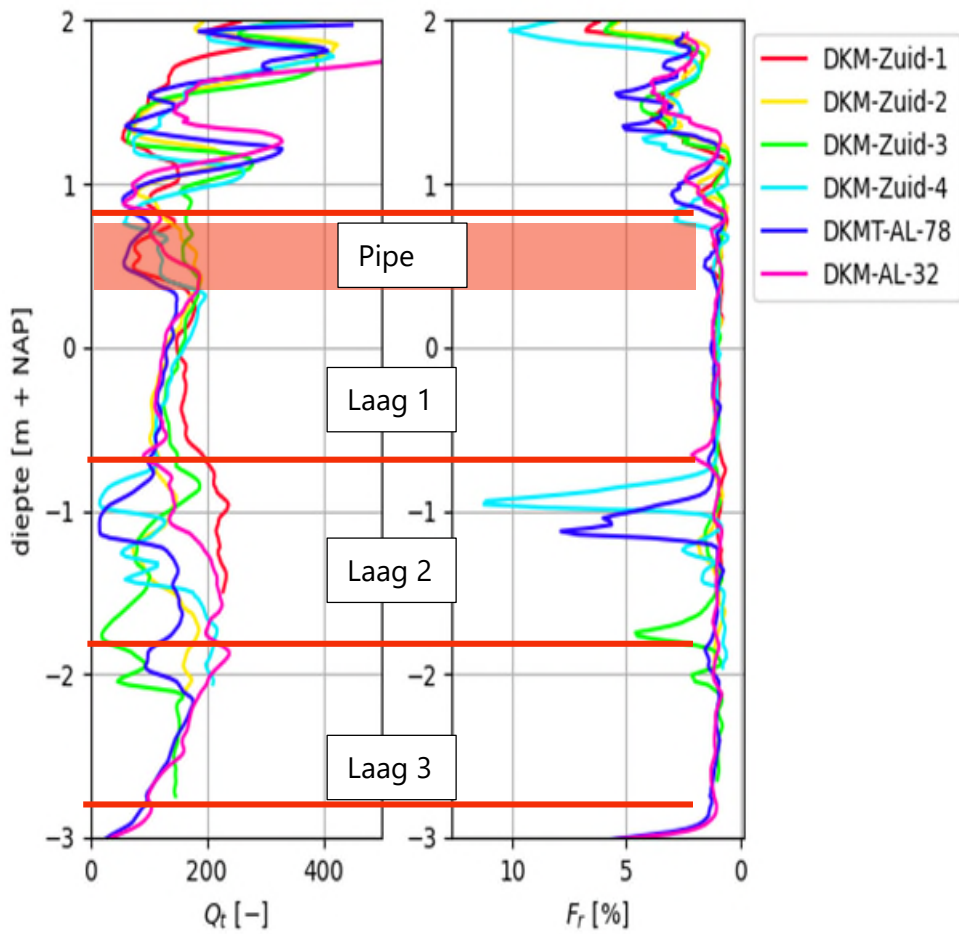
1. In de zone rondom de pipe is door het grote verschil in de resultaten van AL-32 en AL78 geen duidelijke conclusie te trekken. De conusweerstand na aanbrengen damwand ligt tussen de vooraf gemaakte sonderingen in. Het wrijvingsgetal laat wel een lichte afname zien.
2. In laag 1 lijkt er een lichte afname in het wrijvingsgetal zichtbaar. In de conusweerstand is geen duidelijke toename of afname zichtbaar.
3. In laag 2 is geen duidelijke conclusie te trekken door de grote spreiding in de sondeerresultaten die vooraf gemaakt zijn. De resultaten van de controlesonderingen liggen voornamelijk tussen deze resultaten in. Door de oogharen heen lijkt de conusweerstand gemiddeld licht af te zijn genomen.
4. In laag 3 is vanwege de beperkte diepte van de controlesondering geen conclusie te trekken.

De genormaliseerde conusweerstand en wrijvingsgetal en de spreiding in de lagen van deze parameters is weergegeven in figuur 15. Door te normaliseren wordt het effect van de extra kleiophoging en het verschil van grondwaterstanden gecompenseerd. Op basis hiervan worden de volgende constatering gedaan:

1. Voor de deze resultaten geldt hetzelfde als geconstateerd in figuur 14. Een afname van het wrijvingsgetal, en geen duidelijke conclusie over de conusweerstand vanwege de grote spreiding in de voor-sonderingen.



Figuur 14: Vergelijking parameters voor en na uitvoering met (links) de conusweerstand en het wrijvingsgetal en (rechts) de spreiding van de conusweerstand en wrijvingsgetal binnen de laag (in rood de controle sonderingen).



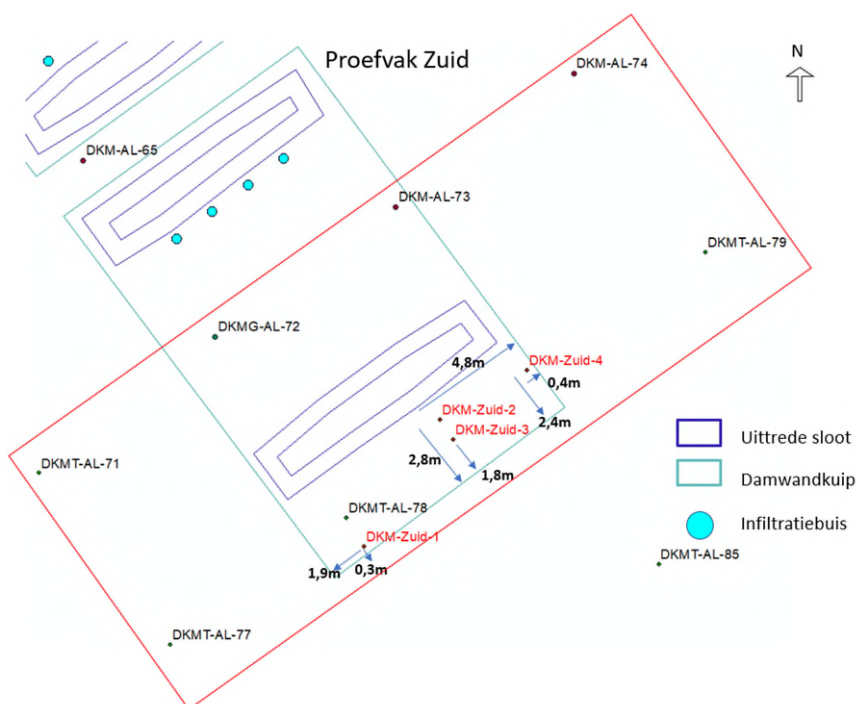
Figuur 15: Vergelijking parameters voor en na uitvoering met (links) de genormaliseerde conusweerstand en het wrijvingsgetal en (rechts) de spreiding van de genormaliseerde conusweerstand en wrijvingsgetal binnen de laag (in rood de controle sonderingen).

In figuur 16 is voor het interpreteren van de resultaten nogmaals de locatie van de verschillende sonderingen weergegeven. In figuur 17 is links de relatieve dichtheid weergegeven, rechts is de spreiding gevisualiseerd. Op basis hiervan worden de volgende constatering gedaan:

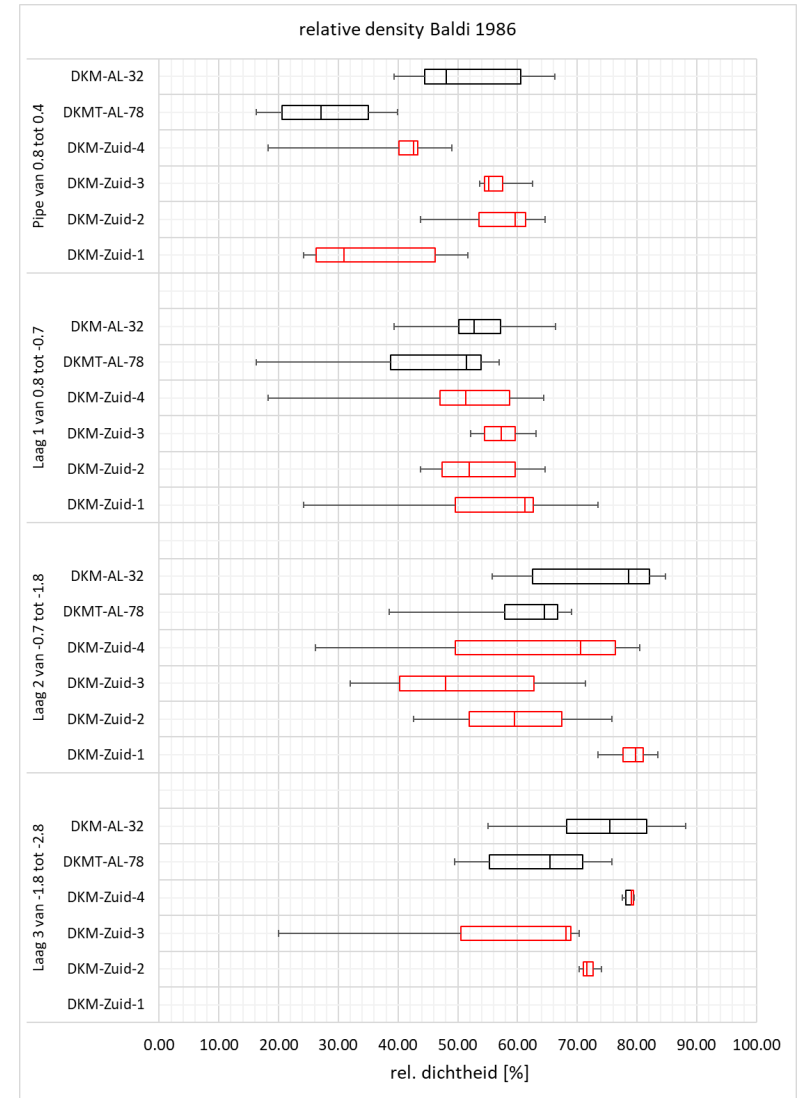
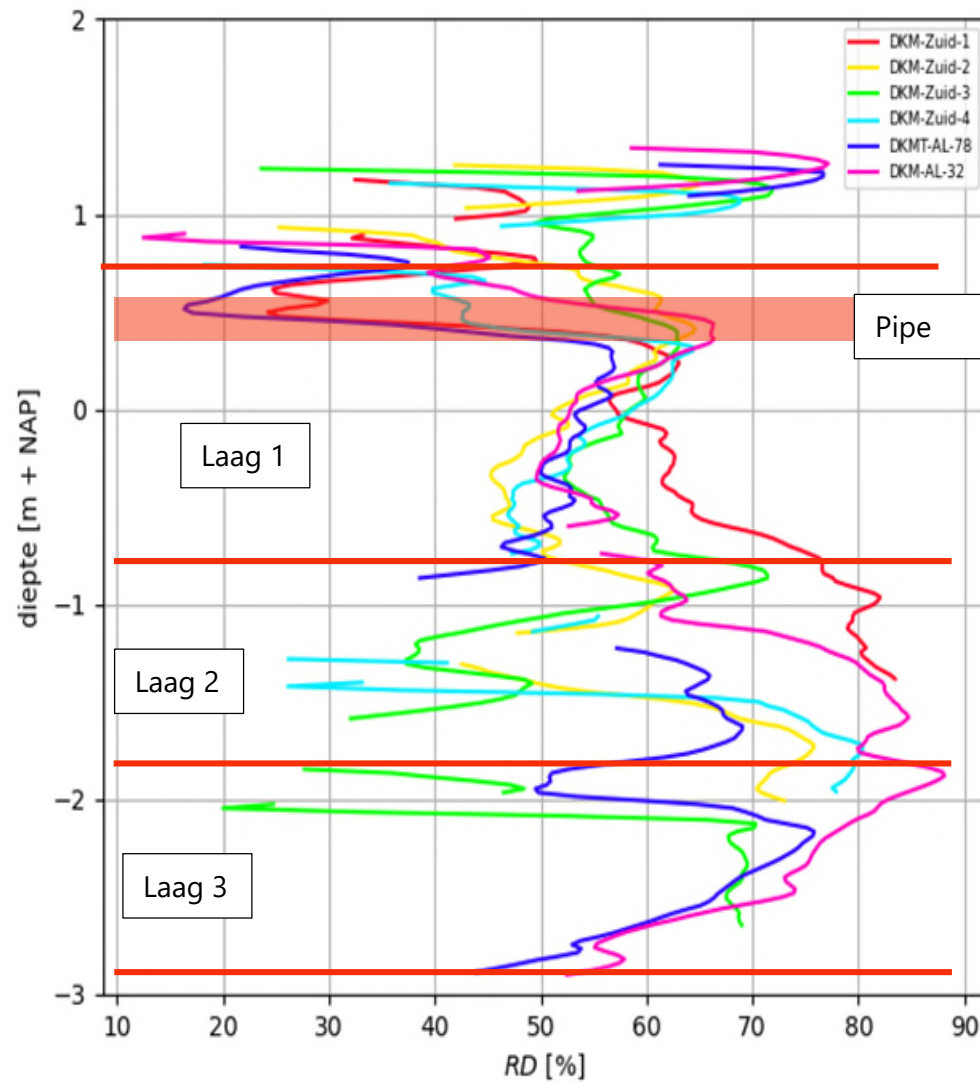
1. In laag 2 is een duidelijke afname te zien van de relatieve dichtheid t.o.v. van de sonderingen die vooraf gemaakt zijn. In de overige lagen geen duidelijke verschillen, mede door grote spreiding in resultaten voor en na.

In figuur 18 is links de relatieve dichtheid weergegeven van alle uitgevoerde sonderingen, rechts is de spreiding gevisualiseerd. Op basis hiervan worden de volgende constatering gedaan:

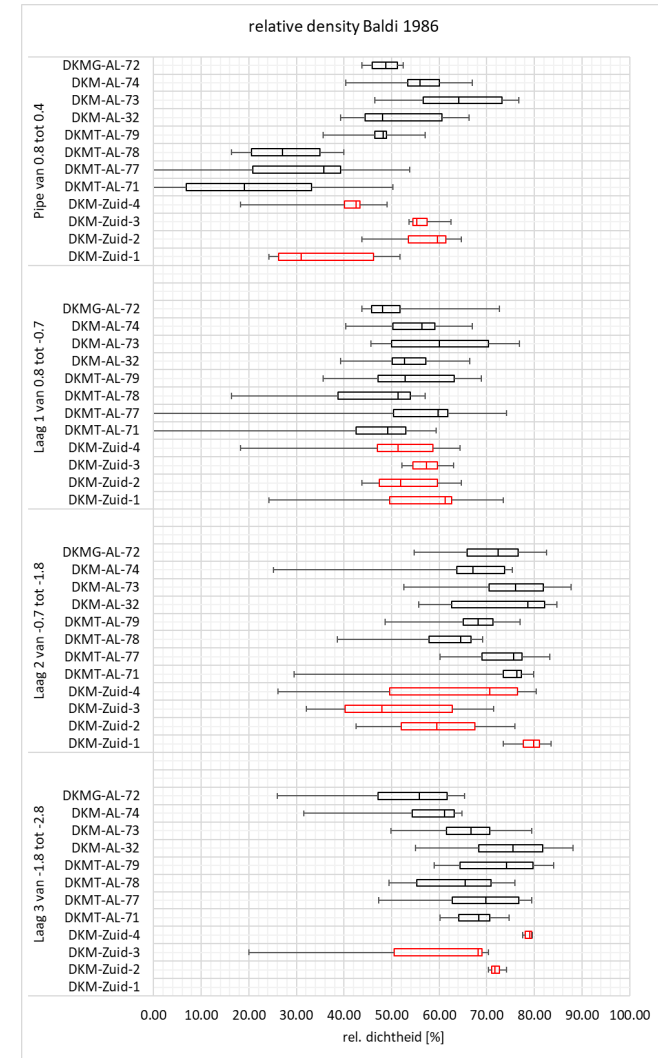
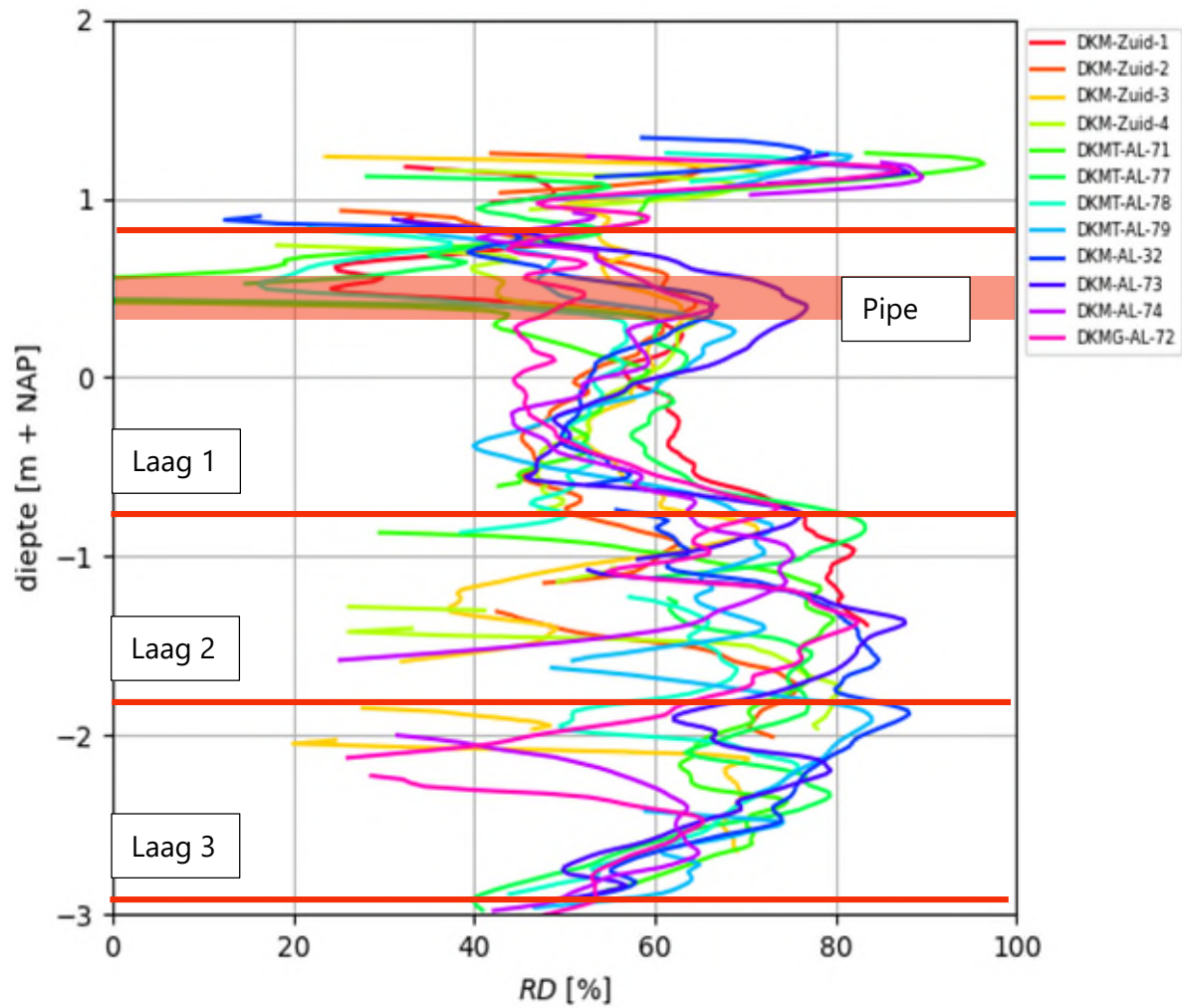
1. In de zone rond de pipe is veel spreiding. Sonderingen AL-71, 77 en 78 geven de laagste waarde van de RD. De controle sonderingen laten een grote spreiding zien. Waarbij Zuid-1 en 4 opvallen omdat deze lager zijn dan Zuid-2 en 3. Zuid-1 ligt relatief dicht bij sondering AL-78 waarmee vergeleken de relatieve dichtheid is toegenomen.
2. In zone 1 lijkt de relatieve dichtheid enigszins zijn afgenomen maar ligt binnen de bandbreedte van de vooraf uitgevoerde sondering.
3. In zone 2 is de duidelijkste afname te zien van de relatieve dichtheid.
4. Vanwege de afstand tot de damwand zou sondering DKM-Zuid-2 het kleinste effect moeten laten zien, dit is alleen in laag 2 zichtbaar. DKM-2 en 3 staan in een raai waarbij sondering DKM-3 het dichtst bij de damwand is uitgevoerd. Uit de resultaten volgt geen duidelijke conclusie. Rondom de pipe is de spreiding het kleinst in DKM-3 en is het effect vergelijkbaar met DKM-2. In laag 1 lijkt er een groter effect te zijn op DKM-2 vergeleken met DKM-3. In laag 2 is het effect wel duidelijk zichtbaar. Hier is de relatieve dichtheid van DKM-3 lager dan die van DKM-2.



Figuur 16: Overzicht relevante sonderingen Zuidvak, damwand (turquoise), sloot (blauwe lijn), de sonderingen met toevoeging 'Zuid' zijn de achteraf uitgevoerde controlesonderingen.



Figuur 17: Vergelijking parameters voor en na uitvoering met (links) de relatieve dichtheid en (rechts) de spreiding van de relatieve dichtheid binnen de laag (in rood de controle sonderingen).



Figuur 18: Vergelijking parameters voor en na uitvoering met (links) de relatieve dichtheid (rechts) de spreiding van de relatieve dichtheid binnen de laag voor alle beschouwde sonderingen (in rood de controle sonderingen).

Conclusies & aanbevelingen

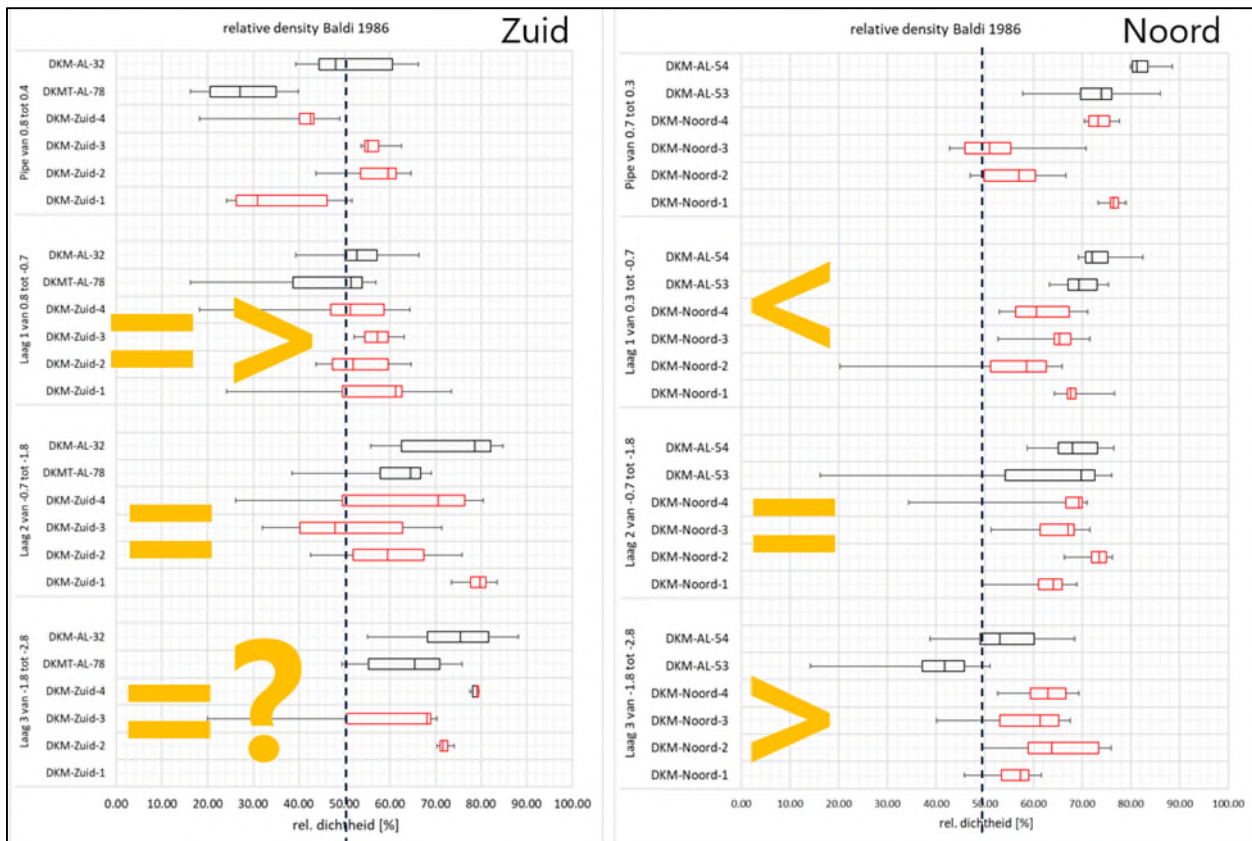
In voorliggende memo is het effect van het intrillen van damwanden op de pakking van het getijdezand van de proefvakken Noord en Zuid onderzocht. Na installatie van de damwanden zijn per proefvak vier controlesonderingen gemaakt op verschillende afstanden van de damwand. Op basis van het sondeeronderzoek is de (genormaliseerde) conusweerstand, wrijvingsgetal en relatieve dichtheid voor en na installatie vergeleken. Hierbij is het zandpakket opgedeeld in 4 lagen, 1 laag van +/- 20cm rondom de pipe en 3 lagen volgens de opbouw beschreven in het ontwerprapport [3].

Vanwege de grote (basis)variatie in de gemeten conusweerstand en afgeleide relatieve dichtheid is het trekken van een eenduidige conclusie ten aanzien van het effect van het intrillen van de damwanden lastig. Door de oogharen heen is per onderscheiden zandlaag binnen het getijdenpakket een invloed waarneembaar. Dit effect is niet voor alle lagen gelijk en verschilt ook per proefvak.

Het intrillen van de damwanden heeft lokaal voor een iets hogere dan wel iets lagere pakking gezorgd, afhankelijk van de beginconfiguratie van het korrelskelet. Het lokaal verzakken van de grond in de kassen van de damwandplanken wordt toegeschreven aan de kleef langs de plank die de cohesieve toplaag heeft meegetrokken. Grootschalige zakkingen zijn niet waargenomen.

In het model van Sellmeijer voor terugschrijdende erosie is in de sterktefactor ook een term opgenomen voor de relatieve dichtheid (RD). De aangepaste rekenregel is alleen voor een relatieve dichtheid van groter dan 50% gevalideerd. Zoals uit Figuur 19 blijkt wordt aan deze voorwaarde voldaan, in het noordvak meer uitgesproken dan in het zuidelijke vak. De invloed van de relatieve dichtheid op het berekende kritiek verval met het Sellmeijer model lijkt beperkt te zijn. In de rekenregel zelf is de relatieve dichtheid niet opgenomen, dit omdat de parameters lastig te bepalen is en de onzekerheid rondom de invloed van de relatieve dichtheid klein is ten opzichte van de totale onzekerheid van de rekenregel.

Op basis van onderstaand figuur lijkt de relatieve dichtheid rond pipeniveau (en laag 1) voor het zuidelijke proefval gelijk te zijn gebleven of iets te zijn toegenomen, terwijl in het noordelijk proefvak sprake zou zijn van een afname. Uiteindelijk liggen de waarden erg dicht bij elkaar voor beide proefvakken, zo rond de 60%. Er wordt dan ook geen significant effect van een wijziging in relatieve dichtheid op het resultaat verwacht tussen beide proefvakken.



Figuur 19: Relatieve dichtheid voor en na intrillen damwanden incl. aanduiding effect en RD=50% grens (stippellijn).

Aanbevelingen

Om het effect van de installatie van de damwanden op de pakking van het getijdezand te onderzoeken zijn er na installatie per proefvak 4 controlesonderingen gemaakt. Hierbij zijn per proefvak 2 sonderingen op een raai geplaatst en 2 sonderingen op variërende afstanden tot de damwand om het effect van afstand op een eventueel effect te onderzoeken. Uit de analyses volgt dat er binnen korte afstanden relatief veel variatie in bodemopbouw zit waardoor de vergelijking bemoeilijkt wordt. Vanwege de variatie in bodemopbouw op korte afstand wordt aanbevolen om bij toekomstige analyses de controle sonderingen dicht(er) (orde 1m) bij de voor installatie geplaatste sonderingen te plaatsen.

De effecten van een veranderende pakking zullen het meest van invloed zijn op de doorlatendheid als parameter binnen de pipinganalyses. De doorlatendheidsvariatie van het getijdezandpakket is vastgesteld met HPT-AMPT sonderonderzoek dat eveneens voor en na de proef (lees: intrillen damwanden) is uitgevoerd. De HPT-resultaten worden gevalideerd en aangescherpt op basis van een fit van een stromingsmodel op de gemeten waterdrukken en debieten tijdens de daadwerkelijke proefuitvoering. Het wordt aanbevolen de resultaten van deze modelfit en eventuele verschillen met de gehanteerde doorlatendheidsvariatie uit de ontwerpfase te beschouwen in het licht van de resultaten uit deze verdichtingsanalyse.

Appendix B

Analyse laboratoriumonderzoek
fase 3 pipingproeven

Pipingproeven Hedwigepolder

Aan: Projectteam Hedwigepolder
Van: Luuk Barendse; Gert-Ruben van Goor
Datum: 15 juli 2022
Ref nr.: 1220-164143.M29 v3.0
Onderwerp: Analyse laboratoriumresultaten fase 3

1. Inleiding

Tussen 6 september en 7 oktober 2021 zijn in de Hedwigepolder twee grootschalige pipingproeven uitgevoerd, inclusief Crime Scene Investigation (CSI) na afloop. Met dit laatste wordt het opengraven van de proefvakken bedoeld om de bodemopbouw en de ontstane pipes te onderzoeken. Tijdens het uitvoeren van de proeven is monstermateriaal van de ondergrond genomen om de karakteristieken te bepalen.

Deze uitwerking bevat de resultaten van het in situ- en/of laboratoriumonderzoek dat ten behoeve van het Hedwigeproject is uitgevoerd. Dit onderzoek is uitgevoerd zoals beschreven in het lab-plan 1220-164143.M22 d.d. 18-11-2021 en uitgevoerd door het laboratorium van Fugro. De proeven bestaan uit standaard geotechnische proeven om samenstelling en grondeigenschappen te bepalen en proeven specifiek gericht op bepaling van de chemische samenstelling en/of erosie eigenschappen.

Tabel 1.1: Samenvatting monsteroverzicht

Proefvak	Monstercategorie	Aantal	Codering
Zuid	1 (afgeschept wel)	5	Z1 t/m Z5
	2 (CSI, geroerd)	8	Z107 t/m Z112; Z_1_geroerd; Z_2_geroerd
	3 (CSI, ongeroerd)	16	Z100 t/m Z106; Z113 t/m Z119; Z_1; Z_2; Z200; Z201
Totaal Zuid:		29 monsters	
Noord	1 (afgeschept wel)	42	N1 – N42
	2 (CSI, geroerd)	43	N100 t/m N139; N144 t/m N146
	3 (CSI, ongeroerd)	6	N140 t/m N143; N200; N201
Totaal Noord:		89 monsters	
-	2 (CSI, geroerd)	1	N146 (monstermateriaal rondom WSMs)

Er zijn meer monsters in het Noordelijke proefvak afgeschept omdat in dit proefvak de pipe verder en beter waarneembaar groeide dan in het Zuidelijke proefvak, waar de pipe ook in de nacht is gegroeid. Zo zijn er tijdens de proef in het Noordelijke proefvak veel meer monsters uit de wel afgeschept om inzicht te krijgen in onder andere de verandering in korrelverdeling.

De uitgevoerde proeven dienen onder andere parameterwaarden op te leveren voor toepassing in het Sellmeijer rekenmodel voor piping. Daarnaast kan het inzicht geven in waarom de pipe op die diepte is gaan groeien. Ten behoeve van de bepaling van de grondeigenschappen zijn zowel het afgeschepte monstermateriaal van de wellocaties (tijdens de proefuitvoering) als de monsters genomen tijdens de CSI-fase gebruikt. Hierin zijn de categorieën gehanteerd zoals te zien in Tabel 1.2.

Tabel 1.2: Herkomst van monsters bepaald de categorie.

Herkomst / categorie	Beschrijving	Aantal beproefde monsters [-]
Pipe_naast	Monster genomen binnen >0,10 m en <0,50 m naast pipe.	4
Pipe_onder	Monster genomen binnen >0,10 m en <0,50 m onder pipe.	9
Pipe_CSI	Monster genomen binnen <0,10 m van pipe.	10
Pipe_wel	Monster genomen in of bij wel.	23
Pipe_dak	Monster genomen van dak van pipe.	2
CSI_algemeen	Monster voor algemeen onderzoek.	20

1.1 Eerder uitgevoerd onderzoek

De huidige analyses maken gebruik van het gedetailleerde onderzoek zoals heeft plaatsgevonden in fase 3, tijdens de proefuitvoering en de CSI-fase. Eerder onderzoek binnen fase 1A, 1B en 2 van het project was vooral bedoeld voor het bepalen van de geschiktheid van mogelijke proeflocaties en een eerste grove karakterisering van de ondergrond.

De resultaten van het onderzoek uit deze eerdere fasen is gerapporteerd en geanalyseerd in het eindrapport van fase 1 (1220-164143.R01 d.d. 15-1-2021) en het ontwerprapport van de pipingproeven (1220-164143.R02 d.d. 16-6-2021). Het onderzoek heeft zich destijds gericht op het bepalen van de globale bodemopbouw, korrelverdeling van het getijdenzand en doorlatendheid langs de Sieperdadijk (fase 1A) en kansrijke locaties in het achterland (fase 1B en 2). De belangrijkste resultaten van het eerdere onderzoek zijn samengevat in onderstaande tabel en zijn in lijn met de resultaten zoals gerapporteerd in het Factual Report van de pipingproeven (1220-164143.R04 d.d. 25-3-2022) en in voorliggend hoofdstuk.

Tabel 1.3: Resultaten eerder onderzoek.

	Fase 1A (Sieperdadijk)	Fase 1B (Achterland)	Fase 2 (Zoekgebied)
d_{70} top zand [um]	Niet uitgevoerd	114 (zoekgebied 2 ¹⁾)	132 (105-153)
Dikte zandpakket [m]	(deels) ontbreken deklaag op zand	4-4,5 (zoekgebied 2)	3,7 – 4
Doorlatendheid (K_h) [m/d]	1,8-2,1 (sectie XIV en sectie XII)	-	Meerlaags: 1,75 tot 4
Anisotropie (K_h/K_v) [-]	3,7	-	3,5 (2-4,7)
¹⁾ Binnen zoekgebied 2 is de uiteindelijke proeflocatie gekozen			

2. Korrelverdelingen

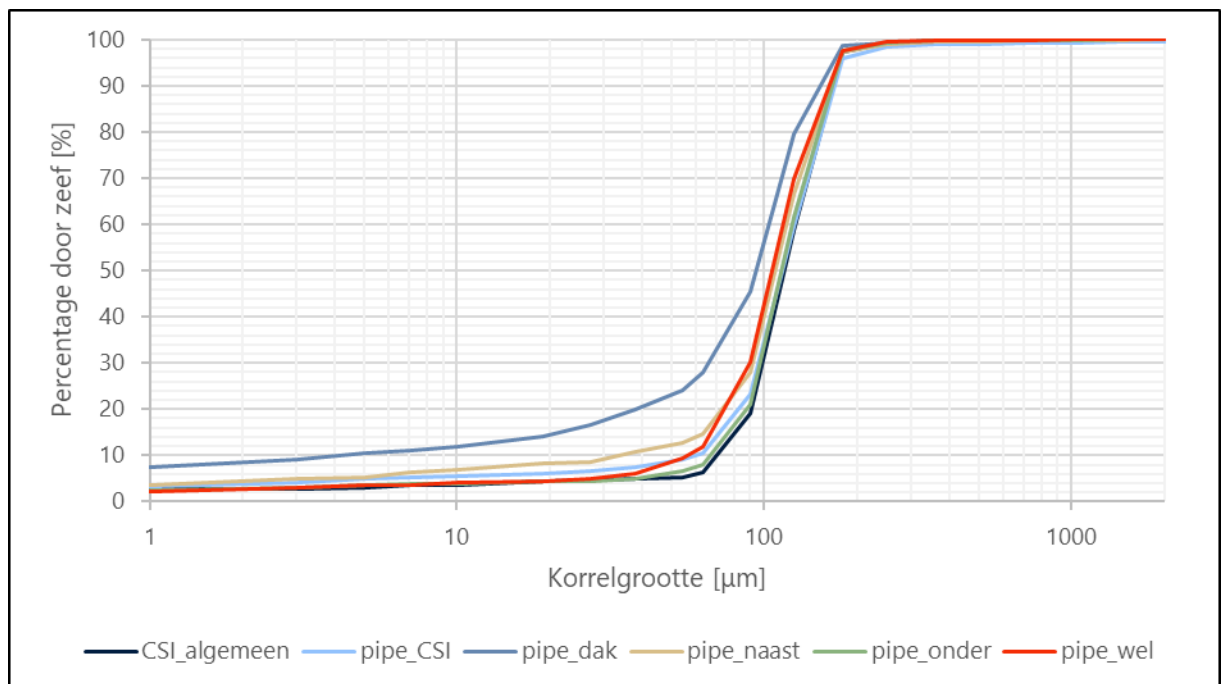
2.1 Korrelverdelingen

Aan de hand van zeefproeven in het laboratorium zijn de korrelverdelingen van de verschillende monsters bepaald. Door de massa per zeef te bepalen kan het percentage per korrelgrootte worden bepaald. De fijne fracties onder de 63 μm zijn met behulp van hydrometerproeven bepaald. De hydrometerproef is een sedimentatiemethode die nagaat hoe lang de deeltjes van een monster er over doen om te bezinken tot de bodem in een cilinder gevuld met water.

Tabel 2.1: Overzicht monsteselectie korrelverdeling.

Categorie	Aantal	Monsters
Pipe_wel	23	N1, 2, 6, 7, 9, 10, 14, 17, 21, 23, 25, 27, 29, 30, 31, 33, 36, 39, 41, 42 Z1, 3, 5
Pipe_CSI	10	N100 t/m 107, N115, N116
CSI_algemeen	3	N112; Z117, 118
Pipe_naast	3	N114, 117; Z108
Pipe_onder	9	N119, 120, 124, 125, 126; Z109, 111, 112
Pipe_dak	2	N145, Z100

Van de verschillende monsters uit Tabel 2.1 zijn de korrelverdelingen bepaald. De gemiddelde korrelverdeling per categorie is te zien in Figuur 2.1. Hier valt op dat pipe_dak een grotere kleine fractie heeft ten opzichte van de andere monsterafnamelocaties. Alle korrelverdelingen per categorie zijn te zien in Figuur 2.1.



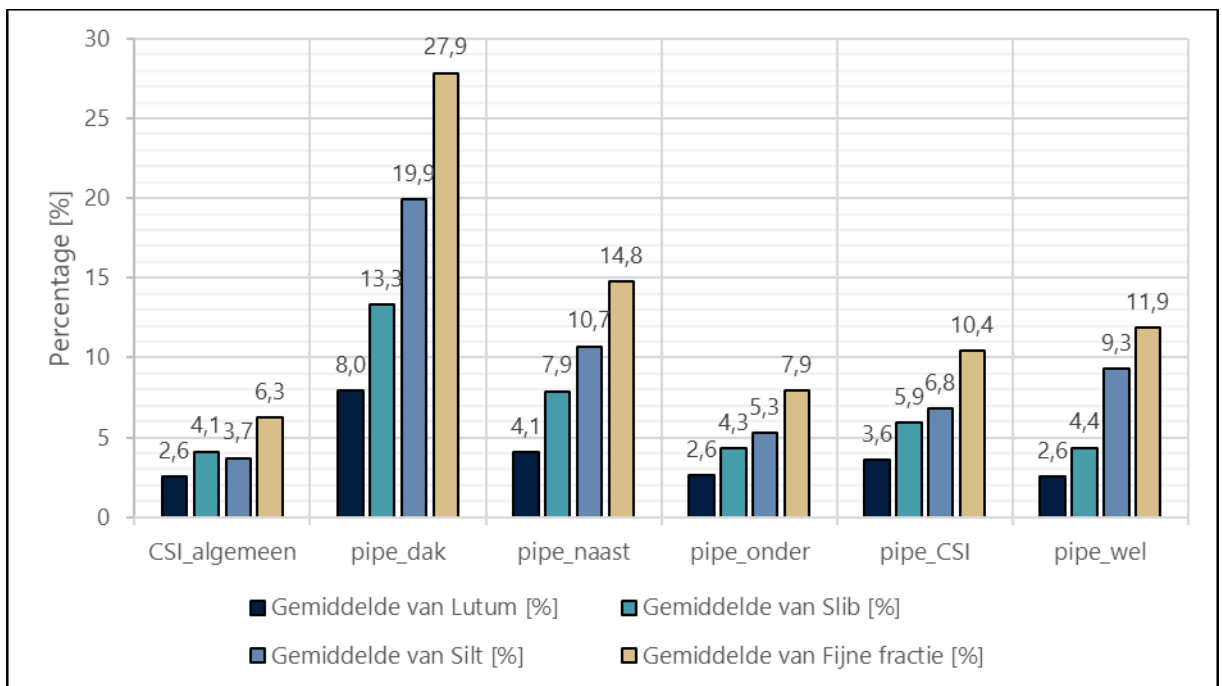
Figuur 2.1: Korrelverdeling van monsters gemiddeld per categorie.

De verschillende monsters zijn geïnclassificeerd op korrelgrootte volgens Tabel 2.2.

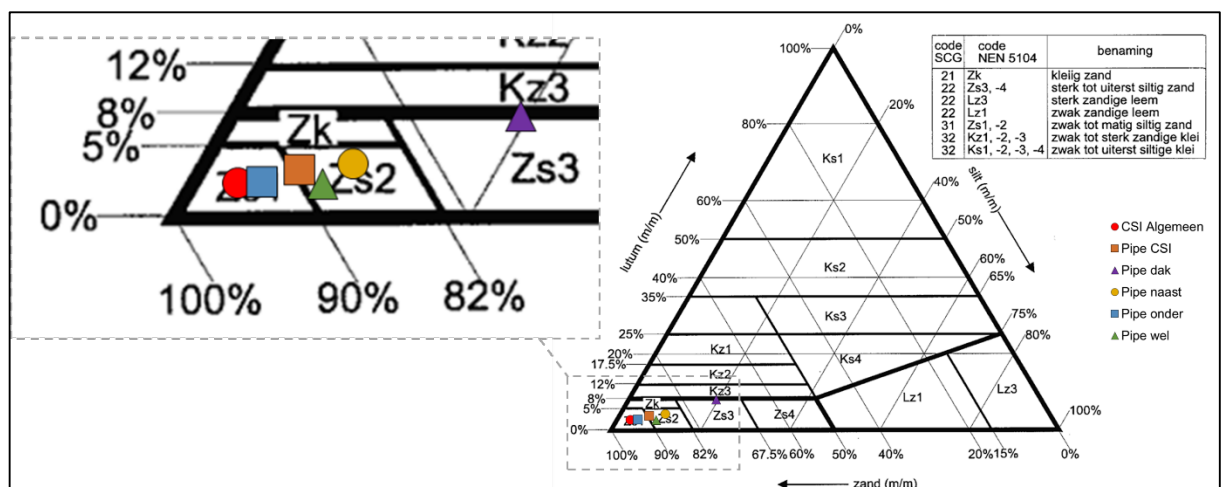
Tabel 2.2: Classificatie korrelgroottes.

	Minimum [μm]	Maximum [μm]
Lutum	0	2
Slib	0	16
Silt	2	63
Zand	63	2000

De korrelgroottes zijn per type monster weergegeven in Figuur 2.2. In Figuur 2.3 zijn volgens NEN 5104 de verschillende monsters geïnclassificeerd in de zanddriehoek.



Figuur 2.2: Gemiddelde lutum-, silt- en siltpercentages per monstercategorie. Slib is een subcategorie binnen de kleine fractie (0-63 μm) waardoor de percentages nu optellen tot > 100%.



Figuur 2.3: Indeling en benaming van grondsoorten naar de gehalten aan lutum, silt en zand conform NEN 5104.

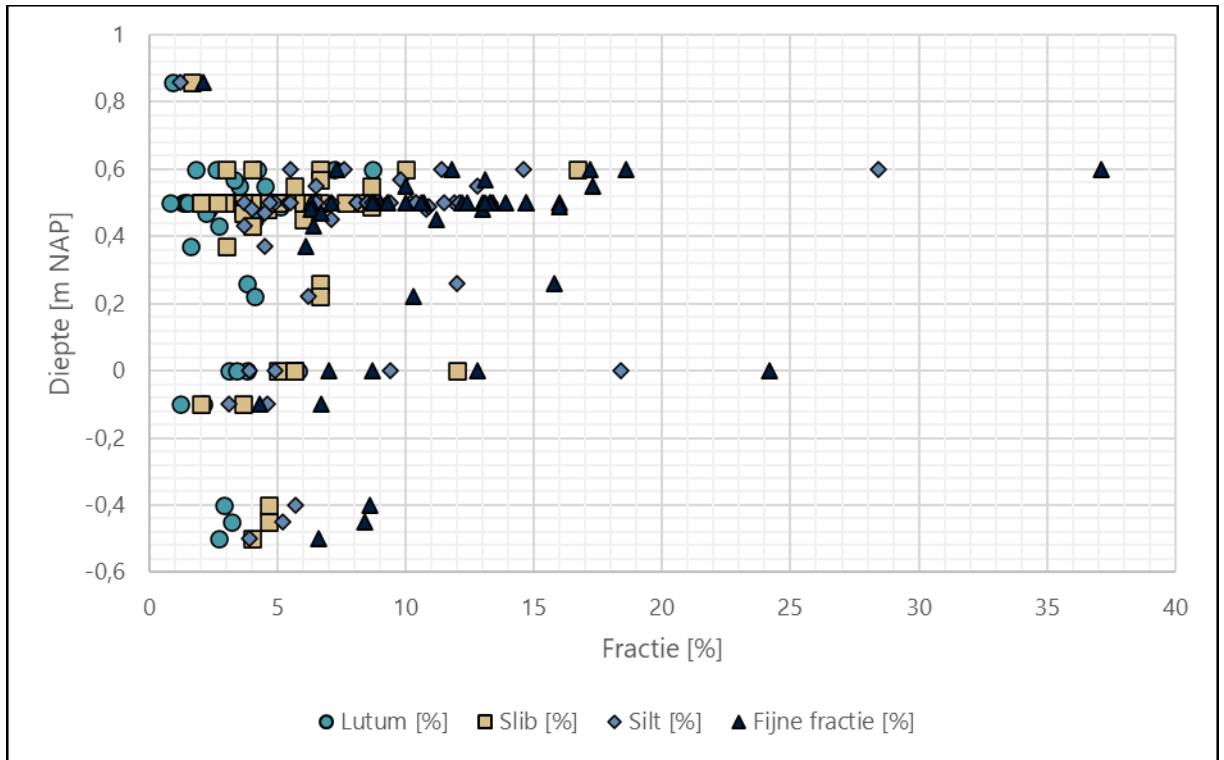
Wat opvalt is het hoge gehalte aan silt (19,9%), slib (13,3%) en lutum (8,0%) in het dak van de pipe ten opzichte van de andere locaties. Pipe_dak classificeert dan ook juist op het grensvlak van 'klei, sterk zandig (Kz3)' en 'zand sterk siltig (Zs3)'. Het materiaal is cohesief genoeg om als dak voor de pipe te dienen, niet in te storten en blijkbaar ook weerstand tegen erosie door langsstromend water in de erosiepipe te kunnen bieden.

Uit Figuur 2.2 is af te lezen dat pipe_wel minder lutum en slib bevat in vergelijking met pipe_CSI. Het is aannemelijk dat een deel van het fijnste materiaal is weggevoerd door het uitredend water en verderop is afgezet. CSI_algemeen komt goed overeen met pipe_onder, dit wordt verklaard doordat beide categorieën van monsters over het algemeen relatief diep in het zandpakket zijn genomen.

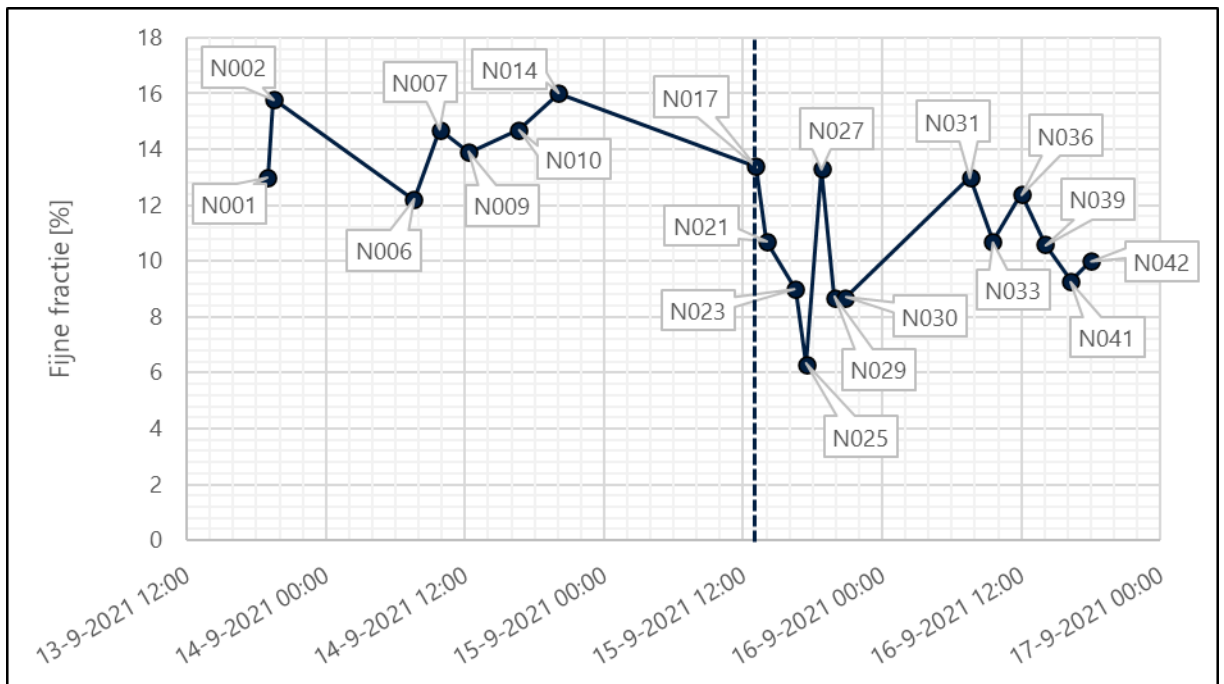
Pipe_naast heeft een relatief hoog percentage aan fijne fractie vergeleken met pipe_CSI en pipe_wel. In lijn met de hypothese van het onderzoek kan dit het pad van de pijp verklaren, de werkhypothese is namelijk dat zand met een relatief hoge fijne fractie meer weerstand heeft tegen piping.

Pipe_onder laat een relatief laag percentage fijne fractie zien in vergelijking met pipe_CSI/wel en -naast. Dat kan verklaard worden door de verschillende opvullingsfasen van de getijdengeul waarbij doorgaans een 'fining-upward'-trend wordt gevonden. Naarmate de geul verzand neemt de waterstroming af en wordt fijner materiaal afgezet. Ter illustratie van het verloop over de diepte zijn in Figuur 2.4 de verschillende fracties (lutum, slib, silt en de totale fijne fractie) afgezet tegen de diepte. Dit figuur laat zien dat de grond naar boven toe fijner wordt. Het laat een afnemende fijne fractie zien naarmate de diepte toeneemt. Dit duidt ook op het 'fining-upward' proces bij het opvullen van de getijdengeul.

In Figuur 2.5 zijn de fijne fracties die zijn afgescheept bij de zandmeevoerende wel in het Noordelijke proefvak (Figuur 2.6) weergegeven. De horizontale pipegroei in het Noordelijke vak is waargenomen vanaf 15-9 13:00. Vanaf dit tijdstip (N017) is er een duidelijke afname in de fijne fractie te zien. Dit is te verklaren doordat voor die tijd verticale piping optreedt, waarbij de pipe groeit door het uiterst siltige zand (vergelijkbaar met of siltiger dan pipe_dak). Op het moment dat de pipe horizontaal begint te groeien, wordt minder siltig zand naar boven getransporteerd.



Figuur 2.4: Lutum-, slib-, silt- en fijne fractie afgezet over de diepte.



Figuur 2.5: Gehalte fijne fractie over tijd afgeschept bij de zandmeevoerende wel in het noordelijke proefvak. De gestippelde verticale lijn geeft het tijdstip van waarneming van horizontale pipegroei in het Noordelijke vak weer.



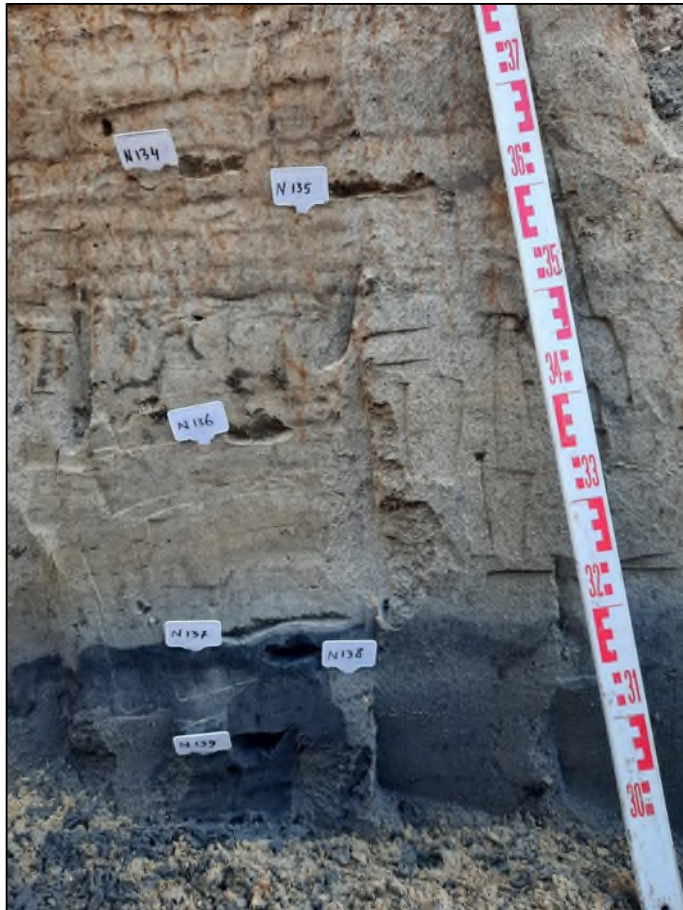
Figuur 2.6: Zandmeevoerende wel waarbij tijdens de proef zand is afgeschept (monsters: N1-N42).

2.2 Malvern korrelverdeling

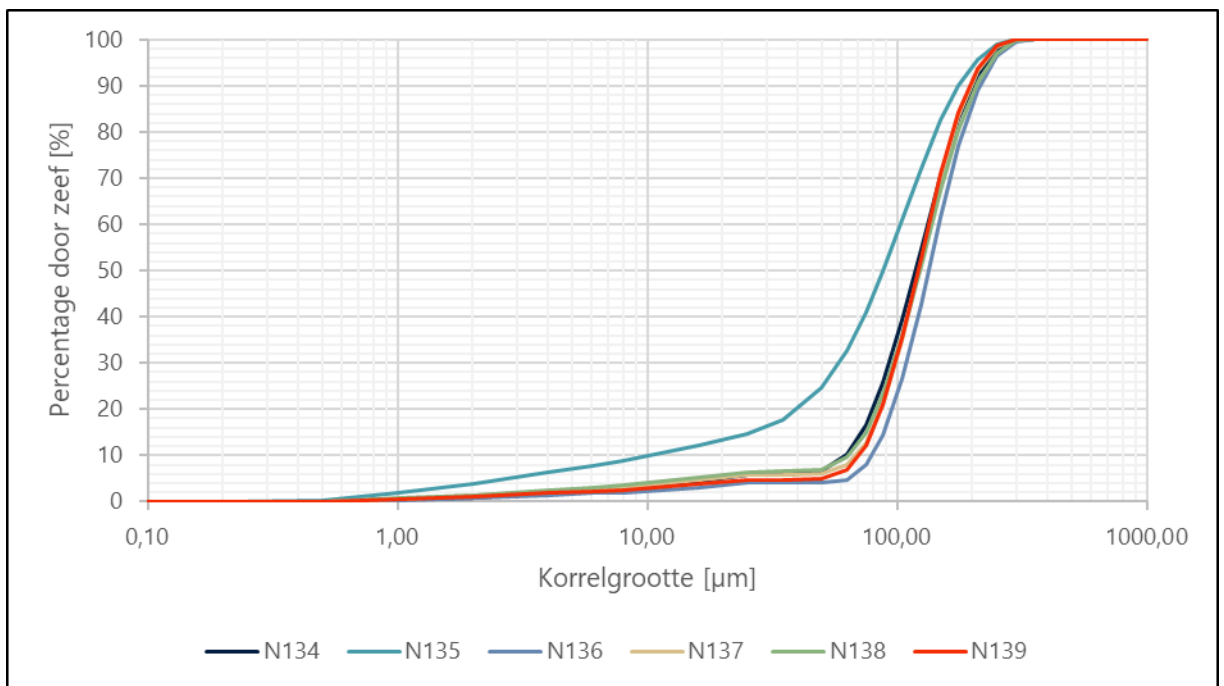
Voor het bepalen van de korrelverdeling en -vorm van de verschillende deelfracties binnen het gelaagde klei/silt pakket boven het pipinggevoelige zandpakket is gebruik gemaakt van laserdiffractie (Malvern; Deltares). Ook op monsters van het diepere zandpakket zijn Malverntesten uitgevoerd om eventuele verschillen tussen het bruine en grijze (gereduceerde) zand en de overgangszone hiertussen te onderzoeken, zie locaties in Figuur 2.7. In Figuur 2.8 is te zien dat er weinig verschillen te zien zijn tussen de bruine en grijze zandlagen. Uit de korrelverdeling van N135 blijkt dat dit monster een relatief hoog percentage aan fijne fractie heeft.

Tabel 2.3: Overzicht monsters N134 – N139.

Monster	Beschrijving
N134	Zandig materiaal uit top getijdenezandpakket met afwisseling zand en kleilagen
N135	Kleimateriaal uit top getijdenezand met afwisseling zand en kleilagen
N136	Zandig materiaal onder toplaag (zand/klei), boven donkere klei-/siltlaag
N137	Monster direct boven donkere klei-/siltlaag in lichtgrijze afzetting van ca. 3 cm dik
N138	Monster van donkere klei-siltlaag
N139	Monster van gereduceerd zand onder de donkere kleisiltlaag



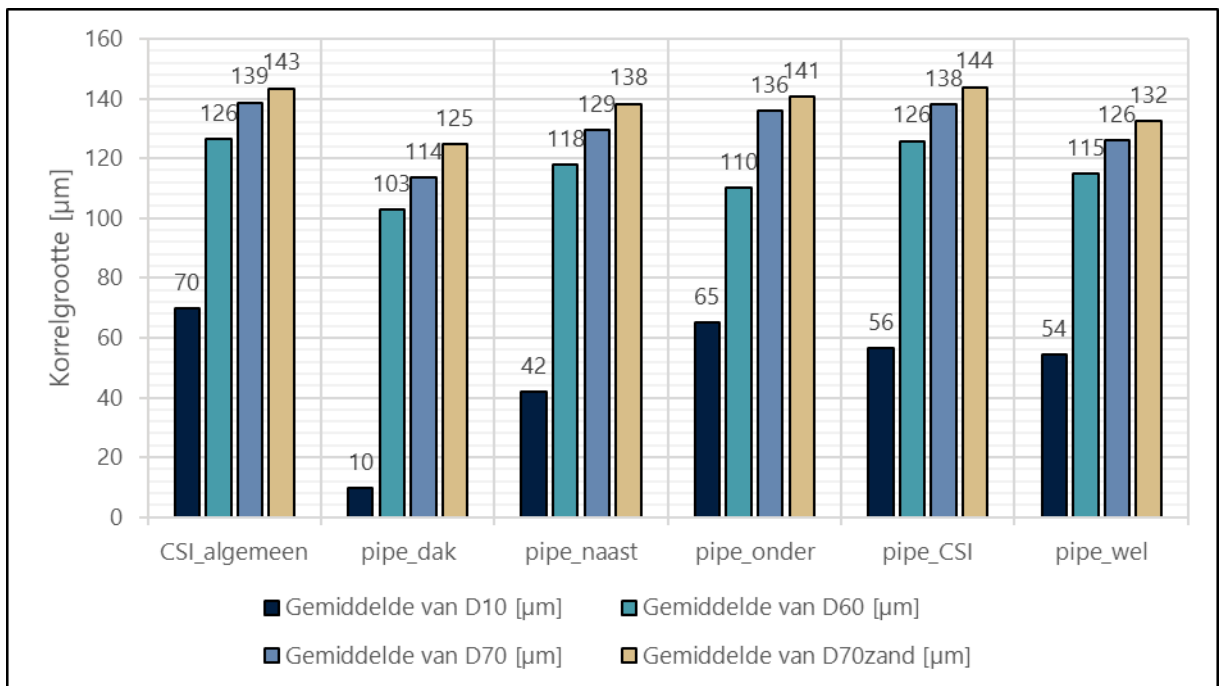
Figuur 2.7: Overzicht van locaties monsters N134 t/m N139.



Figuur 2.8: Korrelverdeling van monsters volgens Malvern laserdiffractie.

D₁₀, D₆₀, D₇₀ en C_u

In Sellmeijer is de D₇₀ van de zandfractie een inputparameter. D₁₀ / D₆₀ van de hele fractie wordt gebruikt om de uniformiteit van de korrelverdeling te beschrijven en gebruikt in empirische doorlatendheidsformules op basis van korrelverdeling (zie §2.4). Figuur 2.9 laat de D₁₀, D₆₀ en D₇₀ waardes zien van de verschillende monstercategorieën. Hierin valt op dat er weinig variatie in D₇₀ te zien is in het zandpakket, met in het dak van de pipe de laagste D₇₀ waarde, wat verklaard wordt door het grotere gehalte aan lutum, slib en silt. De D₇₀ waardes komen overeen met Tabel 3-1 uit de Ontwerpnota DO, waar een gemiddelde D₇₀ van 132 µm is bepaald.



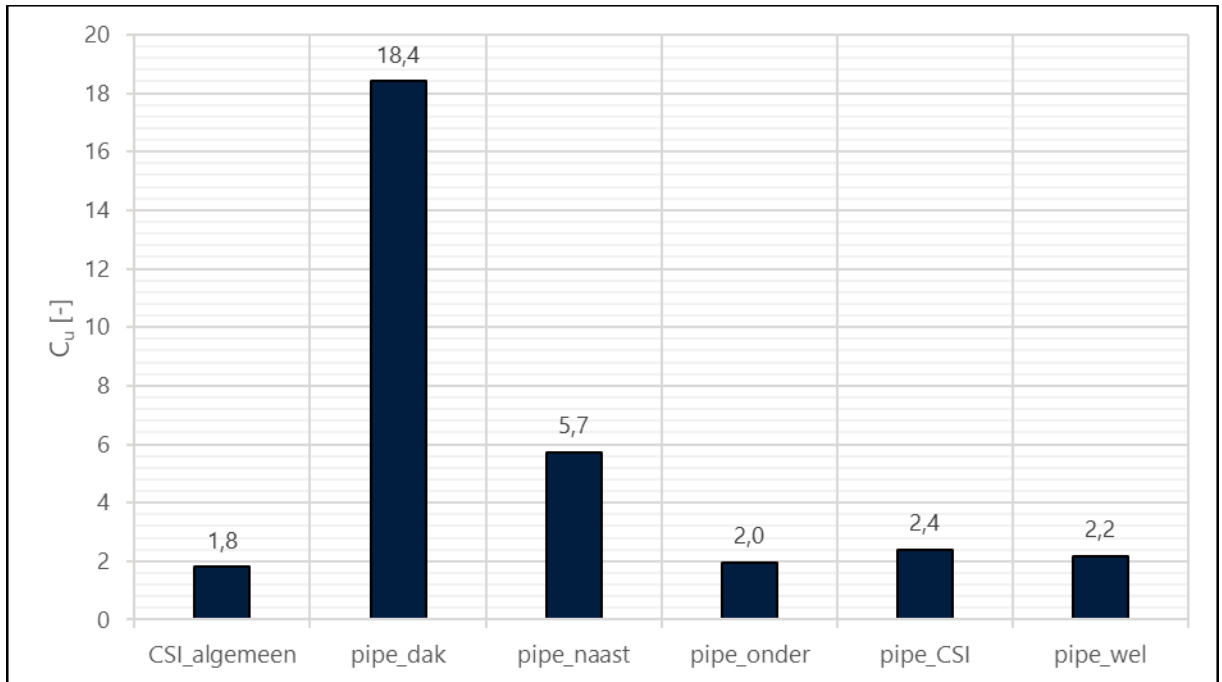
Figuur 2.9: D₁₀, D₆₀, D₇₀ en D_{70zand}-waardes van verschillende type monsters.

De D₇₀ is bepaald op basis van de volledige fractie. In de schematiseringshandleiding Piping is opgenomen dat de D₇₀ van enkel de zandfractie bepaald dient te worden als input voor Sellmeijer. Deze D_{70zand} waardes zijn weergegeven naast de D₇₀ waardes.

De uniformiteitscoëfficiënt C_u is een ruwe vormparameter en geeft de verhouding weer van D₆₀ en D₁₀ met:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

In Figuur 2.10 zijn de C_u-waardes per monstercategorie opgenomen. Hierin valt logischerwijs de uniformiteitscoëfficiënt van het dak van de pipe (18,4) weer op. Dit wordt veroorzaakt door met name de lage D₁₀ korrelgrootte vanwege het grotere gehalte aan lutum, slib en silt. Zoals eerder opgemerkt is op locaties naast de pipe (> 10 cm) een relatief hoge fijne fractie aangetroffen, dit resulteert eveneens in een relatief hoge C_u waarde. De overige monsters zijn relatief laag en met een C_u van rond de 2 te classificeren als slecht gegradeerde grond (redelijk uniforme korrels) wat ook volgt uit de steile korrelverdelingsdiagrammen.



Figuur 2.10: Uniformiteitscoëfficiënt C_u per monstercategorie.

2.4 Doorlatendheid op basis van korrelverdeling

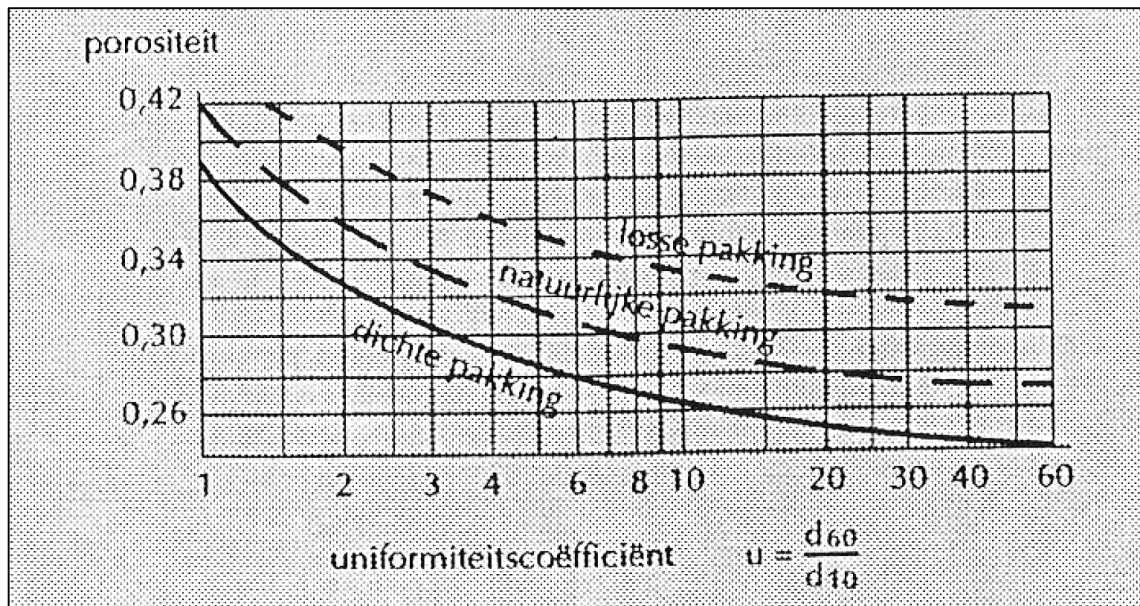
De doorlatendheid is bepaald aan de hand van drie empirische doorlatendheidsformules, namelijk; Den Rooijen (1992), Hazen (1991) en Beyer (1964).

Den Rooijen (1992)

$$k = (c_0 - 1,83 * 10^3 \ln(C_u)) D_{10}^2$$

- c_0 = parameter afhankelijk van de pakking:
 - Losse pakking: $c_0 = 1,5 * 10^4$
 - Middelmatige pakking: $c_0 = 1,2 * 10^4$
 - Vaste pakking: $c_0 = 1,0 * 10^4$
- C_u = uniformiteitscoëfficiënt [-]
- D_{10} = denkbeeldige zeefopening, waardoor 10% van het materiaal gaat [mm]

In Figuur 2.11 zijn de verschillende pakkingen zoals door den Rooijen gedefinieerd. Zoals verderop bepaald bedraagt de porositeit ca. 0,44 [-] en de uniformiteitcoëfficiënt ca. 2, waardoor het zandpakket als los gepakt is beschouwd.



Figuur 2.11: Relatie porositeit, uniformiteitscoëfficiënt en pakking [Technisch Rapport voor controle op het mechanisme piping bij rivierdijken, jan. 1994, Grondmechanica Delft].

Hazen (1991)

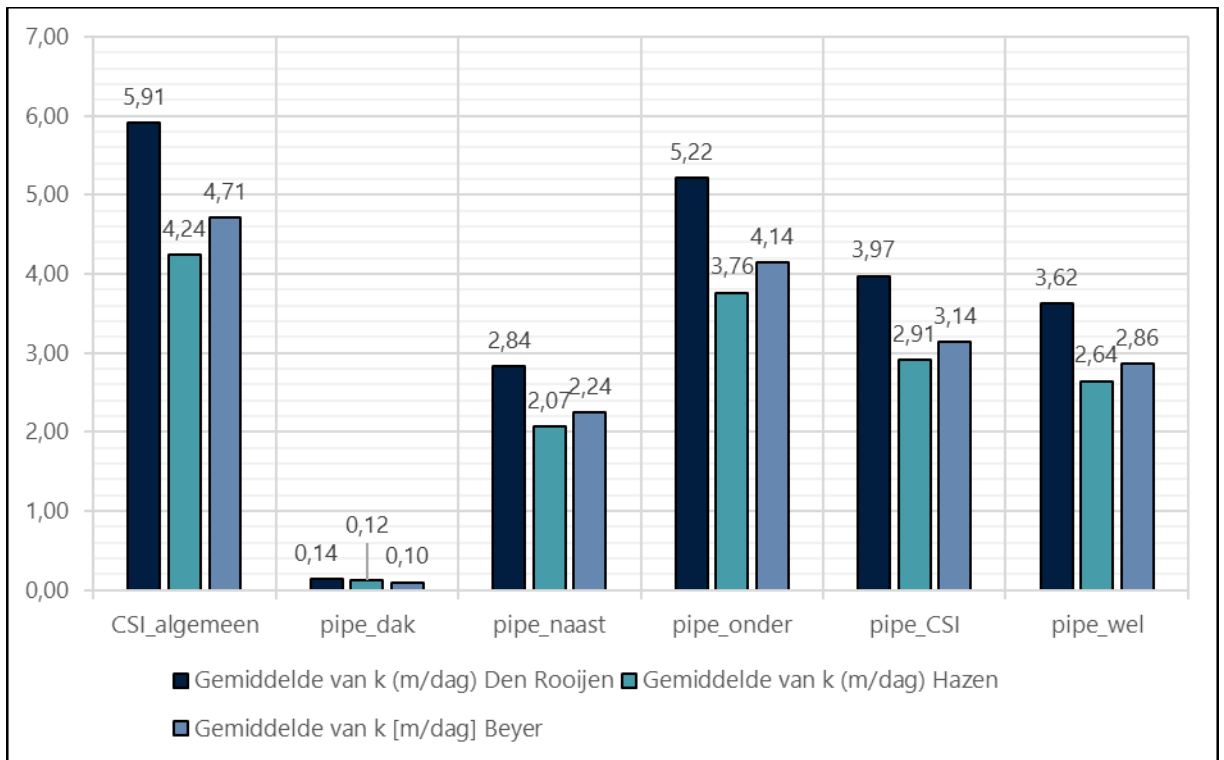
$$k = \beta C D_{10}^2$$

- β = 1 [-]
- C = Hazen coëfficiënt [$100 \text{ cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$]
- D_{10} = denkbeeldige zeefopening, waardoor 10% van het materiaal gaat [mm]

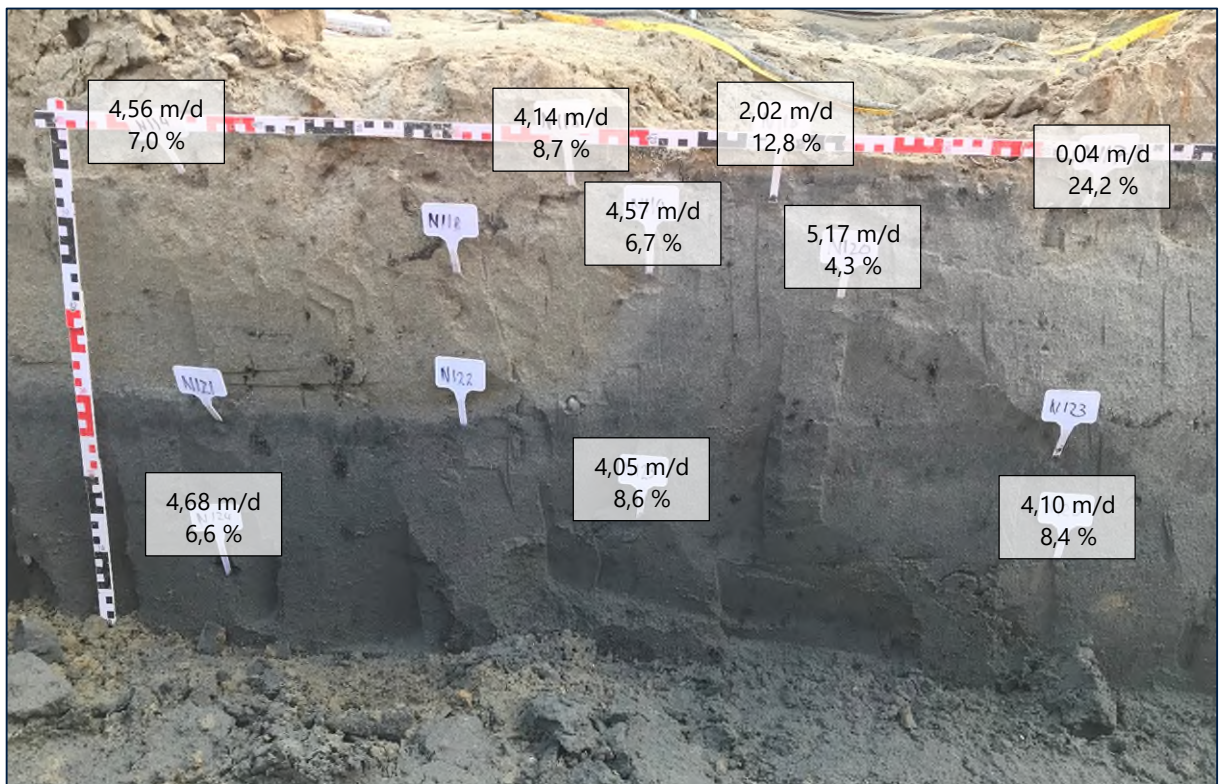
Beyer (1964)

$$k = \frac{\beta g}{\nu} \log\left(\frac{500}{C_u}\right) D_{10}^2$$

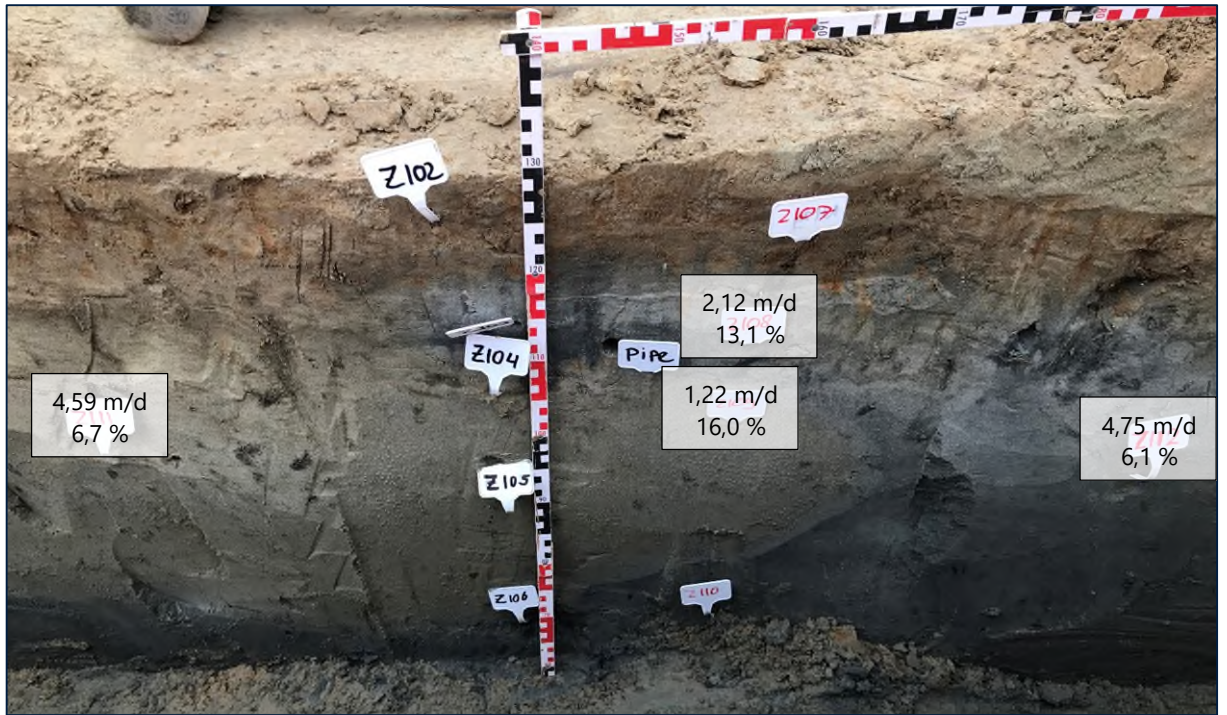
- β = 0,0006 [-]
- g = valversnelling [$9,81 \text{ m/s}^2$]
- ν = kinematische viscositeit [m^2/s]
- C_u = uniformiteitcoëfficiënt [-]
- D_{10} = denkbeeldige zeefopening, waardoor 10% van het materiaal gaat [mm]



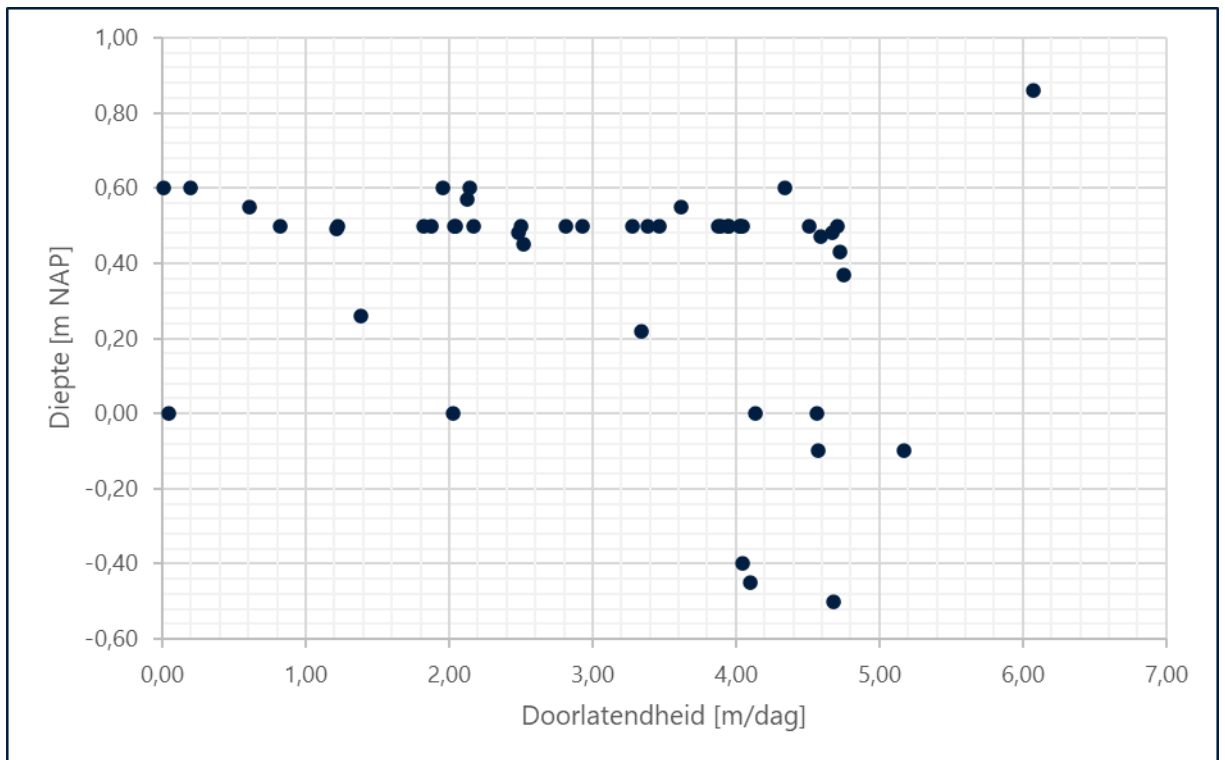
Figuur 2.12: Doorlatendheid volgens Den Rooijen, Hazen en Beyer per monstertype.



Figuur 2.13: Doorlatendheid volgens Beyer [m/dag] en fijne fractie [%] van samples N114 - 126.



Figuur 2.14: Doorlatendheid volgens Beyer [m/dag] en fijne fractie [%] van samples Z102 - 112.



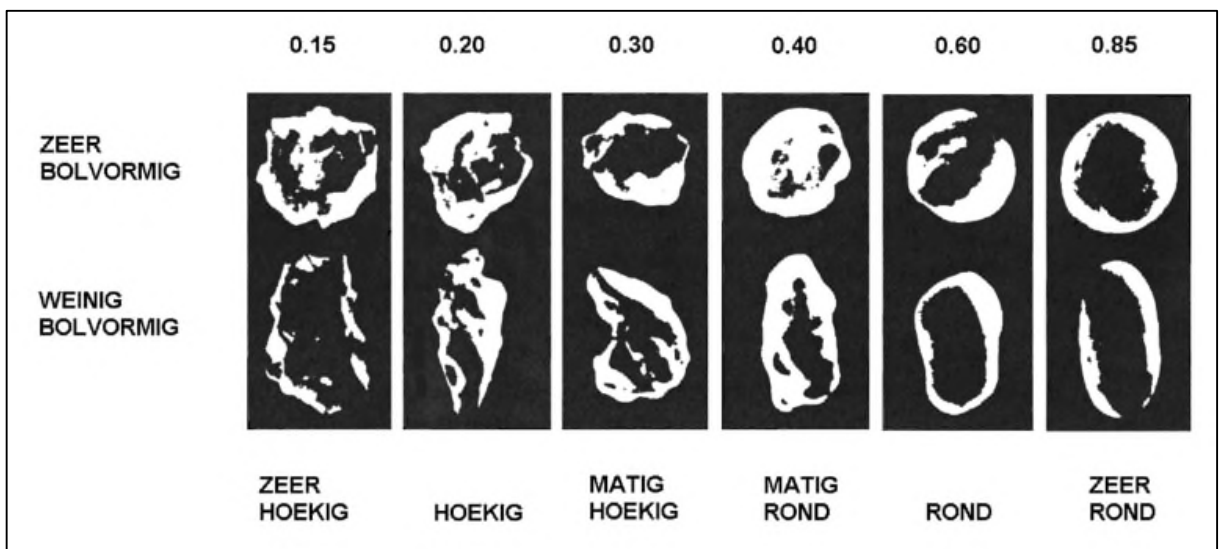
Figuur 2.15: Doorlatendheid volgens Beyer (1964) uitgezet over de diepte.

In Figuur 2.15 zijn de doorlatendheden volgens Beyer over de diepte uitgezet. De empirische doorlatendheidsformules zoals die van Beyer maken voornamelijk gebruik van de D_{10} - en C_u -waardes als variabele parameters. Over het algemeen is er een trend te zien van hogere doorlatendheden naarmate de diepte van monsterafname toeneemt. Dit is te verklaren door het 'fining-upward' proces, waarbij een relatief hoger percentage fijne fractie is te vinden

boven in het zandpakket. Wel is er een grote spreiding in doorlatendheden te zien. Dit is te verklaren door de variatie in D_{10} waardes per monster, variërend van $3,2 \mu\text{m}$ (doorlatendheid van $0,005 \text{ m/dag}$) tot $78,9 \mu\text{m}$ (doorlatendheid van $6,08 \text{ m/dag}$), wat leidt tot een grote variatie in doorlatendheden volgens de bovengenoemde empirische doorlatendheidsformules.

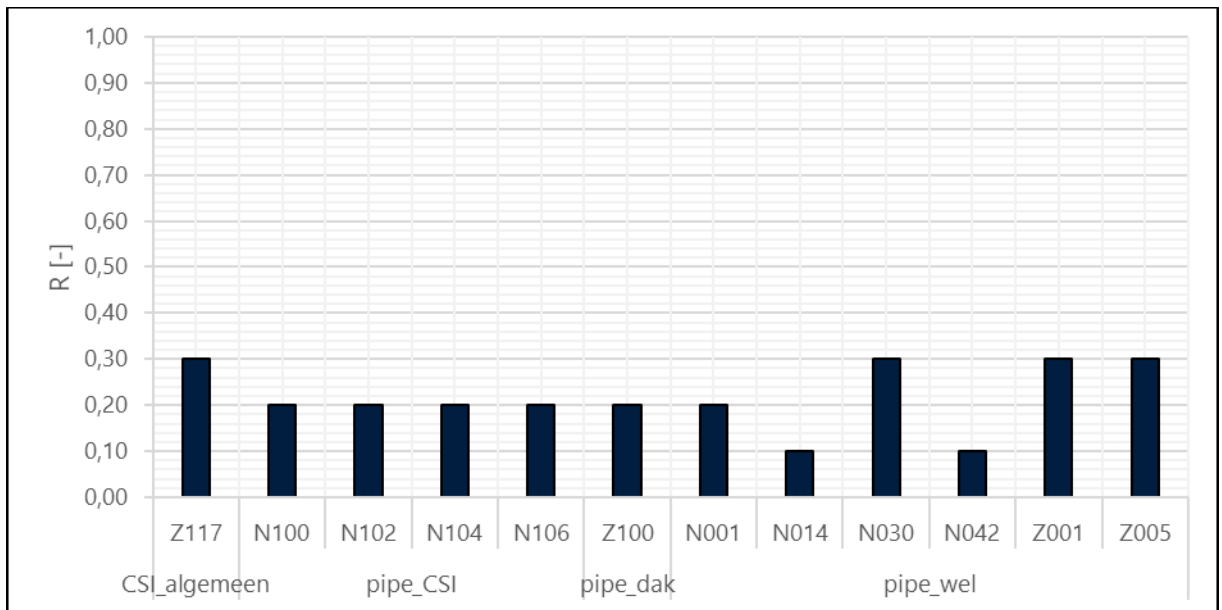
3. Korrelvorm

Van een deelselectie van deze monsters is ook de korrelvorm bepaald. Er werden geen significante verschillen in korrelvorm verwacht door dezelfde afzettingsgeschiedenis. Door het bepalen van de korrelvorm is dit vermoeden getoetst en een vergelijking gemaakt met de korrelvorm gevonden in andere afzettingen/locaties. De korrelvorm kan ook worden gebruikt in analyses naar de sleepkrachtfactor en/of rolweerstandshoek van het zandige materiaal. De korrelvorm is bepaald op basis van de rondheidsschaal van Powers, zoals te zien in Figuur 3.1.



Figuur 3.1: Rondheidsschaal van Powers (1953).

De resultaten per herkomst van de monsters zijn te zien in Figuur 3.2. Hierin is te zien dat er met name hoekige korrels binnen de proefvakken zijn gevonden. Alle monsters vertoonden weinig bolvormige korrels, waarbij de rondheid varieerde van zeer hoekig ($R = 0,10$) tot hoekig ($R = 0,20$) en matig hoekig ($R = 0,30$). Met name bij de wel van de pipe zijn er meer matig hoekige zandkorrels in de monsters geobserveerd ten opzichte van de overige CSI-locaties. Toch zijn hier ook twee monsters als 'zeer hoekig' geclassificeerd. Daarom zijn hier geen eenduidige conclusies over te trekken. De hoekigheid van het materiaal duidt op relatief weinig transport van de zandkorrels, aangezien de hoekigheid afneemt bij het veelvuldig rollen van de korrels over elkaar heen. Dit betekent dat het aannemelijk is dat de getijdengeul materiaal heeft aangevoerd dat in de nabije omgeving is 'aangetapt', waarschijnlijk is de bron van het zand het Pleistocene zand onder het veen. Na afzetting binnen de getijdengeul is het zand klaarblijkelijk niet vaak meer omgewerkt en is het zand relatief hoekig gebleven.



Figuur 3.2: Korrelvorm volgens Powers (1953) van verschillende type monsters.

4. Zoutgehalte

Van verscheidene monsters is het zoutgehalte van het bodemvocht bepaald. De locaties van deze monsters zijn weergegeven in Figuur 4.1.

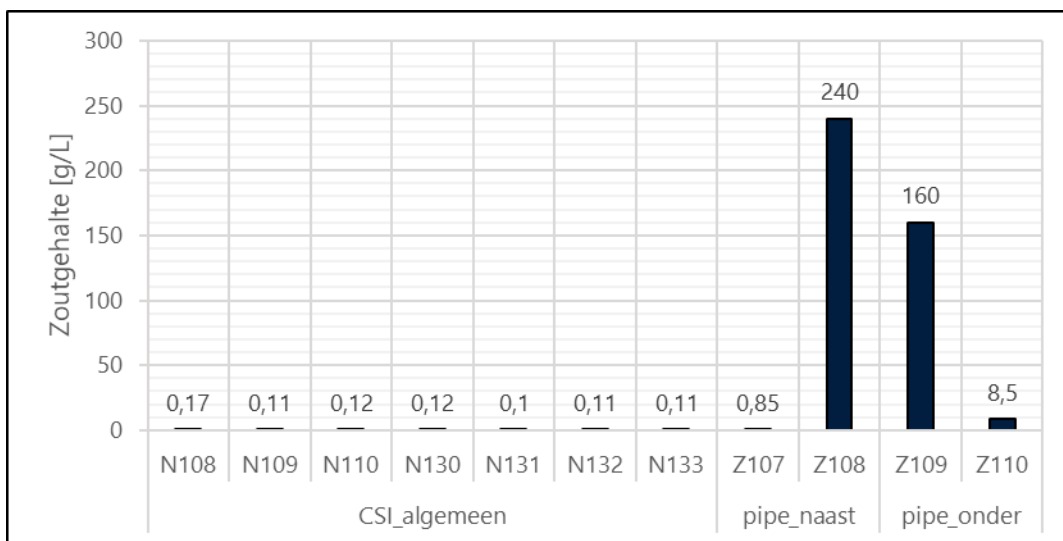


Figuur 4.1: Locaties monsters N108-N110 (links) en Z107-Z110 (rechts).

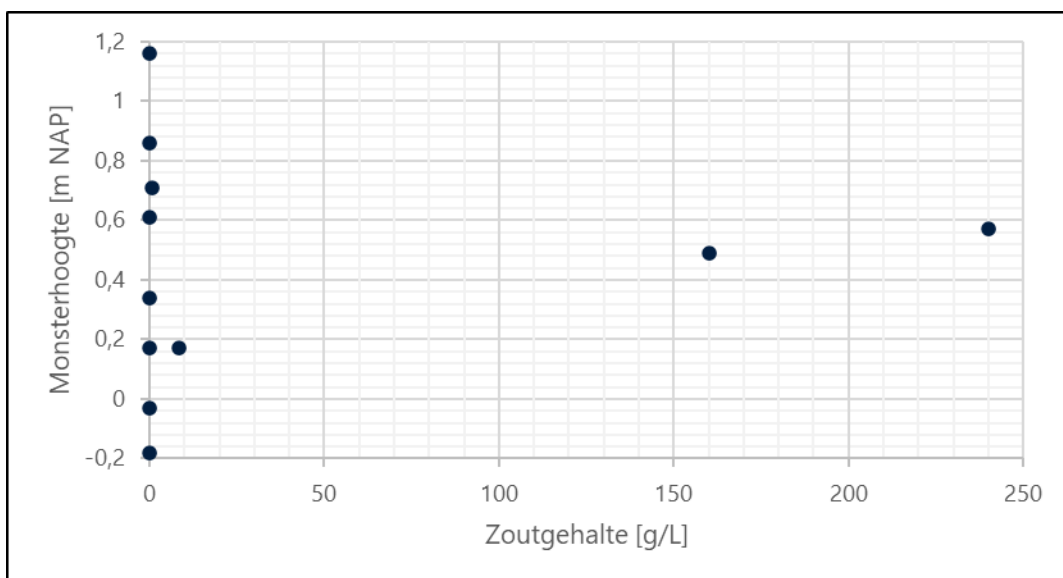
De bepaalde zoutgehaltes zijn weergegeven in Figuur 4.2. In Figuur 4.3 zijn de zoutgehaltes uitgezet over de diepte waar de monsters zijn afgenomen. Hierin valt op dat met name de

twee monsters Z108 en Z109 vlak bij de pipe op ongeveer NAP +0,5 m duiden op een zeer hoog zoutgehalte in het bodemvocht. De resultaten worden als niet representatief geacht. Redenen hiervoor:

- In de rapportage van het chemische lab worden afwijkende waarden van het droge stofgehalte (% gewicht) gevonden voor deze monsters van nabij 100% (99,4% en 98,9%), terwijl dit voor de overige monsters rond de 80% is. De monsters bevatten hierdoor mogelijk te weinig vocht voor een nauwkeurige meting.
- Eerder uitgevoerde geleidbaarheidsonderingen sluiten aan bij een zoutgehalte van het bodemvocht tot ca. maximaal 0,2 g/L (gemiddeld EC: 0,5 dS/m). In de EC-profielen is geen significante variatie in de verzadigde zone te ontdekken.
- Proef is uitgevoerd met schoon drinkwater. Concentratie van stroming rondom de pipe zou juist bijdragen aan een lager zoutgehalte.



Figuur 4.2: Zoutgehalte bodemvocht per monster.



Figuur 4.3: Zoutgehalte uitgezet over de diepte.

5. Bulk- en droge dichtheid

Enkele monsters zijn geselecteerd voor het bepalen van meer algemene eigenschappen zoals het volumegewicht van zowel het gelaagde klei/silt pakket als het onderliggende zandpakket waarin de horizontale pipe is gaan groeien.

Tabel 5.1: Grondeigenschappen uitgezet over de diepte.

Diepte [m +NAP]	Monster	Categorie	$\gamma_{nat} / \gamma_{droog}$ [kN/m ³]	γ_{part} [kN/m ³]	Watergehalte [%]	Porositeit [-]
1,08	Z101	CSI_algemeen	16,48 / 14,52	25,99*	13,5	0,44*
0,96	Z113	CSI_algemeen	18,64 / 15,11	25,99*	23,3	0,42*
0,83	Z114	CSI_algemeen	18,93 / 15,40	25,99*	23,0	0,41*
0,67	Z115	CSI_algemeen	18,74 / 14,62	25,99*	27,6	0,44*
0,55	Z116	CSI_algemeen	19,13 / 15,30	25,99*	24,9	0,41*
0,43	Z117	CSI_algemeen	17,85 / 15,11	26,78	18,0	0,44
0,31	N140	CSI_algemeen	19,03 / 15,50	25,99*	22,9	0,40*
0,22	Z118	CSI_algemeen	18,74 / 15,11	26,49	24,6	0,43
0,03	Z119	CSI_algemeen	18,74 / 15,11	25,99*	23,9	0,42*
0,01	N141	CSI_algemeen	19,33 / 15,50	25,99*	24,5	0,40*
-0,29	N142	CSI_algemeen	18,74 / 14,91	26,39	26,1	0,43
-0,69	N143	CSI_algemeen	17,95 / 14,03	26,29	27,7	0,47
0,34	Gemiddeld	CSI_algemeen	18,52 / 15,02	26,49	23,3	0,42

*Voor niet onderzochte deeltjesdichtheden is standaardwaarde van 2650 kg/m³ aangehouden.



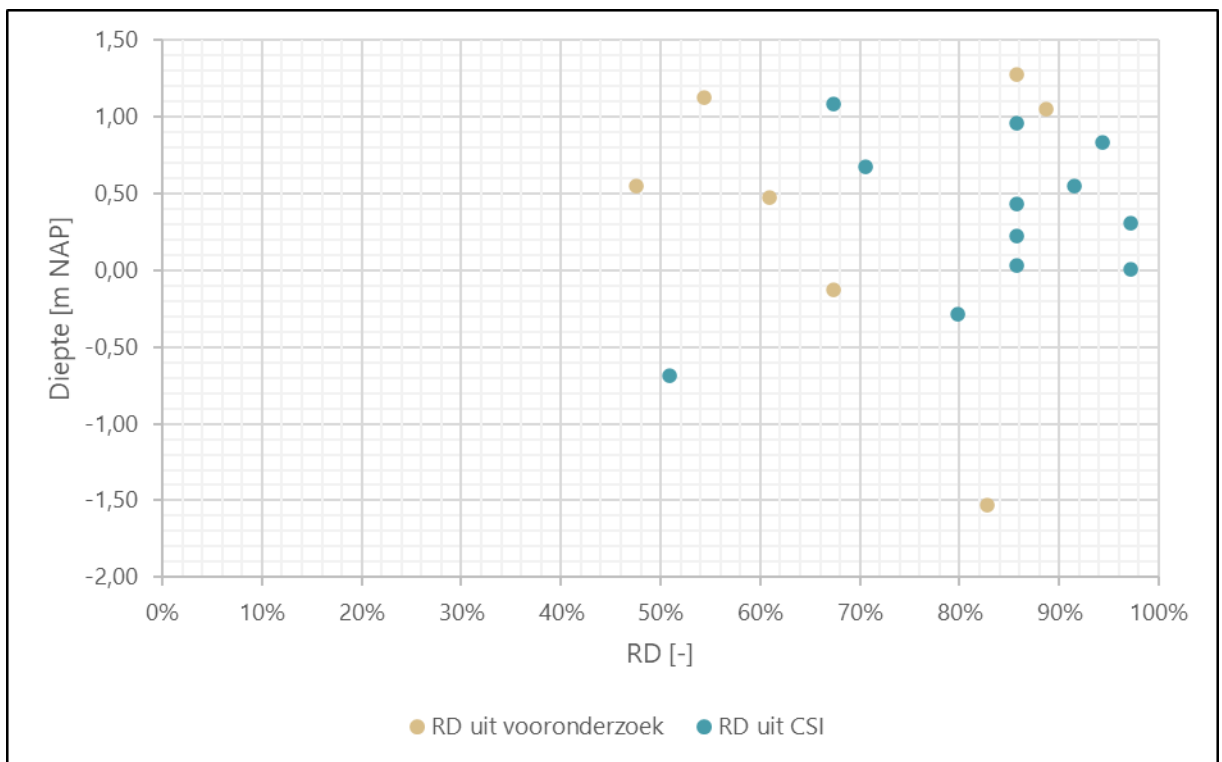
Figuur 5.1: Locaties monsters N140-N143 (links) en Z101 en Z113-Z117 (rechts).

De relatieve dichtheid is bepaald met onderstaande formule waarbij $\gamma_{d(min)} = 12,7 \text{ kN/m}^3$ en $\gamma_{d(max)} = 15,6 \text{ kN/m}^3$ respectievelijk de minimum en maximum index volumegewichten zijn en γ_d de droge dichtheid.

$$RD = \frac{1 - \frac{\gamma_{d(min)}}{\gamma_d}}{1 - \frac{\gamma_{d(min)}}{\gamma_{d(max)}}} * 100\%$$

De RD-waardes zijn uitgezet tegen de diepte in Figuur 5.2. Dit laat zien dat de relatieve dichtheden uit het vooronderzoek lager zijn dan in de CSI-fase. De gemiddelde RD uit het vooronderzoek is 70% en in de CSI-fase 83%.

Verder is te zien dat alle RD-waardes groter zijn dan 50%, wat een voorwaarde is van de Sellmeijer rekenregel. Wel moet worden opgemerkt dat de wijze van monsterafname in het vooronderzoek nauwkeuriger is verlopen dan in de CSI-fase. In het vooronderzoek is er gebruik gemaakt van piston samples en Ackermann samples voor het afnemen van de monsters. In de CSI-fase zijn er met Kopecky ringen monsters afgenomen, wat meer verstoring van de sample teweegbrengt dan de eerdergenoemde piston en Ackermann samples.



Figuur 5.2: Relatieve dichtheid (RD) afgezet over de diepte uit het vooronderzoek (fase 2) en CSI (fase 3).

6. Organisch stof- en kalkgehalte

Voor 5 monsters is het organisch stof- en kalkgehalte bepaald. Deze monsters en beschrijving zijn gepresenteerd in tabel 6.1, het gloeiverlies en kalkgehalte zijn opgenomen in tabel 6.2.

Tabel 6.1: Monsters en bijbehorende beschrijving

Monster	Beschrijving
Z111	15 cm onder pipeniveau in bruin zand (boven gereduceerd zandpakket)
Z112	15 cm onder pipeniveau in grijs (gereduceerd) zand
N118	Lichtbruin
N120	Grijs, 15 cm onder pipe
N144	Grijs

De gepresenteerde gloeiverlieswaarden liggen dichtbij elkaar, dit geldt ook voor het kalkgehalte. Er is geen duidelijk onderscheid te maken op basis van de verschillende typen zand.

Tabel 6.2: Organisch stofgehalte (gloeiverlies) en kalkgehalte per monster.

	Z111	Z112	N118	N120	N144
Gloeiverlies [%]	0,9	0,8	1,5	0,9	1,4
Kalkgehalte [%]	6,5	7,5	7,3	6,8	7,0

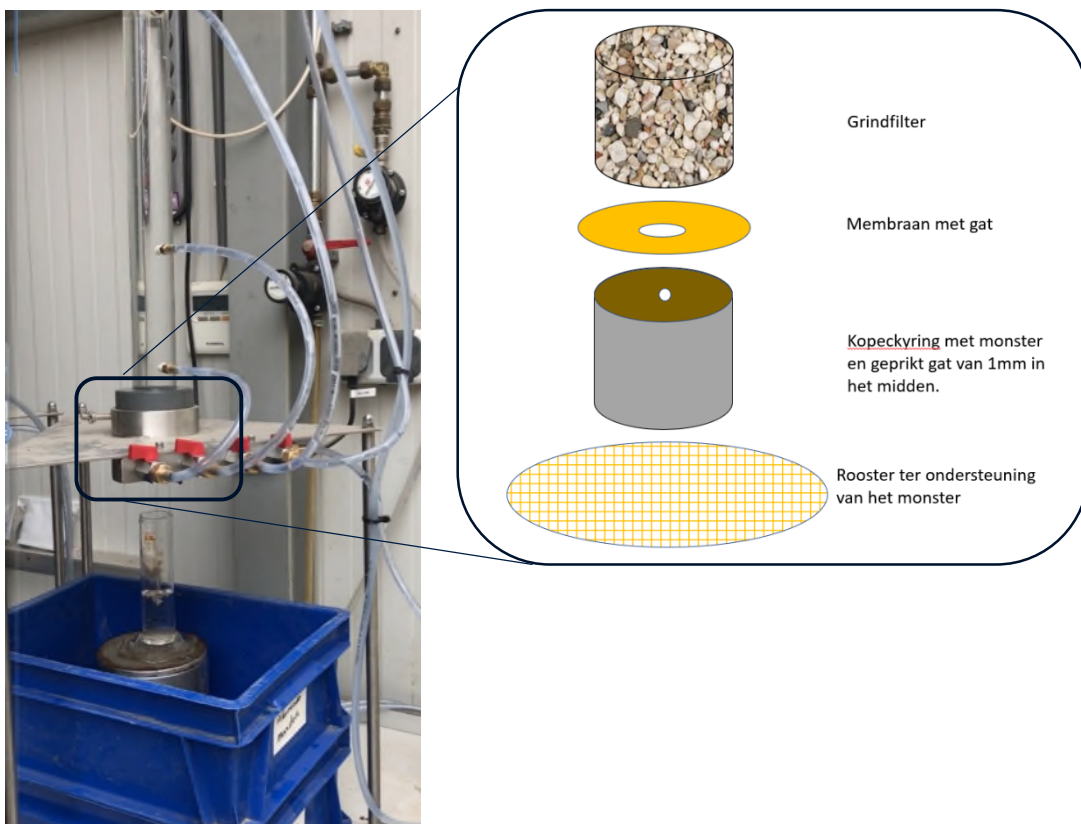
7. Pinhole Test

De Pinhole Test is een kwantitatieve erosieproef waarbij water via een vooraf geprikt gat door een grondmonster stroomt, hierbij wordt de mate van het oplossen en het afbrokkelen van het grondmonster bepaald. De verkleuring van het uittredende water door geërodeerd materiaal (het eluaat), en de tijdsduur per gedefinieerd volume uittredend water geven inzicht in de erosiebestendigheid van een grondmonster. Veel uitspoeling en dus verkleuring van het water duidt op een weinig erosiebestendig materiaal, weinig uitspoeling duidt op een hogere erosiebestendigheid. De test wordt met name toegepast op klei, maar ook op zand. Met het uitvoeren van de Pinhole Test op zand is internationaal beperkte ervaring, omdat zand in de regel onvoldoende erosiebestendig is. Fugro Nederland heeft eerder geen ervaring met het uitvoeren van de Pinhole Test op zand. Vanwege het relatief hoge percentage fines van het getijdenzand en daarmee enige mate van cohesie is de verwachting dat de Pinhole proeven op getijdenzand een kans op succes hebben. Daarmee geeft de Pinhole Test inzicht in de relatieve erosiebestendigheid van het getijdenzand. Er zijn monsters gekozen van het dak van de pipe als ook paartjes van monsters van het bruine, niet-gereduceerde zand en het grijze, gereduceerde zand. Tijdens de CSI zagen we namelijk dat de pipe geen duidelijke kleilaag nodig heeft om onderlangs te groeien en leek het pad van

de pipe in bepaalde mate afhankelijk van de ligging van het grensvlak tussen het bruine en grijze zand.

Proefbeschrijving

In figuur 7.1 is de Pinhole opstelling weergegeven. In een doorzichtige buis worden standaard waterhoogtes opgelegd door een overloop te openen of te sluiten. De hoogte van de overlopen en dus de hoogte van de waterkolom bovenop het monster zijn gedefinieerd op 50, 180, 380 en 1020 mm waterkolom. Het water stroomt door het monster en wordt opgevangen in een maatbeker. Per hoogte wordt bijgehouden hoe lang het duurt om 10ml, 25ml, 50 ml en 100ml water op te vangen, hierbij wordt de verkleuring van het eluaat genoteerd. In het veld zijn monsters gestoken met Kopeckyringen (inwendig $\varnothing 50\text{mm}$, hoogte 51mm, volume 100cc), deze zijn afgesloten bewaard in een koelcel. De monsters zijn beproefd onder veldvochtige omstandigheden. De Kopeckyring met daarin het monster wordt onder de doorzichtige buis bevestigd. In het midden van het monster wordt voorafgaand aan de proef een gat geprikt met een diameter van 1 mm. Het monster (zie figuur 7.1) wordt aan de bovenzijde omsloten door een membraan en grindfilter om uitspoeling aan de bovenzijde van het monster te voorkomen en de waterstroom door het midden van het monster te forceren. Aan de onderzijde van de Kopeckyring wordt het monster ondersteund door een fijnmazig rooster, voldoende groot om het eluaat en korrels door te laten.



Figuur 7.1: De Pinhole Test opstelling links, rechts schematische weergave van het ingebouwde monster.

Proefuitvoering

Voor 5 monsters uit de Hedwigepolder is de Pinhole Test uitgevoerd, deze zijn weergegeven in tabel 7.1, de locaties van de monsternamen in figuur 7.2. Ter vergelijking is ook een proef uitgevoerd op norm-zand (zie bijlage), zand met een gestandaardiseerde korrelverdeling, dit zand bevat geen fijne fractie. Monster Z1 is voor de volledigheid wel opgenomen, maar deze kan als niet-representatief worden beschouwd. Het monster is gescheurd en bevat holle ruimtes in de Kopeckyring. Op basis van het vaste volume van een Kopeckyring is een schatting gegeven van het volumiek gewicht onder veldvochtige omstandigheden, hierbij valt het lage gewicht door verstoring van monster Z1 en het verschil in gewicht tussen het grijze (ca. 1915 kg/m³) en het bruine zand (ca. 1945 kg/m³) op. Dit is in lijn met de in het laboratorium bepaalde volumieke gewichten, zie ref. 1. In tabel 7.2 zijn gemiddelde percentages van de fijne fractie per kleurgroep gegeven op basis van het algemene labonderzoek.

Tabel 7.1: Monsters en gewichten

Monster	Beschrijving	Kopeckyring nummer	Gewicht Kopecky incl. monster [g]	Gewicht Kopecky exc. monster [g]	Gewicht monster [g]	Nat volumiek gewicht [kg/m ³]
Z1*	Bruin zand (niet gereduceerd)	150	279,71	93,51	186,20	1862
Z2	Grijs zand (gereduceerd)	57	288,39	96,57	191,82	1918
Z103	Grijze zandlens, op pipeniveau	180	295,40	103,99	191,41	1914
Z104	Bruin zand, juist onder grijze zandlens, 5-10 cm onder pipeniveau	61	286,02	91,94	194,08	1941
Z105	Bruin zand, zandlaag boven gereduceerd zandpakket. 25cm onder pipeniveau.	179	287,89	93,30	194,59	1946

*Monster Z1 is verstoord

Tabel 7.2: Eigenschappen gemiddelde waarden bruin en grijs getijdensand

Kleur	Lutum [%]	Slib [%]	Fijne fractie [%]
Bruin	3,2	6,6	9,8
Lichtbruin	3,6	7,3	11,0
Grijs	3,2	8,8	12,0



Figuur 7.2: Profielen tijdens de CSI-fase in de Hedwigepolder met daarop de beproefde monsters Z1, Z2, Z103, Z104, Z105 en de pipe te zien.

Zolang er geen uitspoeling van het monster plaatsvindt bedraagt de maximale doorstroomopening een gat met 1mm diameter. Bij een constante uitstroomopening is de Pinhole Test analoog aan een leegstromend vat, waardoor de debieten vergeleken kunnen worden met de uitstroomsnelheid op basis van de wet van Torricelli (onderstaande formule). In de praktijk blijkt dat loskomende deeltjes het uitstroomkanaal gedeeltelijk blokkeren, waardoor de doorstroomopening kleiner is. Op basis van ervaringen met deze proef liggen gangbare waarden voor de diameter van de doorstroomopening tussen 0,5 en 0,7 mm. Wanneer erosie plaatsvindt neemt het doorstroomoppervlak kwadratisch toe en daarmee nemen ook de debieten fors toe. Op basis van proefervaring is bekend dat dit toeneemt tot ruim boven de gepresenteerde (figuur 7.4) Torricelli bovengrens van 1 mm diameter waarbij (veel) erosie plaatsvindt. Bij de hier gepresenteerde proeven leidt erosie meteen tot bezwijken en is dit niet zichtbaar in het figuur. De doorlatendheid van het getijdenzand is relatief laag, het monster is voldoende hoog en de proefduur is voldoende kort om lekkage

door het monster te verwaarlozen, daarnaast wordt de waterstroom door de opening in het midden van het monster geforceerd.

$$u = \sqrt{2gh}$$

Formule van Torricelli met:

u = stroomsnelheid

g = valversnelling

h = waterhoogte

Wat bij alle monsters opvalt is dat het eluaat niet nauwelijks verkleurd is, het water is helder tot het moment van bezwijken van het monster. Zodra zand uit het monster begint te spoelen, spoelt vrijwel direct een groot deel van het monster uit en valt de waterkolom boven het monster leeg, wat het einde van de test betekent. In figuur 7.3 is een foto van monster Z104 na proefuitvoering opgenomen, de bovenzijde van het monster is nog intact, hier is de uitspoeling door het midden duidelijk zichtbaar. Bij geen van de proeven is de hoogste belastingstap van 1020 mm waterkolom bereikt. Dit is ook niet de verwachting, bij klei kan bij deze belastingstap ook veel erosie of bezwijken van het monster optreden. Dit geeft dus geen aanleiding tot onbetrouwbare proefuitvoering of resultaten. Alleen monster Z103 blijft bij meerdere belastingstappen intact (50, 180, 380mm), de andere monsters bezwijken tijdens de eerste belastingstap, al verschilt het moment van falen, zie tabel 7.3. Bij Z103 vindt de uitspoeling plaats tussen het verhogen van de 3^e naar de 4^e belastingstap. Bij het norm-zand spoelt het monster al direct uit bij het opvoeren van de waterkolom naar 50mm, nog voordat de proef daadwerkelijk start.

Tabel 7.3: Tijd tot bezwijken van monsters tijdens Pinhole Test

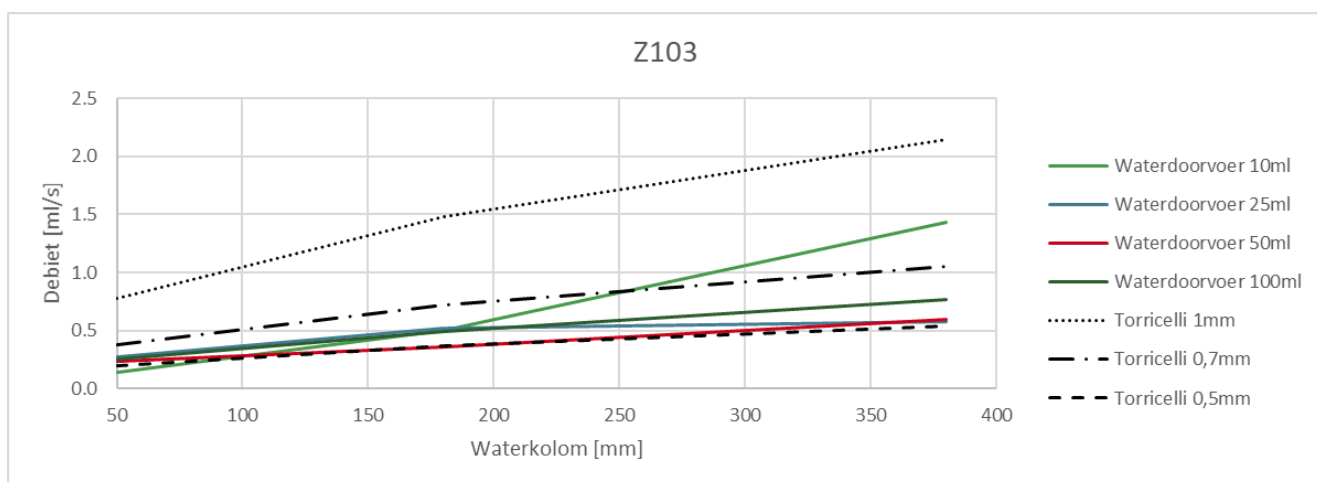
Monster	Tijd tot bezwijken [s]	Behaalde belastingstap
Z1*	20	1
Z2	40	1
Z103 (pipeniveau/dak)	790	3
Z104 (direct onder pipeniveau))	30	1
Z105 (onder pipeniveau)	170	1
Norm-zand	0	0

*Monster Z1 is verstoord



Figuur 7.3: Monster Z104 na uitvoering van de Pinhole Test. Dit monster is aan de bovenzijde nog intact, waar duidelijk de uitspoeling in het midden van het monster zichtbaar is.

In figuur 7.4 is het resultaat van de Pinhole Test voor monster Z103 gegeven, inclusief bandbreedtes op basis van de formule van Torricelli. Monster Z103 is het enige monster waarbij meerdere belastingstappen zijn gehaald. Deze resultaten zijn in lijn met de visuele waarneming dat nauwelijks verkleuring van het eluaat plaatsvindt en dus nauwelijks materiaal erodeert. Waarmee de resultaten binnen de eerder genoemde Torricelli bandbreedtes vallen en ook een vergelijkbare gekromde curve vormen. Wat opvalt is dat de meest (Z103) en minst (Z104) erosiebestendige proef direct boven elkaar zijn genomen in het veld rond pipeniveau, zie figuur 7.2.



Figuur 7.4: Debieten bij monster Z103, de bandbreedtes voor de debieten zijn bepaald met de formule van Torricelli.

Conclusie

De Pinhole Test is een erosieproef die een indicatie geeft van de erosiebestendigheid van het beproefde materiaal. De proef wordt voornamelijk op klei toegepast, maar in mindere mate ook op zand. Klei is erosiebestendiger dan zand. Dat laatste blijkt ook uit deze serie proeven die op getijdenzand uit de Hedwigepolder zijn uitgevoerd in vergelijking met de proeven uit de Fugro database op klei. Van de vijf proeven is bij slechts één proef meerdere belastingstappen gehaald (Z103), de andere drie geslaagde proeven bezwijken na variërende tijdsduur bij de eerste belastingstap. Monster Z1 was verstoord en de pinholetest wordt daarom als niet geslaagd beschouwd. Ten opzichte van het norm-zand is het getijdenzand erosiebestendiger. Dit is conform verwachting op basis van proefervaring, norm-zand bevat geen fijne fractie en is daarom minder erosiebestendig dan het getijdenzand met relatief veel fijne fractie.

Monster Z103, gestoken op de overgang van pipe en dak, is het meest erosiebestendig waarschijnlijk door een relatief hoog percentage silt en lutum. Op 5-10 cm onder de pipe bij monster Z104 is de erosiebestendigheid een stuk lager (ca. 26x). Z104 bezwijkt ook sneller (ca. 5,5x) dan monster Z105 op weer een iets lager niveau, ca. 25 cm onder pipeniveau. De pipe heeft zich gevormd tussen twee relatief erosiebestendigere lagen. Qua waarde komen de resultaten van Z104 overeen met die van Z2 van het diepst gelegen gereduceerde zandmateriaal. Op basis van deze beperkte set proeven is geen verband vastgesteld tussen de kleur (gereduceerd of niet) en erosiebestendigheid.

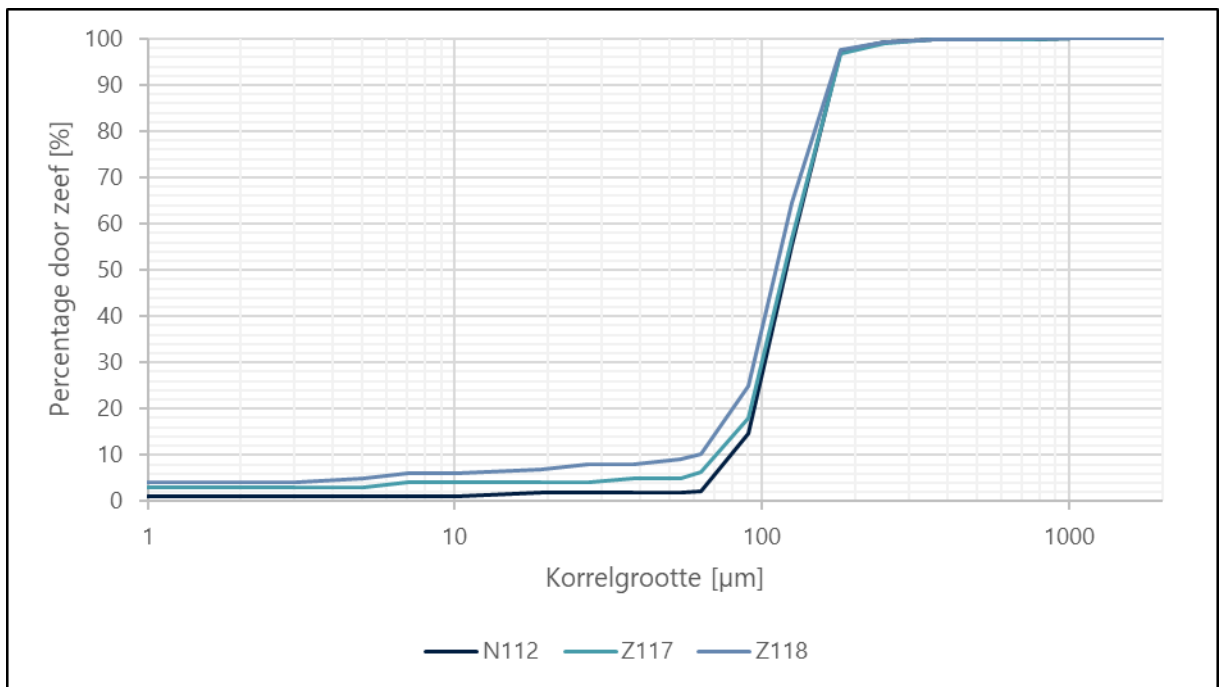
Met het uitvoeren van de Pinhole Test op zand is internationaal beperkte ervaring, Fugro Nederland had hier eerder geen ervaring mee. Wanneer nader onderzoek op zand wordt uitgevoerd wordt aanbevolen om de proefopstelling aan te passen in oriëntatie (verticaal > horizontaal) en extra aandacht te besteden aan ongewenste uitspoeling door toepassing van adequate filters.

Appendix A

Korrelverdelingen per
monstercategorie

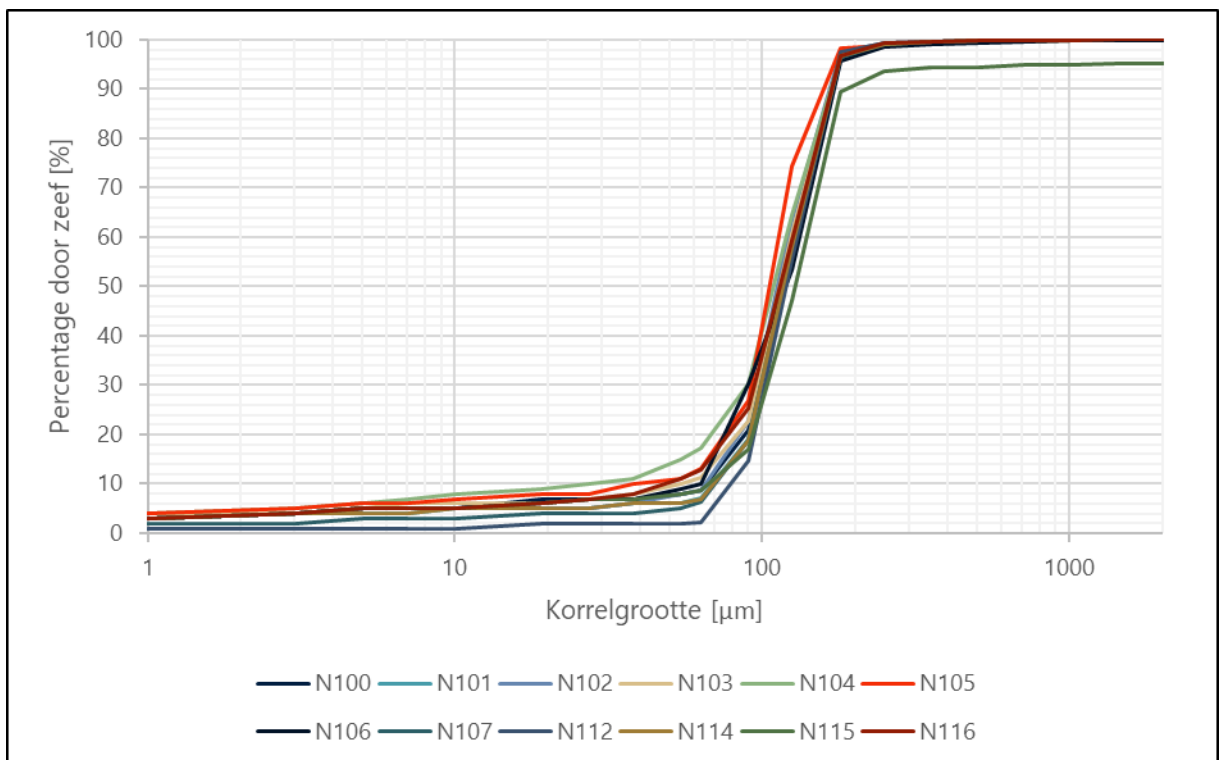
A.1 Korrelverdelingen per monstercategorie

A.1.1 CSI Algemeen



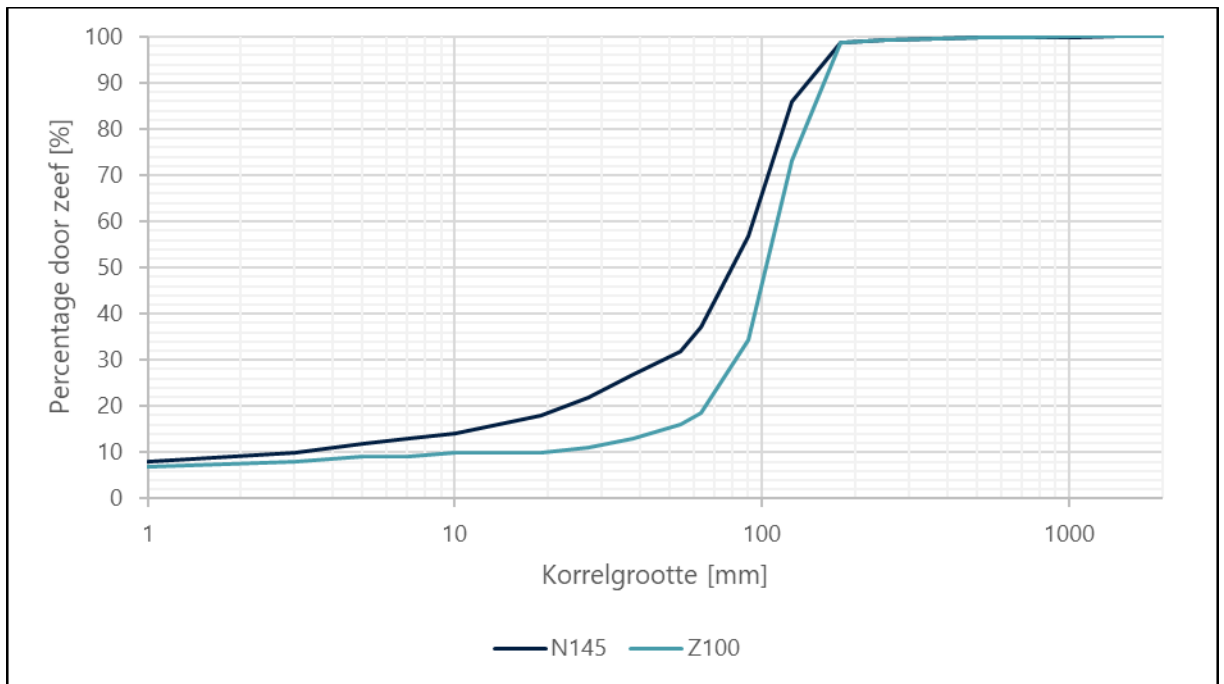
Figuur A0.1: Korrelverdeling van monsters "CSI algemeen".

A.1.2 Pipe CSI



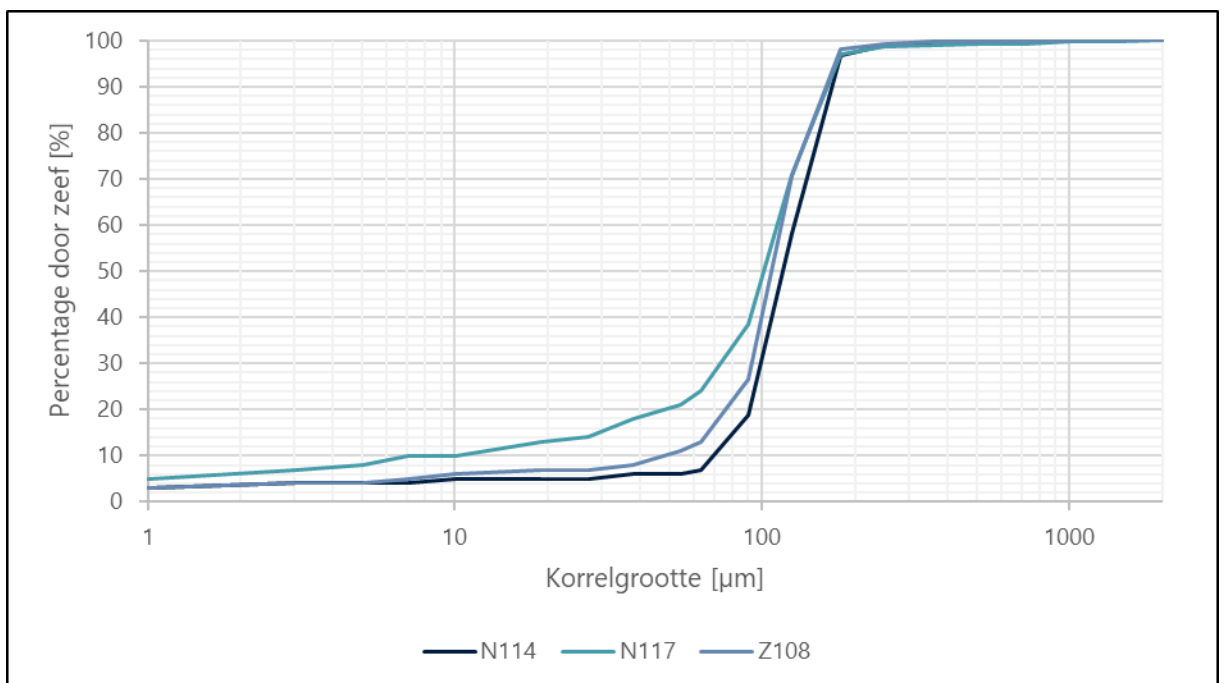
Figuur A0.2: Korrelverdeling van monsters "Pipe CSI".

A.1.3 Pipe dak



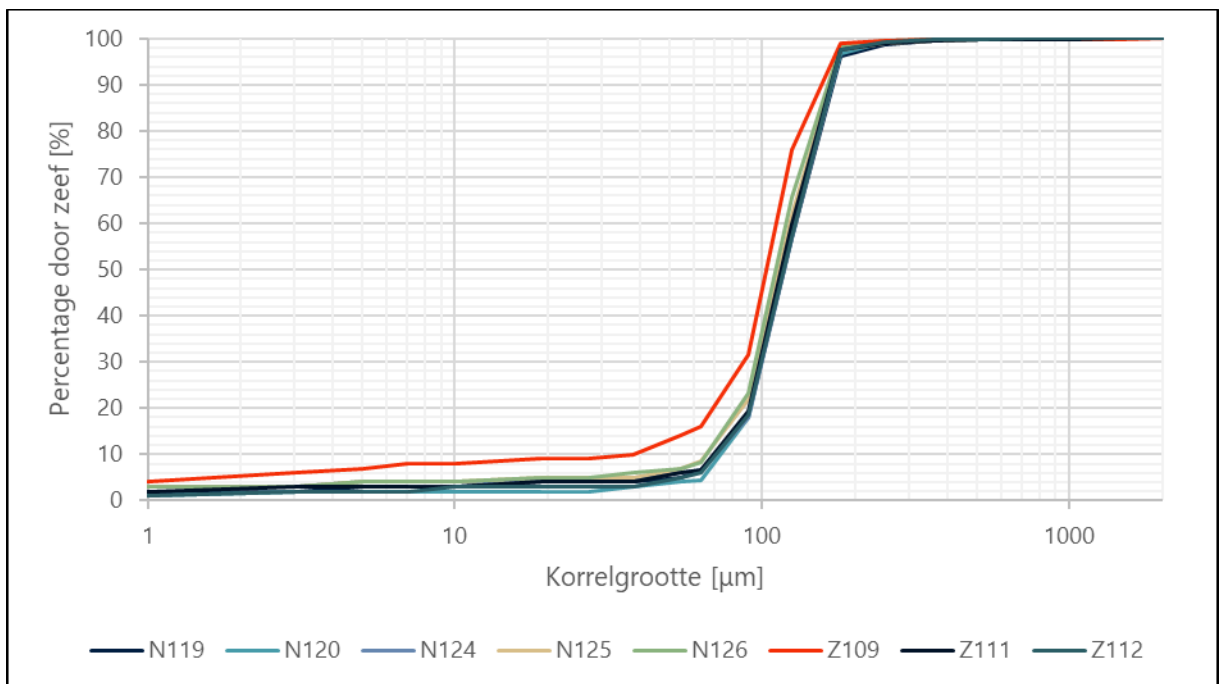
Figuur A0.3: Korrelverdeling van monsters "Pipe Dak".

A.1.4 Pipe naast



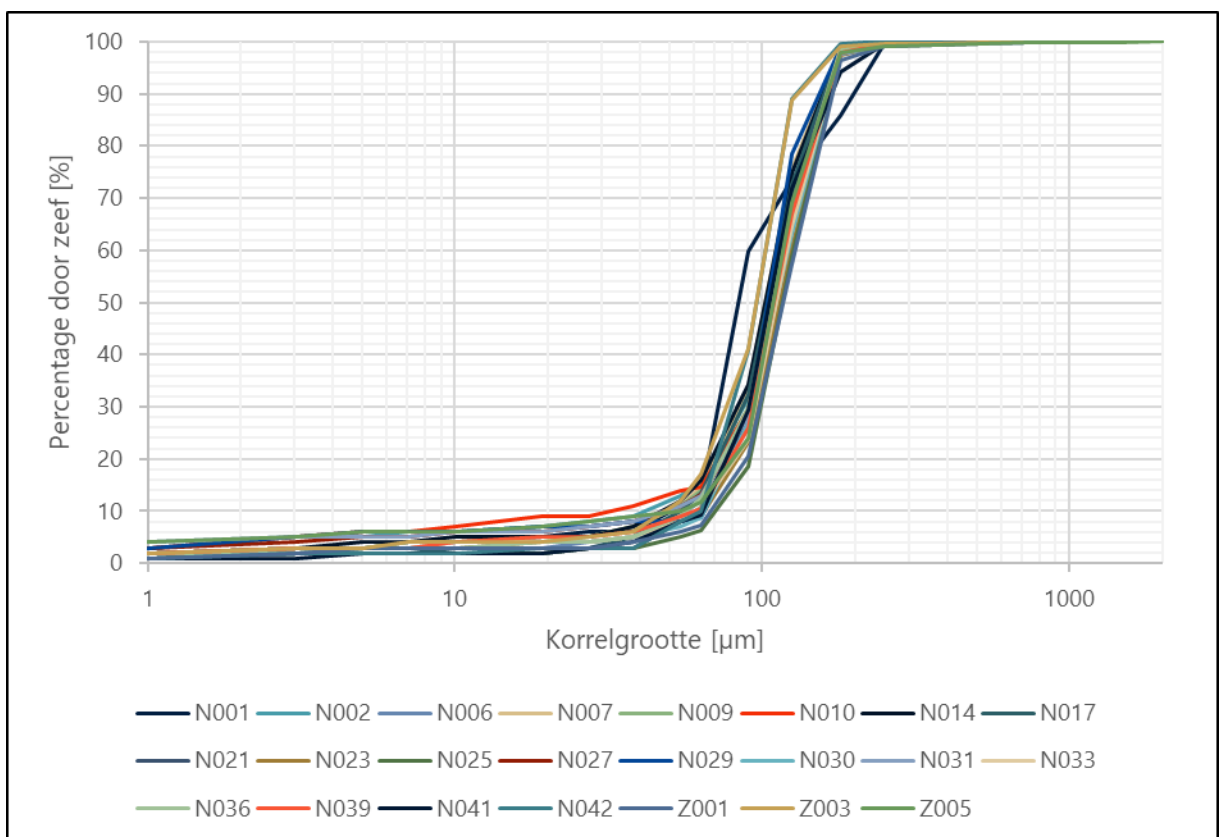
Figuur A0.4: Korrelverdeling van monsters "Pipe Dak".

A.15 Pipe onder



Figuur A0.5: Korrelverdeling van monsters "Pipe Onder".

A.16 Pipe wel

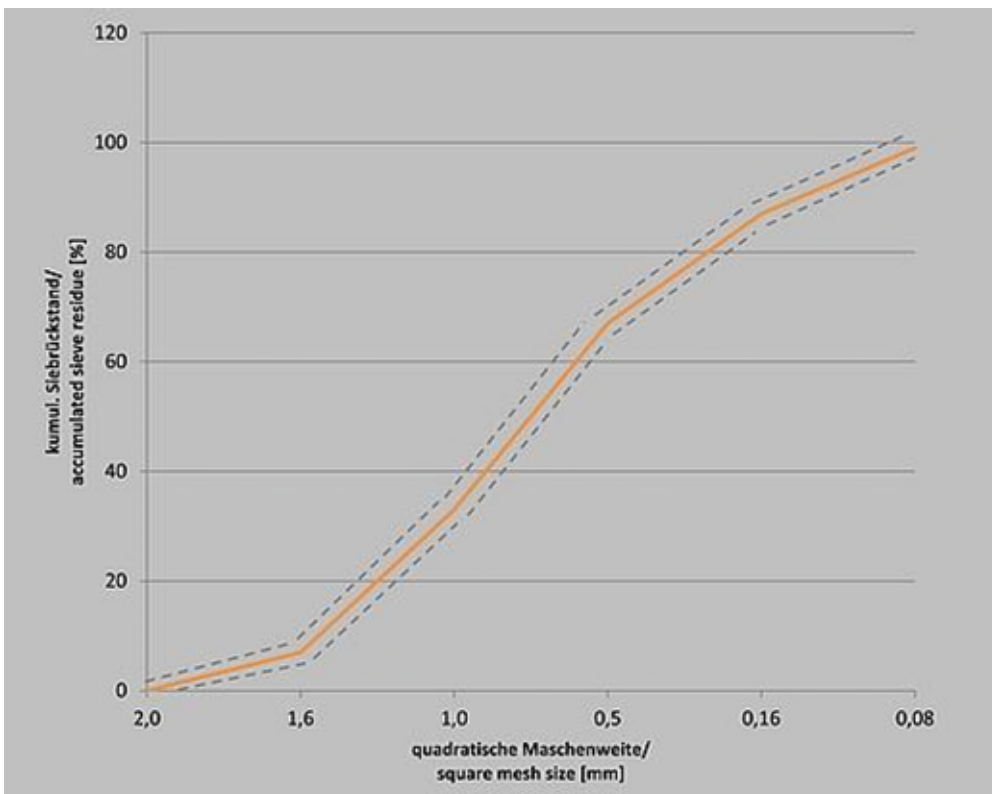


Figuur A0.6: Korrelverdeling van monsters "Pipe Wel".

Appendix B

Pinhole Test

B.1 Korrelverdeling norm-zand



Appendix C

Analyse drukgradiënten op basis
van WSM data

Analyse drukgradiënten WSMs

Aan: Projectteam Hedwigepolder
Van: Lisa van der Linde, Gert-Ruben van Goor
Datum: 23 maart 2022
Ref nr.: 1220-164143.M24 v2.0
Onderwerp: Analyse drukgradiënten WSMs Hedwigepolder

De pipingproef in de Hedwigepolder is in beide proefvakken geslaagd door piping te bewerkstelligen. Dit is onder andere tijdens de proef waargenomen in de waterspanningsmeters. Bij het CSI "Crime Scene Investigation" van de pipingproef, waarbij de proefvakken zijn ontgraven, is het pipe-pad nauwkeurig ingemeten en vastgelegd. Dit CSI-onderzoek heeft o.a. de kaarten opgeleverd die in het Factual Report (1220-164143.R04 d.d. 25-3-2022) zijn opgenomen. Hierin is te zien hoe de pipe meandert tussen de verschillende waterspanningsmeters. In deze memo is de ontwikkeling van dit pipe-pad over de tijd beschreven aan de hand van de meetreeksen van de waterspanningsmeters. Daarnaast is de groeisnelheid van verschillende segmenten van de pipe bepaald.

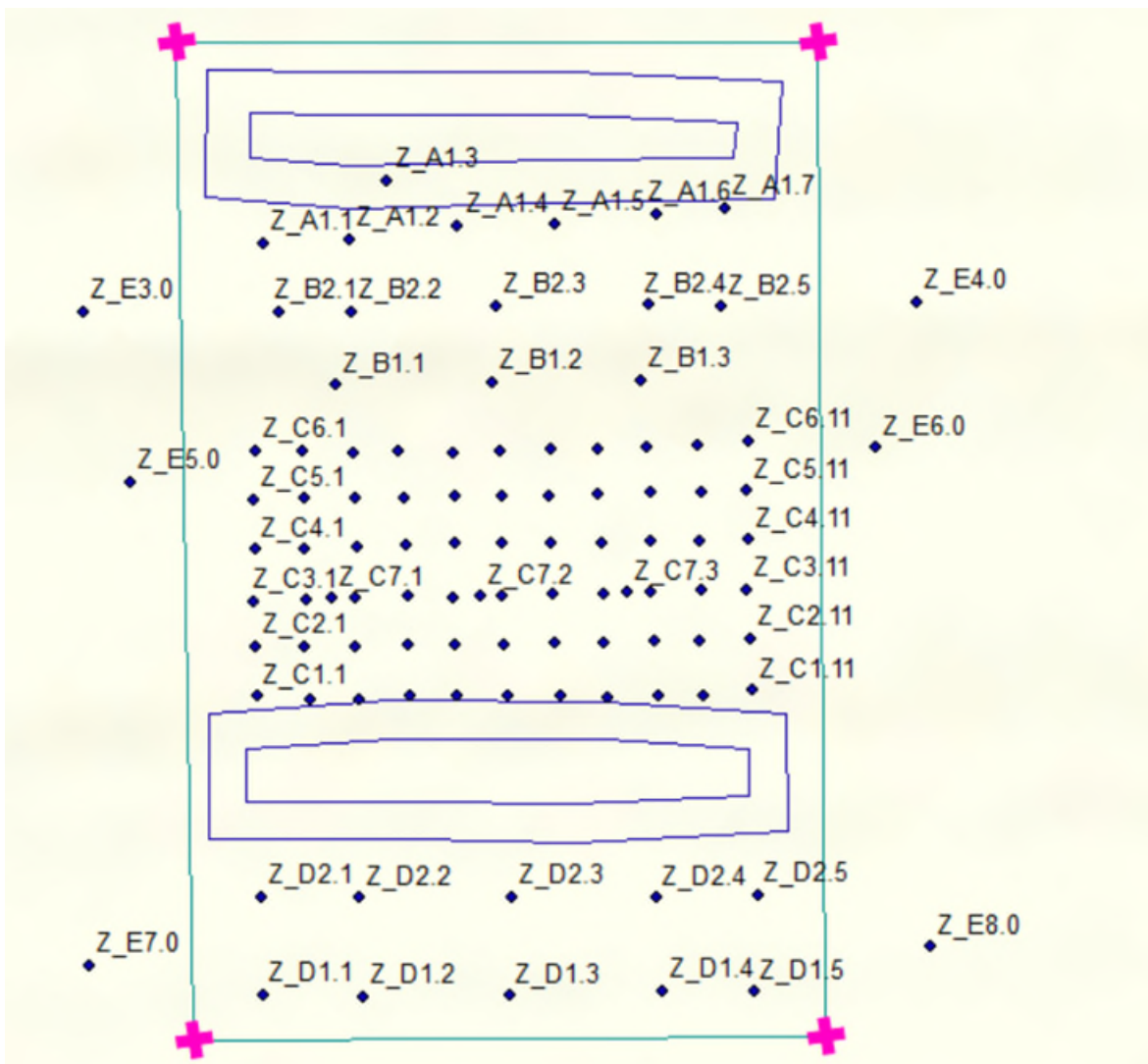
Deze memo is opgesplitst in 3 delen. Eerst is een overzicht gegeven van de meetopstelling met daarbij ook de methode om de groeisnelheid van de pipe te bepalen. Delen 2 en 3 van deze memo geven de analyses van de waterspanningen in proefvak zuid en proefvak noord respectievelijk.

1.1 Meetopstelling en analysemethode

Tijdens de piping proef zijn honderden waterspanningsmeters (WSMs) geplaatst om de waterdrukken te volgen. Een overzicht van de waterspanningsmeters in proefvak zuid (de proefvakken zijn identiek), is te zien in Figuur 1.

De pipe is tijdens de proef dieper gegroeid dan in het ontwerp is aangenomen. De waterspanningsmeters in het vak direct bovenstrooms van de sloot (vak C), die bedoeld waren om de pipegroei te meten, waren nagenoeg allemaal op NAP +0,9 m geplaatst (0,2 m onder het verwachte pipe niveau). Maar door de diepere ligging van de pipe staan de waterspanningsmeters ca. 0,4 m boven het uiteindelijke pipeniveau. Ondanks deze relatief hoge plaatsing in een relatief gelaagd toppakket (silt/lutum-zand) is het mogelijk gebleken het verloop van het pipingproces op basis van de gemeten waterdrukken te volgen. Vanwege de relatief hoge plaatsing in de gelaagde top van het getijdenzandpakket waarin lutum, silt en zandlaagjes elkaar afwisselen reageren enkele WSMs niet of vertraagd op de proefbelasting. Daardoor zijn niet op elke locatie bruikbare drukreeksen beschikbaar.

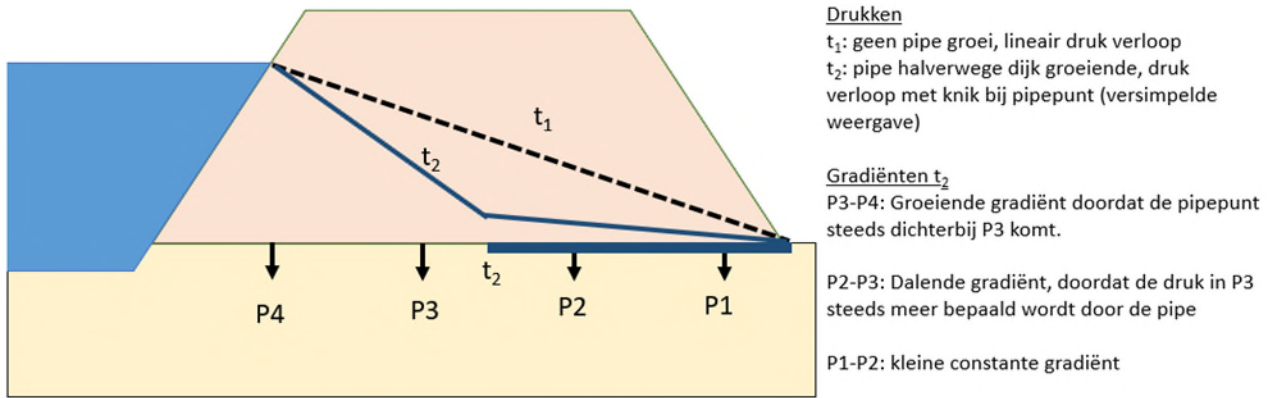
In deze analyse worden enkel de waterspanningsmeters in vak C meegenomen, omdat hier de waterspanningsmeters in een gestructureerd grid dicht op elkaar geplaatst zijn. Hierin wordt een onderscheid gemaakt tussen de 11 langsraaien (CX.1 t/m CX.11) en de 6 dwarsraaien (C1.X t/m C6.X).



Figuur 1: Waterspanningsmeters proefvak Zuid

Ter plaatse van de pipe en in de directe omgeving van de pipe zijn de waterspanningen lager dan verwacht op basis van het stromingspatroon zonder pipe, hierdoor kunnen de waterspanningsmeters de aanwezigheid van de pipe detecteren (zie ook Figuur 2). Wanneer de pipe een WSM nadert daalt de waterspanning sterk.

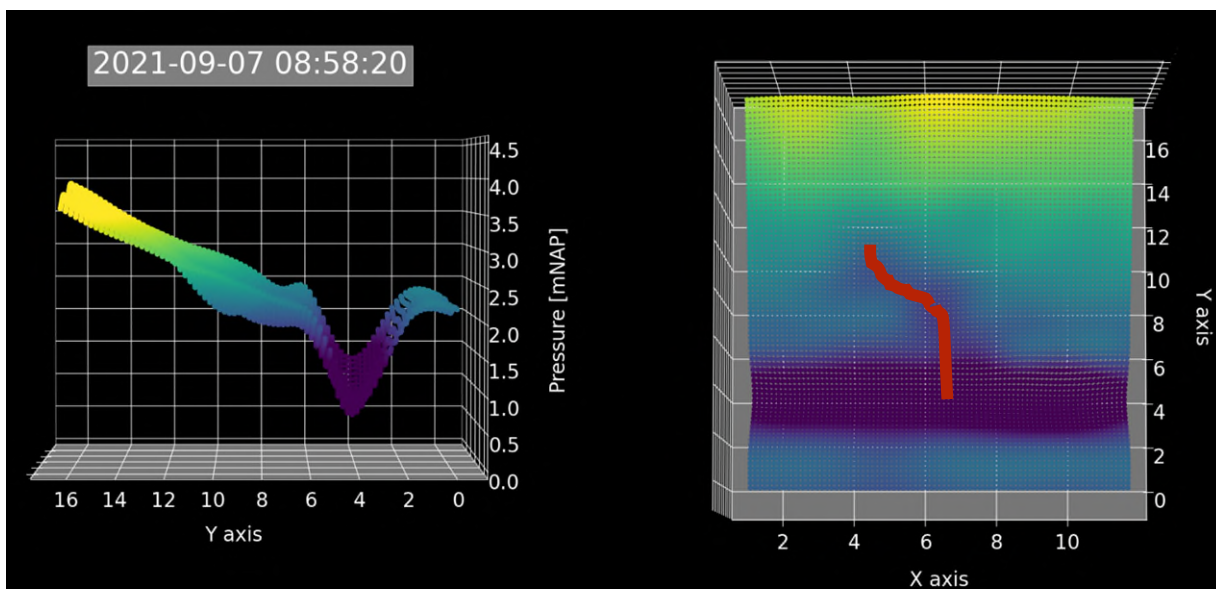
Naast een directe analyse van de waterspanningsmeters, wordt het pipe-pad weergegeven door de gradiënt tussen twee waterspanningsmeters (koppel) te beschouwen over de tijd. Wanneer de pipe-punt zich bij de benedenstroomse waterspanningsmeter van dit koppel bevindt is de gradiënt tussen deze WSM's initieel zeer groot, maar met de verdere progressie van de pipe daalt de gradiënt doordat de waterspanning in de volgende WSM's steeds meer beïnvloed wordt door de pipe. Aangenomen wordt dat de piek in de gradiënt optreedt wanneer de pipe de eerste waterspanningsmeter van het gradiënten koppel heeft bereikt.



Figuur 2: Schematische weergave drukken tijdens piping

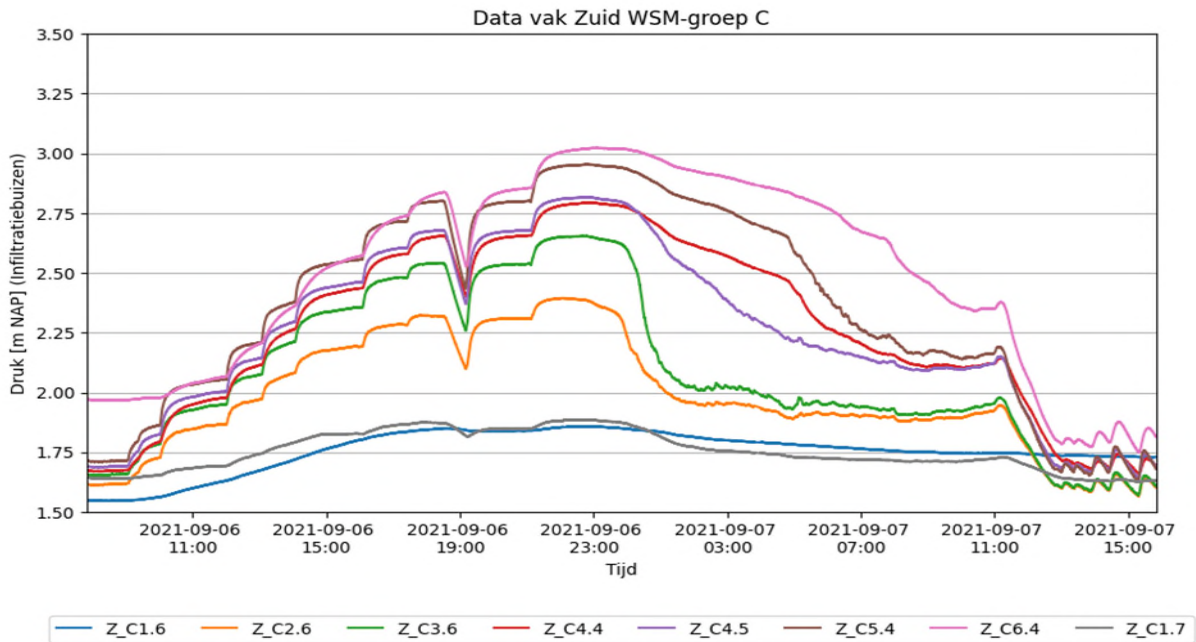
1.2 Proefvak Zuid

In proefvak zuid bevindt de dominante zandmeevoerende wel zich in het midden van de uittrede-sloot. In de waterspanningen is dit waarneembaar in WSMs C2.5 en C2.6 door een sterke daling in de waterspanningen rond 23:30 op 6 september 2021, op dit moment heeft de pipe al anderhalve meter afgelegd. Pipegroei is in de eerste langsgraai van WSM (C1.5/C1.6) niet duidelijk zichtbaar geweest. Dit komt hoogstwaarschijnlijk door de relatief hoge plaatsing in de gelaagde top van het getijdenezandpakket. De pipe groeit richting de infiltratiebuizen tot deze de 4^e dwarsraai (C4.5) bereikt, vanaf dan buigt de pipe af naar het zuid-westen (links in het onderstaande figuur), deze afbuiging is waarschijnlijk veroorzaakt door heterogeniteit in de bodem. De pipe groeit vervolgens weer door richting de infiltratiebuizen tot de pompen uitgezet worden op 7 september om 11:00. Op basis van de waterspanningsmeters bevindt de pipe zich op ca. 2/3^e van het proefvak aan het einde van de proef, de pipe is tot ca. raai 6 gegroeid. In Figuur 3 is te zien hoe de pipe over het proefvak is gegroeid op basis van de waterspanningsmeters. Het exacte pipe-pad zoals bij het CSI is bepaald is te zien in bijlage 1, deze komt goed overeen met het pipe-pad o.b.v. de waterspanningsmeters



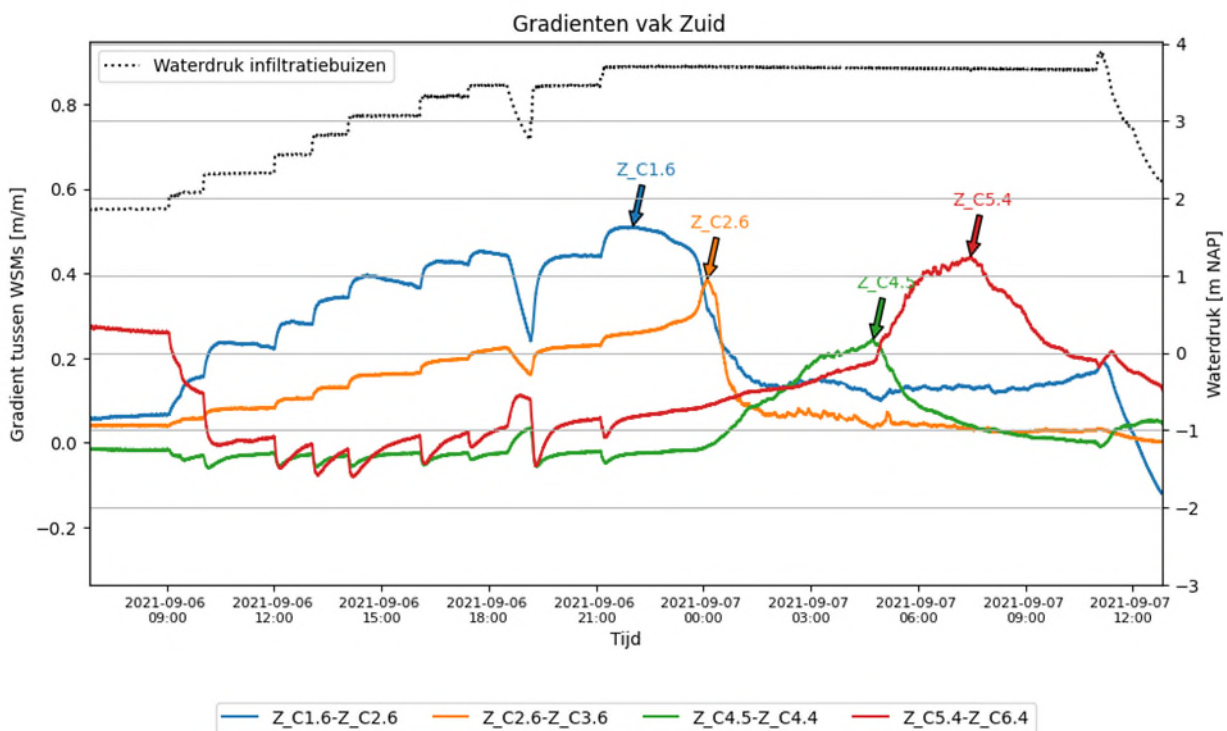
Figuur 3: Overzicht pipegroei proefvak Zuid, interpolatie van de waterspanningen.

De waterspanningsmeters met een sterke daling (waar de pipe vlak langs gegroeid is), zijn te zien in het onderstaande figuur.



Figuur 4: Selectie waterspanningsdaling in proefvak Zuid. De scherpe daling toont de naderende pipe.

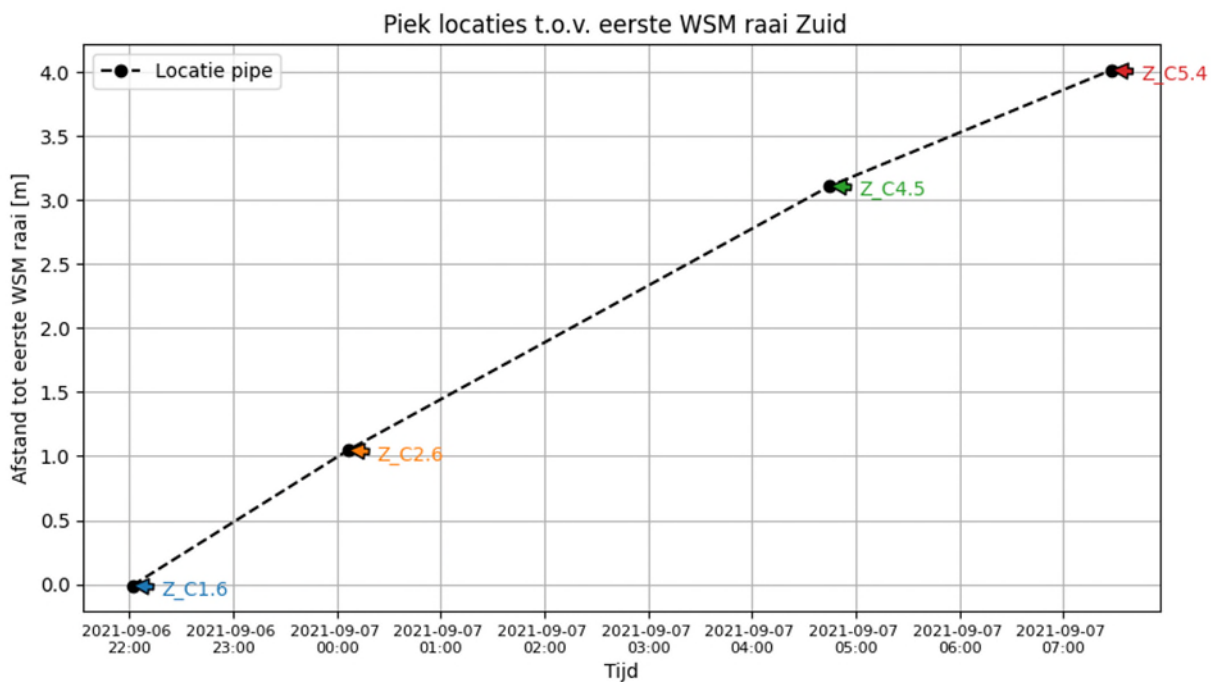
Door de gradienten tussen twee aansluitende waterspanningsmeters te analyseren is locatie van de pipe nauwkeuriger te bepalen. De gradiënten van de WSM koppels bij de pipe zijn weergegeven in Figuur 5, de geselecteerde koppels geven ongeveer weer waar de pipe zich bevindt op welk tijdstip.



Figuur 5: Gradiënten proefvak Zuid. Op 06-09-2021 rond 19:00 is er een stroomstoring geweest, dit heeft geresulteerd in een verlaging van de waterstanden. Het gradiënten koppel Z_C4.5-Z_C4.4 is loodrecht op de (globale) stroomrichting vanwege het afbuigen van de pipe.

WSM C1.6 reageert verdoofd, daarom is ook WSM C1.7 geanalyseerd (niet getoond in Figuur 5), deze ligt iets verder van de pipe vandaan. De analyses met WSM C1.7 en WSM C1.6 geven exact hetzelfde resultaat, doordat dit wordt gedomineerd door de scherpe daling in WSM 2.6. Het starttijdstip van de analyse komt overeen met de verwachte starttijd o.b.v. de debietenanalyse, dit is eerder dan wat we in de het veld geobserveerd hadden doordat de WSM's in de eerste raai niet heel sterk reageren op de drukverandering door de pipegroei.

Door de locatie van de pipepunt (bij de eerste WSM in het koppel) uit te zetten tegen het tijdstip van de piek, is te bepalen met welke snelheid de pipe groeit. Deze verplaatsing van de pipepunt (piek van het koppel) is weergegeven in Figuur 6.



Figuur 6: Pipe progressie proefvak Zuid, de pipe locatie t.o.v. de eerste WSM raai is hierboven weergegeven.

De pipe lijkt zich met een redelijk constante snelheid door het proefvak te verplaatsen. De afgeleide snelheden zijn in de onderstaande tabel weergegeven, de groeisnelheid van de totale pipe is bepaald door de meanderende pipelengte (afstand WSM 1.6 tot het einde van de pipe waar deze is opgegraven) te delen door de tijd tussen de eerste waarneming van horizontale pipegroei (06-09-2021 22:00) en het einde van de proef (07-09-2021 11:00).

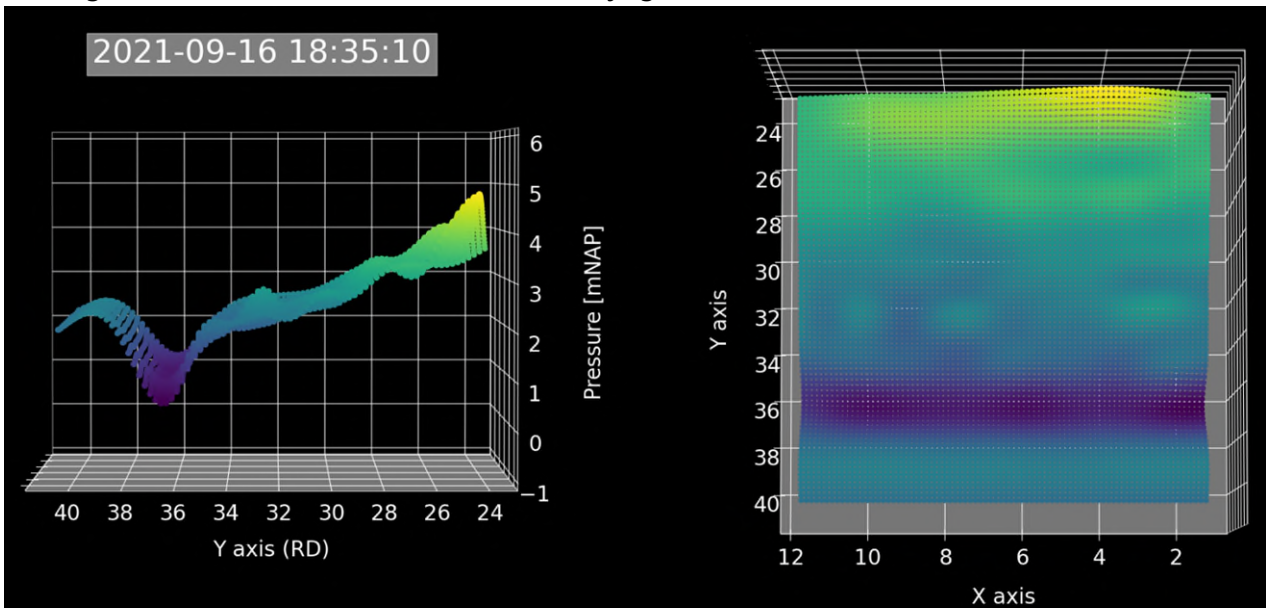
Tabel 1: Pipegroei snelheid proefvak zuid

LOCATIE PIPE	SNELHEID [MM/S]	OPMERKINGEN
SEGMENT: C1.6-C2.6	0,14	
SEGMENT: C2.6-C4.5	0,09	
SEGMENT: C4.5-C5.4	0,14	
TOTALE MEANDERENDE PIPE	0,18	(9-0,6) meter / 13 uur
TOTALE AFSTAND PIPE (HAAKS OP SLOOT)	0,11	(5,6-0,6) meter / 13 uur

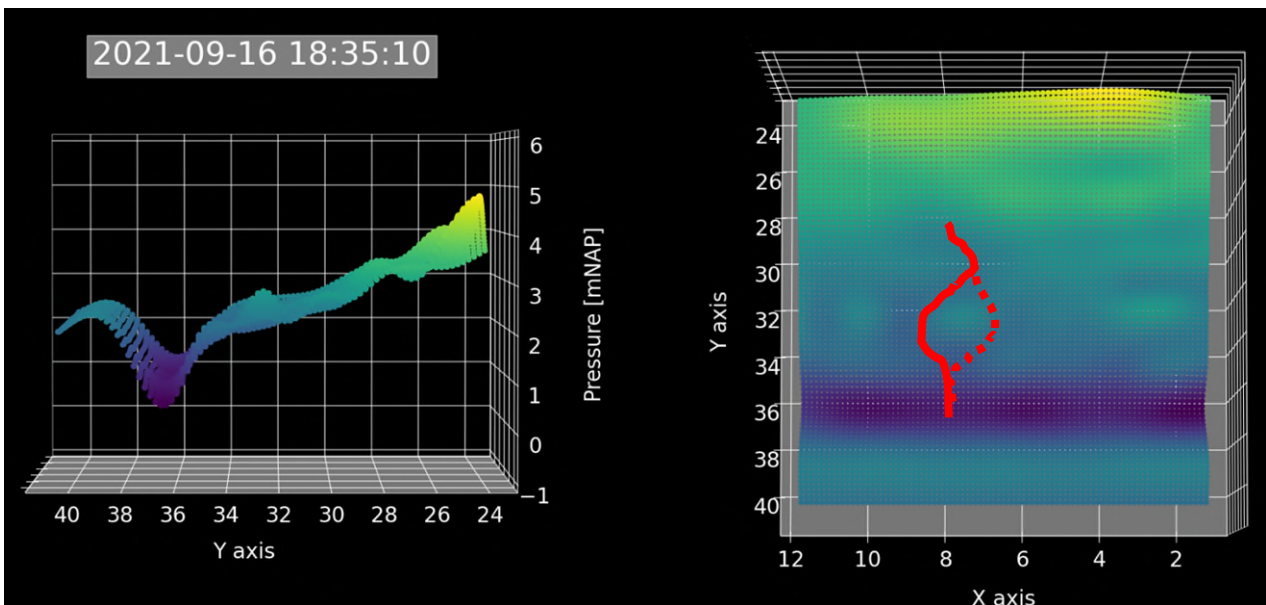
Deze pipegroeisnelheid o.b.v. de WSM's is gemiddeld ca. 0,12 mm/s. Door de totale pipegroei vanaf de eerste WSM raai door de pipingduur te delen is een gemiddelde snelheid van 0,11 mm/s bepaald, dit komt goed met elkaar overeen. De groeisnelheid van de totale meanderende pipe is groter, doordat de meanderende pipelengte groter is dan de afstand van de sloot tot de pipe-punt.

1.3 Proefvak Noord

In proefvak noord groeit de pipe richting de infiltratiebuizen vanaf C1.4-C1.5 De pipe meandert richting de infiltratiebuizen zoals te zien is in bijlage 2. In

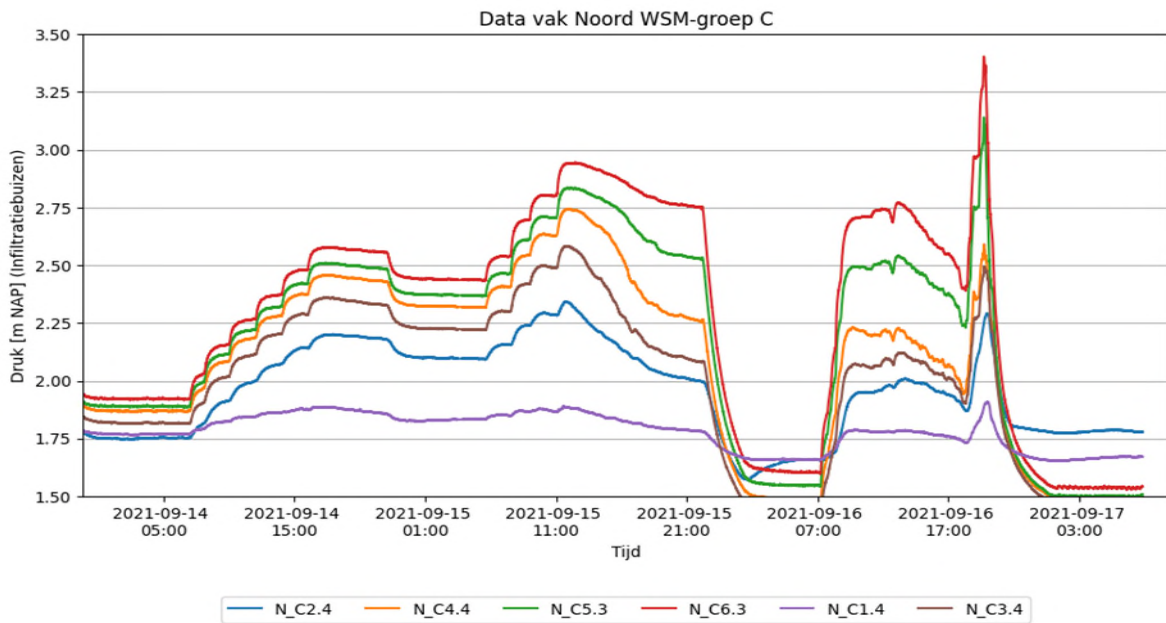


Figuur 7 is te zien hoe de pipe over het proefvak is gegroeid op basis van de geïnterpoleerde meetreeksen van de waterspanningsmeters.



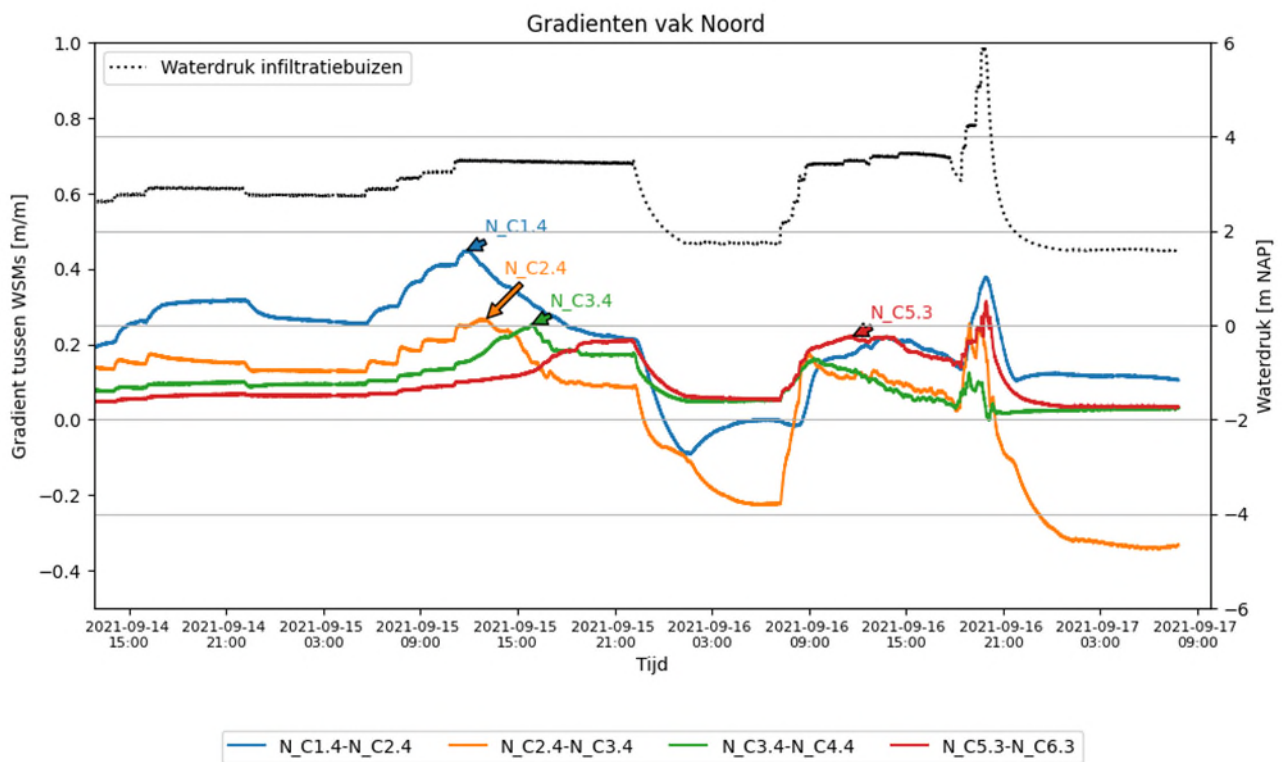
Figuur 7: Overzicht pipegroei proefvak Noord, interpolatie van de waterspanningen. Bij de gestippelde lijn is op basis van de interpolatie van de waterspanningsmeters ook een relatief lage waterspanning, hier is de pipe echter niet gegroeid.

De waterspanningsmeters waarin een sterke daling is waargenomen zijn te zien in het onderstaande figuur.



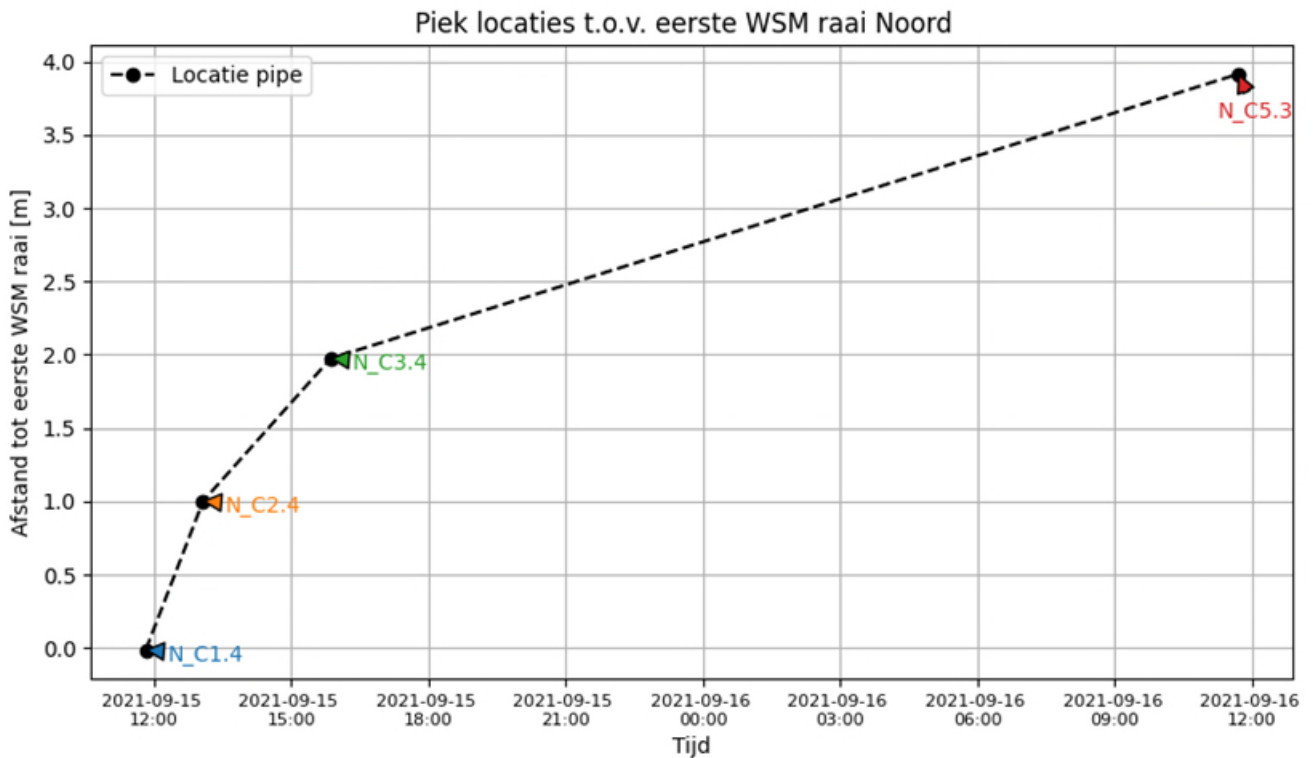
Figuur 8: Selectie waterspanningsmeters vak Noord. De scherpe daling rond 14:00 15-09-2022 toont de naderende pipe.

De gradiënten van de WSM koppels bij de pipe zijn weergegeven in Figuur 9, de geselecteerde koppels geven ongeveer weer waar de pipe zich bevindt op welk tijdstip. Het WSM koppel C5.3-C6.3 ligt niet direct in het pad van de pipe maar is weergegeven omdat de koppels die precies bij de pipe liggen (langsraaien 4 en 5 ipv 3), verdoofd reageerden waarschijnlijk door de aanwezigheid van klei- en siltlagen.



Figuur 9: Gradiënten proefvak Noord, op de linker as de gradiënt en op de rechter as de waterdruk in m NAP.

Met de locatie van de WSM's en de piek in de gradienten is bepaald hoe snel de pipe zich verplaatst van de uittredesloot naar de infiltratiebuizen. Deze verplaatsing van de pipe (gradiënten piek) over de tijd is weergegeven in Figuur 10.



Figuur 10: Pipe progressie proefvak Noord, de pipe locatie t.o.v. de eerste WSM raai is hierboven weergegeven.

De verplaatsingssnelheden van de piek zijn te zien in Tabel 2. De daling van de gradiënt in het koppel N_C2.4-N_C3.4 lijkt in twee stappen te gaan (zie Figuur 9), dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het meanderen van de pipe. Dit meanderen zorgt ervoor dat de plaatsbepaling/tijdbepaling van de piek minder nauwkeurig is.

's Nachts is de waterstand in de infiltratiebuizen verlaagd (rond 22:00), de waterdruk is de volgende dag om 09:00 weer hersteld. Door het uitzetten van de pompen is de direct bepaalde pipegroeisnelheid tussen raai 3 en raai 5 niet representatief, daarom is deze gecorrigeerd voor de 11 uur waarin de waterspanningen verlaagd zijn. Deze correctie is ook bij de globale snelheidsbepaling van de volledige pipe toegepast.

De verwachting is dat de gemiddelde snelheid van raai 1 tot raai 3 een goede inschatting geeft van de opgetreden pipegroei snelheid. Daarbij wordt opgemerkt dat de pipegroei tijdens de proef leek te stagneren vanaf de avond van 15 september. Dit kan een indicatie zijn dat het verval nabij het kritieke verval is. Pas bij het verder ophogen van de waterspanningen is de pipe verder gegroeid op 16 september.

Tabel 2: Pipe progressiesnelheid vak Noord

LOCATIE	SNELHEID [MM/S]	OPMERKINGEN
SEGMENT: C1.4 - C2.4	0,22	
SEGMENT: C2.4 - C3.4	0,10	
SEGMENT: C3,4 – C5.3	0,06	Gecorrigeerd voor het verlagen van de waterstanden.
TOTALE MEANDERENDE PIPE	0,20	(15,5 - 0,6) meter / (32 - 11) uur
TOTALE AFSTAND PIPE (HAAKS OP SLOOT)	0,12	(10 - 0,6) meter / (32 - 11) uur

Tot raai 3 is de gemiddelde pipegroeisnelheid 0,15 mm/s. Hierna lijkt de pipegroeisnelheid significant af te nemen. De totale pipegroeisnelheid is 0,12 mm/s wanneer de absolute afstand tussen de eerste WSM raai en de pipe-punt gebruikt wordt. De pipegroeisnelheid inclusief meanderen is 0,2 mm/s. Tijdens de CSI fase is een drainagebuis aangetroffen voorbij de laatste WSM raai in vak C, dit is de locatie waar de pipe is opgesplitst (zie bijlage B) ook hier was in het veld een stagnatie te merken, dit heeft geen invloed op de huidige analyse omdat hierin enkel de waterspanningen in vak C beschouwd zijn.

1.4 Discussie en conclusies

Met deze analyse is het pad van de pipe en de progressie over de tijd weergegeven. Voor dit onderzoek dient het als ondersteuning van het bepaalde kritiek verval en kunnen op basis van deze analyse nadere correlaties gelegd worden tussen het (bij het CSI) uitgevoerde grondonderzoek en het meanderen van de pipe. In de grotere context van piping onderzoek kunnen deze experimenten helpen in de stap naar het tijdsafhankelijk rekenen aan piping.

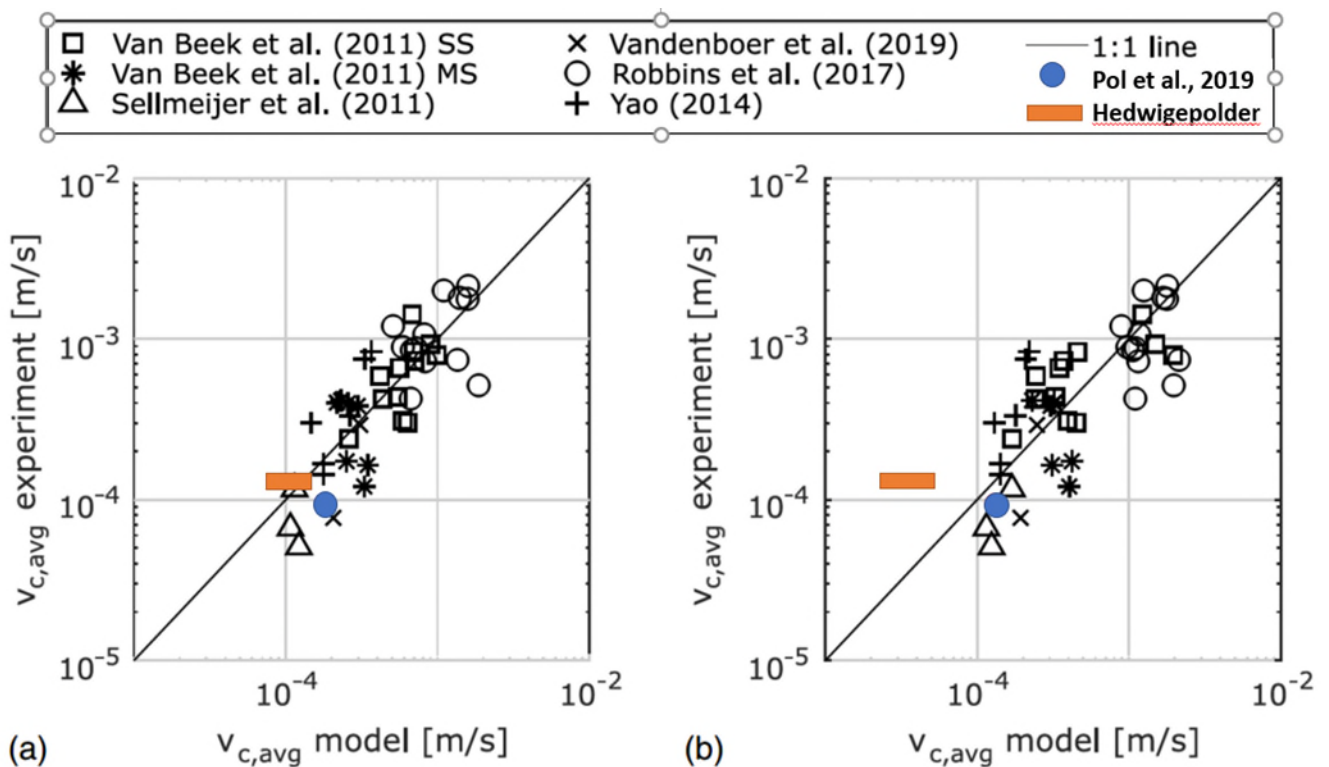
De waterspanningsmeters hebben het pad van de pipe goed kunnen volgen, zoals te zien is in figuren 3 en 7. Dit pipe-pad is geverifieerd in de CSI-fase van het onderzoek, zie de bijlagen. De snelheid waarmee de pipepunt zich van de uittredesloot naar de infiltratiebuizen beweegt is afhankelijk van de heterogeniteit die onderweg ontweken moeten worden. Bij relatief constante pipegroei is de snelheid ca. 0,12 mm/s. De pipegroeisnelheid in termen van afgelegde afstand is met ca. 0,19 mm/s groter.

In het onderzoek naar pipegroeisnelheden heeft Pol et al. (2021) een vergelijking gemaakt tussen experimenten, de pipegroeisnelheid varieert tussen ca. 0,05 mm/s en 3 mm/s. De gemeten snelheden in de pipingproeven in de Hedwigepolder lijken goed overeen te komen met de lagere waarden in deze dataset, zie ook Figuur 11. Op basis van empirische data lijkt dit verklaard kunnen worden door de schaal van de experimenten. De datapunten van Pol et al (2021) en Sellmeijer et al. 2011 betreffen grootschalige proeven, evenals de pipingproef in de Hedwigepolder. Proeven op (kleine) laboratorium schaal lijken een grotere pipegroeisnelheid te hebben. Echter is hier geen theoretische ondersteuning voor. Bovendien is een deel van der kleine schaal proeven initiatie gedomineerd, waardoor de opstelling overbelast is geraakt en de groeisnelheid van de pipe groter is. Figuur 11 toont de geobserveerde groeisnelheden t.o.v. twee verschillende voorspellende vergelijkingen.

$$v_{c,avg} = 3.2 \frac{kH}{nL} \quad (1)$$

$$v_{c,avg} = 4E^{-3} \left(\frac{H}{L}\right)^{1.4} \left(\frac{k}{3.4E^{-4}}\right)^{0.57} \quad (2)$$

De lengte van de kwelweg L is gelijk aan 10 [m], het opgelegde verval H is ca. 2,4 [m], de porositeit n is 0,41 [-] en voor de doorlatendheid is een range van 1 [m/d] tot 2 [m/d] toegepast, omdat in het afleiden van de vergelijkingen, een homogene isotrope doorlatendheid wordt aangenomen.



Figuur 11: Pipegroeisnelheden gemeten in experimenten t.o.v. berekeningen (a) vergelijking 1 en (b) vergelijking 2. Figuur aangepast uit Pol et al. (2021)

1.5 Referenties

Pol, J. C., Kanning, W., & Jonkman, S. N. (2021). Temporal Development of Backward Erosion Piping in a Large-Scale Experiment. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 147(2), 04020168.

Appendix D

Achtergrondrapportage ERT
metingen

Application of time-lapse ERT (Electrical Resistivity Tomography) to detect the growth of piping under a levee.

Author(s)
Marios Karaoulis

Deltares



Application of time-lapse ERT (Electrical Resistivity Tomography) to detect the growth of piping under a levee.

Client	Waterschap Hollandse Delta
Contact	Hans de Bart
Reference	Hedwigepolder, piping, ERT
Keywords	

Document control

Version	0.1
Date	31-08-2022
Project nr.	11204565-006
Document ID	11204565-006-BGS-0002
Pages	33
Classification	
Status	preliminary This is a preliminary report, intended for discussion purposes only. No part of this report may be relied upon by either principal or third parties.

Author(s)

This table is not for publication

Doc. version	Author	Reviewer	Approver	Publish
0.1	Marios Karaoulis	Marc Hijma (Deltares) Noor Pruijn (WSHD) Lisa van der Linde (Fugro) Luuk Barendse (Fugro)	Maaïke Blauw	

Summary

This report presents the results from the Electrical Resistivity Tomography (ERT) measurements in the Hedwigepolder that were used to detect pipe formation below an artificial levee. At the test site an induced piping experiment took place and permanent electrodes were installed for the duration of the study. A series of ERT (time-lapse) data were collected and tomographic inversion from the data was executed.

The results show that the ERT method can image the location of the sand boil and pipe formation. The location is in good accordance with direct measurements from the installed piezometers. Visual validation after the experiment with trenches confirmed the location of the pipe.

The results allowed to create a model containing all the dynamic changes in resistivity in the subsurface. By analysing those changes, the subsurface could be clustered into three areas: 1) an area with increased water levels, 2) an area that remained stable and 3) an area where pipe formation occurred. The results indicate that it should be possible to predict the location of pipe growth using ERT time-series analysis before the pipe actually forms. More data along real levees are needed to further develop this system.

Contents

	Summary	3
1	Introduction	5
1.1	Objective	5
2	Site characteristics	6
3	Methods	9
3.1	Electrical properties	9
3.2	ERT principles	9
3.3	Considerations about ERT measurements	12
3.3.1	Influence of temperature and salinity on resistivity	12
3.3.2	Spatial resolution and coverage	13
3.3.3	Measurement resolution and accuracy	13
3.3.4	Accuracy of resistivity of the inversion result	14
3.3.5	Measuring frequency	14
3.3.6	Overall QC data	15
3.3.7	Measuring array	15
3.3.8	Pre-processing	16
3.3.9	Inversion	16
4	Results from site 1 (south side)	18
4.1	Time series analysis	21
5	Results from Site 2 (north side).	24
5.1	Time series analysis	26
6	Conclusions	28
7	Recommendations	29
Appendix 1	Equipment	30
Appendix 2 – Information about the measuring system		31
8	References	32

1 Introduction

The Electrical Resistivity Tomography (ERT) method allows for measuring the electrical properties of the subsurface that are most sensitive to water content and quality, but also depend on the lithology of the subsurface. The electrical properties of the water in their turn depend for a large part on temperature but are also influenced by the chemistry of the water, especially salinity. During pipe formation the electrical properties of the subsurface at and near the location of the pipe change, thus making ERT in potential a suitable tool to monitor the piping evolution and other changes on the subsurface related to water (Karaoulis et al, 2019). In this report, we present the results from the ERT for detecting pipe formation under the artificial levee in het Hedwigepolder. The test site consists of an induced piping experiment where permanent electrodes are installed for the duration of the experiment. A series of ERT (time-lapse) data was collected and tomographic inversion was performed from the data.

1.1 Objective

The objective of this research is to test whether the application of time-lapse ERT (Electrical Resistivity Tomography) can be used to detect pipe formation under a levee.

2 Site characteristics

In the municipality of Hulst (Figure 1) we installed a semi-permanent ERT monitoring system in the embankment of the levee (Figure 2), both at the south and north side.

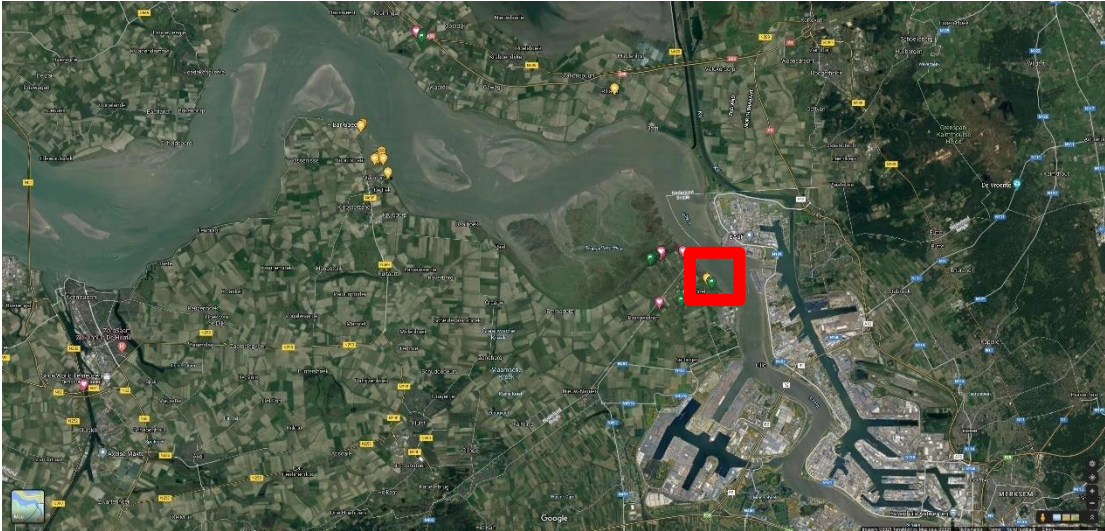


Figure 1 Overview of the area of investigation



Figure 2 The constructed levee

The ERT measurements were taken with the ERT-DAS 1 with 4 extension switch boxes (Figure 3). Technical specs can be found in the appendix.



Figure 3 The main measuring unit with the extension switch boxes.

The overall schedule is split into two sections / monitoring periods. During the 4th-7th of September, we measured at the south side of the levee. During the 9th- 17th of September, we measured on the north side. The setup, system, acquisition array and processing are identical for both sites, so we will describe this only once.

Along the slopes of the embankment (Figure 4) we installed 7 cables with metal pins (electrodes). The 6 top most lines have a length of 10 m each and 41 electrodes with 0.25 m spacing. The 7th line (the bottom one, closest to the ditch) has a total length of 6 m, with 24 electrodes with 0.25 m spacing (Figure 5). The 7th line is centralized compared to the other 6. In total, we utilized 270 electrodes. Figure 6 shows a cross-view with the position of the cables in relation to the depth of pipe formation (panel A) and a photo of the layout of the cables in the field.

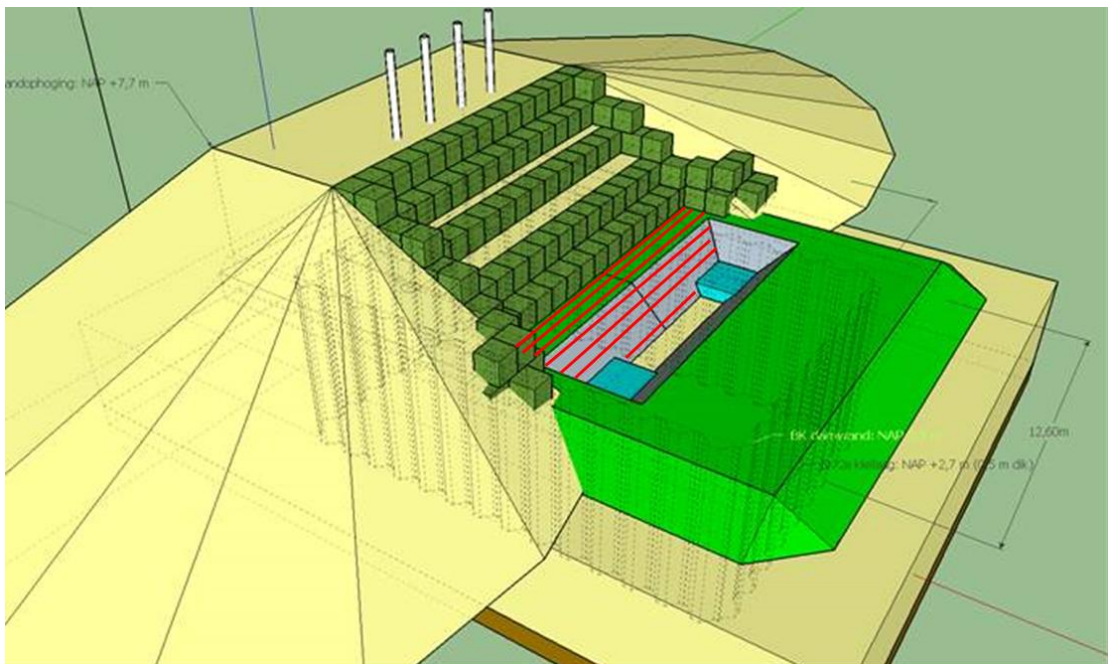


Figure 4 Overview of ERT cable installation. The red lines are the ERT-cables.

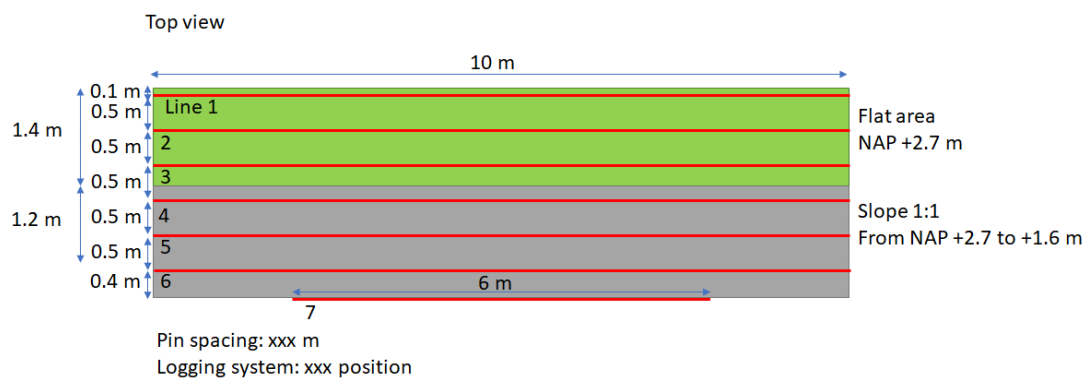


Figure 5 Top view of the ERT cable installation, the cables are red.

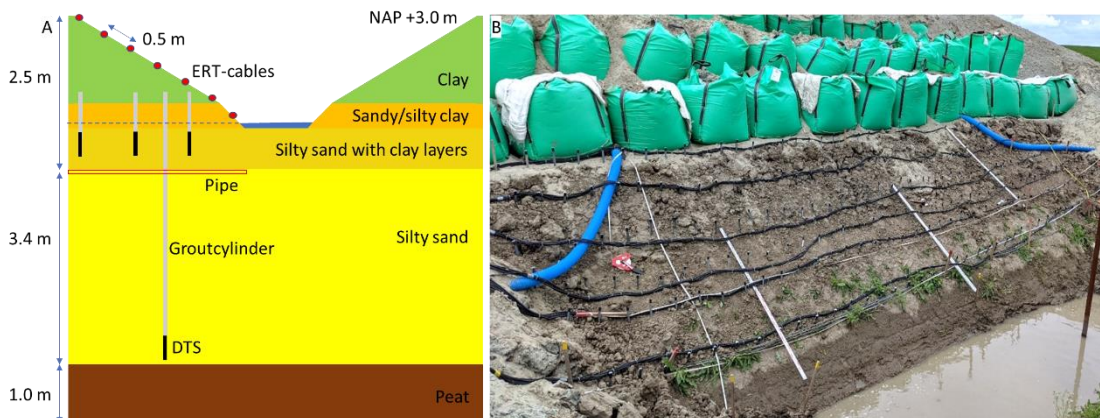


Figure 6 A: position of the ERT-cables along the slope in relation to the position of the ditch and the level of pipe formation. B: lay-out of the cables next to the ditch. The cables are black and the metal pins are visible along the cables.

3 Methods

3.1 Electrical properties

Electrical properties of soils are related mostly to the porosity and the chemistry of the fluids on the grains or in the pores and less to the chemistry and mineralogy of the soil material itself. The electrical properties can provide indirect indications of the nature of soils and the spatial variation of the nature of soils (Figure 7). The measurement is known as the Direct Current (DC) resistivity method. This method is an active method aimed at measuring the resistivity (the resistance of a material to the flow of an electrical current) of the subsurface by determining the electric potential field induced by applying an electric potential to a soil at electrodes.

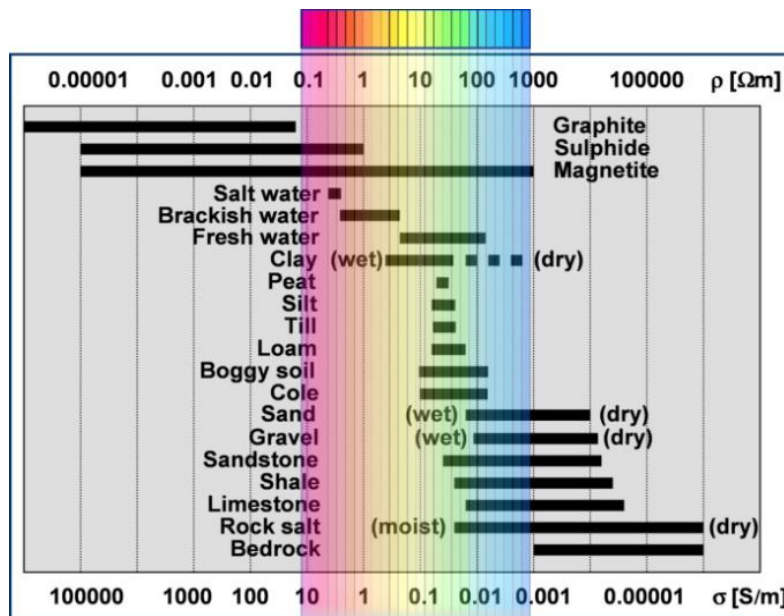


Figure 7 Typical electrical conductivities (resistivities) for diverse materials

3.2 ERT principles

The extensive use of ERT in fundamental- and applied research, but also for monitoring all over the world, is driven both by the relative ease with which data can be collected and by the thorough understanding of how changes in electrical properties can be interpreted in terms of geo-hydrological and geochemical processes. This has resulted in the off-the-shelf availability of hardware and software. Such software packages have capabilities which can be used to convert time-lapse geophysical data into actionable information on subsurface processes (Karaoulis et al. 2011).

A typical acquisition system for DC resistivity measurements comprises a resistivity meter, an electric source (battery), cables with electrodes, a switching box and a control and storage unit (computer). For each measurement, two current electrodes are used: one to inject the current into the subsurface and the other to receive the same amount of current from it. By convention, these electrodes are named A and B, respectively. The electric field is measured (at least) with two other electrodes (M and N) called the potential electrodes (Figure 8a). The way in which the current and

potential electrodes are arranged on the Earth's surface is called an array. By changing the configurations of the array, the properties of the subsurface are mapped (Figure 8c). Numerous electrode arrays have been designed and use several electrode positions along a profile. By using switch boxes it is possible to obtain a large number of measurements in a short time, resulting in the capability of repeating measurements over longer time periods (time-lapse data) (Figure 8b). These systems can collect data with high spatial resolution, allowing better and more reliable tomographic results (Figure 8d).

To increase the vertical resolution, electrodes can also be placed within boreholes, allowing higher resolution imaging between the boreholes. Boreholes can be placed in a 2D plane or distributed in 3D to get 3D tomographic images. By collecting data over time (time-lapse ERT), we can image the resistivity property in 4 dimensions. More general information about the method and its applications can be found in Revil et al. (2012).

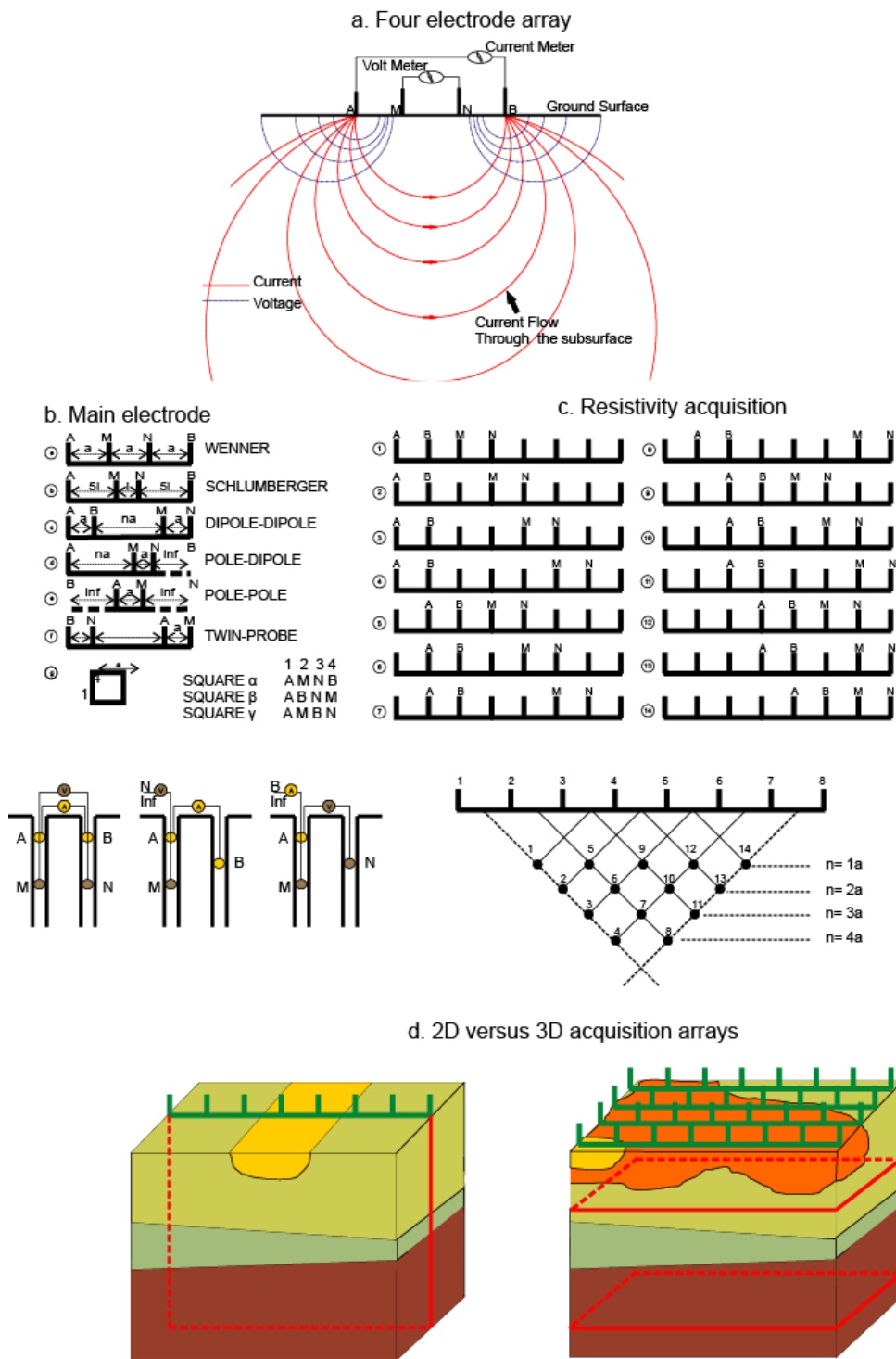


Figure 8: Principle of resistivity measurement in the field. **a.** Each measurement involves two current electrodes A and B) and two potential electrodes (M and N). **b.** Classical electrode arrays used in electrical resistivity surveying. **c.** Construction of a so-called pseudosection (apparent resistivity section) using a dipole-dipole array along a profile. **d.** 2D versus 3D acquisition arrays.

3.3 Considerations about ERT measurements

Several considerations regarding the ERT method are described in this chapter. These considerations are relevant for the interpretation and layout of the here described field test, but also for future field tests.

3.3.1 Influence of temperature and salinity on resistivity

The resistivity of water is predominantly influenced by salinity and temperature. The effect of salinity variations on resistivity is much larger than the effect of temperature. Figure 9, left panel, shows that the resistivity is inversely proportional to the temperature, i.e. as temperature increases, the resistivity decreases. Over a temperature increase from 0 °C to 30 °C, the resistivity decreases by approximately one half (from roughly 30 to 15 ohm.m), but small temperature changes, in the order of degree, have a relatively small impact. The effect of varying salinity is much more pronounced (Figure 9, middle panel): there is a sharp decrease in resistivity between fresh water (salinity < 150 mg/l) and salt water (salinity > 10,000 mg/l). The right panel of Figure 9 shows the combined effect of temperature and salinity. The curves for different temperatures are quite close together and all show the marked contrast between fresh and salt water.

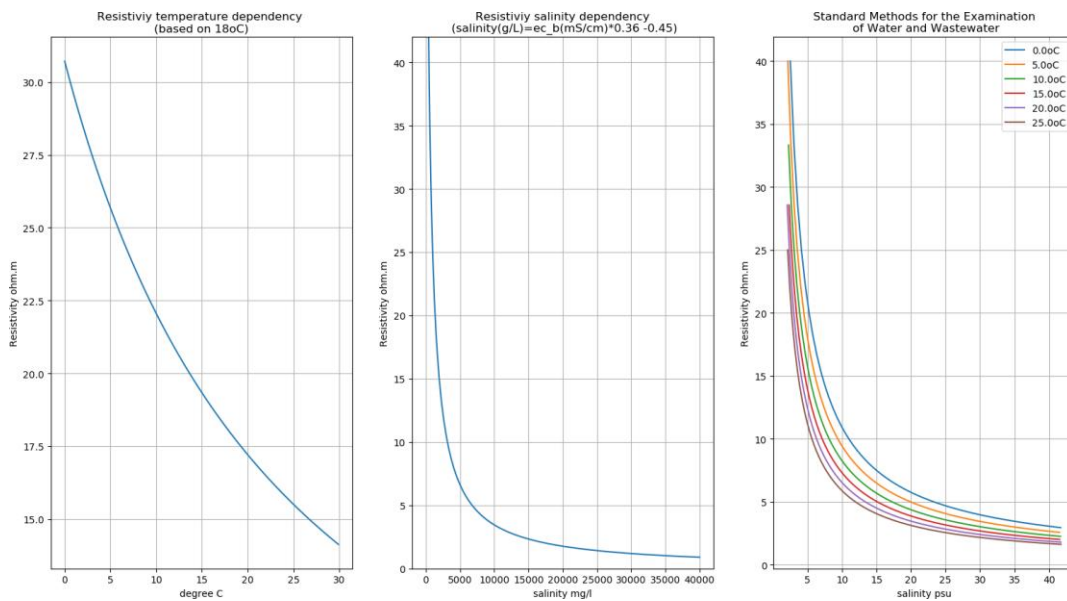


Figure 9: Dependence of resistivity on temperature (Fofonoff and Millard, 1983, left panel), salinity (De Louw et al., 2011ab, middle panel) and the combined temperature and salinity effect (De Louw et al., 2011ab, right panel).

Finally, environmental variables such as temperature also strongly influence the resistivity of the soil itself (Hermans et al, 2014). In order to isolate the influence of a single contributor like temperature, it is vital that the others are kept constant. This is an appropriate assumption for relatively short (order of hours) time-lapse ERT studies using heated fluid as a geophysical tracer. For our field experiment, we assume that during pipe formation the geological units remain constant and thus that observed changes in resistivity values will be predominantly caused by changes in temperature, changes in saturation/water level and changes in salinity. This is shown in chapters 4 and 5, where we cluster the subsurface in areas, based on the time-related response. At the location of the pipe itself sand is replaced by water, but the diameter of the pipe is small (max. 5 cm) compared to the resolution of the ERT-data and hence the pipe itself doesn't show up in the ERT-data. With respect to salinity of the groundwater, there must have been changes in salinity during the start of the experiment since the original groundwater consists of fresh water (rainwater) on top of brackish

water. The infiltrated water consists of drinking water and hence has different properties. During the experiment some manual measurements were done and the infiltrated water had very different properties (conductivity of 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$) than the water coming out the well (conductivity of 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ at one time). The conductivity of the water in the surrounding ditches was much higher (8000-11000 $\mu\text{S}/\text{cm}$). No continuous measurements of the salinity were performed.

3.3.2 Spatial resolution and coverage

The spatial resolution of the resistivity measurements is determined by the electrode spacing in the cables. The electrodes are installed in cables with fixed distances between the electrodes. The horizontal resolution of the resistivity measurements is equal to half of the distance between the electrodes. The vertical resolution decreases with increasing distance from the cable. In the inversion, the spatial coverage is determined by the location and placement of the cables. A single cable provides information of resistivity of a 2D plane in the same direction as the cable. Multiple electrode cables cover a 3D volume if electrodes from different cables are used in the electrode configuration. The resolution depends on the spacing between the boreholes because this dictates the distance between the electrodes. In this work, we discretize the subsurface in 80x25x15 cells. The x-y resolution is 0.125 m and the z-resolution per layer can be seen in Table 1. The depth of the pipe below the cables varies between ~ 1.75 and 3 m, meaning that the vertical resolution at the pipe level decreases from ± 0.15 to ± 0.20 m. The uppermost ERT-cable doesn't measure at pipe level.

Table 1 The 3D model depth resolution.

Layer	Top (m -surface)	Bottom (m -surface)	Resolution (\pm m)
1	0	0.0625	0.03
2	0.0625	0.135	0.04
3	0.135	0.22	0.04
4	0.22	0.31	0.05
5	0.31	0.42	0.06
6	0.42	0.54	0.06
7	0.54	0.69	0.08
8	0.69	0.86	0.09
9	0.86	1.05	0.10
10	1.05	1.27	0.11
11	1.27	1.52	0.13
12	1.52	1.81	0.15
13	1.81	2.0	0.10
14	2.0	2.3	0.15
15	2.3	2.7	0.20

3.3.3 Measurement resolution and accuracy

Resistivity measurements are sensitive over a very large range of values. It is well within the specifications of the ERT unit to measure resistivities from 10^{-6} ohm.m (wire) to $\sim 10^3$ Ohm.m (dry

sand). The resistivities that are relevant for measuring changes due to pipe formation are in the order of +4 to 10 Ohm.m. These values fall well within the dynamic range of the standard ERT instruments. This range makes ERT a suitable tool for detecting pipe formation. The instrument specifications state that the measurement accuracy is 0.05%.

3.3.4 Accuracy of resistivity of the inversion result

ERT provides a measurement of the resistivity of water in units of ohm.m. The accuracy of the inversion model result and the model grid cell size are related. Sharp contrasts, such as between fresh and saline water or warm and cold water might not be well resolved due to the grid cell size. The values of two model cells on either side of a sharp transition might not be exact. Sharp contrasts tend to be smeared in the model when using standard processing. With an adjusted processing scheme designed for sharp contrasts, the inversion result can be improved. This information can originate from DTS, where the spatial resolution along the fibre is typically higher than the ERT. If auxiliary data is available (such as DTS measurements), the values can be further improved, and model resistivity values become closer to the true values.

The inversion output includes an uncertainty metric: the RMS error. This metric provides information about the goodness of fit between the data and the inversion model result. Typically, an RMS error of less than 10% represents a very high quality of the inversion model result. Repeated measurements and auxiliary data increase confidence in the model result.

3.3.5 Measuring frequency

Several types of measurement frequencies are important for time-lapse measurements. The first is the hardware measuring frequency. A typical measurement frequency is 6 Hz, meaning that currents can be injected 6 times per second. The instrument of Deltares is an 8-channel system, meaning that for each current injection 8 pairs of potential electrodes can record the potential. With a measurement frequency of 6 Hz and an 8-channel system, a maximum of 48 potential measurements can be taken per second. In practice, this maximum is not reached, because most systems use mechanical switches that need a few msec to rotate, the power supply needs some extra msec to build up the power and a few msec are needed to store the data to memory. A more realistic estimation is about 16-24 measurements per second. There are systems with more channels in the market (i.e. ABEM is 12 channels, Iris is 10 channels). Custom-based systems can be built, especially for applications where measurements with different cables are required. Another type of frequency is the repeat frequency of each complete set of electrode combinations. It takes time (one cycle) to measure a set of electrode combinations. If the cycle is fast compared to the process that is monitored, the cycle can be regarded as one instance in time. For example, the resistivity of a system is expected to change slowly over a period of one day. A measurement cycle of 45 minutes would then result in a representative situation. If the duration of the cycle is in the same order as the expected change, the result would be somewhat smeared over time. One measurement cycle would in that case not be representative for the situation at one instance in time. During the field test, the period of pipe formation lasted more than a day, but periods of rapid growth can be as short as an hour. The measurement cycle duration should therefore also be short, relative to the speed of pipe formation, without missing relevant electrode combinations. The duration of the measurement cycle can be optimized. Not all combinations of electrodes are useful for the inversion. If the measuring array is optimized, it can be reduced from e.g. about 30000 combinations to 300 or less. This speeds up one cycle of measuring all electrode combinations defined in the measurement protocol. The cycles can be sped up even more if enough data is available over time, enabling the tailoring of the prediction algorithms. Further optimization might even reduce the measurement cycle to 2 to 3 minutes.

3.3.6 Overall QC data

The most important factor affecting data quality for ERT is the contact resistance: the contact between the sensor and the medium. In the soil, this can be a problem if the soil is dry. In saturated soil, however, the contact resistance is low. In that case, current injection is easy in the subsurface. During the field test, the soil was moist enough for good current injection and hence data quality was good.

3.3.7 Measuring array

The way the four measuring electrodes are used (A-B-M-N) is called an array. From all possible configurations, only a few are used in practise (like Wenner, Schlumberger, dipole-dipole, gradient...). The measuring protocol encompasses single cable measurements (i.e pins used only from each cable separately) using a multi-gradient protocol (see Figure 10). Additionally, to get a better 3D measuring scheme, we utilized pins from 2 cables (i.e some pins in cable 1, some pins in cable 2, Figure 10) using a bipole-bipole scheme. The measurements between cables are repeated in pairs, with the following scheme. Since the combination of all possible cables and all possible interline cables leads to a large number of measures, we choose to produce optimized protocols for cross-hole ERT measurements based on the Jacobian matrix method. Additionally, since the goal is to decrease the acquisition time to be able to capture time-related changes, we further optimized the protocol to utilize measures that make the best use of the 8-channel system, with emphasis on changes on the model (internal code, unpublished). We end up with a protocol with 6617 measures. With the MPT unit, we used a 6Hz pulse that takes a full round of measures at 45 minutes. At the end of each round of measuring, we added a 15-minute delay. Thus, we have one “new” dataset every hour. To minimize the effect of potential changes that might happen, within the acquisitions time, the order of measures is based on the location of each measure. i.e. we first finish all measurements that correspond to the spatial location between cables 1-2 before we move to the next plane. This way, if changes took place in the plane between 6-7 using that time, the effect will be minimal.

Table 2 Interline scheme used for 3D data cover

Cable utilized	Interline cable spacing
1-2	1
2-3	1
...	1
6-7	1
1-3	2
2-5	2
...	2
4-7	2
1-4	3
2-5	3
...	3
5-7	3
1-5	4
2-6	4
3-7	4
1-6	5
2-7	5
1-7	6

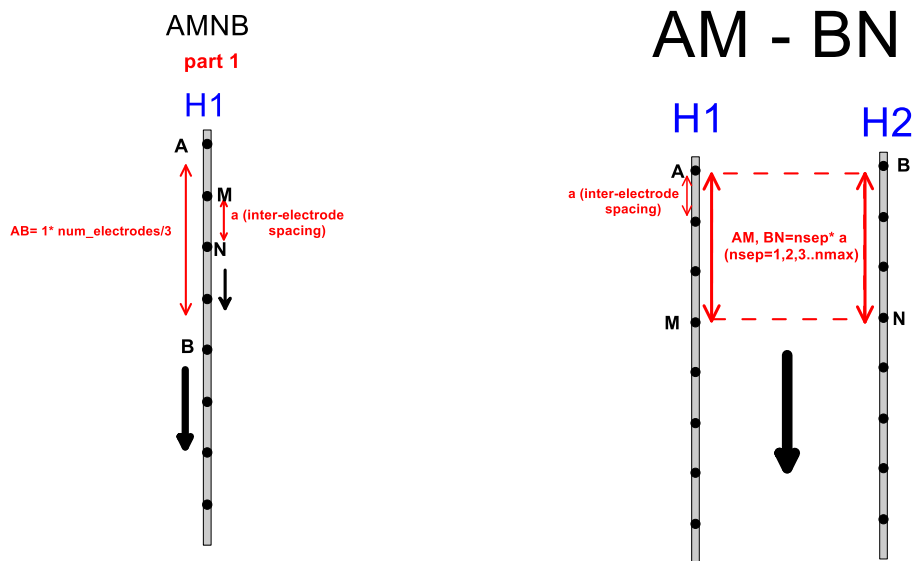


Figure 10 Left: Multi-Gradient single cable measurements. Right: Between cables measurements.

3.3.8 Pre-processing

The collected data from this experiment are potential differences between the transmitting and receiving electrodes, and depend upon the distribution of the subsurface resistivity, which is the material property we are interested in. Before starting with data processing, an evaluation of data quality was undertaken. At this stage, erroneous data, appearing as unreasonably high or low values, are filtered out. Erroneous data can be caused, for example, by electrical noise and improper electrode coupling to the ground. Filtering was performed on all lines to ensure optimal data quality. The number of removed data points for each line is shown in Table 2.

3.3.9 Inversion

Inversion aims to determine the subsurface resistivity configuration that gave rise to the measured data at the surface. It is a mathematical optimization procedure which uses the acquired data as input and the prior knowledge (for example the depth to certain layers) to constrain the produced models.

The subsurface below the lines is first meshed into a grid. Inversion processing starts with an initial estimate of the subsurface resistivity configuration based on prior information. A geometrical factor, accounting for the electrode's topography and relative location is applied. The algorithm then proceeds with a forward calculation on this model to predict the potential differences that would arise if a survey were carried out over it.

At this stage, the actual field data are brought in and the inversion algorithm calculates the misfit between the actual data and the initially predicted mode. Depending on the desired misfit between the model and the measurements, additional iterations of this process will be performed (i.e. new configurations generated and tested), until a suitable model (satisfying the misfit criteria and inversion iteration numbers) is reached. The mathematically acceptable model must then be assessed for its geological and geophysical plausibility.

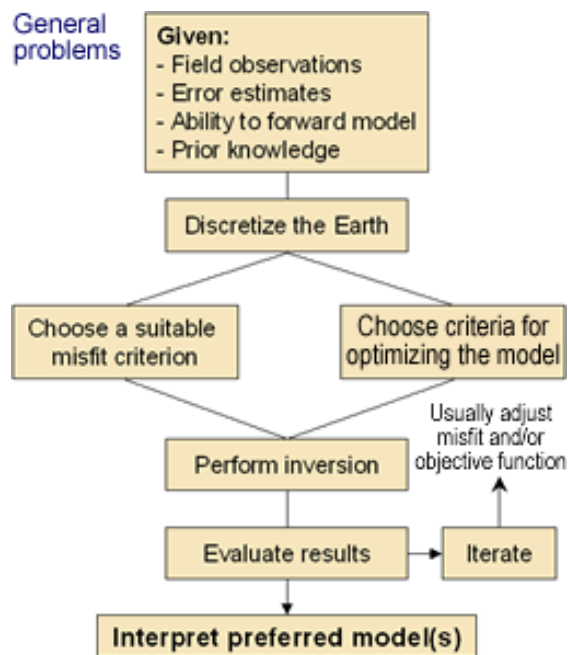


Figure 11 The data processing workflow

A geophysical inversion was then conducted using the pyGIMLI (Rucker et al., 2017) and Res2DINV (Locke, 2010) software packages to assess the impact of different inversion options (such as the application of smoothing to regulate the sharpness of transitions between different layers) and to identify common features from these results in order to confidently interpret them. After comparing the two sets of results, the pyGIMLI inversions were selected for interpretation due to their greater geological plausibility and lower misfit.

4 Results from site 1 (south side)

First, we present the results from the South side. The analysis of the results is based on the joint use of the piezometers and ERT inverted results (see Figure 12). The ERT inverted model covers part of the area where piezometers are installed. Figure 13 shows the time-series of the piezometers, over the same monitoring period as the ERT measurements.

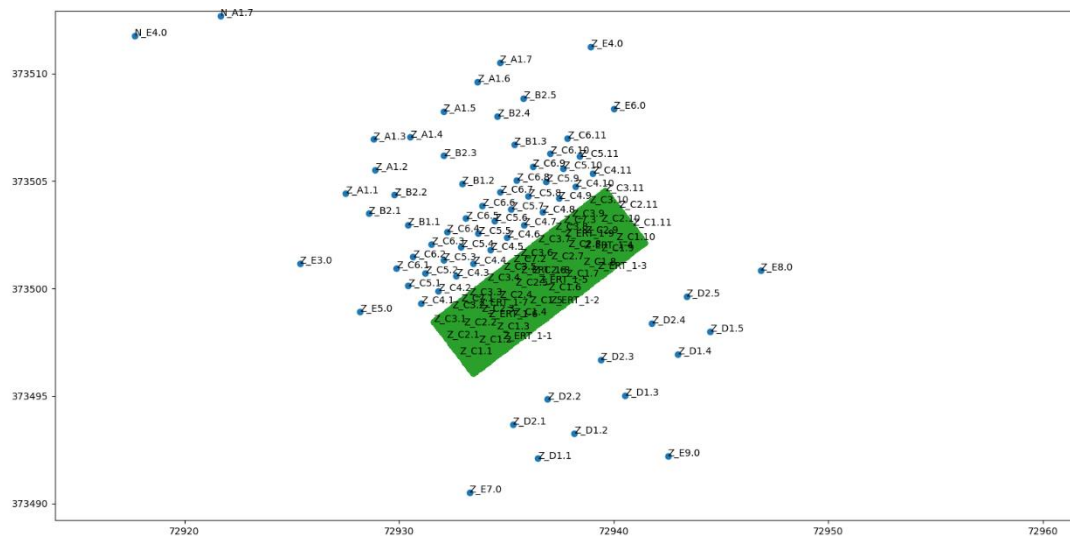


Figure 12 The location of the piezometers (blue dots) and ERT inverted model (green dots) used for this analysis

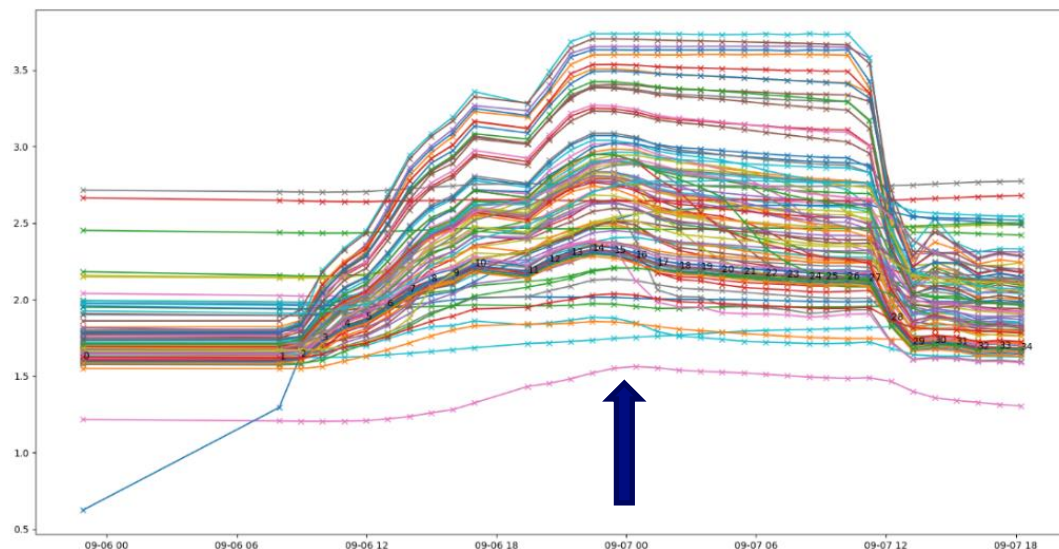


Figure 13 Piezometers measures over the ERT monitoring time. We observe a gradual increase on the water level (pressure), but some piezometers show a decrease just before 09-07 00 (piping, above the arrow). More information can be found in the main report.

All figures consist of two parts. Using all the piezometers measures (pressure) at each time step, we interpolate the data (Figure 14), presented as a surface. The volume below the surface presents the changes in resistivity (as percentage of change, unitless). The ERT inverted model is a 3D voxel model. Figure 14 is the basis for all further interpretation.

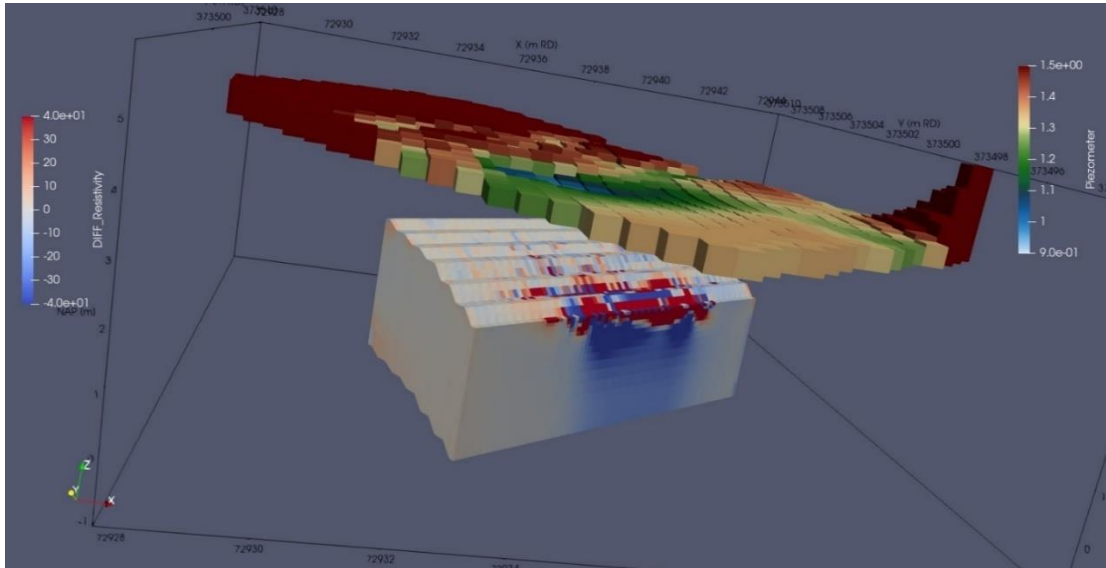


Figure 14 Top part shows the piezometer values as a surface after interpolation. Bottom part shows the changes in resistivity value, with respect to the start of the experiment.

We observe two main phenomena:

- 1) As the pressure on the infiltration tubes increased (Z_A1 row in Figure 12) we observe a decrease in resistivity on the southeast site. We present this on Figure 15, with an isovolume of all areas that show a decrease in resistivity (for various snapshots). Changes observed on the top layer are probably not part of the piping process (thus we neglect them) and are most likely the result of increasing water levels and related moisture content

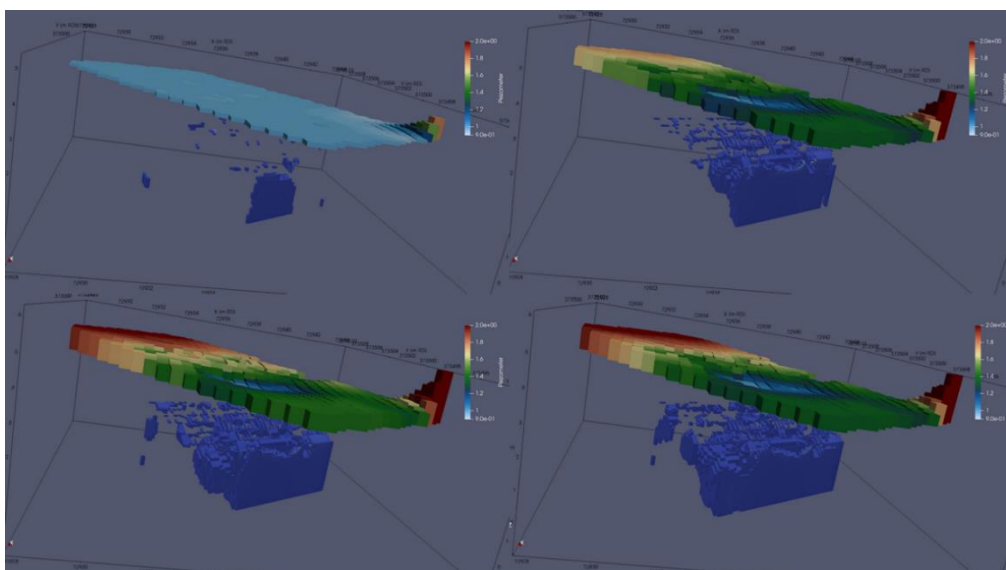


Figure 15 Increase of water level on the south (blue voxels) as pressure on the piezometers increases. From top left to bottom right the time stamp is 05-Sept 22:53, 06-Sept 11:58, 06-Sept 16:59, 07-Sept 02:26

- 2) We observe an increase in resistivity value (4% up to 20%, mean 6% change) in the area of the pipe. This is interpreted to be caused by complex and not well-understood interactions between cool stratified groundwater (fresh at top and brackish at bottom; warmer at top, colder at bottom) and warmer, fresh infiltration drinking water. In addition, the removal of fines from the sand surrounding the pipe could lead to more resistance, although this effect is thought to be less important than the changes in water quality. We believe that the diameter of the pipe is too small to be detected directly, so the decrease of resistivity expected at the pipe itself, is masked by the effects mentioned above. See the discussion section for more thoughts on the processes that could have taken place.
- a. The moment that the ERT-data shows signs of pipe formation is earlier than in the piezometer data. ERT detects the piping process at 6-Sept-14:59, while the piezometers show a strong decrease in the pressure value at 6-Sept 23:26. This is to be expected since as mentioned, the piezometer will “sense” the piping when it reaches the piezometer itself, while ERT-data comes from a wider and deeper zone. The moment of detection of pipe formation fits well with the occurrence of sand boils in the ditch.

Figure 16 shows in the bottom part in binary (blue-red) the areas where the piezometers show a decrease in pressure (i.e. piping). The ERT inverted model is presented as the volume of areas (red voxels) with increased resistivity (4% to 20%). Both data show the same location for pipe formation.

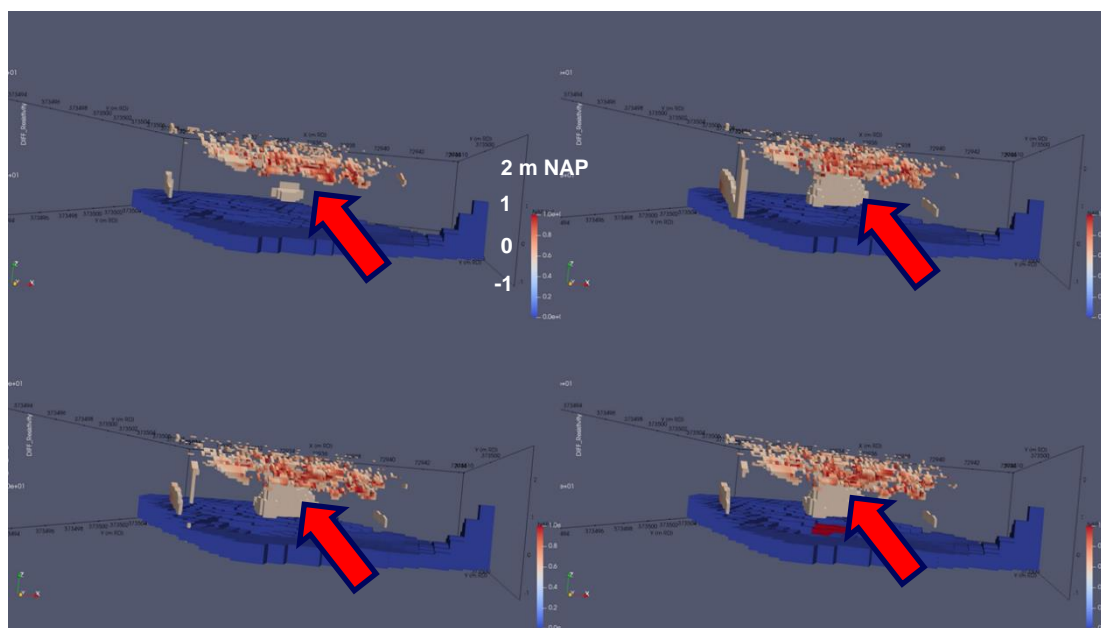


Figure 16 Pipe growth as measured by increase in ERT. From top left to bottom right: 06-Sept-14:59, 6-Sept16:59, 06-Sep 21:26, 06-Sept-23:26

4.1 Time series analysis

To understand the dynamics of the area (i.e the rate the resistivity values change over time), we use the Dynamic Time Warp analysis. In time series analysis, dynamic time warping (DTW) is an algorithm for measuring similarities between two temporal sequences, which may vary in speed. For instance, similarities in resistivities could be detected using DTW, even if one area is changing faster than the other, or if there were increases and decreases during the course of an observation. In this way, we can see how each cell of the inverted model is changing and where the piping occurs. Figure 17 shows the results from the DTW analysis. The way to interpret those results is as follows;

The inverted model is discretized in 28800 cells (80x24x15). Each cell has an XYZ coordinate and is scanned for changes that hint at piping. During the experiment, the cells show different behaviour. Some cells:

- 1) Show a decrease in resistivity (due to rising water tables, wet soil is more conductible than dry soil; cluster 2 and cluster 3).
- 2) Some cells will show an increase in resistivity (pipe formation, sand boil; cluster 4)
- 3) Some cells show no or very small changes, located in the same area where several piezometers didn't record any change in pressure (cluster 1).

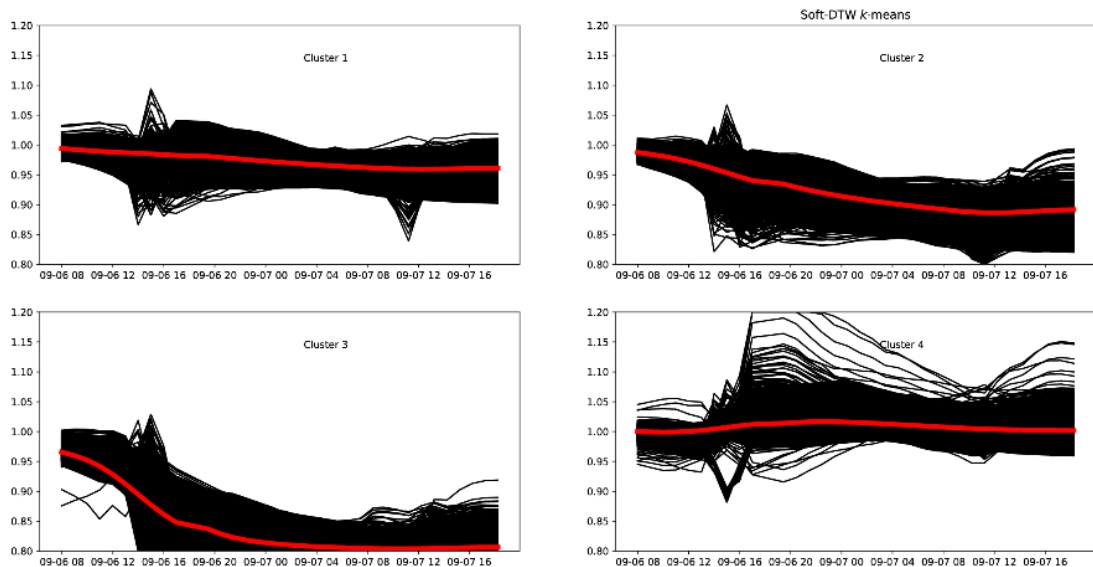


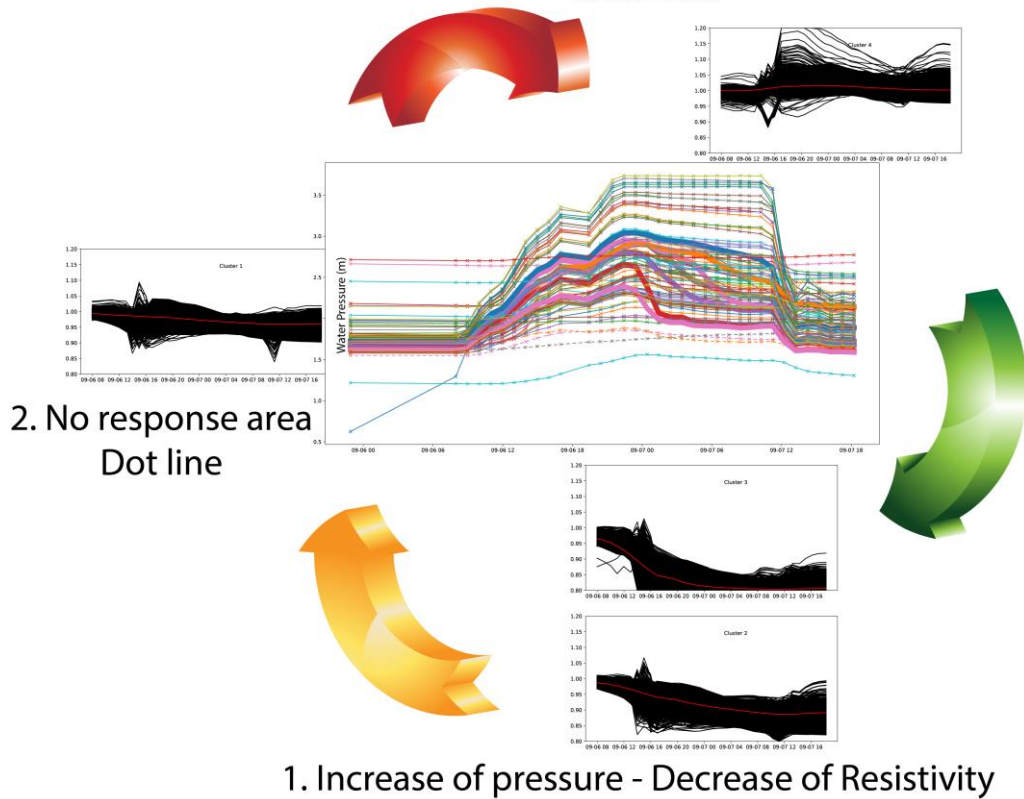
Figure 17 DTW analysis of the resistivity changes of each cell. We observe 4 clusters. Areas (cells) that show no or small changes over time (cluster 1), areas with slow and rapid changes (clusters 2 and 3), and an area where we see an increase in resistivity (cluster 4). Cluster 4 shows where the piping process occurs. Black lines show all data from the 28800 cells, the red line the average cluster. Y-axis shows the ratio of change over time.

In other words, by observing the behavior of the resistivity values over time, we can detect both the location and the time that this occurred. The actual shape of each cluster is expected to be site-specific, thus this cannot be generalized. What is important to notice, is that by analyzing the time series, one can see the pipe-formation developing and start predicting when this will take place. For using ERT-data as a predictive tool, it will be first necessary to repeat this type of research at other locations, to better understand how the resistivity changes in the different cluster during the process that eventually leads to piping. Below the process of identifying pipe formation using ERT and piezometer data combined is schematized (Figure 18).

Figure 19 shows the clustering from the ERT together with the drop of pressure from the piezometers. We observe that the piping from both ERT and piezometer is shown in the same location.

Piping Mechanism

3. Piping starts - Decrease in pressure - Increase in resistivity
Bold Line



1. Increase of pressure - Decrease of Resistivity

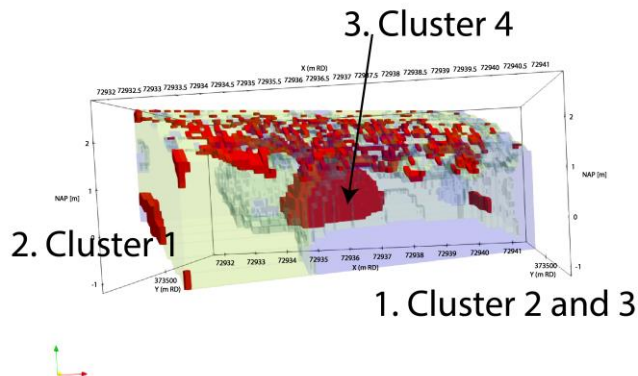


Figure 18 The piping mechanism as identified from the ERT clustering. We observe 1) areas (clusters 2 and 3) with a decrease in resistivity (increase water level and pressure), 2) areas where we do not observe changes in resistivity (cluster 1) and finally 3) the area of the piping (cluster 4) where we observe an increase in resistivity. The clustering is based on the DTW algorithms and it's presented as line plots on the top figure. The volume below shows the

results from the clustering: green is cluster 1, blue is clusters 2 and 3 and piping is cluster 4. This figure shows the location where each cluster takes place. Note that this pattern is most likely site-specific.

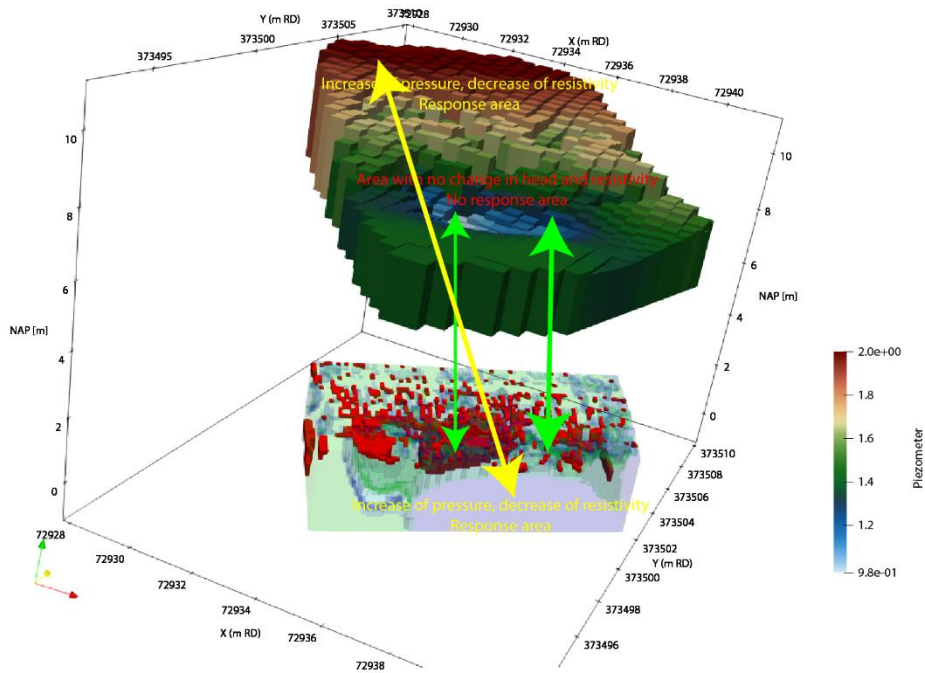


Figure 19 The spatial distribution of the clustering mechanism. The area where ERT shows pipe formation (bottom figure), is the area where the piezometers showed the largest drop in pressure (top figure). Overall, we observe that as the pressure in the infiltration tubes is increased, the resistivity in the lower-outer part is decreased, due to the increase of the water level.

5 Results from Site 2 (north side).

The analysis of the results is based on the joint use of the piezometers and ERT inverted results (see Figure 20).

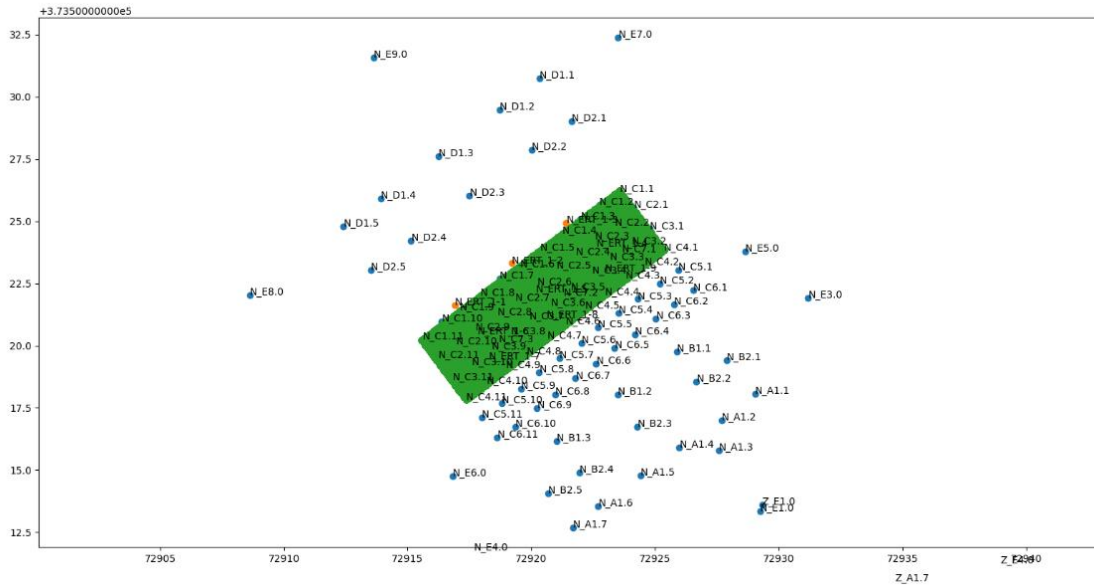


Figure 20 The location of the piezometers (blue dots) and ERT inverted model (green dots) used for this analysis

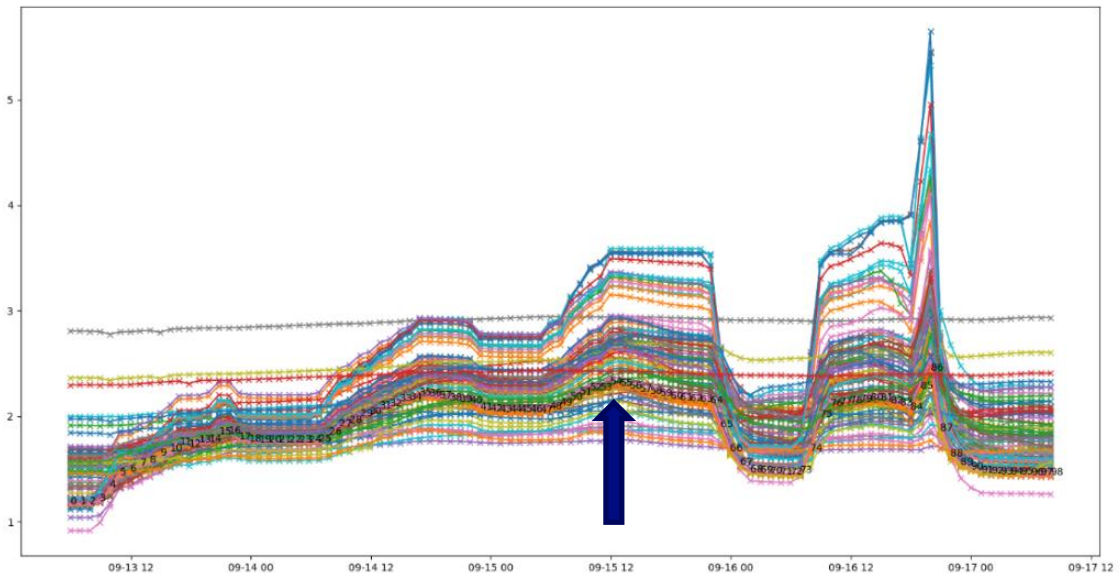


Figure 21 Piezometers measures over the ERT monitoring time. We observe a gradual increase on the water level (pressure), but some piezometers show a decrease after 09-15 12 (piping, arrow). More information can be found in the main report.

We observe two main phenomena:

- 1) As the pressure on the infiltration tubes increased (N_A1 row, Figure 20) we observe a decrease in resistivity in the northwest site. We present this in Figure 22, with an

isovolume of all areas that show a decrease in resistivity (for various snapshots). Changes observed in the top layer are probably not part of the piping process (thus we neglect them) and are most likely the result of increasing water levels and hence moisture content.

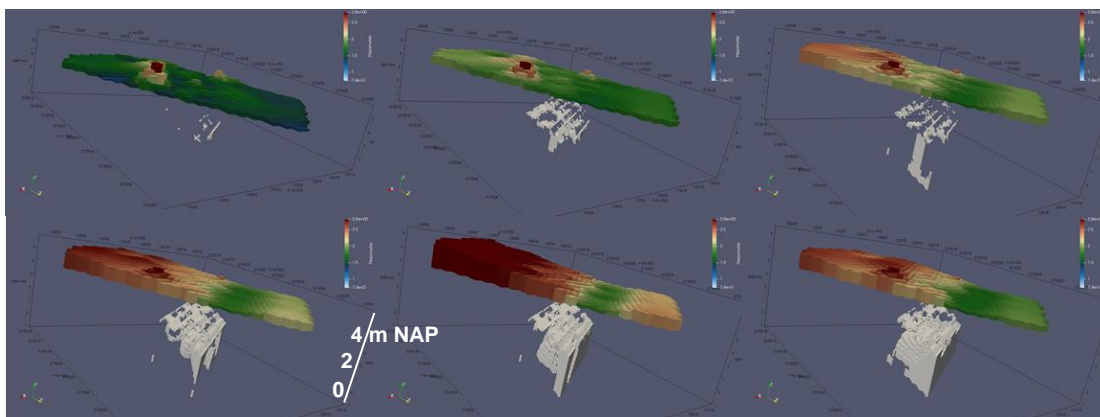


Figure 22 Increase of water level in the south (blue voxels) as pressure on the piezometers increases. From top left to bottom right the time stamp is 05-Sept 22:53, 06-Sept 11:58, 06-Sept 16:59, 07-Sept 02:26

- 2) Figure 23 shows a selected time series for the monitoring period. We observe that while the whole northern section becomes less resistive (due to increased water levels), there is a small section about 1/3 of the length (x-direction) that shows a tiny decrease or remains the same (values from -1 to + 1 %). This area doesn't show significant changes over the period until pipe formation shows up in the piezometers. When piping starts, we observe a small increase in resistivity (smaller change than at South site). We attribute this to the fact that the infiltration of water started much longer before piping started than in the north side, so probably the overall groundwater characteristics (temperature, salinity) were already more mixed.

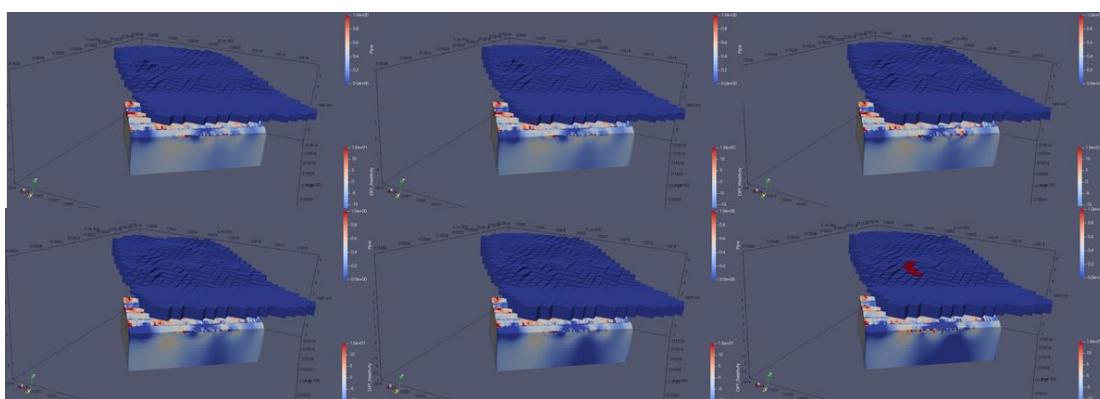


Figure 23 Pipe growth as measured by increase in ERT. From top left to bottom right: 15-Sept-02:54, 15-Sept 04:54, 15-Sept 06:55, 15-Sept-08:55, 15-Sept-10:55, 15-Sept – 12:55

5.1 Time series analysis

To understand the dynamics of the area (i.e the rate the resistivity values change over time), we use the Dynamic Time Warp analysis. Figure 17 shows the results from the DTW analysis. The way to interpret those results is the following;

The inverted model is discretized in 28800 cells (80x24x15). Each cell has an XYZ coordinate and is scanned for changes that hint at piping. During the experiment, the cells show different behaviour. Some cells:

- 1) Show a slow decrease in resistivity (due to rising water tables, cluster 3 and cluster 4), similar to site 1
- 2) Area with a fast decrease in resistivity (cluster 1), similar to site 1.
- 3) Some cells will show a short period of increase in resistivity (cluster 2)
- 4) We do not observe areas with no response. This is in accordance also with the piezometers, that do not show areas where pressure did not increase.

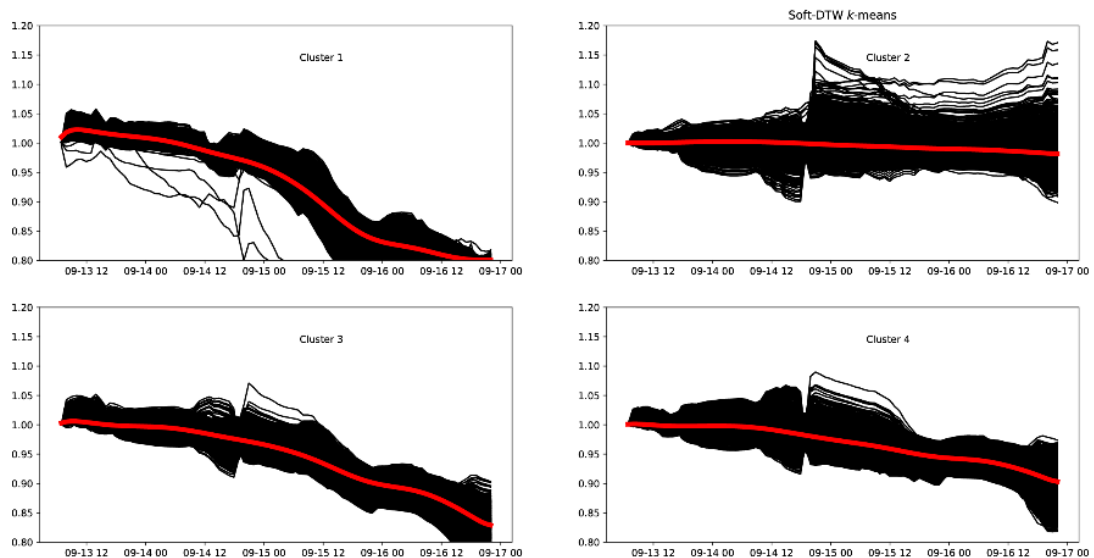


Figure 24 DTW analysis of the resistivity changes of each cell. We observe 4 clusters. Areas with slow and rapid changes (cluster 1 and clusters 3 and 4) and an area where we see an increase in resistivity (cluster 2). Cluster 2 shows where the piping is located. Black lines show all data from the 28800 cells, the red line the average cluster. Y-axis shows the ratio of change over time.

Figure 25 shows the clustering from the ERT together with the drop of pressure from the piezometers. We observe that the piping from both ERT and piezometer is shown in the same location.

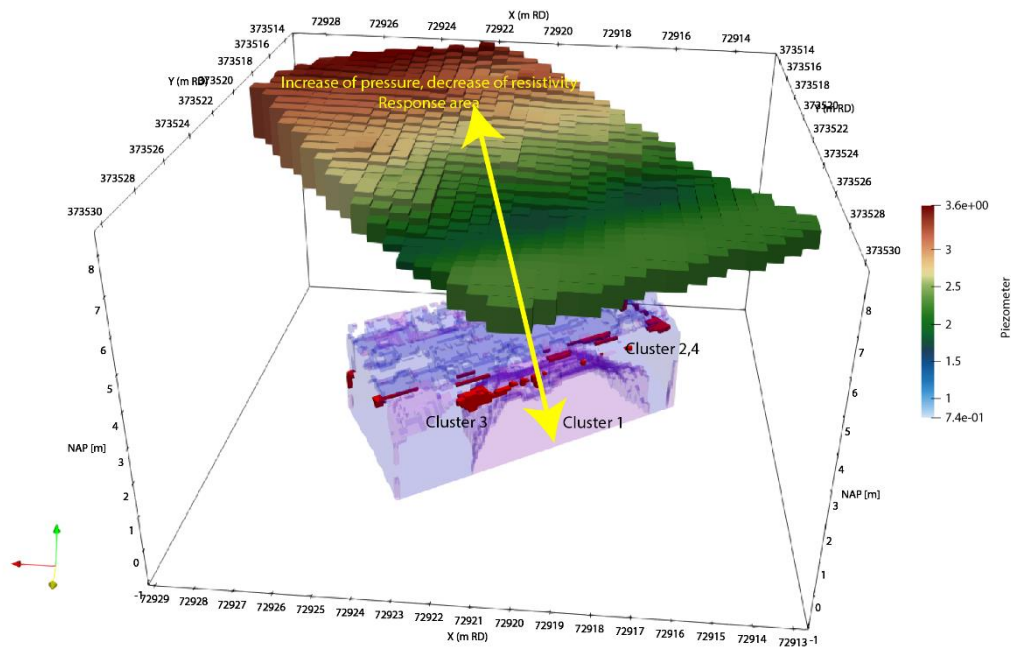


Figure 25 The spatial distribution of the clustering mechanism. The area where ERT shows the piping (bottom figure), is the area where the piezometers showed the largest drop in pressure (top figure). Overall we observe that as the pressure in the infiltration tubes is increased, the resistivity in the lower-outer part is decreased, due to the increase of the water level.

6 Discussion and conclusion

The objective of this study was to test whether the application of time-lapse ERT (Electrical Resistivity Tomography) can be used to detect pipe formation under a levee. The analysis shows that ERT can capture pipe formation and since it images volumes, it senses pipe formation before piezometers do. In this study, ERT detects changes soon after the first sand boils become active, while the first signs of pipe formation in the piezometers follow hours later. The piezometers sense pipe formation only when the pipe is relatively nearby, order of decimeters, while the ERT-system gives 3D-results across an area of 10 m. If more piezometers would have been placed, also at the level of pipe formation, this time delay would have been smaller or absent.

Beforehand it was expected that the exact location of the pipe could not be detected with ERT, since the pipe is small in comparison the voxel size in the ERT-model. Still, we expected an overall decrease in resistivity in the area of pipe formation, because sand is being replaced by water. The analysis, however, shows that in the area of pipe formation resistivities increase. We attribute this to complex interplays between the fresh and relatively warm infiltration water and the colder and fresh (top) to increasingly brackish groundwater (bottom). In addition, washing out of the fines in the sand surrounding the pipe could play a role in the seen effect of increased resistivities, although we think that this effect is relatively small. Since resistivities increase at the location of the sand boil and the pipe, this means that either the temperature or the salinity drops, or both. A drop in salinity seems to make sense, since the infiltrated water is fresher than the groundwater. But since the permeability of the subsurface is in the order of 1-1.5 m/day, the infiltrated water cannot have reached the sand boil at the time the ERT-data measures increased resistivity. More likely is that the upward groundwater flow near the sand boil and pipe brings deeper and colder water closer to the surface, resulting in increased resistivities. But in the absence of direct measurements of temperature and salinity close to the sand boil this remains speculative.

At the south side, the increase in resistivities was higher than at the north side. We attribute this to the longer period of infiltration of water before the piping started, and hence the groundwater was better mixed and resembling the infiltration water more. During real high-water situations this should be further investigated, to see whether the infiltration of water gives similar signals or not. This largely depends on the difference in salinity and temperature between the river/estuarine water and the groundwater, and perhaps on the fines content of the sand.

It is also important to notice, that during real high-water situations, we wouldn't expect so sudden/big changes in the water pressure and thus the overall decrease in resistivity (i.e. change in the water level) would not be so strong. During the tests in the Hedwigepolder this overall decrease was large, making it perhaps harder to detect smaller changes caused by pipe formation than during real high-waters.

Overall, it can be concluded that ERT can be used to indicate the area where pipe formation occurs. The following mechanism has been observed:

- 1) First an area that is associated with a decrease of resistivity is visible near the area where pipe formation will start. This is related to increasing water levels.
- 2) Where pipe formation starts, an increase in resistivity is visible, most likely due to complex groundwater flows and perhaps upwelling of colder water.
- 3) There are areas of the model that show a small decrease (site 2) or no change (site 1) in resistivity. These areas are mostly located in the "upper" site and in contact with the area with a high decrease in resistivity.

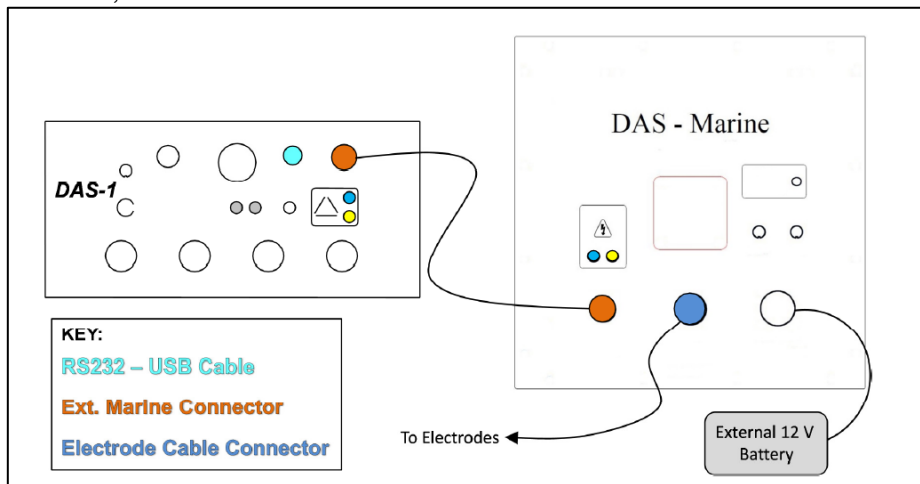
7 Recommendations

As mentioned in the conclusions section, we are not certain if the ERT-signal in real scenario's would be similar to the one observed in the Hedwigepolder. If colder groundwater wells up during a real scenario, this could potentially lead to a similar signal, but this depends on the specific groundwater characteristics. A similar setup in a real field case scenario, would help to further understand this process. This understanding is needed to further explore the potential usage of ERT as an early warning system for pipe formation.

Appendix 1 Equipment



Main unit, MPT DAS-1



Scheme of panel layout

Application of time-lapse ERT (Electrical Resistivity Tomography) to detect the growth of piping under a levee.

Appendix 2 – Information about the measuring system

DAS-1 UNIT

Input Gain Ranging Automatic; .08, .4, 2, 10 V

Maximum Output Current 2.5 Amps

Maximum Output Voltage 475 Volts 950 V peak to peak

Maximum Output Power 250 Watts

Power Supply 12 V

Input Impedance ~109 Ohm

Electrodes Simple Metal Electrodes

Input (Receiver) Voltage Range +/- 10 V, 1000 V Common Mode

Analogue to Digital Conversion 24 Bit Rated A to D

Measurement Precision 0.05% Typical

IP Measurement User Selectable 35 Custom Windows

Power-Line Rejection 60 Hz / 50 Hz

SP Compensation Proprietary High-Order Polynomial

Waveform Square: On+, Off, On-, Off (Time Domain) or On+, On-
(Frequency Domain)

Operation Frequency Programmable From 1/64 Hz to 13.5 Hz

Signal Processing Continuous Stacking Over Integration Window

Stacking Maximum Stacks 256

Noise Reporting As Standard Deviation

Noise Rejection Proprietary Rejection of Electrode Noise

Multi-Channel 8 Independent Receiver Channels

Memory & Data Storage MicroSD Card

Data Transmission RS-232C or USB or Direct Read of MicroSD Card

User Controls Laptop Computer Software Interface

Receiver Weight Approximately 19 kg (Multiplexer = 12 kg)

Dimensions 47 cm X 36 cm X 31 cm

8 References

Hermans T, Wildemeersch S., Jamin P. , Orban P., Brouyère S. , Dassargues A., Nguyen F., Quantitative temperature monitoring of a heat tracing experiment using cross-borehole ERT, *Geothermics*, Volume 53, 2015, Pages 14-26, ISSN 0375-6505, <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.03.013>.

De Louw, P. G., Van Der Velde, Y., & Van der Zee, S. E. A. T. M., 2011a. Quantifying water and salt fluxes in a lowland polder catchment dominated by boil seepage: a probabilistic end-member mixing approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(7), 2101-2117.

De Louw, P. G., Eeman, S., Siemon, B., Voortman, B. R., Gunnink, J., Van Baaren, E. S., & Oude Essink, G. H. P., 2011b. Shallow rainwater lenses in deltaic areas with saline seepage. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(12), 3659-3678.

Fofonoff, N. P., & Millard Jr, R. C., 1983. Algorithms for the computation of fundamental properties of seawater.

Karaoulis, M. and Bakx, W. and Doornenbal, P. and Kruiver, P. and Rijpkema, S.. Visualising Groundwater Flow Using Time-Lapse Electrical Resistivity Tomography", 2019,1,1-5,doi.org/10.3997/2214-4609.201902439".

Karaoulis, M., J.-H. Kim, and P.I. Tsourlos, 2011, 4D Active Time Constrained inversion: *Journal of Applied Geophysics*, 73, no. 1, 25-34.

Karaoulis M., A. Revil, P. Tsourlos, D.D. Werkema, B.J. Minsley, IP4DI: A software for time-lapse 2D/3D DC-resistivity and induced polarization tomography, *Computers & Geosciences*, Volume 54, 2013, Pages 164-170, ISSN 0098-3004, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.01.008>.

Loke M. H. , "Res2Dinv ver. 3.59 for Windows XP/Vista/7, 2010. Rapid 2-D Resistivity & IP Inversion Using the Least-Squares Method. Geoelectrical Imaging 2D & 3D Geotomo Software," 2010.

Revil, A., M. Karaoulis, T. Johnson and A. Kemna (2011). "Review: Some Low-Frequency Electrical Methods for Subsurface Characterization and Monitoring in Hydrogeology." *Hydrogeology Journal* 20(4): 617-658.

Rücker, C., Günther, T., Wagner, F.M., 2017. pyGIMLi: An open-source library for modelling and inversion in geophysics, *Computers and Geosciences*, 109, 106-123, doi: 10.1016/j.cageo.2017.07.011.

Deltares is an independent institute for applied research in the field of water and subsurface. Throughout the world, we work on smart solutions for people, environment and society.

Deltares

www.deltares.nl

Appendix E

Achtergrondrapportage AH-DTS
metingen



HEDWIGE-PROSPERPOLDER

ANALYSE-RAPPORT TEMPERATUURMETINGEN

Dossier	Deelrapport	Revisie
GEO-18/112 (MOW) 11204565 (Deltares)	001	RevB



Rev	Datum	Omschrijving wijzigingen	Opgemaakt	Goedgekeurd
0	10/03/2022	Eerste versie	Eva Goeminne – Griet De Backer (MOW)	Leen De Vos (MOW)
A	01-07/2022	Definitieve conceptversie	Pieter Doornenbal (Deltares)	Marc Hijma (Deltares)
B	10-08/2022	Definitieve versie	Pieter Doornenbal (Deltares)	Marc Hijma (Deltares)
C				
D				



 	Analyse-rapport Temperatuurmetingen	A-GEO-PP03-3.1 versie 05
	GEO-18/112-001-revA Deltaresproject 11204565	Pagina 2 van 49

INHOUD

1	Inleiding.....	3
2	DOEL.....	3
3	Proefopstelling en Plaatsing.....	3
4	Methode.....	6
4.1	Temperatuur als proxy voor het detecteren van piping	6
4.2	temperatuurmetingen met Distributed temperature Sensing	8
4.2.1	Variatie temperatuur ten opzichte van absolute temperatuur	8
4.2.2	Absolute temperatuurwaarden	10
4.2.3	Passieve methode - Vergelijking niet-gekalibreerde meetwaarden met gekalibreerde sensor PT-100	12
4.2.4	Fluctuatie buitentemperatuur	13
4.3	Data set gebruikt voor AH-DTS analyse	13
5	Data-analyse.....	14
5.1	ah-dts om piping te detecteren	14
5.1.1	Opsplitsen van twee subsets	14
5.1.2	Toepassen van een maximum temperatuur zoek algoritme	14
5.1.3	Extraheren van de afkoelcurves	16
5.1.4	Normaliseren van de afkoelcurve	16
5.1.5	Berekenen van de helling van de afkoelcurves	17
5.2	analyse van de aH-DTS data	19
5.2.1	Afkoelcurves	19
5.2.2	Analyse van de maximale temperaturen	20
5.3	Vergelijking meettechniek	23
5.3.1	Invloed sondeerbuis	23
5.3.2	Invloed gebruik van grout rond de glasvezelkabel	28
5.3.3	Invloed pipe - detecteerbaar achter de sloot	29
6	Conclusie.....	35
7	Bijlage opwarm cycli per locatie	37
8	Bijlage B Afkoelcurves voor en tijdens de proeven.....	40

 	Analyse-rapport Temperatuurmetingen	A-GEO-PP03-3.1 versie 05
	GEO-18/112-001-revA Deltaresproject 11204565	Pagina 3 van 49

1 INLEIDING

Bij de pipingproeven in de Hedwigepolder wordt pipegroei gemeten met drie complementaire monitoringssystemen: waterspanningsmeters, ERT en temperatuur met glasvezel. Dit rapport toont de resultaten van de temperatuurmetingen met de Distributed Temperature Sensing techniek (DTS) waarbij de glasvezel de sensor is (zie paragraaf 4.1 voor een verdere uitleg van de techniek). De temperatuurmetingen bestaan uit passieve temperatuurmetingen en de actieve hitte puls temperatuurmetingen (AH-DTS). De passieve temperatuurmetingen zijn uitgevoerd en verwerkt door het Departement Mobiliteit en Openbare Werken (Vlaanderen, België) en de AH-DTS zijn uitgevoerd en verwerkt door Deltares (Nederland).

Het rapport is opgebouwd door eerst het doel van de pipingproef en de doelen van de temperatuurmetingen te presenteren. Dit wordt gevolgd door hoofdstuk 3, de proefopstelling, de meetinstrumentatie, de plaatsing en de meetgegevens. Hoofdstuk 4 presenteert de data analyse.

2 DOEL

De overkoepelende doelen van het onderzoek naar piping in getijdenzand zijn: de daadwerkelijke sterkte van getijdenzand tegen piping te bepalen, de (sterkte)-eigenschappen en het pipingproces te karakteriseren en deze kennis te vertalen en toepasbaar te maken voor beoordelings- en versterkingsprojecten van waterkeringen.

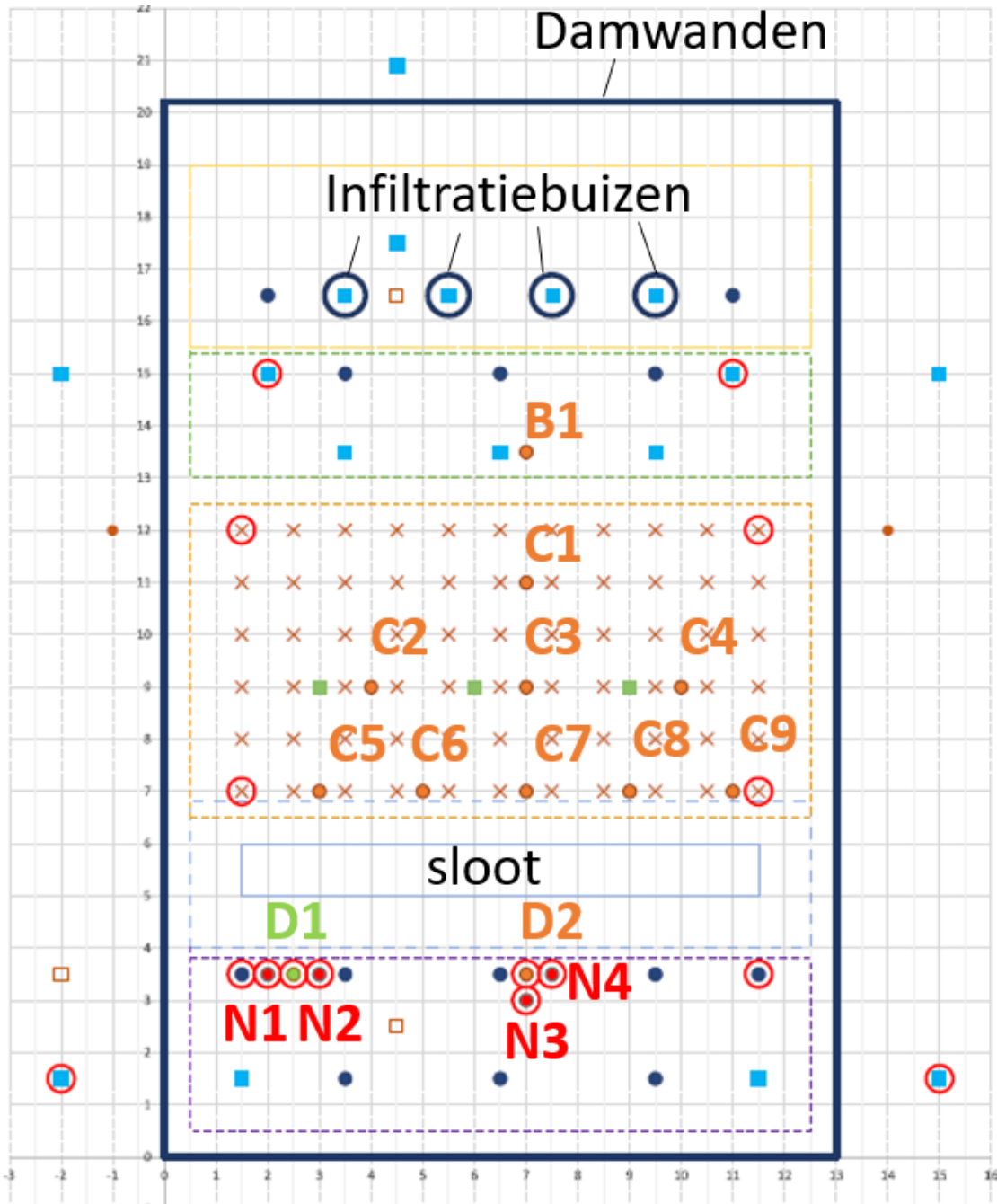
De specifieke doelen van de temperatuurmetingen zijn:

- Kan piping gedetecteerd worden door temperatuurmetingen uit te voeren en tot op welke afstand van de metingen is piping detecteerbaar? (meting Deltares)
- Hoe evolueert de temperatuurmeting in functie van de ontwikkeling van de pipe? (meting Deltares)
- Vergelijking meettechniek afd. Geotechniek (glasvezel in holle sondeerbuizen) en Deltares/Fugro (glasvezelkabel rechtstreeks in contact met de grond of met grout).
- Vergelijking meettechniek met aanbrengen afdichtende grout langsheen verloren glasvezelkabel en niet afdichten over de zandlaag (laten toevallen zandlaag) langsheen verloren glasvezelkabel (meting Deltares).

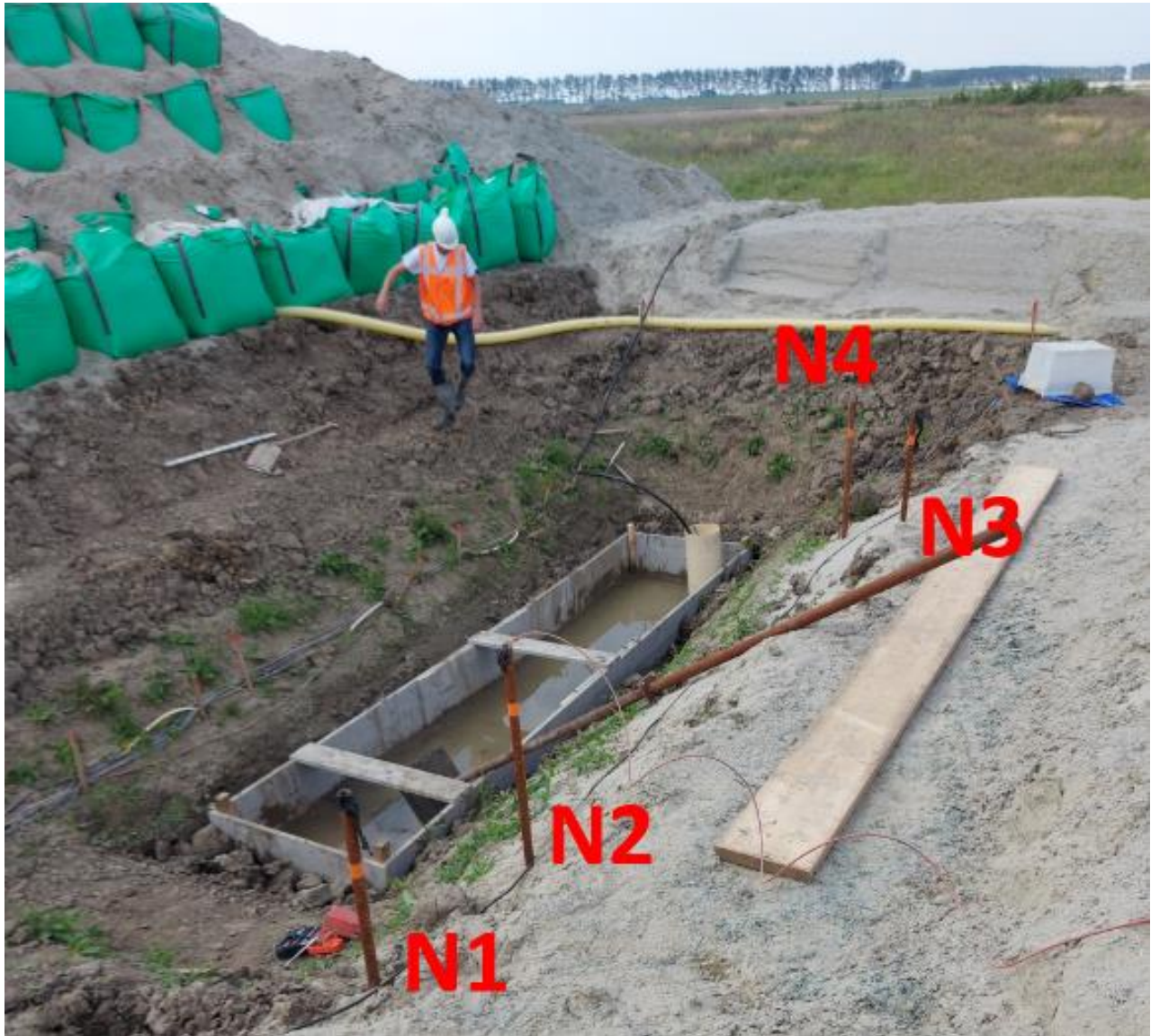
3 PROEFOPSTELLING EN PLAATSING

In proefvak Noord zijn door Fugro en Deltares op 12 locaties AH-DTS glasvezelkabels geplaatst om de temperatuur te meten. De AH-DTS kabels B1, C1 t/m C9 en D1 zijn tot -2,8 m NAP geïnstalleerd. De AH-DTS kabel D2 is geplaatst tot een diepte van -7,8 m NAP. De AH-DTS glasvezelkabel zijn gesondeerd met een verloren punt. Daarnaast zijn er ook nog 4 sondeerstangen geplaatst (N1 t/m N4) om de passieve temperatuurmetingen met een glasvezelkabel in uit te voeren. De volledige benaming van deze meetlocaties is NDT1-4, maar worden in **Error! Reference source not found.** en Figuur 2 afgekort tot N1 t.e.m. N4. In de verdere tekst wordt telkens gesproken over NDT1-NDT2-NDT3 en NDT4. Deze meetlocaties bevinden zich achter de sloot waarin de piping geïnitieerd wordt. Een overzicht van de proefopstelling met glasvezelmeetpunten voor DTS is weergegeven in Figuur 1.



Voor informatie betreffende de proefopstelling, de meetinstrumentatie, de plaatsing (incl. vastgestelde anomalieën), en de meetgegevens wordt verwezen naar het Factual Report (Fugro project 1220-164143.R04 / Deltares project 11204565 / / MOW project GEO-18/112).



Figuur 1 – Grondplan overzicht monitoring – noordelijk vak. De AH-DTS locaties B1, C1 t/m C9 en D1 en D2. N1 t/m N4 om de passieve temperatuurmetingen in een sondeerstang uit te voeren.



Figuur 2 – Sondeerstangen N1 t/m N4

 	Analyse-rapport Temperatuurmetingen	A-GEO-PP03-3.1 versie 05
	GEO-18/112-001-revA Deltaresproject 11204565	Pagina 6 van 49

4 METHODE

In dit hoofdstuk wordt de methode gepresenteerd om piping te kunnen detecteren. Er wordt eerst een achtergrond gepresenteerd om temperatuur te kunnen gebruiken voor het detecteren van piping (paragraaf 4.1). Vervolgens wordt gepresenteerd hoe temperatuurmetingen worden verricht met de DTS-techniek (paragraaf 4.2). Paragraaf 4.3 presenteert de dataset die gemaakt is voor de AH-DTS analyse.

4.1 TEMPERATUUR ALS PROXY VOOR HET DETECTEREN VAN PIPING

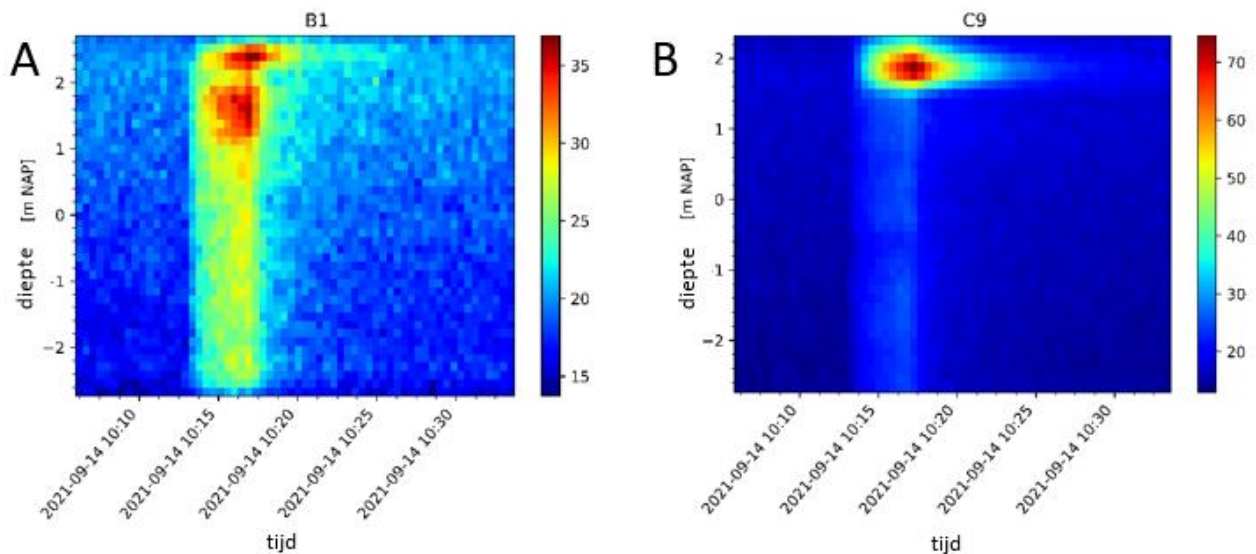
Temperatuur kan gebruikt worden als proxy voor grondwaterstroming. Er wordt dan gebruik gemaakt van het creëren van een temperatuursprong (opwarming) en het volgen van de temperatuurontwikkeling in de tijd. Op de locatie waar er een sterkere grondwaterstroming is wordt verondersteld dat er een lagere temperatuurontwikkeling is dan op locaties waar een zwakkere grondwaterstroming is, en ook dat na opwarming de kabel weer sneller afkoelt. Op de locaties waar een pipe ontstaat, wordt ervan uitgegaan dat de toegevoerde energie wordt meegenomen door de grondwaterstroming in de pipe waardoor er op de locatie van de temperatuurmetingen een lagere temperatuur gemeten wordt dan op locaties waar geen pipe aanwezig is. In een lab opstelling zijn verschillende grondwaterstroomsnelheden opgezet en zijn temperatuurmetingen verricht. Hieruit is een formule ontwikkeld voor een bepaalde periode en een constante verwarming. De ΔT wordt uit de data gehaald en benaderd door het fitten van een evenwichtstemperatuur van opwarm- en afkoelcurves. Vervolgens is een analytische oplossing van de warmtevergelijking toegepast om expliciet de grondwaterstroming te bepalen voor de lab setup (Bakx et al, 2019).

$$u = \left(\frac{p}{\frac{\Delta T \cdot 2\pi}{Q} + \left(\frac{1}{k_{tot}} \ln\left(\frac{r_{tot}}{r_{h1}}\right)\right)} \right)^{1/m}$$

Waarbij p en m constanten zijn die worden bepaald uit de experimentele data van de setup, k_{tot} is de gecombineerde thermische conductiviteit berekend (harmonic mean) voor materiaal, Q de warmte-input, r_{h1} de radius van het opwarmgedeelte van de kabel en r_{tot} de som van alle stralen van opwarm kabel, de afstand door het sediment en de straal van de glasvezel om de temperatuurverandering te meten.

In dit onderzoek is de kennis toegepast die is opgedaan in een eerder onderzoek van AH-DTS metingen voor grondwaterstromingen in een labsetting. Door de kortere lengtes van de opwarmdraden zijn de weerstanden lager waardoor de toegevoerde energie zou zorgen voor een te hoge temperatuur. Om vergelijkbare temperatuursprongen te krijgen met de referentie vanuit de lab setup is er in het veld gekozen om de opwarmdraden van de locaties aan elkaar te verbinden om zo de totale weerstand te vergroten en de temperatuursprong vergelijkbaar te krijgen als die met de labopstelling (Bakx et al 2019).

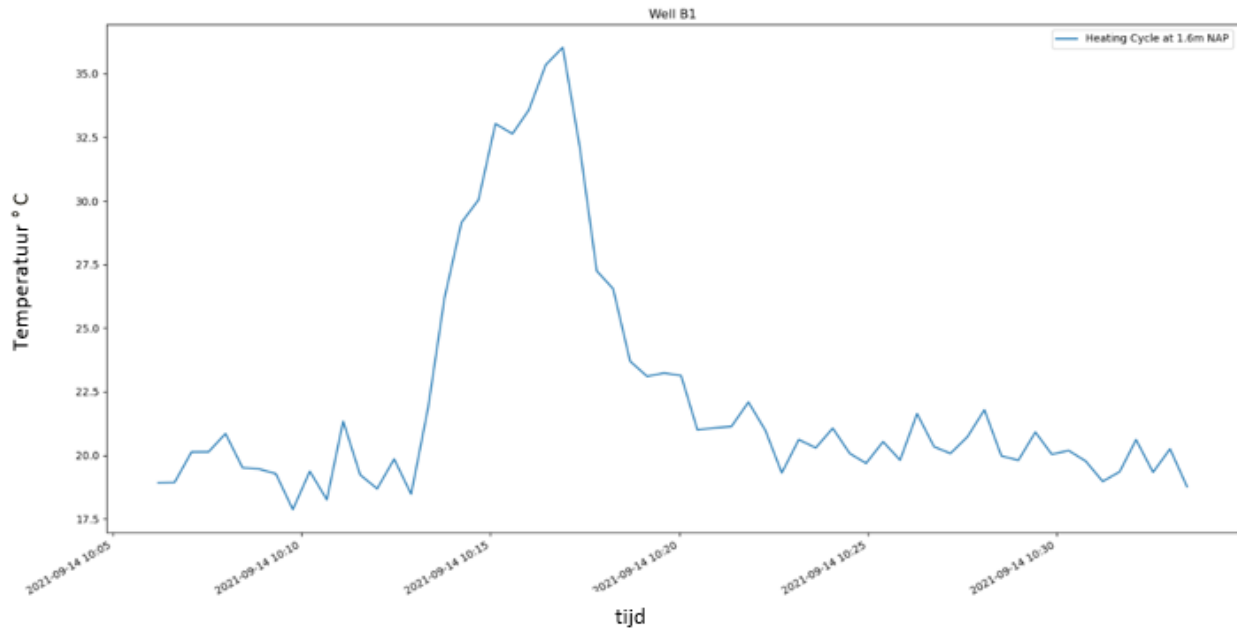
Tijdens de installatie zijn er op een aantal locaties opwarmdraden beschadigd geraakt waardoor de optimale data-acquisitie niet behaald kon worden. Daarnaast is gebleken dat tijdens de testen er grote temperatuurverschillen ontstaan tijdens een opwarmcyclus (Figuur 3a en b) tussen de verschillende punten. Het grote verschil zou kunnen ontstaan door het verschil tussen vochtgehalte tussen de punten, het vochtgehalte dat verschilt in de diepte als ook het verschil in toegevoerde energie door een verschil in opwarm lengtes.



Figuur 3 A) Temperatuur ontwikkeling tijdens een opwarmcyclus bij locatie B1 en B) temperatuur ontwikkeling bij de locatie C9. Duidelijk te zien is het verschil in maximale temperatuur, veroorzaakt door een verschil in toegevoerde energie als mogelijk ook een verschil in vochtgehalte in het diepteprofiel. Een lager vochtgehalte zal er voor zorgen dat er een hogere temperatuur wordt gemeten.

Voordat de AH-DTS monitoring is gestart is uitgezocht hoelang de opwarming aangezet kan worden zonder dat de kabels zouden kunnen doorbranden. Uit deze testen is gekomen dat tijdens de data-acquisitie er warmtepulsen worden afgegeven over 4 minuten en dat deze elk half uur worden herhaald. Met dit interval is uitgesloten dat kabels kunnen doorbranden door te grote temperatuursprongen.

Een voorbeeld van een temperatuurontwikkeling tijdens een opwarmmoment op een diepte van NAP +1,6 m voor locatie B1 is gegeven in Figuur 4. Er is te zien dat de temperatuur toeneemt met ongeveer 17 graden op deze diepte. Deze temperatuurontwikkeling verschilt echter wel per diepte-interval, waar hogere temperatuur ontwikkeling is in het ondiepe deel en lagere temperatuurontwikkeling in het diepere deel. Zeer waarschijnlijk komt dit door het vochtgehalte als ook de ondergrondtemperatuur. Een lager vochtgehalte zal een hogere temperatuurontwikkeling veroorzaken. Door de hogere ondergrond temperatuur zal er ook een hogere temperatuurontwikkeling plaatsvinden bovenin het profiel.



Figuur 4 Temperatuurontwikkeling op een diepte van NAP +1,6 m op locatie B1. De opwarmpuls duurt 4 minuten en de temperatuur neemt toe met 17 graden.

4.2 TEMPERATUURMETINGEN MET DISTRIBUTED TEMPERATURE SENSING

4.2.1 Variatie temperatuur ten opzichte van absolute temperatuur

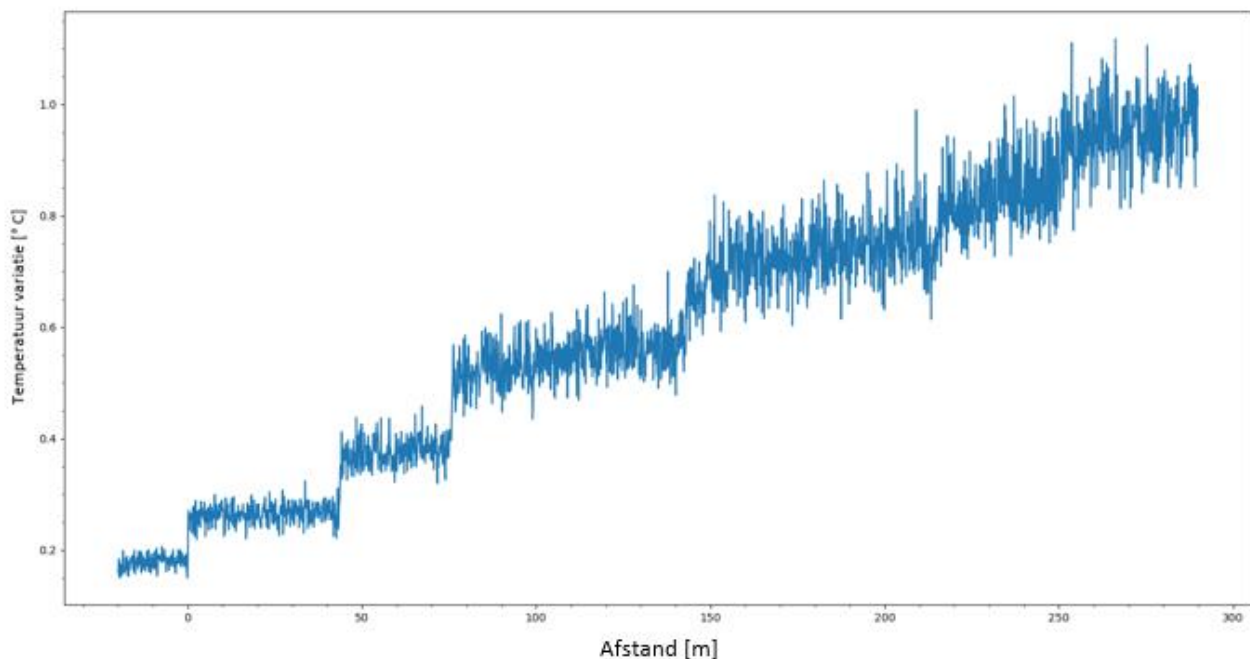
De nauwkeurigheid van de temperatuurmetingen met een DTS-systeem worden beïnvloed door de lengte van de glasvezelkabel, de buiging van de glasvezelkabel, het aantal verbindingen en de tijdsduur van de meting. Om inzicht te krijgen in deze nauwkeurigheid is een lengte van de glasvezelkabels in een kalibratie container box gelegd waar ook conventionele temperatuur (PT 100) sensoren in liggen. Nu is het mogelijk om de temperatuurmetingen met de glasvezelkabel te vergelijken met de PT-100 data van de AH-DTS kast. Het is ook mogelijk de temperatuurmetingen van de glasvezelkabel te kalibreren naar absolute temperatuurwaarden.

De twee PT-100 datasets zijn verzameld door de AH-DTS kast. De PT-100 sensoren zijn geplaatst in een afgesloten kalibratie container box waar ook lengtedelen van de glasvezelkabel in lagen (Tabel 1 geeft een overzicht van de glasvezellengtes in de container). Zo is het mogelijk voor elke glasvezel inzicht te krijgen in de variatie van de temperatuur ten opzichte van de PT-100. Om absolute temperaturen te verkrijgen is een continue kalibratie nodig omdat het DTS meet instrument temperatuursafhankelijk waarden opslaat.

Tabel 1 overzicht van de glasvezellengtes die in de kalibratiecontainer lagen.

Channel	1 van – tot [m]	2 van – tot [m]	3 van – tot [m]	4 van – tot [m]
1	46.5 – 48	102.5 – 104.2	181 – 182	247.28 – 248.6
3	46 – 54.78	106.48 – 115.22		
4	45.84 – 49.9	111.47 – 115.44	120.09 – 126.11	
6	44.42 – 54.57	103.98 – 114.19	118.20 – 131.18	172-93 – 186
7	44.39 – 50.26	108.36 – 114.43		
8	44.15 – 48.25	110.53 – 114.53	118.33 – 126.41	180.39 – 188.47

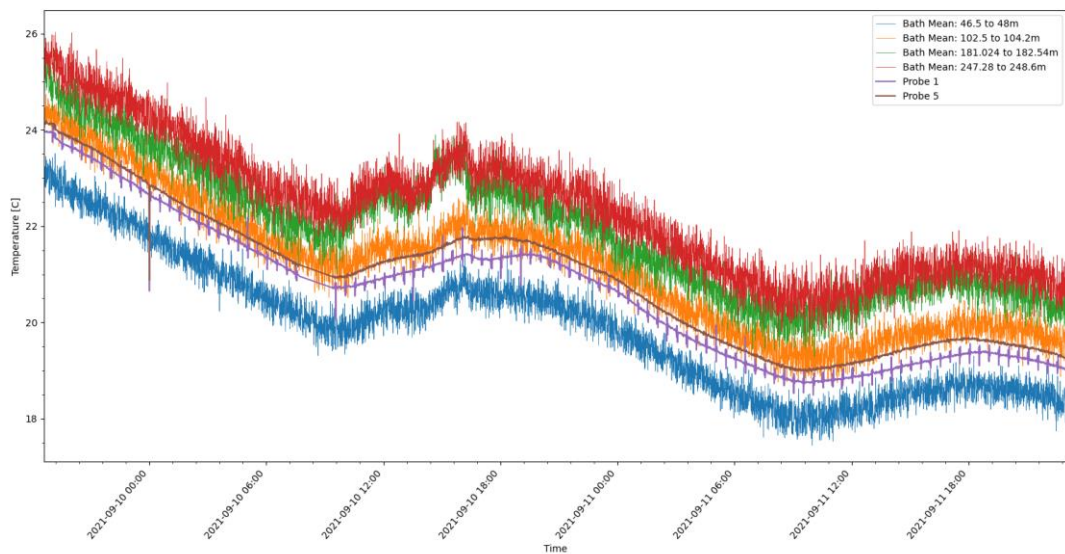
De variatie van de temperatuur is voor kanaal 1 uitgewerkt (zie Figuur 5). Het is waar te nemen dat de temperatuur afhankelijk is van de lengte van de kabel en de verbindingen tussen de glasvezelkabels. Door de lengte van de kabel neemt de variatie toe met uiteindelijk een variatie van 0.9 graden op een afstand van 300 meter. Duidelijk waarneembaar zijn ook de sprongen in variatie rond de 50 m de 75m en 148m. Dit wordt veroorzaakt door het verbinden van de glasvezelkabel aan de onderzijde van de sondeerpunt. Inzicht in variatie van de temperatuurmetingen wordt verkregen door het toepassen van de single ended kalibratie routine van des Tombe et al (2020).



Figuur 5 Verloop van de variatie van de temperatuur, afhankelijk van de lengte van de kabel en het koppelen (splicen) van glasvezelkabels.

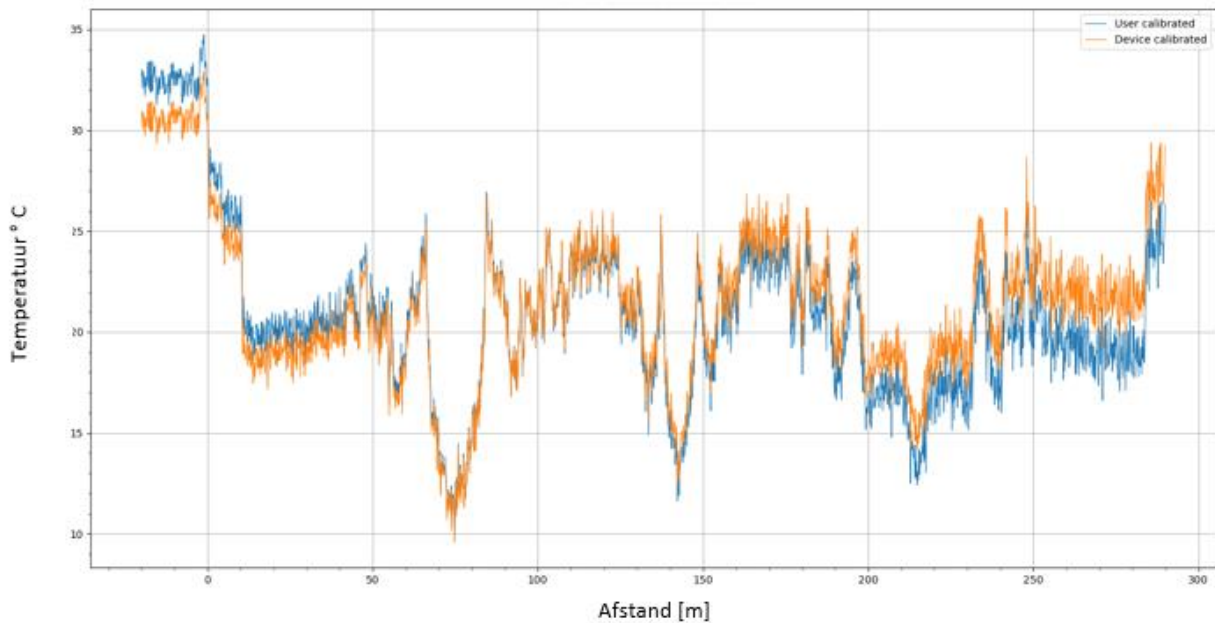
4.2.2 Absolute temperatuurwaarden

Om inzicht te krijgen in de absolute temperatuurwaarden over de lengte van de glasvezelkabel van kanaal 1 zijn de gemiddelde waarden van de glasvezelsecties die in een kalibratiebox zitten (Tabel 1) geplot in Figuur 6. Hierin is te zien dat de PT-100 waarden, weergegeven als probe 1 en probe 5, weinig fluctueren, echter verschillen ze wel 0.1 graden van elkaar. De variatie van de temperatuurmetingen met de glasvezel naarmate de lengte toeneemt is ook duidelijk waarneembaar, evenals de offset van de temperatuur die ook toeneemt naarmate de lengte van de kabel toeneemt.



Figuur 6 Overzicht van de temperatuur data voor de twee PT-100 sensoren en voor de gemiddelde temperaturen van de secties van de glasvezelkabel in de kalibratieboxen. Op PT-100 5 is een regelmatige storing te zien waar niet direct een verklaring voor is.

Er zijn verschillende kalibratiemethodes beschikbaar voor het kalibreren van ruwe temperatuurdata. Doordat de kabels niet doorlopen (door breuken) is er gekozen om de single-ended kalibratie methode toe te passen. Door het toepassen van een single ended-kalibratie methode is het mogelijk de data om te zetten naar absolute temperatuurwaarden. Met deze methode wordt de variatie tussen de PT-100 data en de glasvezeldata bepaald in de kalibratiebox. Over het algemeen geldt dat naarmate de kabel langer wordt de variatie van de temperatuurmeting van de glasvezel toeneemt, als ook dat splices extra ruis kan veroorzaken. Dit is ook terug te zien in de Figuur 5 met de temperatuurmeting over kanaal 1.



Figuur 7 Temperatuurmeting over kanaal 1 waarin de temperatuurwaarden geplot zijn voor de methode die standaard (oranje) door het DTS meet apparaat gebruikt wordt en de toegepaste single ended kalibratie methode (blauw).

Voor alle AH-DTS locaties is de variatie en de afwijking van de absolute temperatuur bepaald. De variatie en afwijking van de absolute temperatuur hebben een relatie met de lengte van de kabel en het aantal verbindingen. Dit is bijvoorbeeld goed terug te zien in Figuur 7 op de locaties van 75 m , 140 m en 210 m. Op de locaties C2, C4, C5, C6 en C8 is geconstateerd dat de kalibratie niet goed is gegaan. Er is een grote afwijking tussen de PT-100 temperatuurwaarden en de gemiddelde temperatuurwaarde van de secties van de glasvezelkabel in vergelijking met de andere locaties (zie Tabel 2). Een verklaring hiervoor zou kunnen zijn dat een deel van de lengte van de kabels niet goed in de kalibratiebox zat.

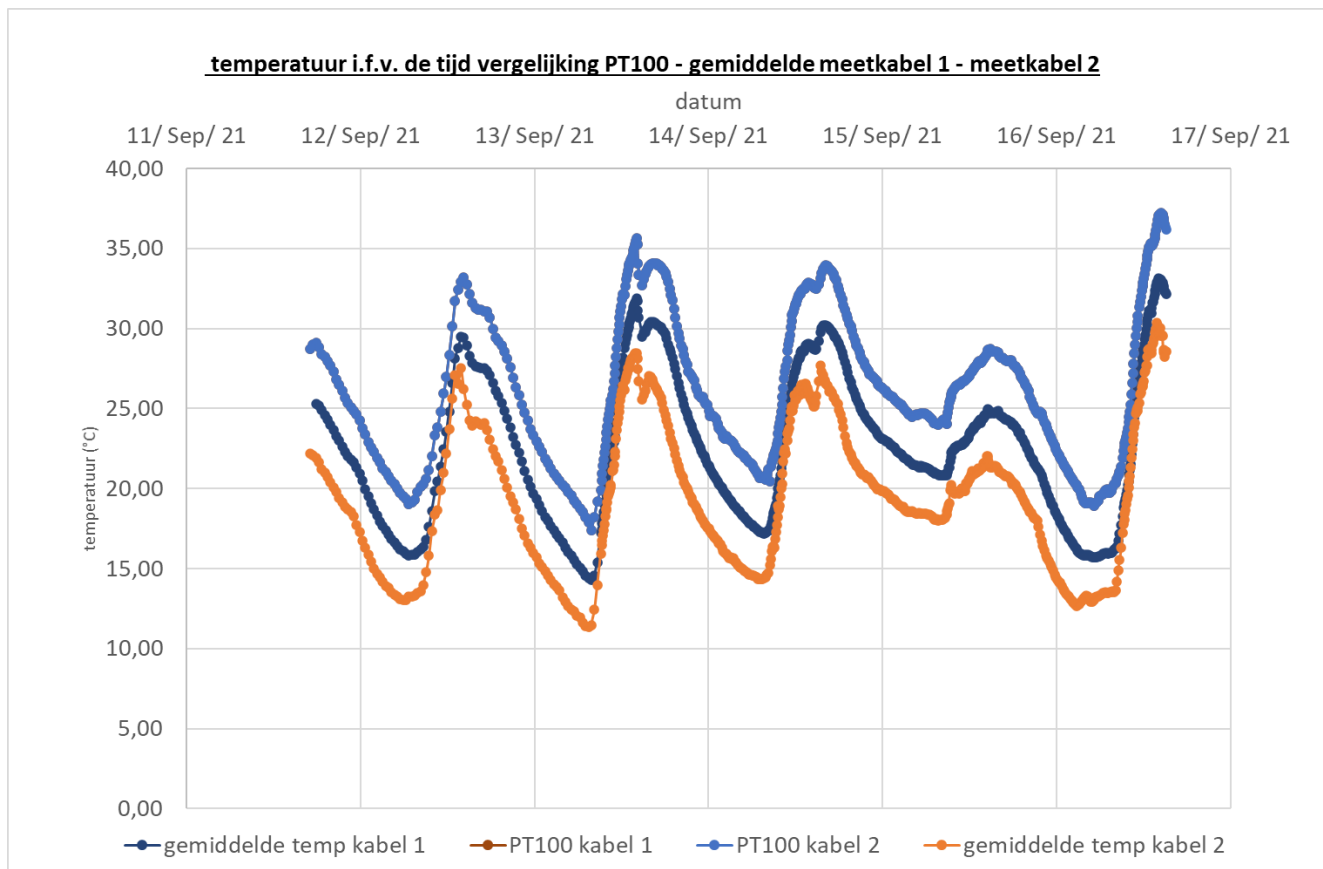
Tabel 2 Overzicht van de afwijking in absolute temperatuur van de PT-100 sensoren en de gemiddelde temperatuur van de glasvezelsecties in de kalibratie box

Positie	channel	van [m]	tot [m]	variatie [°C]	afwijking absolute temperatuur[°C]
B1	1	209	220	0.75	-2
D1	1	137.5	148.5	0.55	-0.1
D2	1	64	86	0.4	0
C7	3	75.5	86.5	0.25	-2.5
C1	4	74	86	0.13	-1.5
C3	4	149	160	0.18	-2.5
C6	5	74	85	x	x
C2	6	74	86	0.25	niet goed gegaan
C5	6	146.5	157.5	0.3	niet goed gegaan
C9	7	74	86	0.35	-1.5

C4	8	74	85	niet goed gegaan
C8	8	147	159	niet goed gegaan

4.2.3 Passieve methode - Vergelijking niet-gekalibreerde meetwaarden met gekalibreerde sensor PT-100

Voor de meetcampagne van dit project zijn we vooral geïnteresseerd in de trend van de temperatuur en niet in de absolute waarde van de temperatuur. Echter, om de temperatuur gemeten door MOW te vergelijken met de Deltares sensoren is het wel belangrijk om te weten hoeveel de gemeten (niet-gekalibreerde) temperatuur verschilt met de absolute temperatuur. Hiervoor wordt door MOW gebruik gemaakt van een gekalibreerde PT-100 sensor. Voor deze meetopstelling ligt de PT-100 sensor samen met de eerste 10 m van de kabel in een kalibratiebox in de auto waar de andere meetapparatuur staat. Hierbij werd een gemiddelde van de 10 m kabel genomen en werd deze uitgezet t.o.v. de PT-100. Dit is terug te vinden in Figuur 8. De PT-100 voor beide kabels valt op elkaar omdat het dezelfde meetsensor voor beide kabels gebruikt is. Daaruit kunnen we concluderen dat de meetsensor +/- 3,6 graden lager meet dan de absolute temperatuur voor meetkabel 1 en 6 graden lager voor meetkabel 2. Dergelijk grote temperatuurverschillen tussen meetkabel 1 en 2 vinden we niet terug bij metingen in de diepte. In de diepte vinden we een verschil in de grootteorde van 0,2°C. Om die reden werden naderhand ook metingen uitgevoerd in het lab onder gecontroleerde omstandigheden in een 10°-ruimte en een 20°-ruimte. De verschillen tussen de meetkabels en de PT100-sensor bedragen in deze ruimtes slechts 0.3 – 0.4°C en zijn dus in dezelfde orde van grootte als gemeten in de diepte in de Hedwigepolder. Mogelijk zijn de temperatuurmetingen van de meetkabels in de auto die gebruikt werden om te vergelijken met de PT-100 niet representatief omwille van andere effecten (schaduw/zon). Een andere mogelijkheid is dat de afwijking van de meetkabels groter wordt bij hogere temperatuur.





Figuur 8 – Vergelijking verloop temperatuur over referentiezone met PT-100 tijdens verloop van meetcampagne.

4.2.4 Fluctuatie buitentemperatuur

Een deel van de MOW kabel was gelegen op het maaiveld tussen de auto en de te meten punten. Dit deel kan gebruikt worden om een inschatting te maken van de buitentemperatuur. Op deze zone werden twee punten uitgekozen en in de grafiek geplaatst, zie Figuur 8. Daarbij zien we dat er grote verschillen zijn tussen dag en nacht. Tijdens de meetcampagne was het heel zonnig en warm maar koelde het sterk af tijdens de nacht. Deze trend zien we ook terug in de bovenste twee meetpunten van onze meetbuizen (boven maaiveldniveau).

4.3 DATA SET GEBRUIKT VOOR AH-DTS ANALYSE

Om een dataset te kunnen gebruiken voor verdere analyse met de AH-DTS methode is een temperatuur dataset gemaakt door de gemiddelde temperatuur te nemen van de gemeten temperatuurwaarden van de glasvezel die naar beneden gaat als ook het gemeten temperatuur waarde van de glasvezel die weer omhoog gaat. Dit is gedaan om zo minder ruis over te houden.

 	Analyse-rapport Temperatuurmetingen	A-GEO-PP03-3.1 versie 05
	GEO-18/112-001-revA Deltaresproject 11204565	Pagina 14 van 49

5 DATA-ANALYSE

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de stappen die zijn genomen om vast te stellen of pipe-ontwikkeling gedetecteerd kan worden met de DTS-opstelling. Deze analyse is grotendeels uitgevoerd zonder kennis over de route van pipe, om op die manier zo objectief mogelijk te kunnen vaststellen of met deze techniek piping gemeten kan worden.

In paragraaf 5.1 worden de stappen gepresenteerd die genomen zijn om de analyse uit te voeren.

In paragraaf 5.2 worden de data van de AH-DTS techniek geanalyseerd.

In paragraaf 5.3 wordt een vergelijking gegeven tussen de meettechnieken.

5.1 AH-DTS OM PIPING TE DETECTEREN

Doordat er geen eenduidige kalibratie toegepast kon worden alsook geen eenduidige energietoevoer kon worden toegepast is het niet goed mogelijk de onderlinge locaties en dieptes met elkaar te vergelijken. Er is vervolgens besloten om per locatie en per diepte verder te gaan met een time-series analyse. Dit betekent dat gekeken wordt naar verschillen in de afkoelcurves en maximale temperaturen vóór en tijdens de proef. De volgende stappen worden toegepast om via de afkoelcurves en maximale temperaturen een mogelijke pipe te detecteren:

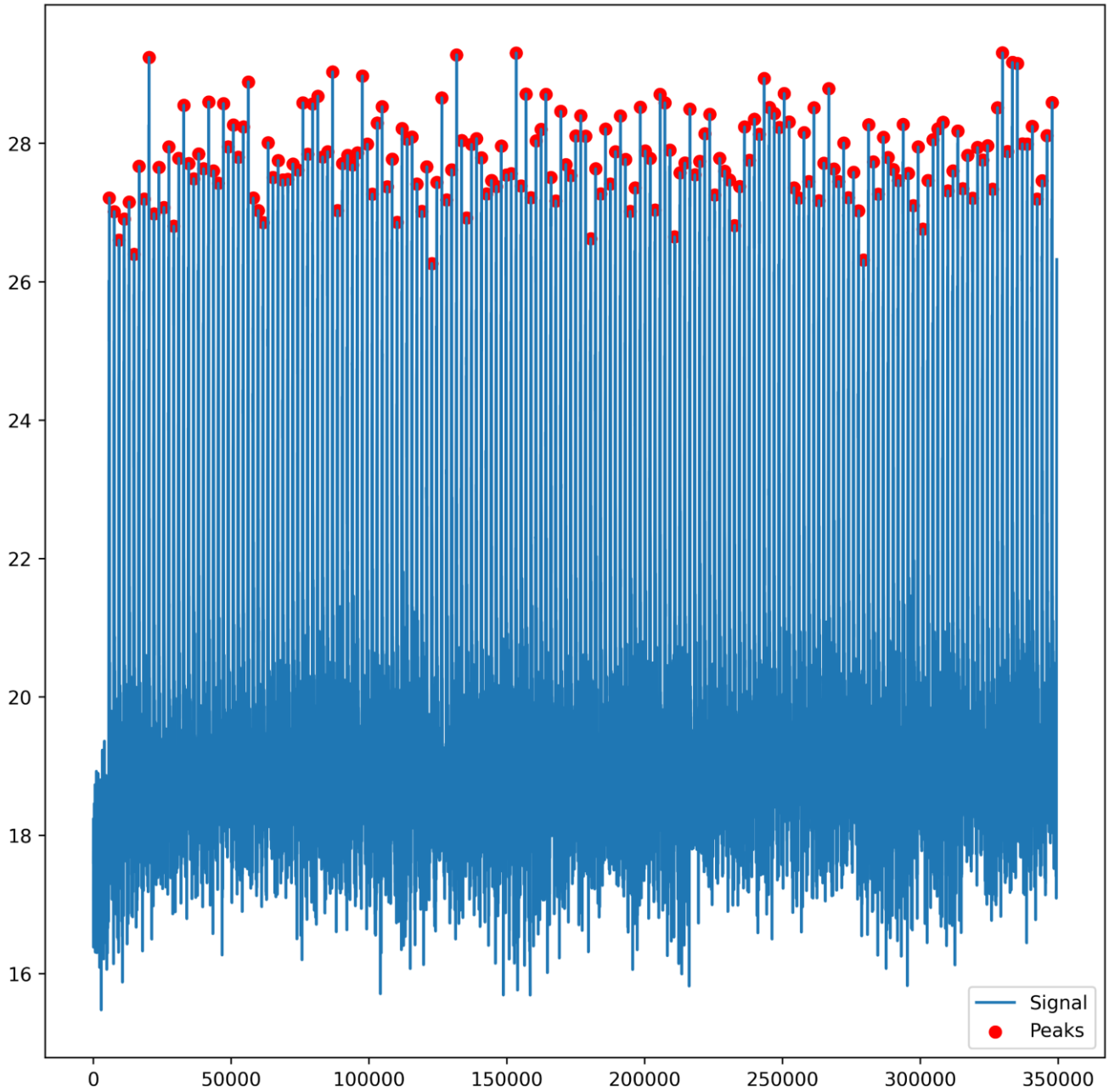
- 1) opsplitsen van twee subsets
- 2) toepassen van een algoritme voor het vinden van de maximale piektemperatuur
- 3) extraheren van de afkoelcurves
- 4) normaliseren van de afkoelcurves
- 5) berekenen van de helling van de afkoelcurves

5.1.1 Opsplitsen van twee subsets

Deze stap is ingezet om de datahoeveelheid behandelbaar te houden. De eerste subset bevat de data voordat de waterdruk werd opgevoerd en de tweede subset nadat de waterdruk is opgevoerd. Het moment van opvoeren van de waterdruk was 13 september 2021 om 8 uur.

5.1.2 Toepassen van een maximum temperatuur zoek algoritme

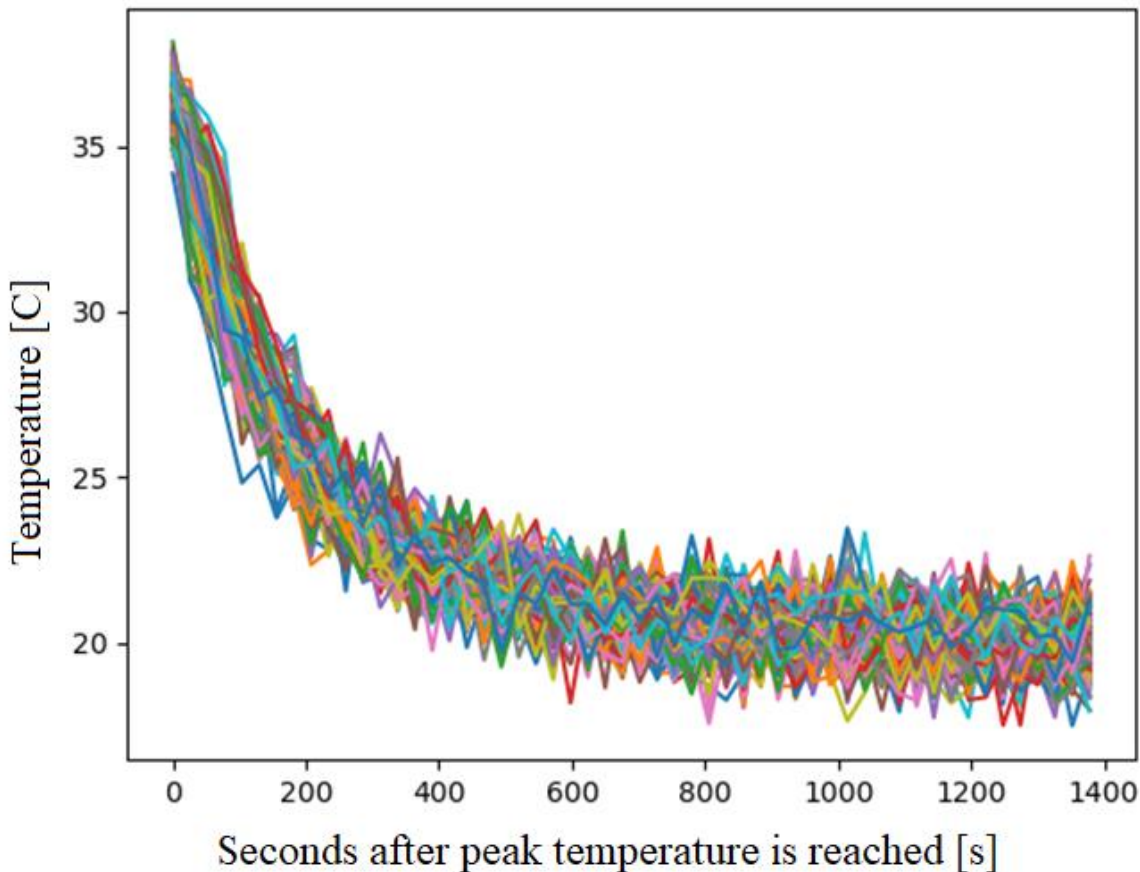
Er is een maximum temperatuur zoek algoritme ontwikkeld om voor elke opwarmcurve de maximum temperatuur uit het gemeten signaal te detecteren en het bijbehorende tijdsmoment. Met de maximumtemperatuur en de bijbehorende tijd is het vervolgens mogelijk om deze te gaan gebruiken voor het bepalen van delta T en het creëren van de afkoelcurves (zie Figuur 9) .



Figuur 9 Het bepalen van de maximale temperatuur voor elke opwarm curve

5.1.3 Extraheren van de afkoelcurves

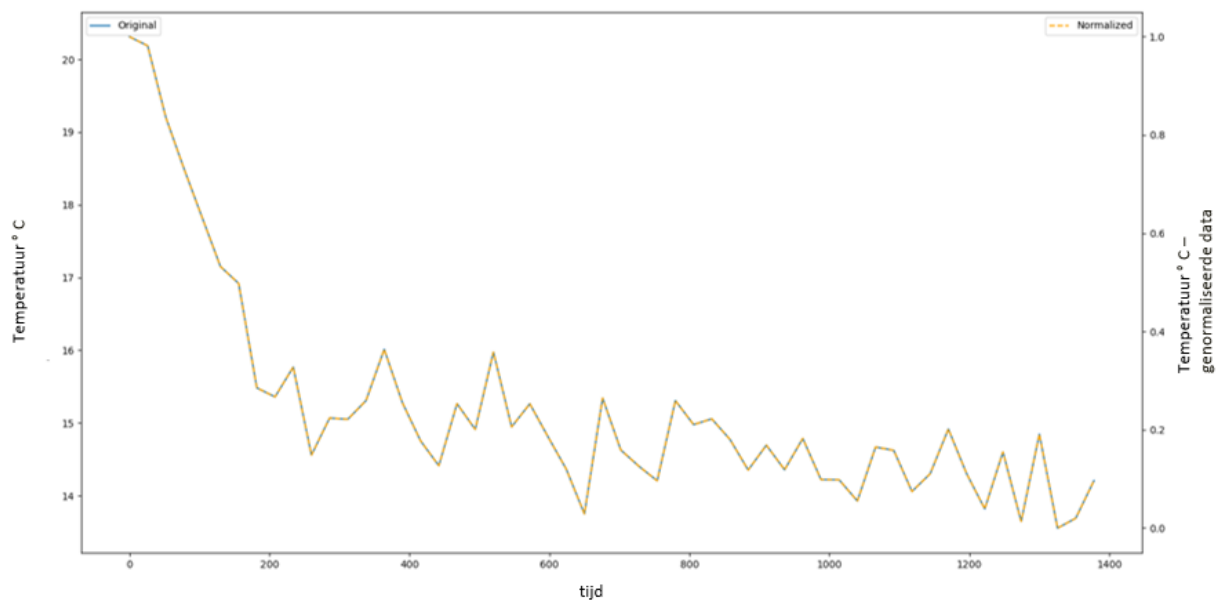
Doordat er voor een relatief korte periode van 4 minuten wordt opgewarmd wordt is op basis van eerder opgedane kennis de evenwichtstemperatuur nog niet bereikt. Het is daardoor niet mogelijk de maximale delta T te gebruiken die gebruikt werd in de opwarmcurves in de lab setup (Bakx et al. 2019). Er is daarom besloten om verder te gaan met het analyseren van de afkoelcurves. Voor elke diepte wordt over de meetperiode de afkoelcurve geplot (Figuur 10).



Figuur 10 overzicht van alle afkoelcurves voor een bepaalde diepte.

5.1.4 Normaliseren van de afkoelcurve

Doordat de data niet eenduidig gekalibreerd kon worden en omdat er niet eenzelfde hoeveelheid energie toegevoerd kon worden is het nodig om de afkoelcurves te normaliseren. Hierin wordt de maximale temperatuur op 1 gezet en de minimale temperaturen op 0 (zie Figuur 11).

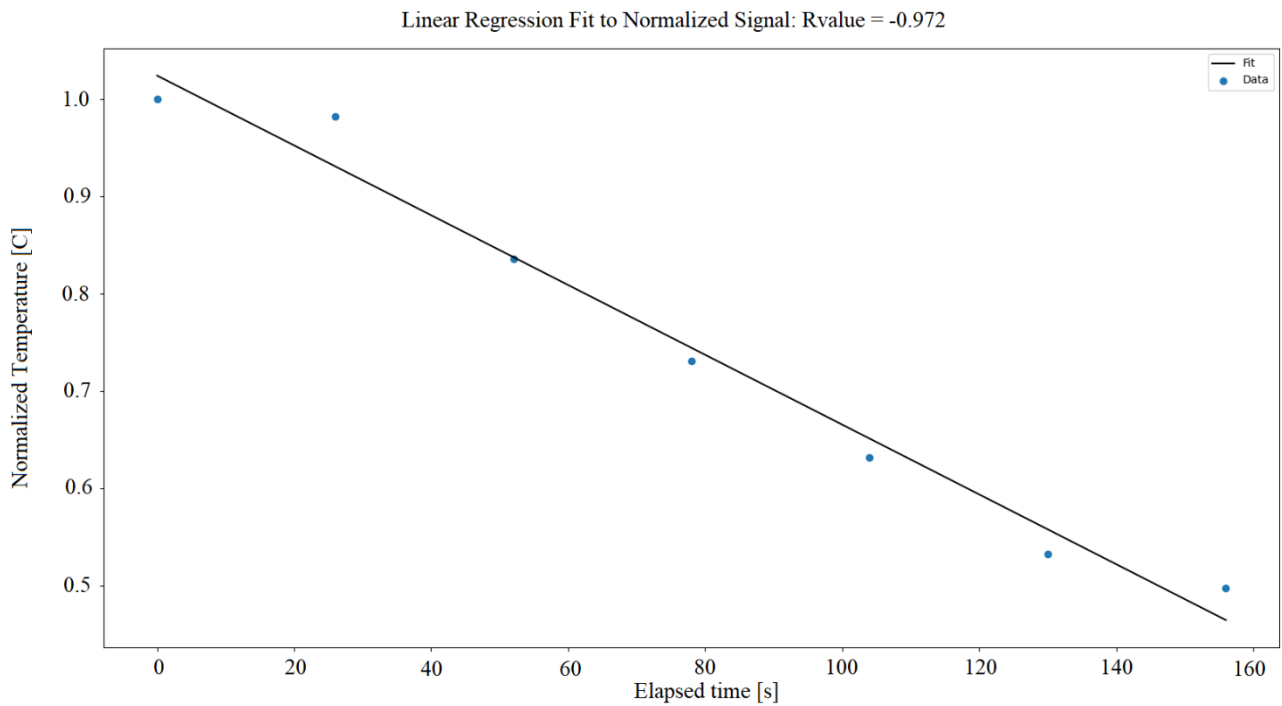


Figuur 11 het normaliseren van de maximale en 50% maximale temperatuur naar 0 en 1

5.1.5 Berekenen van de helling van de afkoelcurves

Voor iedere diepte wordt de afkoelcurve vervolgens gefit en wordt de hellingwaarde (richtingscoëfficiënt) als ook hoe goed (R-kwadraatwaarde) de helling door de dat fit opgeslagen. Over het algemeen is er een goede fit van 0.97 behaald. Hierbij zijn de volgende stappen gezet.

- Het fitten van een lineaire functie op het segment van de afkoelcurve van de maximale temperatuur tot 50% van de maximale temperatuur (zie figuur) .
- De normalisatie procedure bekijkt iedere afkoelcurve apart zodat de temporele bedekking toeneemt



Figuur 12 Lineaire regressie fit op het genormaliseerde signaal.

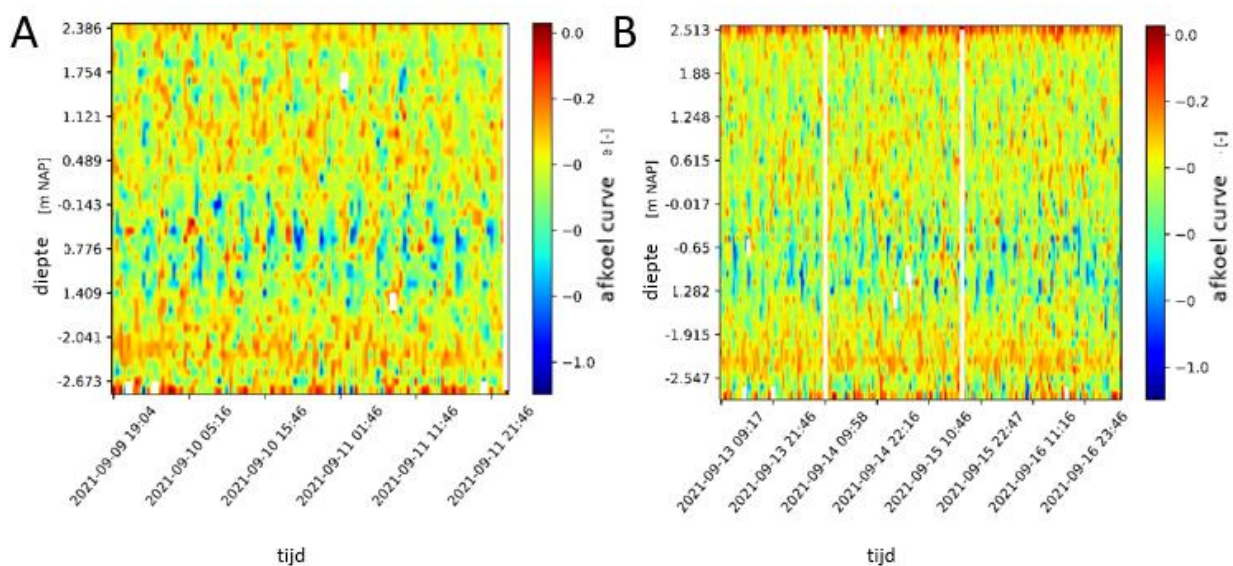
5.2 ANALYSE VAN DE AH-DTS DATA

In deze paragraaf worden de afkoelcurves en maximale temperaturen van de AH-DTS data geanalyseerd.

5.2.1 Afkoelcurves

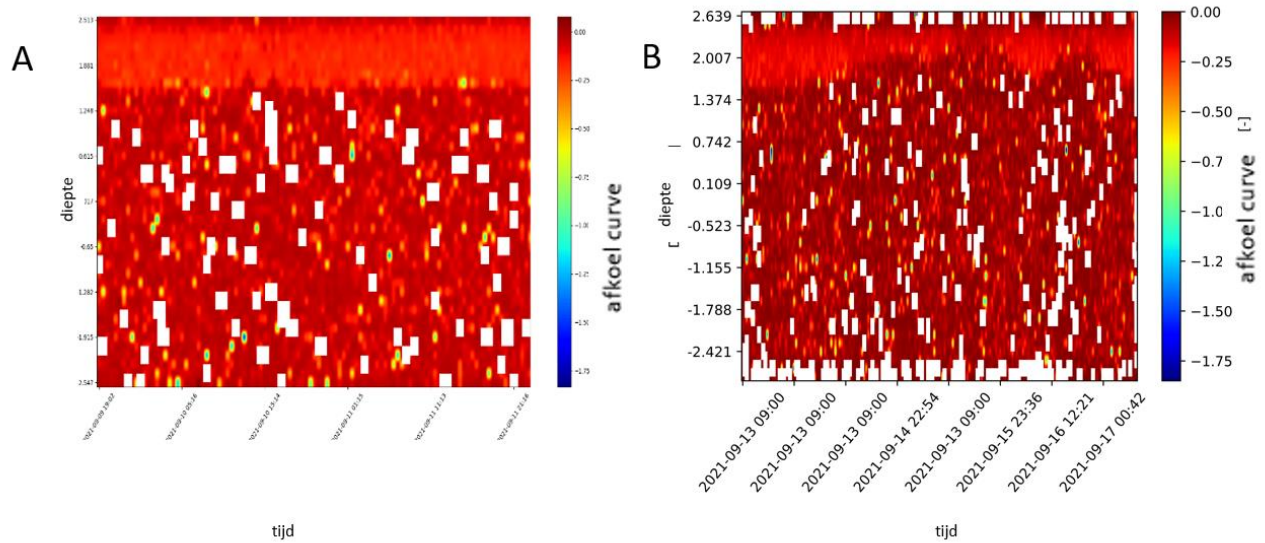
Voor alle locaties zijn de hellingen van de genormaliseerde afkoelcurves geplot over de diepte en over de tijd. De kleur geeft aan wat de waarde is die daarbij hoort. Een rode kleur geeft een flauwe helling en blauwe curve geeft een steile helling. De hypothese is dat wanneer piping optreedt, er een minder groot verschil ontstaat tussen minimale en maximale temperatuur waarden en wanneer naar de afkoeling gekeken wordt de helling dus minder steil wordt. Anderzijds is het ook mogelijk dat, ondanks het kleinere verschil, de curve toch steiler wordt omdat de afkoeling door het stromende water sneller gaat.

Over het algemeen zijn er geen trends waarneembaar in de helling van afkoelcurves van de verschillende locaties. Een voorbeeld voor locatie C4 is gegeven in Figuur 13 waarin in A) de hellingen van de afkoelcurves voor het experiment en B) de hellingen van de afkoelcurves tijdens het experiment worden gepresenteerd. Zie ook bijlage B voor een overzicht van alle plots voor de hellingen van de locaties.



Figuur 13 A voorbeeld van helling van de afkoelcurves voor de proef voor de verschillende dieptes van C4 en B de afkoelcurves tijdens de proef voor de verschillende dieptes.

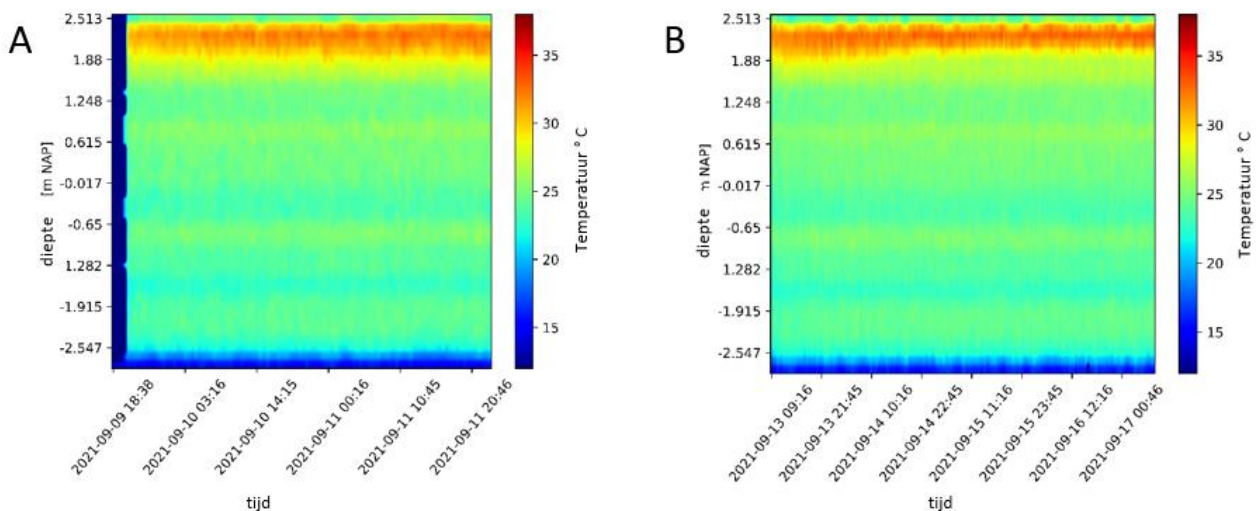
Voor de locatie van D1 is op een diepte van ongeveer NAP +1,8 m wel een afname van de helling waar te nemen. Omdat deze locatie buiten het onderzoeksgebied valt is niet te verklaren waarom er hier een daling van de helling is waar te nemen en daarom ook niet om dit te koppelen aan een mogelijk piping proces.



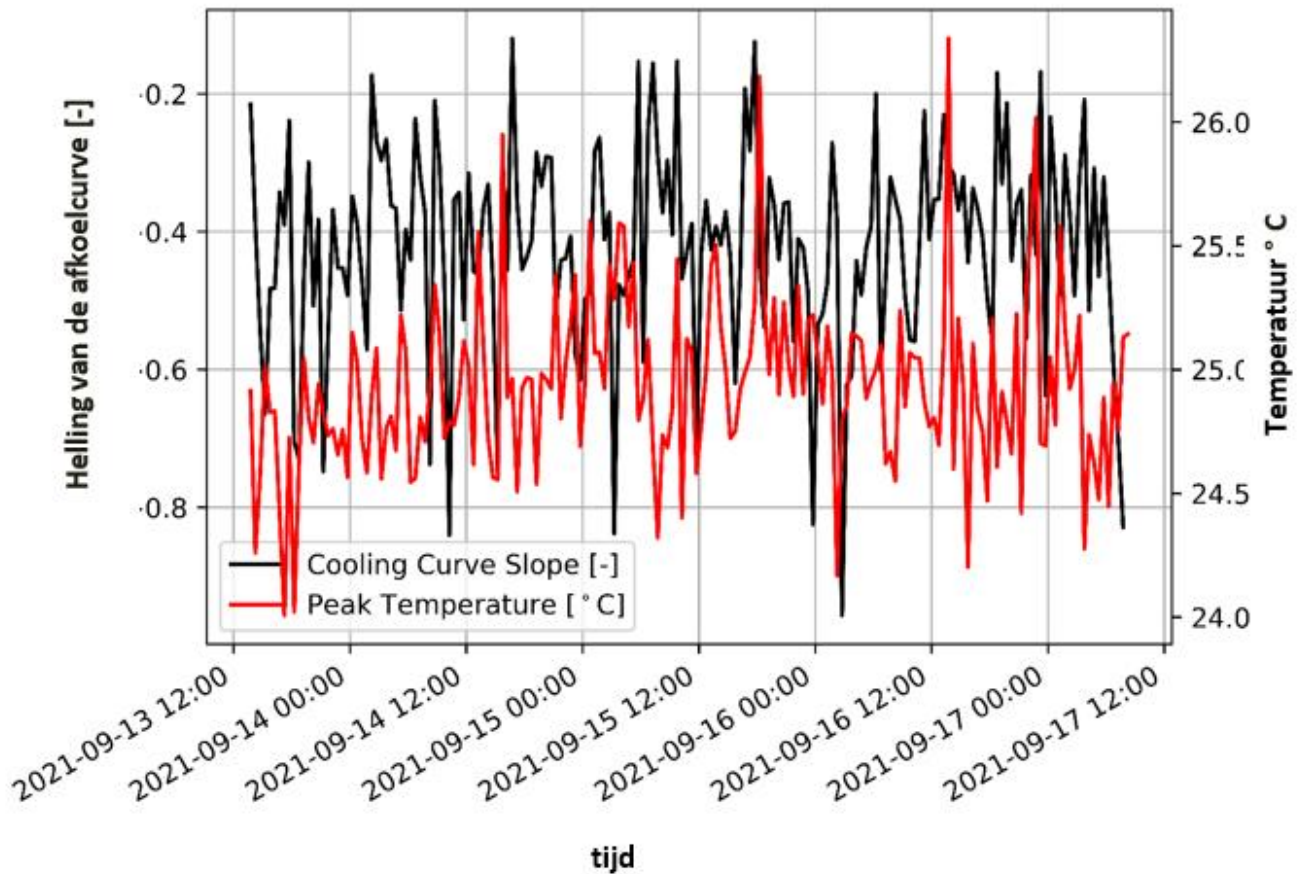
Figuur 14 Afkoelcurves voor de proef voor D1 (A) en afkoelcurves tijdens de proef voor D1(B)

5.2.2 Analyse van de maximale temperaturen

Voor elke locatie en diepte is het door het toepassen van de maximum temperatuur zoekalgoritme mogelijk om alle maximaal bereikte temperaturen te tonen voor het experiment en tijdens het experiment. Over het algemeen laat de bovenzijde van het profiel een grotere temperatuursprong zien dan de diepere delen. Dit komt zeer waarschijnlijk door het lagere vochtgehalte bovenin (zie Figuur 15 voor locatie C2). De maximale temperatuur en afkoelcurves voor locatie C2 voor een diepte van NAP 0,5m zijn geplot.



Figuur 15 A) Visualisatie van de maximale temperaturen voor locaties C2 tijdens de experimenten en B) visualisatie van de maximale temperaturen tijdens het opzetten van de waterdruk C2.

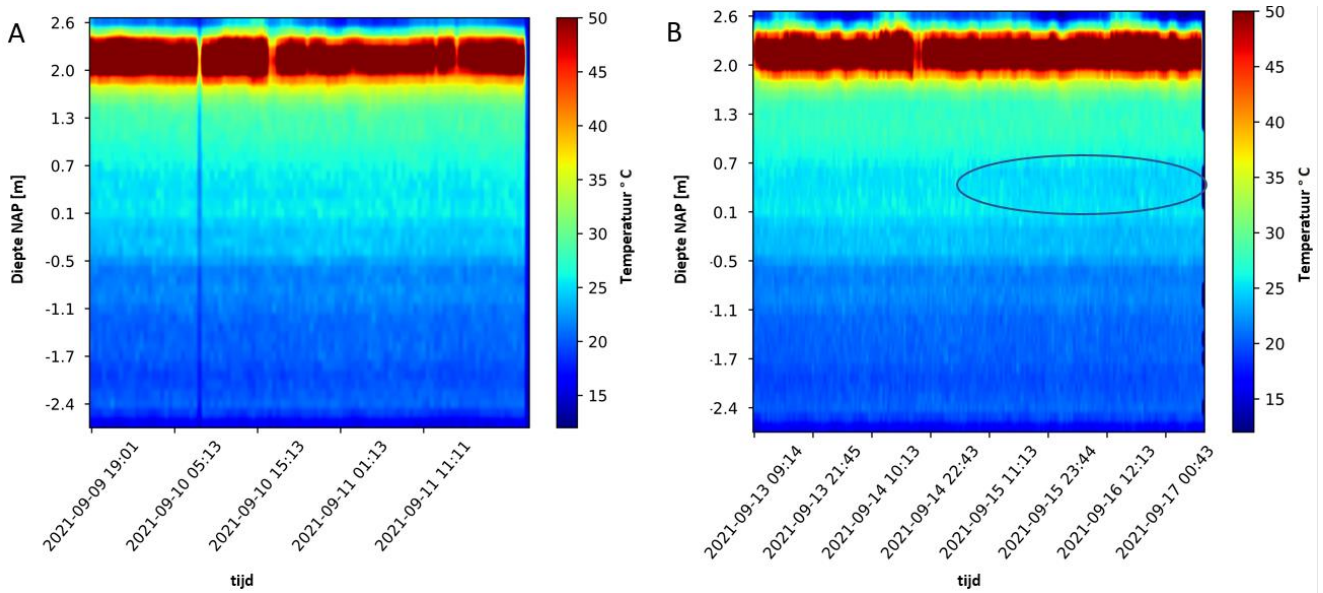


Figuur 16 Afkoelcurves en maximale temperaturen voor locatie C2, NAP 0,5m

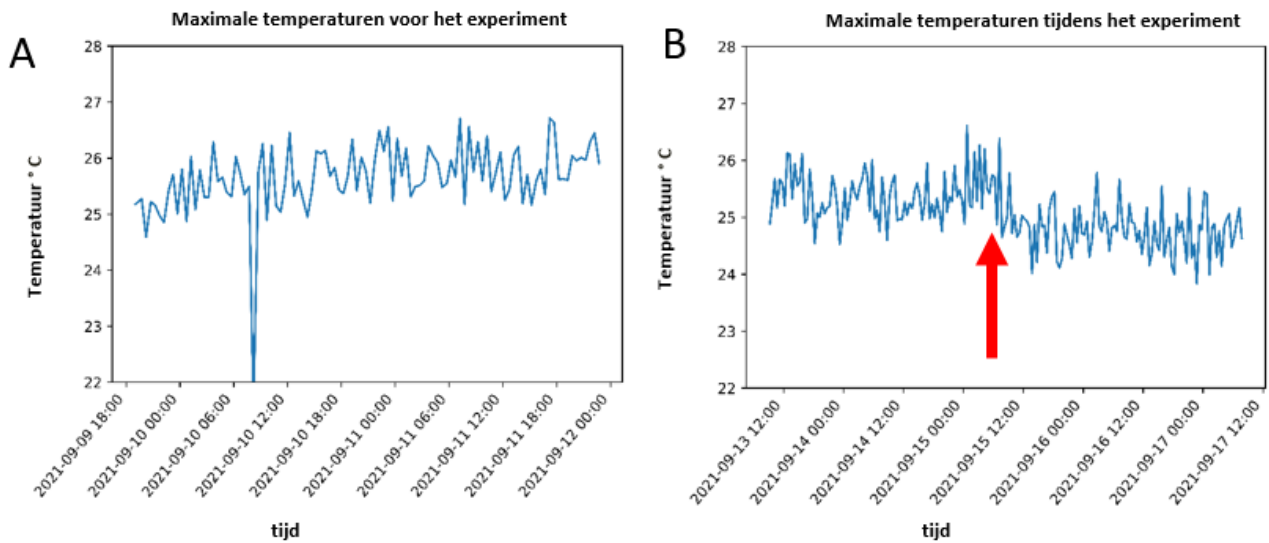
Tijdens de eerste analyses was C6 buiten beschouwing gelaten omdat de data niet bruikbaar leek. Toen bleek uit het CSI werk dat op de locatie de pipe er heel dicht langs is gegaan is nogmaals de data geanalyseerd. Na een nauwkeurige analyse is gebleken dat de data wel bruikbaar is.

Op de locatie C6 is wel een afname te zien van de maximale temperatuur in de zone van NAP +0,1 m tot NAP 0,7 m (zie Figuur 17). Wanneer voor een dieptelocatie van NAP 0,5m deze in de tijd wordt uitgezet is duidelijk waarneembaar dat er een afname is van 1 graad van de maximale temperatuur.

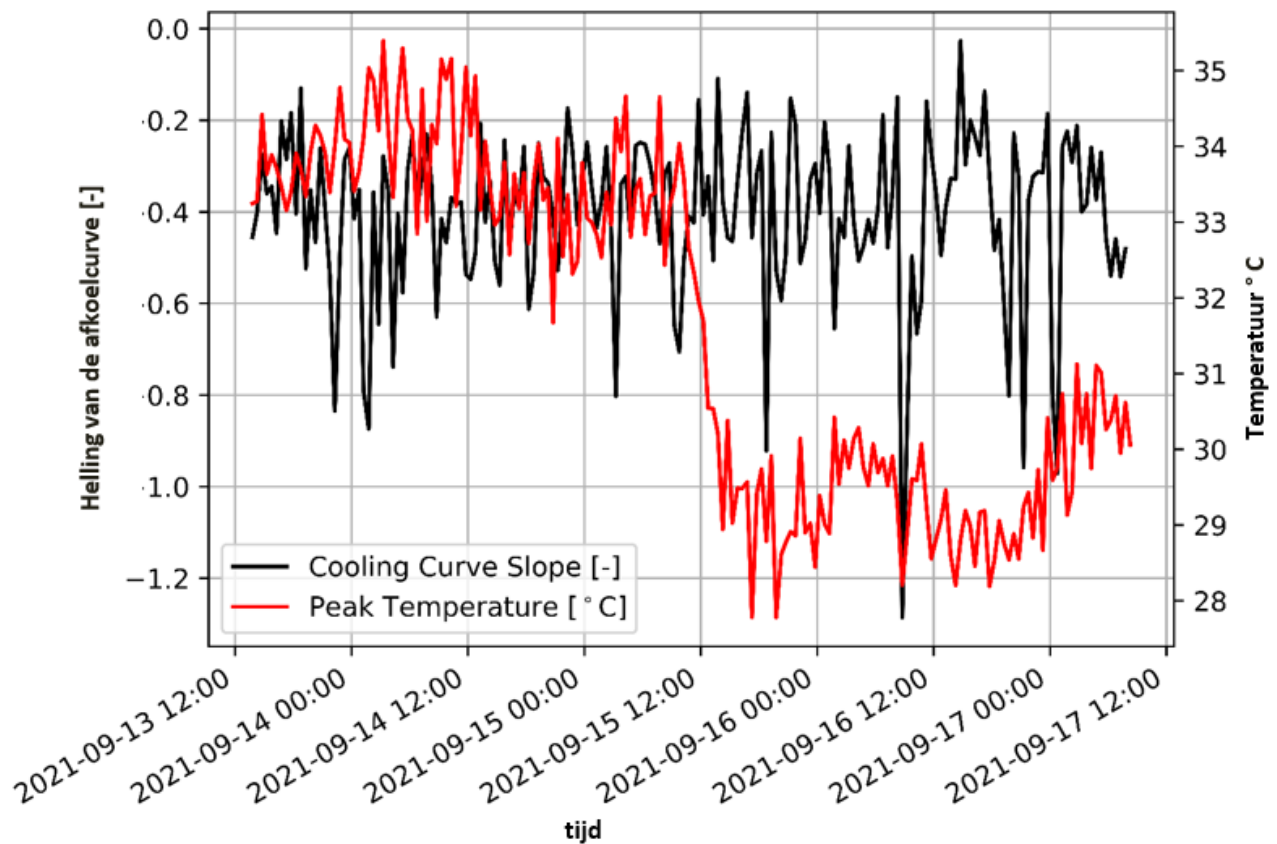
Wel is ook in B1 een duidelijke afname zichtbaar in de maximale temperatuur (Figuur 19), ruwweg vanaf het moment van pipe-ontwikkeling, maar op een diepte van 1,37 m NAP en dat is in deklaag. Deze afname wordt wellicht veroorzaakt door een toename van het vochtgehalte, waardoor de grond minder snel opwarmt.



Figuur 17 Visualisatie van de maximale temperaturen voor locaties C6 A) voor de experimenten voor het opzetten van de waterdruk als ook B) tijdens het opzetten van de waterdruk. Te zien is de afname van de maximale temperatuur in de zone van NAP 0,1 m tot NAP 0,7 m Zie blauwe cirkel van NAP



Figuur 18 Visualisatie van de maximale temperaturen tijdens opwarm curves voor locaties C6 op een diepte van 0.5 m NAP voor het experiment en tijdens het experiment. Duidelijk te zien is de afname van de maximale temperatuur van 1 graad Celsius bij de rode pijl



Figuur 19 Afkoelcurves en maximale temperaturen voor locatie B1 NAP 1,374 m

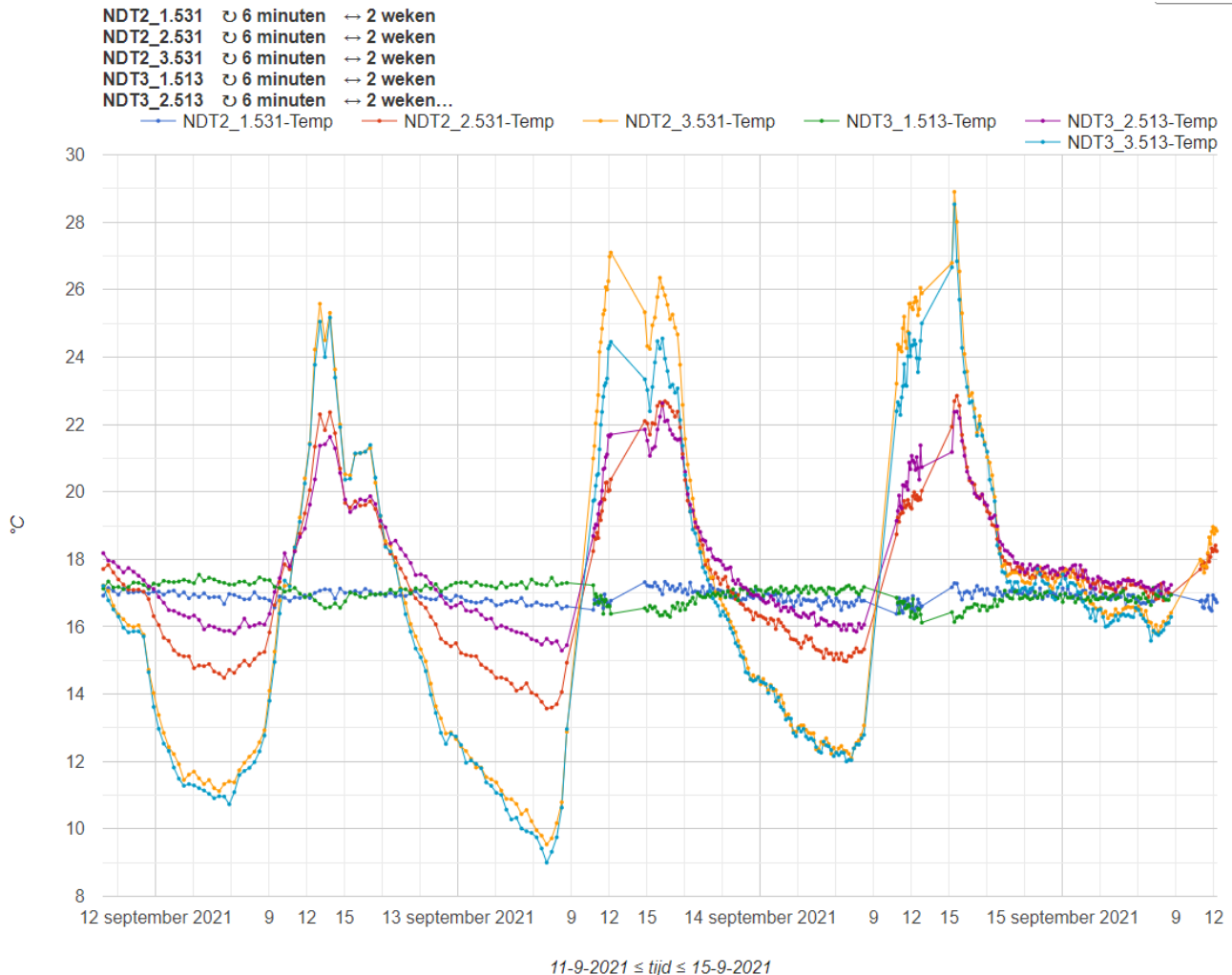
5.3 VERGELIJKING MEETTECHNIEK

5.3.1 Invloed sondeerbuis

Figuur 20 geeft de temperatuur weer voor NDT2 en NDT3 op 3 verschillende niveaus. Twee niveaus bevinden zich in de sondeerbuis boven het maaiveld, nl. op ca. NAP 3,5 en 2,5 m (oranje, lichtblauw, rood, paars). Op die niveaus is de dag-nachtcyclus heel duidelijk te zien, door invloed van de buitentemperatuur en rechtstreeks zonlicht op de buis. Het eerstvolgende, diepere meetpunt bevindt zich op ca. NAP 1,5 m, wat onder het maaiveld is. Het maaiveldniveau bevindt zich ong. op NAP 2,27 m (NDT1, NDT2, D1) en op NAP 2,22 m (NDT3), NAP 2,20 m (NDT4) en NAP 2,25 m (D2). De top van de sondeerbuizen bevindt zich op ca. NAP 3,5 m.

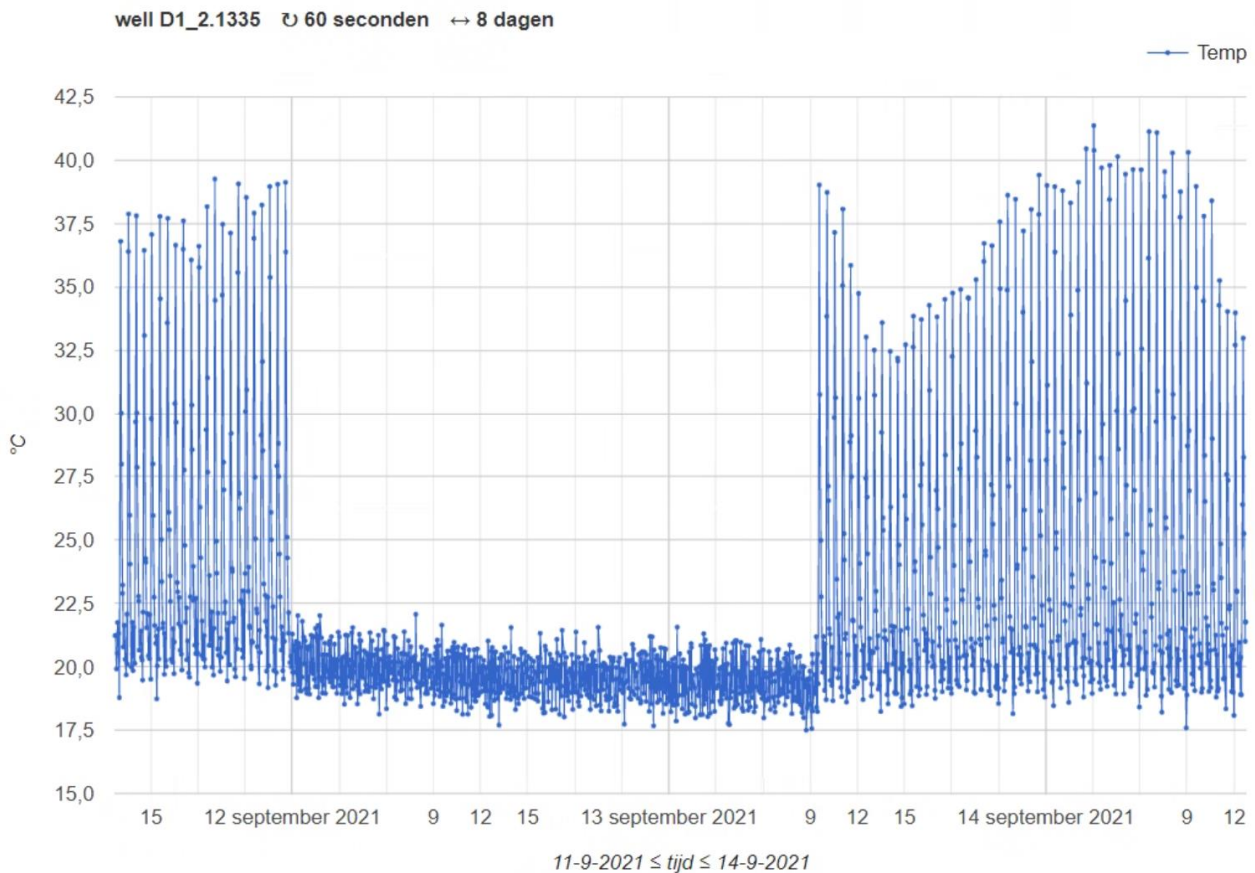
Merk op dat de dag-nachtcyclus niet meer waarneembaar is op NAP 1,5 m. De meting in de buis geeft dus vermoedelijk goed de grondtemperatuur weer en ondervindt al op geringe diepte geen invloed van de

buitenlucht meer. Op langere termijn (over seizoenen heen) zien we wel vaak schommelingen in de temperatuur in de grond, het lijkt echter niet onlogisch dat snelle schommelingen niet zichtbaar zijn.



Figuur 20 Invloed dag-nacht: temperatuurmetingen voor N2 en N3 in functie van de tijd voor 2 punten boven het maaiveld en 1 punt onderaan het maaiveld

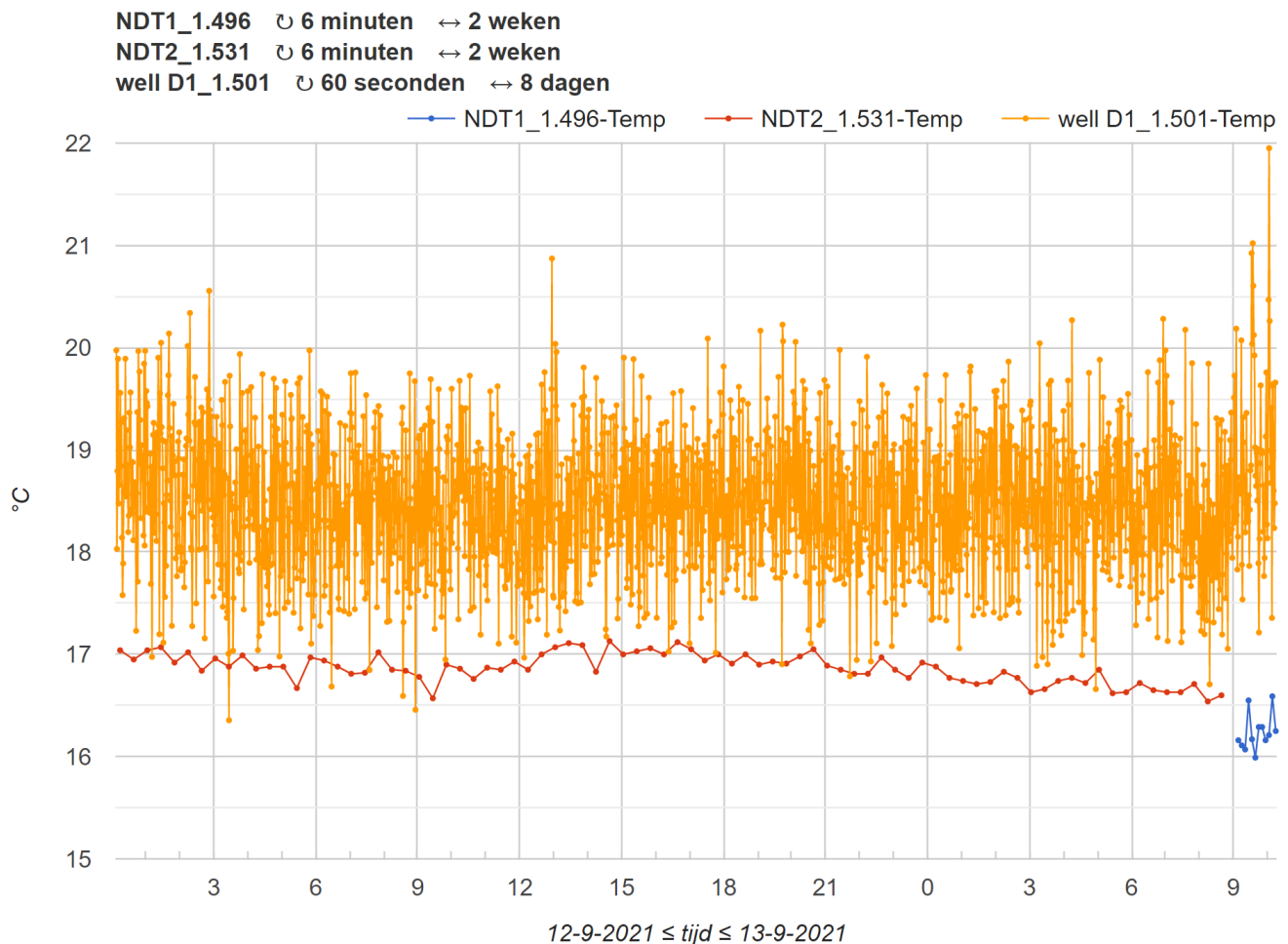
Om inzicht te krijgen in de invloed van de sondeerbuizen kunnen de passieve metingen vergeleken worden met de metingen van Deltares, waarbij de glasvezelkabel rechtstreeks in contact is met de grond, wat het geval is voor D1, en deels in contact is met grond deels met grout (over de kleilaag), wat het geval is voor D2. Hiervoor worden de metingen van dichtbijgelegen meetpunten met elkaar vergeleken, nl. cluster NDT1, NDT2, D1 en cluster NDT3, NDT4, D2. Voor de vergelijking wordt er geconcentreerd op de zone waarin geen 'active heating' is toegepast. In Figuur 21 is een voorbeeld weergegeven met een zone van passieve temperatuurmetingen tussen twee zones met 'active heating'. De passieve zone situeert zich van ongeveer 12/9 middernacht t.e.m. 13/9 – 10u.



Figuur 21- Locatie D1 – niveau 2.13 m NAP – Passieve zone zichtbaar tussen twee zones met actieve verwarming.

In Figuur 22 is de temperatuur weergegeven op ca. NAP 1,5 m voor NDT1, NDT2 en D1 in de passieve meetzone voor D1. In dit tijdframe werd de temperatuur opgemeten in NDT2 (rode lijn), niet in NDT1. Op het einde van de passieve meetzone werd de meetkabel verplaatst naar NDT1 (blauwe lijn). Er is een verschil tussen de temperatuur van D1 en van NDT1-NDT2 van ca. 2.5 à graden. Dit is waarschijnlijk te wijten aan het feit dat voor NDT1-NDT2 niet-gekalibreerde waarden geplot zijn, waarbij werd vastgesteld dat deze ca. 3.6 graden afwijken van de PT-100 gekalibreerde sensor.

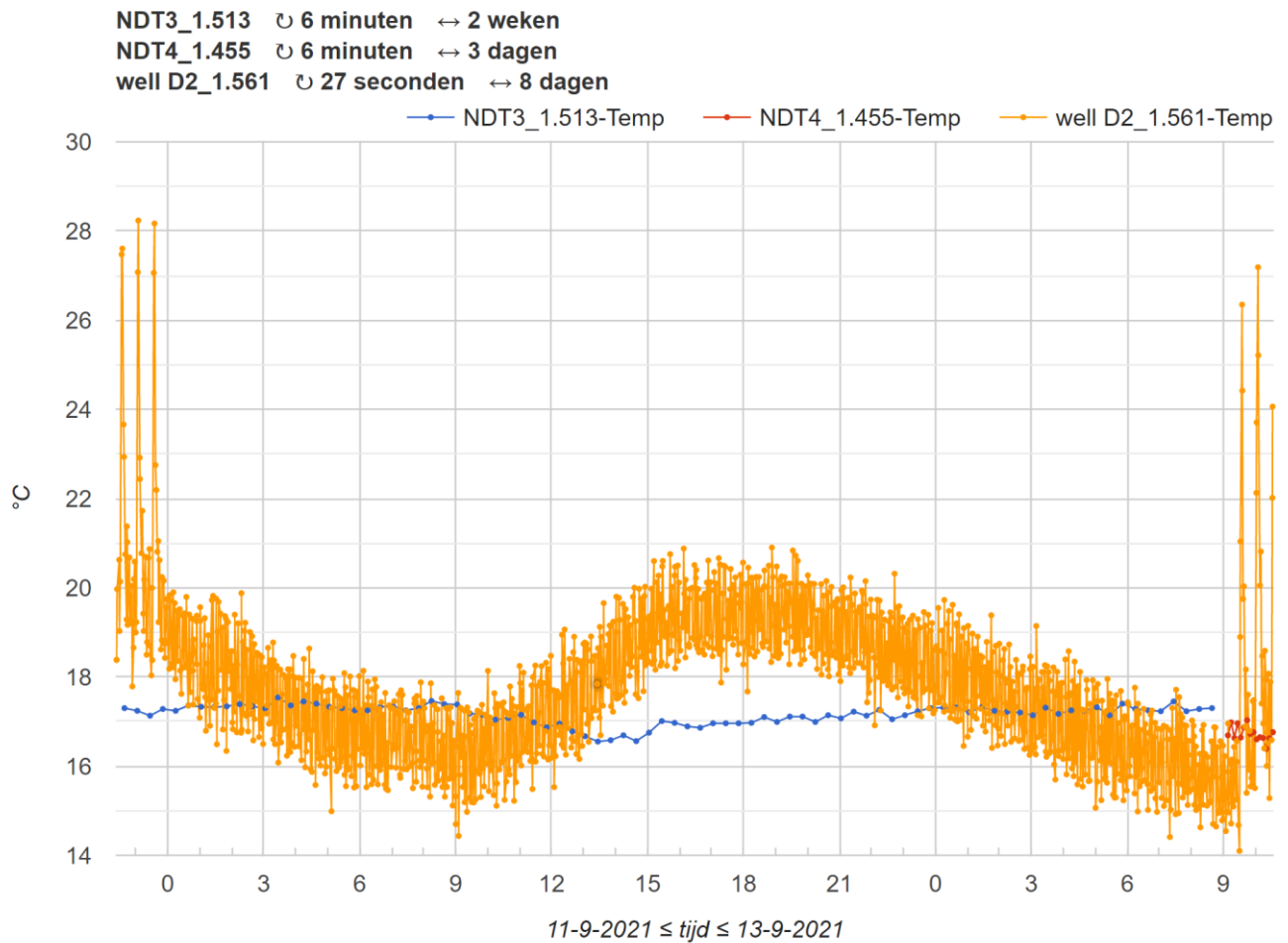
Verder is voor de beide uitvoeringstechnieken (glasvezel rechtstreeks in contact met grond versus in sondebuisje) geen invloed van de dag-nachtcyclus te zien. Er wordt aangenomen dat de gemeten temperaturen representatief zijn voor de grondtemperatuur. Voor de glasvezelkabels die rechtstreeks contact met de grond maken (of via het omstorte grout) wordt een vrij grote ruis waargenomen, waardoor het moeilijk is om te schatten of er een impact is van het al dan niet rechtstreeks meten in de grond.



Figuur 22 Temperatuur in functie van de tijd - Vergelijking tussen N2 en D1 op ca. 1.5 m NAP

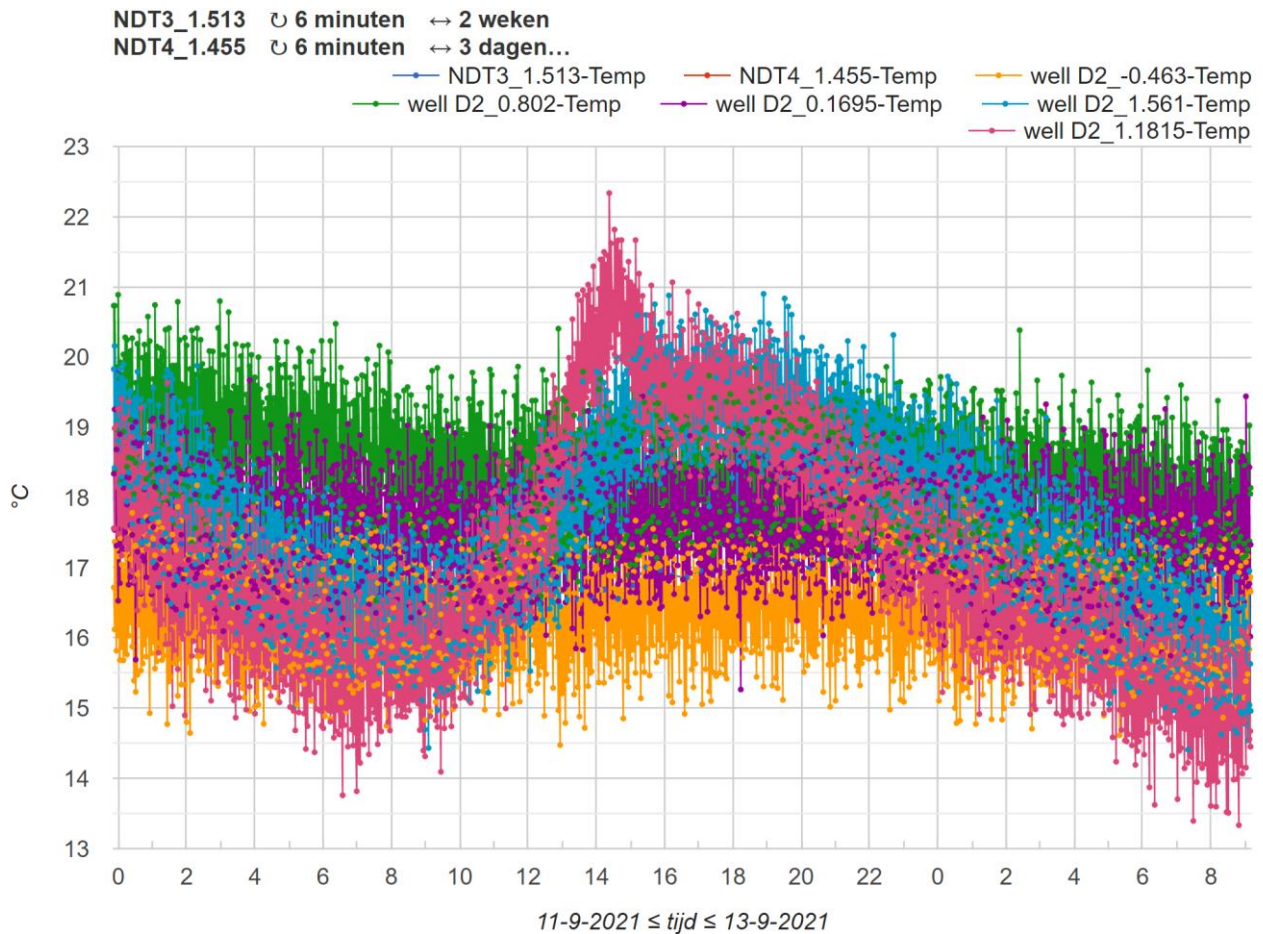
In Figuur 23 is de temperatuur weergegeven op ca NAP 1,5 m voor NDT3, NDT4 en D2. Tijdens de passieve meting in D2 is de temperatuur in sonderbuis NDT3 opgemeten, niet in NDT4. Ongeveer op het einde van de passieve meting, werd de glasvezelkabel naar sonderbuis NDT4 verplaatst.

Opvallend is de temperatuurstijging bij D2 van ca. 9 u tot 16 u en de temperatuurdaling vanaf ca. 20u tot 9u 's ochtends, wat zou kunnen overeenkomen met een invloed van de buitentemperatuur. Het lijkt nochtans weinig waarschijnlijk dat dit merkbaar zou zijn op een diepte van 1.5 m NAP (ca. 75 cm onder maaiveld), aangezien dit niet merkbaar is in de andere metingen.



Figuur 23 Temperatuur in functie van de tijd - Vergelijking tussen N3, N4 en D2 op ca. 1.5 m NAP

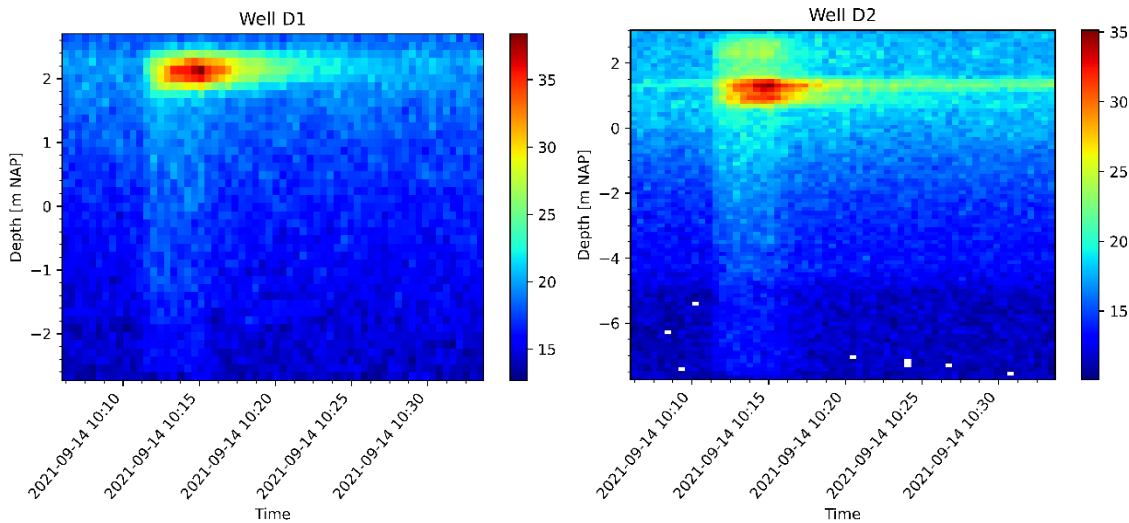
Om na te gaan of deze schommelingen aan de buitentemperatuur te wijten zijn, werd in Figuur 24 een gelijkaardige plot gemaakt, maar werden verschillende diepere meetpunten voor D2 toegevoegd. Bij de twee hoge meetpunten (ca. NAP 1,5 m en NAP 1,18 m) is de temperatuurfluctuatie sterk aanwezig. Bij de twee diepere meetpunten (0.80 en 0.17 m NAP) lijkt de fluctuatie uitgedempt te zijn.



Figuur 24 Temperatuur in functie van de tijd - Vergelijking tussen N3, N4 op ca. 1.5 m NAP en D2 op verschillende dieptes

5.3.2 Invloed gebruik van grout rond de glasvezelkabel

Uit een eerste vergelijking tussen de glasvezelkabel geplaatst zonder grout D1 en met grout D2 is te zien dat de temperatuur langer wordt vastgehouden in de situatie met grout. Met name in het ondiepe deel rond de 1 meter is dit terug te zien. Wellicht komt dit doordat het grout daar niet in contact is met het grondwater, anderzijds zou dit kunnen komen doordat het fijne materiaal de warmte minder goed kan afgeven dan een zand skelet (zie Figuur 25).



Figuur 25 Opwarm curves voor locaties D1 zonder grout en D2 met grout.

5.3.3 Invloed pipe - detecteerbaar achter de sloot

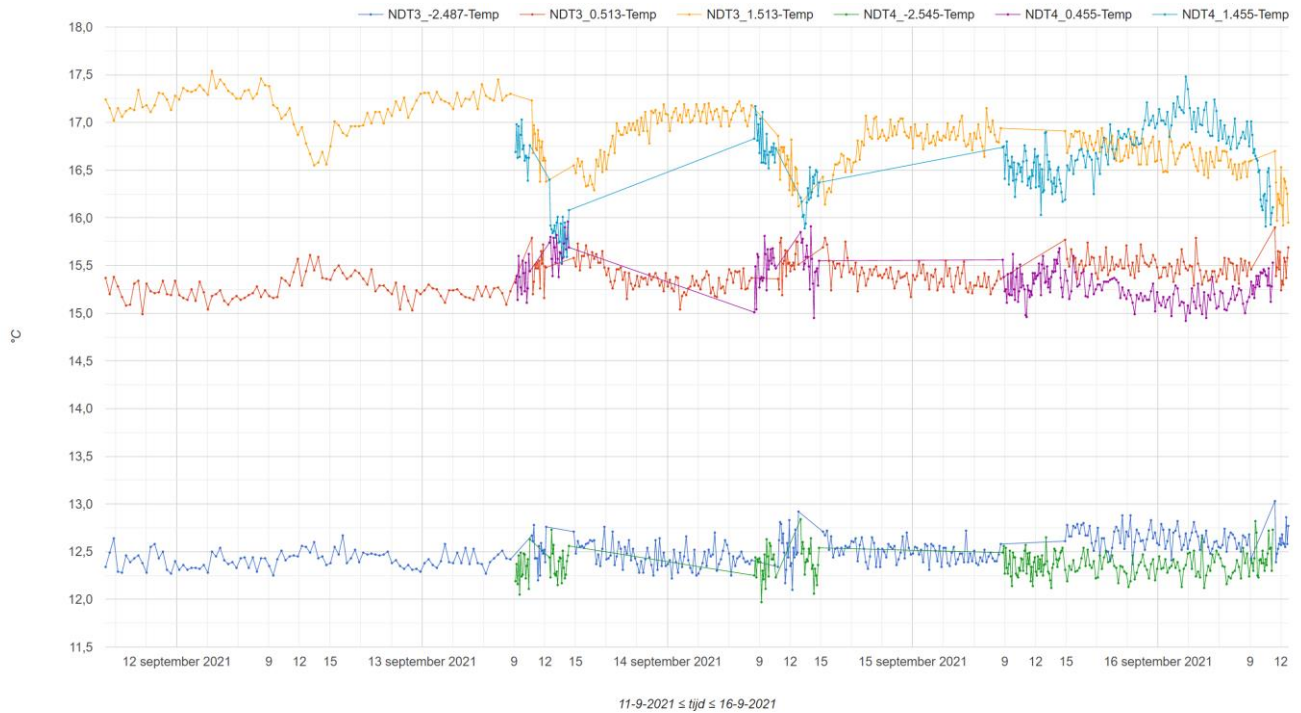
Tijdens de proef werden er door afdeling Geotechniek gemeten met 2 kabels. De eerste kabel werd voornamelijk gebruikt in NDT1 en NDT2. (Enkel tussen 15/09 14:54 en 16/09 9:06 werd deze kabel gebruikt in NDT3.) Hierdoor wisselen de metingen elkaar af tussen NDT1 en NDT2.

In Figuur 26 is het temperatuursverloop te zien op verschillende dieptes. Op basis van de overige monitoringstechnieken en het uitgraven van de pipe is bekend dat de pipe zich ontwikkeld heeft op een diepte van ca. 0.5 m NAP. Om die reden werd in Figuur 26 het verloop voorgesteld op ong. 0.5 m NAP en werd dit vergeleken met een hogere en lagere diepte om eventuele trendverschillen te identificeren. Over de timing van de pipevorming is bekend dat de wel van waaruit uiteindelijk de pipe is gegroeid, actief werd rond 17:00 op 13 september. De eerste aanwijzingen voor horizontale pipeontwikkeling in de WSM-data is er op 15 september rond 15:00. Op het eerste zicht is er geen indicatie van verandering van temperatuur door een mogelijke pipevorming. Op zich is het niet vreemd dat de pipe niet opgemerkt wordt voorbij de sloot, en volgt dit ook de verwachting.



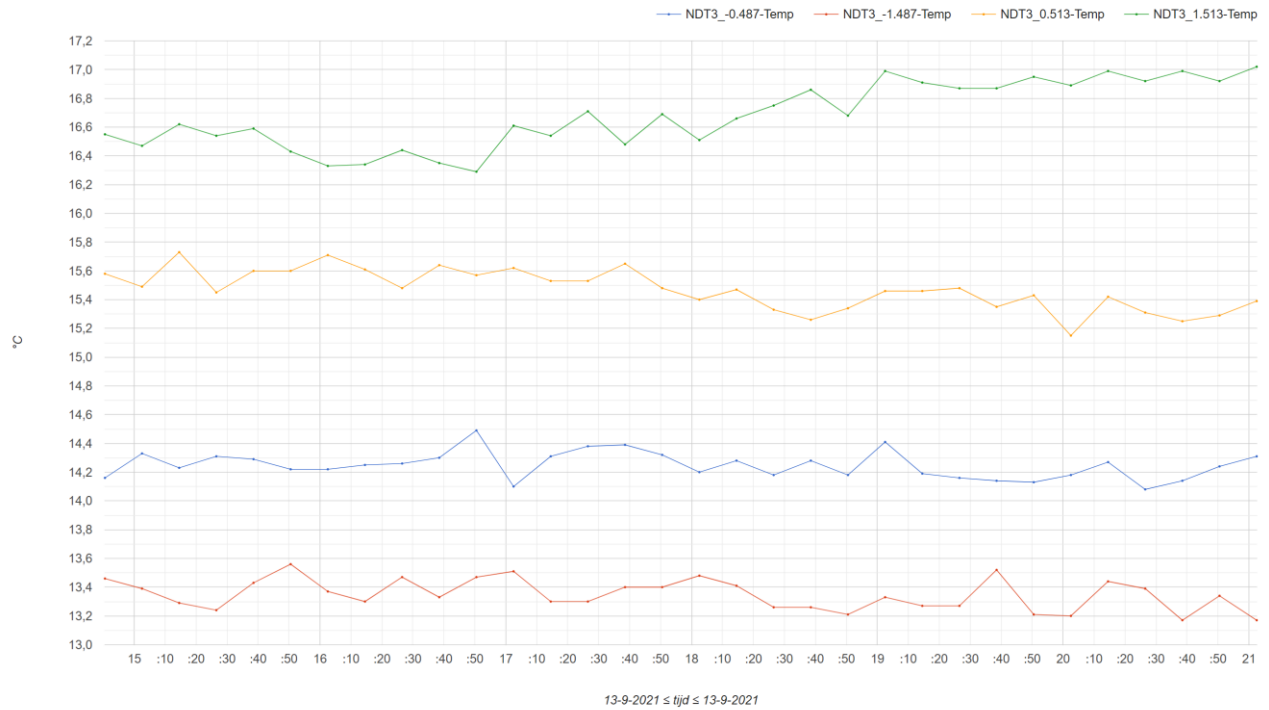
Figuur 26 – Temperatuurtrend op verschillende dieptes t.h.v NDT1 en NDT2

De 2^{de} kabel werd gebruikt in NDT3 en NDT4 zoals weergegeven in Figuur 27. Enkel tussen 15/09 14:54 en 16/09 9:06 werden zowel kabel 1 als 2 gebruikt bij NDT3 en NDT4. Het temperatuursverloop werd op verschillende dieptes uitgezet. De metingen op diepte 1,513 m NAP en 1,455 m NAP hebben mogelijk nog invloed van de buitentemperatuur. Ook hier is geen duidelijke indicatie van temperatuurswijziging door piping.

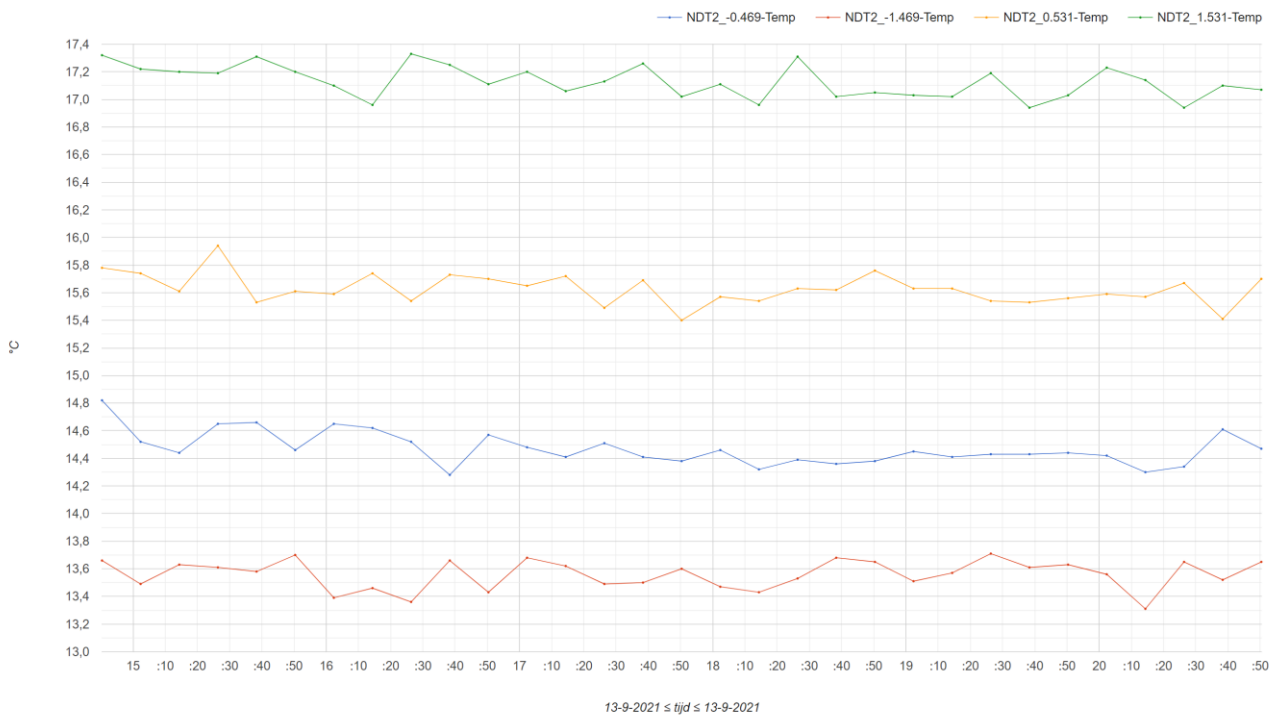


Figuur 27 - Temperatuurtrend op verschillende dieptes t.h.v NTD3 en NDT4

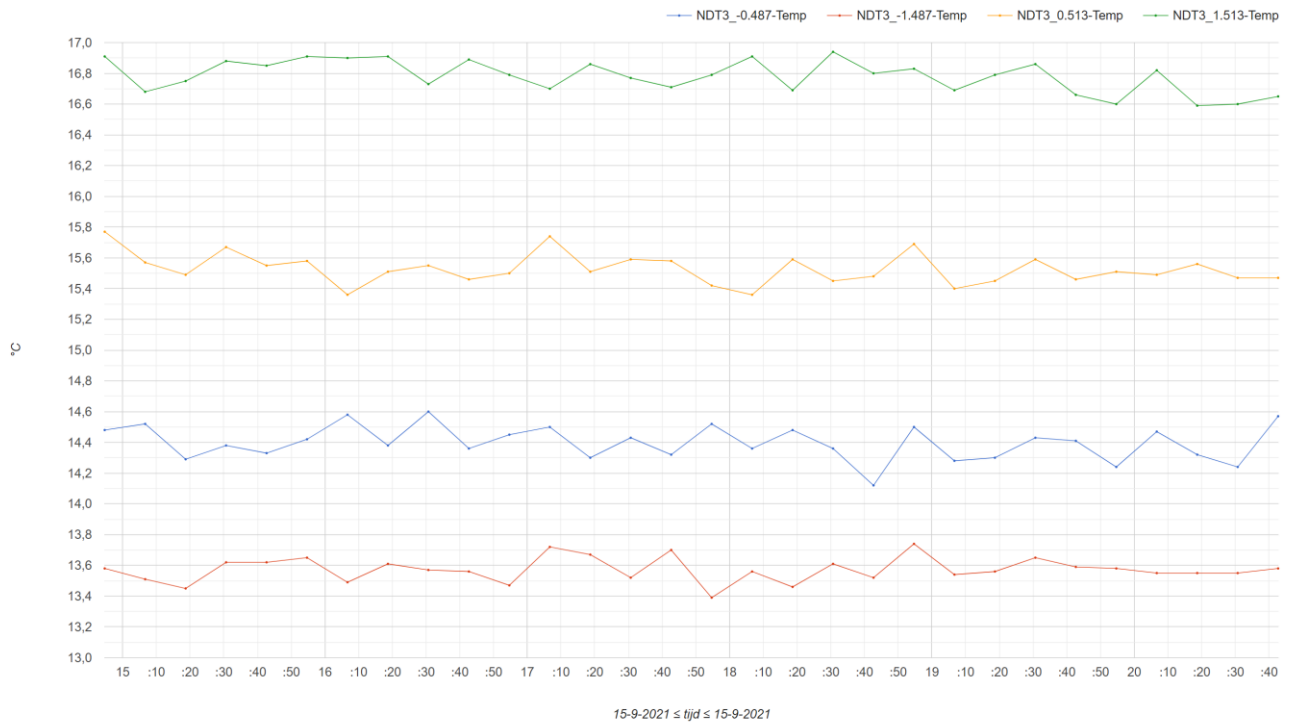
In de volgende 4 grafieken (Figuur 28 t.e.m. Figuur 31) hebben we op 2 tijdszones ingezoomd waar een cruciale fase van de piping is ontstaan. Dit gaat over 13/09/2021 om 17 uur bij het ontstaan van de wel en 15/09/2021 om 15 uur bij de ontwikkeling van horizontale pipe. En dit telkens voor beide kabels. Er is geen temperatuurswijziging t.g.v. een eventuele pipe waar te nemen, wat ook te verwachten is gezien de ligging achter de uittredesloot.



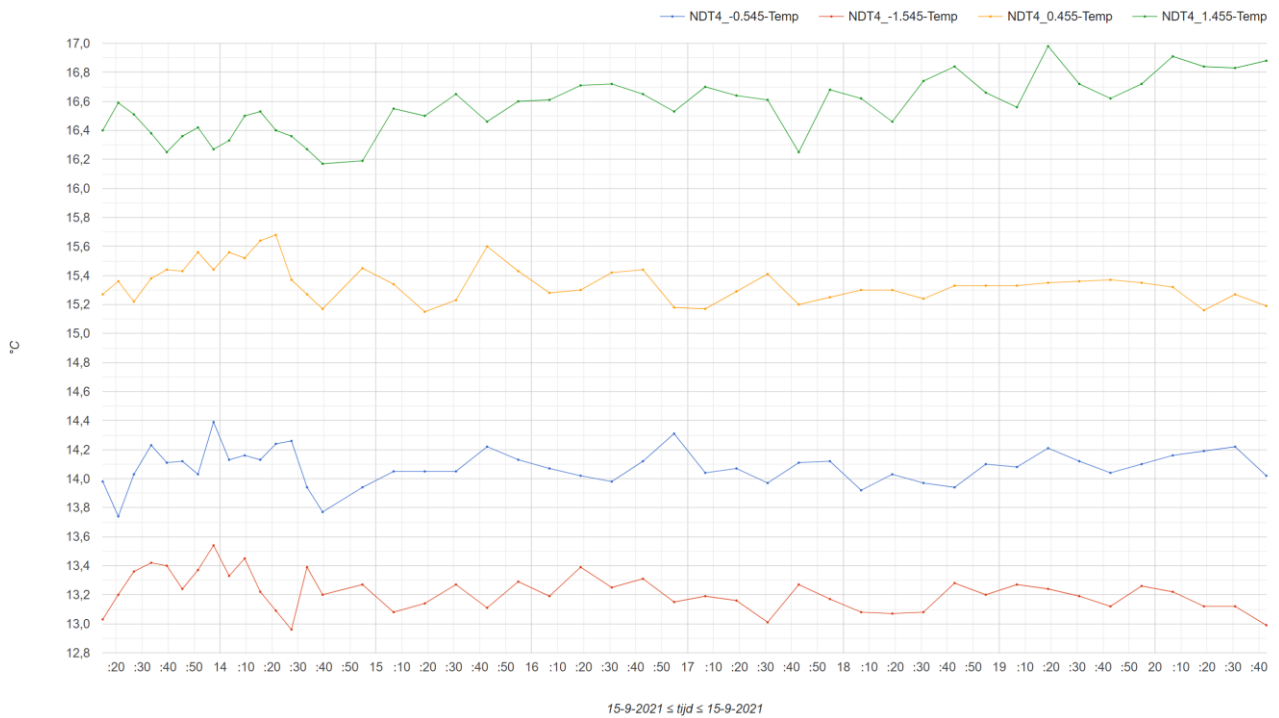
Figuur 28 – Meting door kabel 2 bij ontstaan van de well



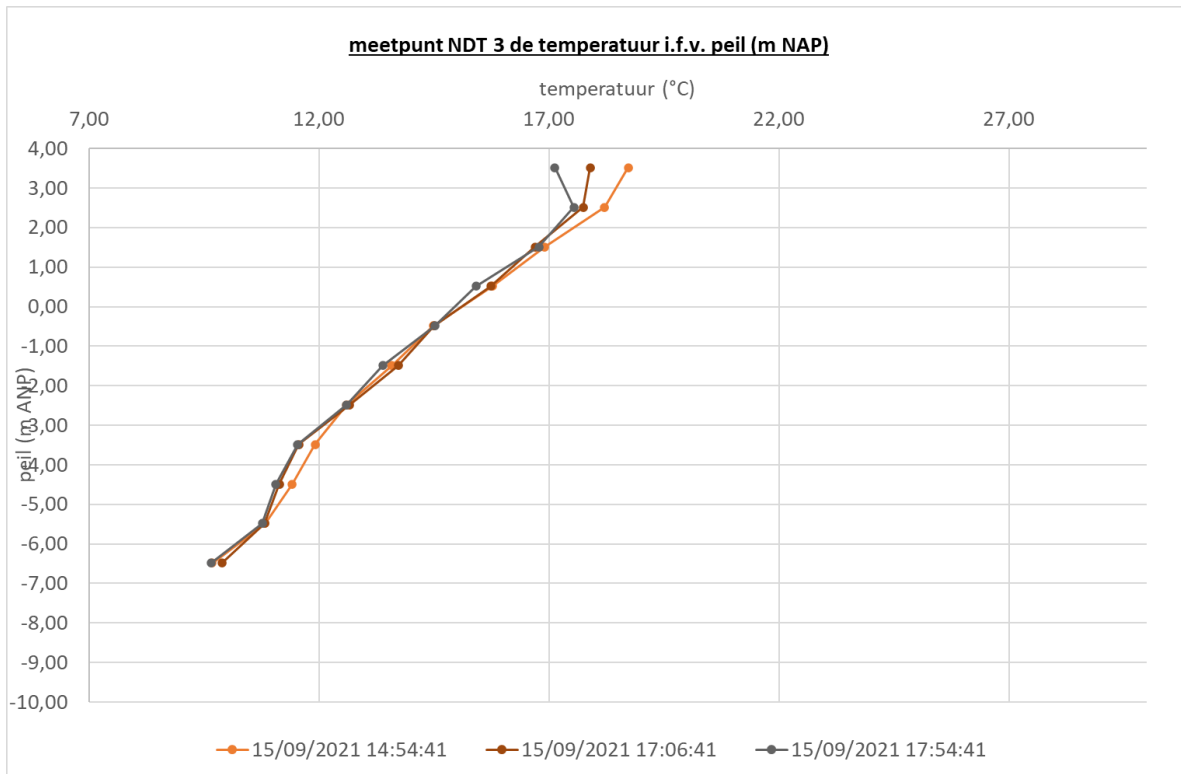
Figuur 29 – Meting door kabel 1 bij ontstaan van de well





Figuur 30 – Meting door kabel 1 bij ontwikkeling van horizontale pipe



Figuur 31 – Meting door kabel 2 bij ontwikkeling van de horizontale pipe



Figuur 32 temperatuur i.f.v. diepte voor kabel 1

 	Analyse-rapport Temperatuurmetingen	A-GEO-PP03-3.1 versie 05
	GEO-18/112-001-revA Deltaresproject 11204565	Pagina 35 van 49

6 CONCLUSIE

In de conclusie worden de onderzoeksvragen beantwoord.

Kunnen we het optreden van piping detecteren door temperatuurmetingen uit te voeren en tot op welke afstand van de metingen is piping detecteerbaar?

Het optreden van piping kan door temperatuurmetingen worden aangetoond, al is deze toepassing nog in ontwikkeling. Een aantal conclusies zijn:

- Uit de AH-DTS maximale temperaturen is voor de locatie C6 de pipe te detecteren nadat bekend was geworden wat de locatie was van de pipe.
- Meer meetpunten zou de kans groter maken dat de pipe gedetecteerd wordt.
- Aan de hand van een op te zetten grondwatermodel en de geanalyseerde stroomsnelheidsmetingen uit de dataset zou het mogelijk moeten zijn om een afstandsrelatie te bepalen.



Hoe evolueert de temperatuurmeting in functie van de ontwikkeling van de pipe?

- Uit de AH-DTS maximale temperaturen is voor de locatie C6 de aanwezigheid van een pipe te detecteren. Ten tijde van het actief zijn van de pipe is een afname in maximale temperatuur te zien van 1 graad ten opzichte van voor de pipe-ontwikkeling. Het moment dat de temperatuur naar beneden gaat komt overeen met de analyse van de WSM-data.
- In de afleiding van de hellingshoek van de afkoelcurve is dit niet terug te zien.

Hoe vergelijkt de meettechniek van de afdeling Geotechniek door een holle sondeerbuis (afdeling Geotechniek) en een glasvezel rechtstreeks in contact (Deltares/Fugro) met de grond of met grout?

In het algemeen heeft de configuratie van de glasvezelsetup, de lengte van de glasvezels, de acquisitie tijd en de kalibratie grote invloed op metingen. Door het kiezen voor een AH-DTS setup met meerdere locaties was het nodig om de glasvezelkabels met elkaar te verbinden. Tijdens de installatie in het veld zijn ook een aantal opwarmkabels beschadigd. Hierdoor kon de vooraf gewenste aanpak niet geheel worden toegepast. Een degelijke vergelijking van de verschillende installatietechnieken is niet eenvoudig, aangezien ook verschillende meettechnieken werden toegepast (active heating versus passief opmeten). Hierdoor kon de vergelijking slechts gebeuren in een beperkt tijdsinterval, waarin overal passief werd opgemeten. Ook die vergelijking was moeilijk, omwille van de relatief grote ruis op de meetdata van de glasvezels die rechtstreeks in de grond zitten.

- In eerste instantie lijkt het erop dat de verschillende meettechnieken vergelijkbare meetresultaten geven.
- Uit een eerste analyse volgt dat de warmte langer wordt vastgehouden bij een glasvezelkabel die omhuld wordt met grout.

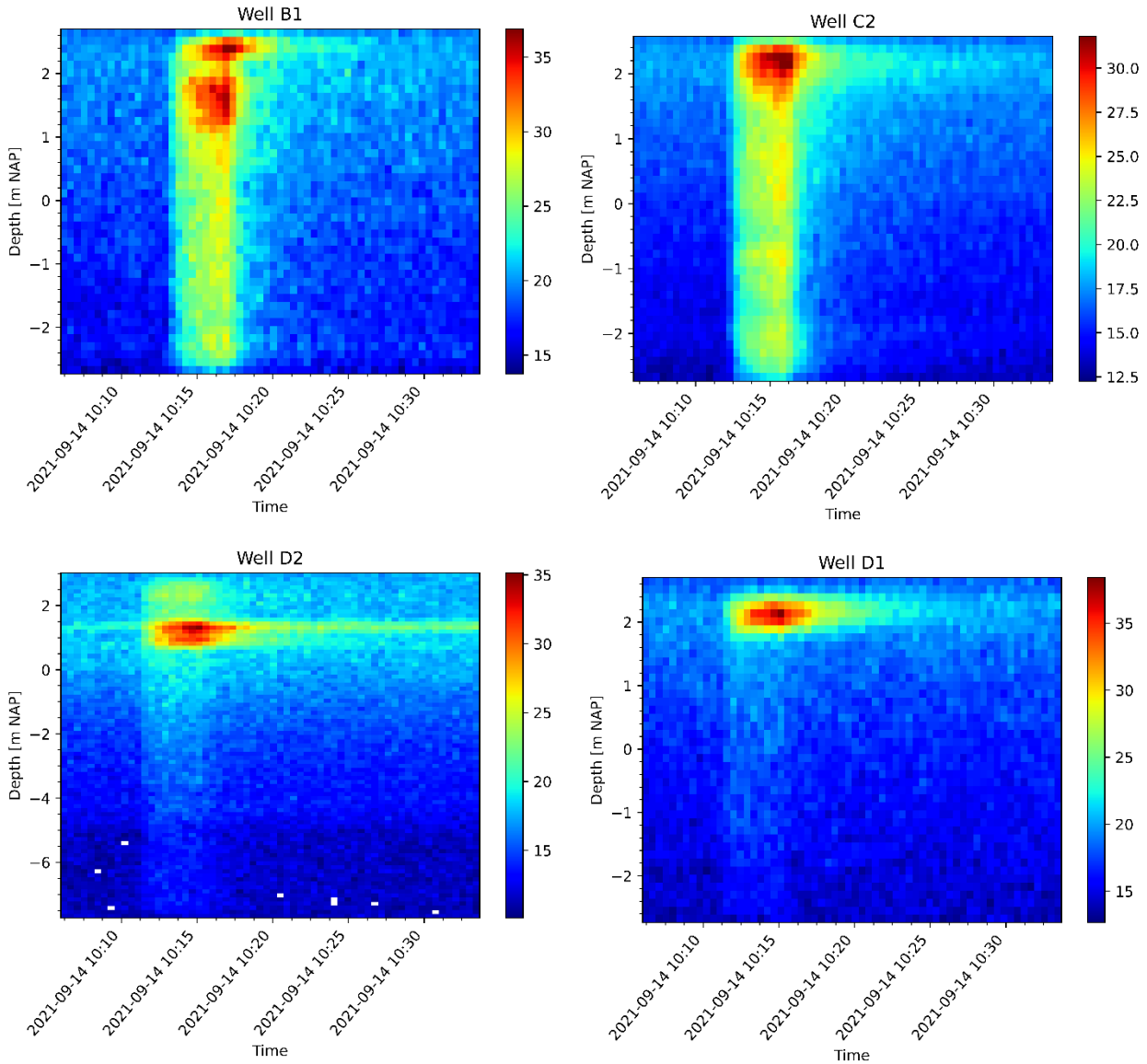
 	Analyse-rapport Temperatuurmetingen	A-GEO-PP03-3.1 versie 05
	GEO-18/112-001-revA Deltaresproject 11204565	Pagina 36 van 49

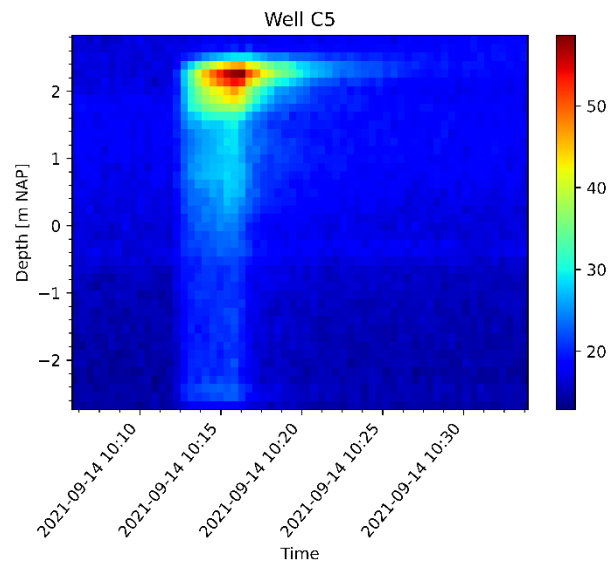
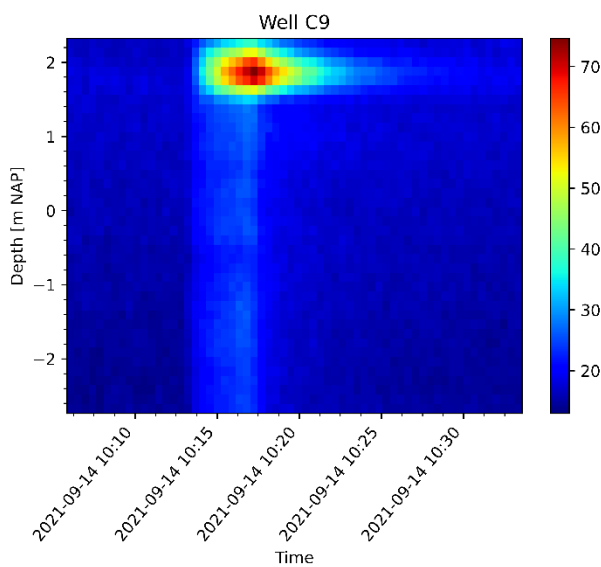
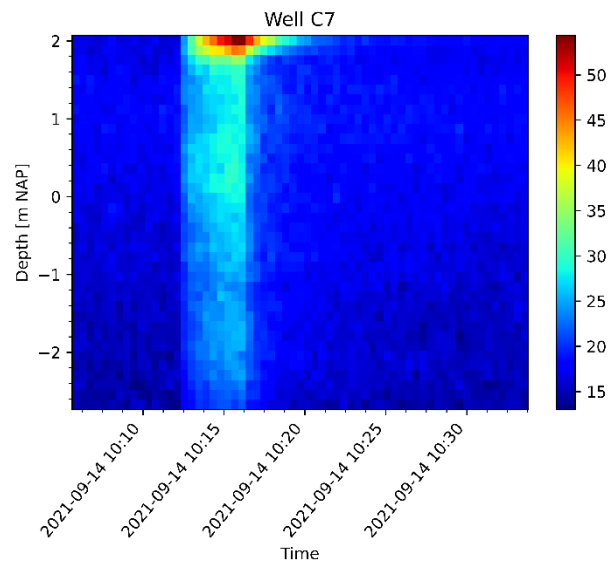
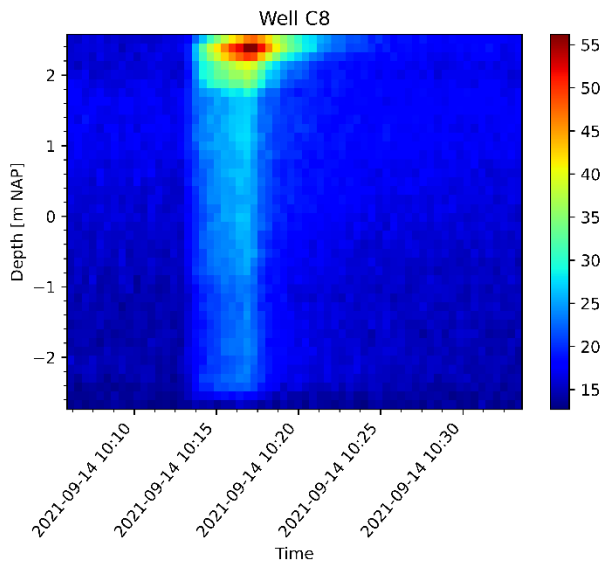
Referenties

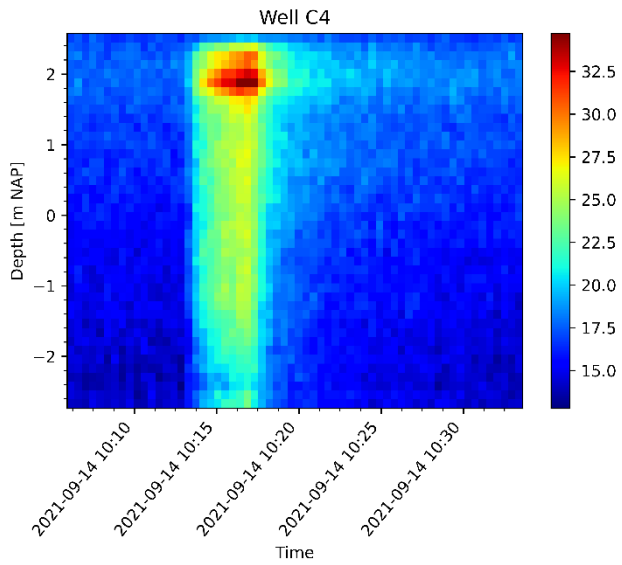
des Tombe, B., Schilperoort, B., & Bakker, M. (2020). Estimation of Temperature and Associated Uncertainty from Fiber-Optic Raman-Spectrum Distributed Temperature Sensing. *Sensors*, 20(8), 2235. <https://doi.org/10.3390/s20082235>

Wiecher Bakx 1,2,* , Pieter J. Doornenbal 3 , Rebecca J. van Weesep 4 , Victor F. Bense 5 , Gualbert H. P. Oude Essink 3,6 and Marc F. P. Bierkens . Determining the Relation between Groundwater Flow Velocities and Measured Temperature Differences Using Active Heating-Distributed Temperature Sensing. *Water*, 2019 <https://doi.org/10.3390/w11081619>

7 BIJLAGE OPWARM CYCLI PER LOCATIE

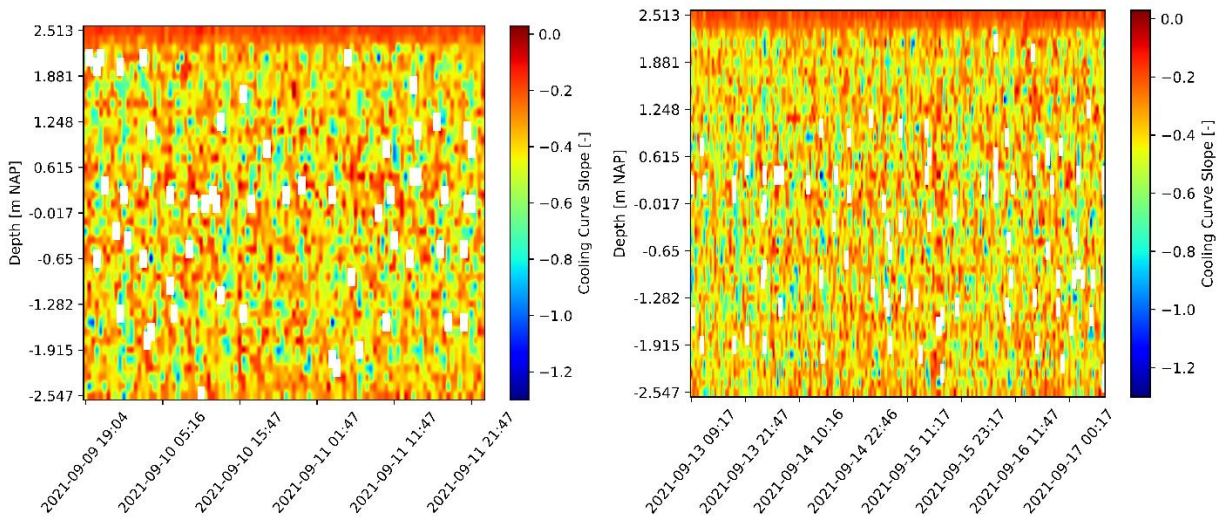




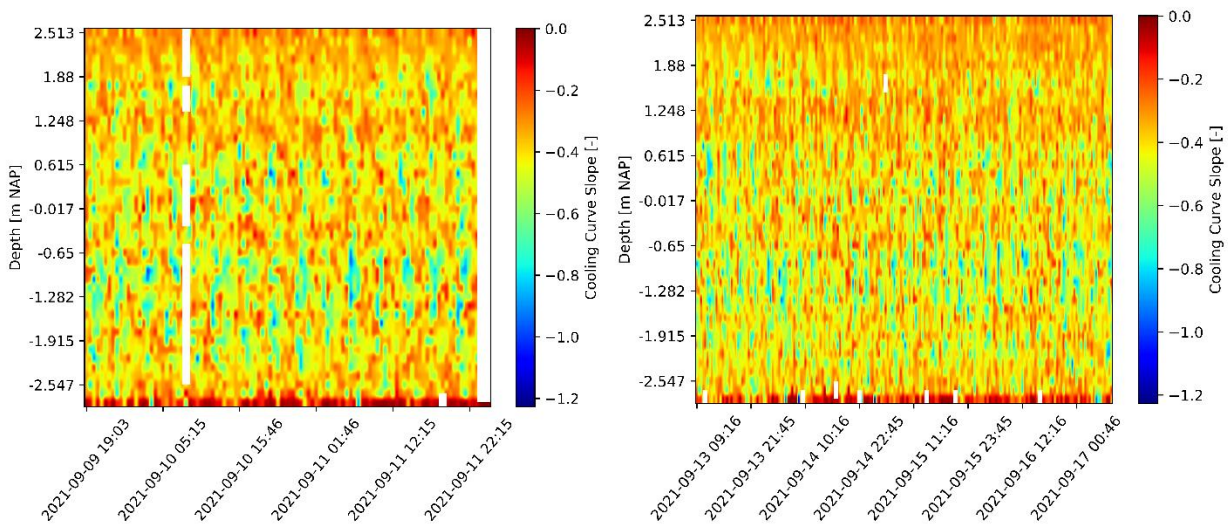


8 BIJLAGE B AFKOELCURVES VOOR EN TIJDENS DE PROEVEN

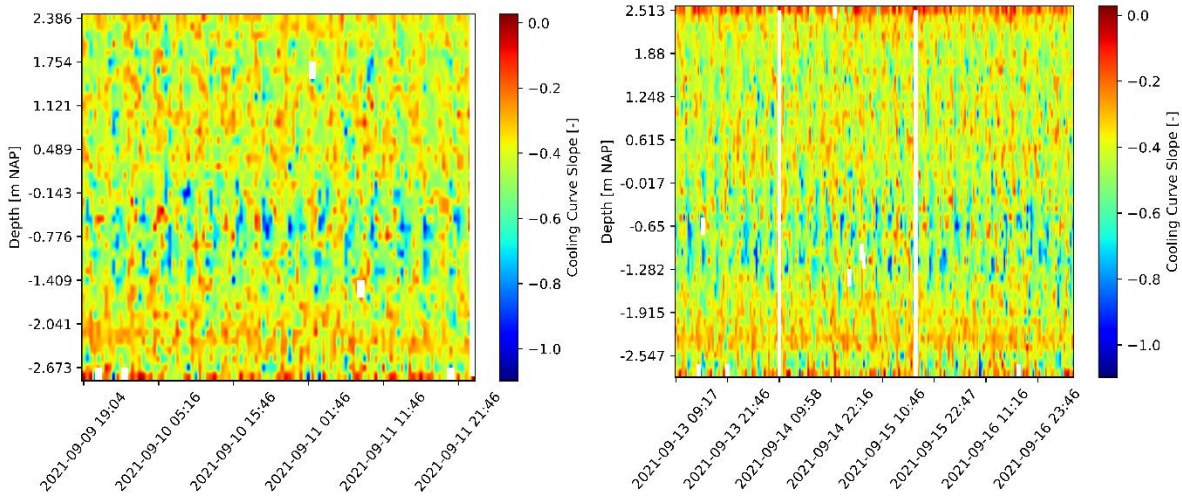
B1



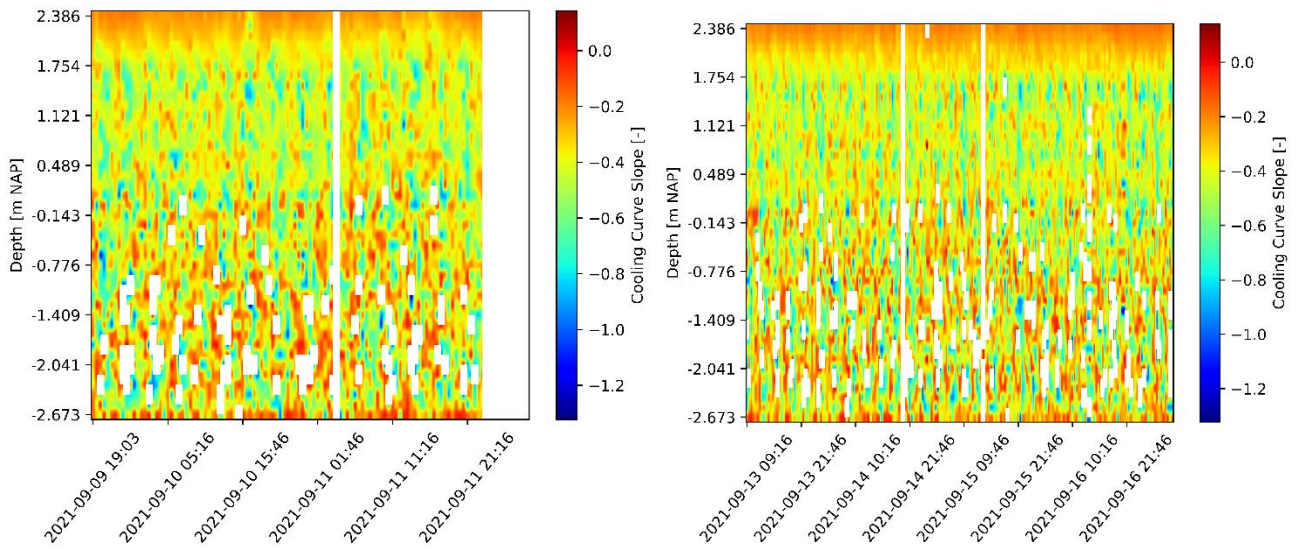
C2



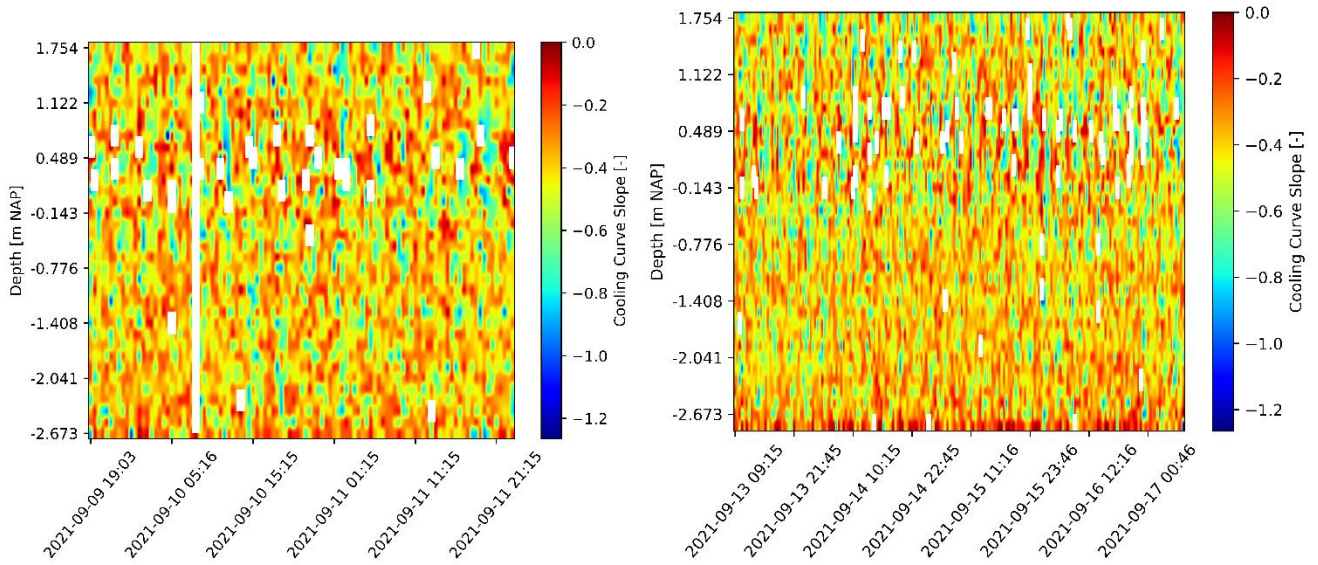
C4



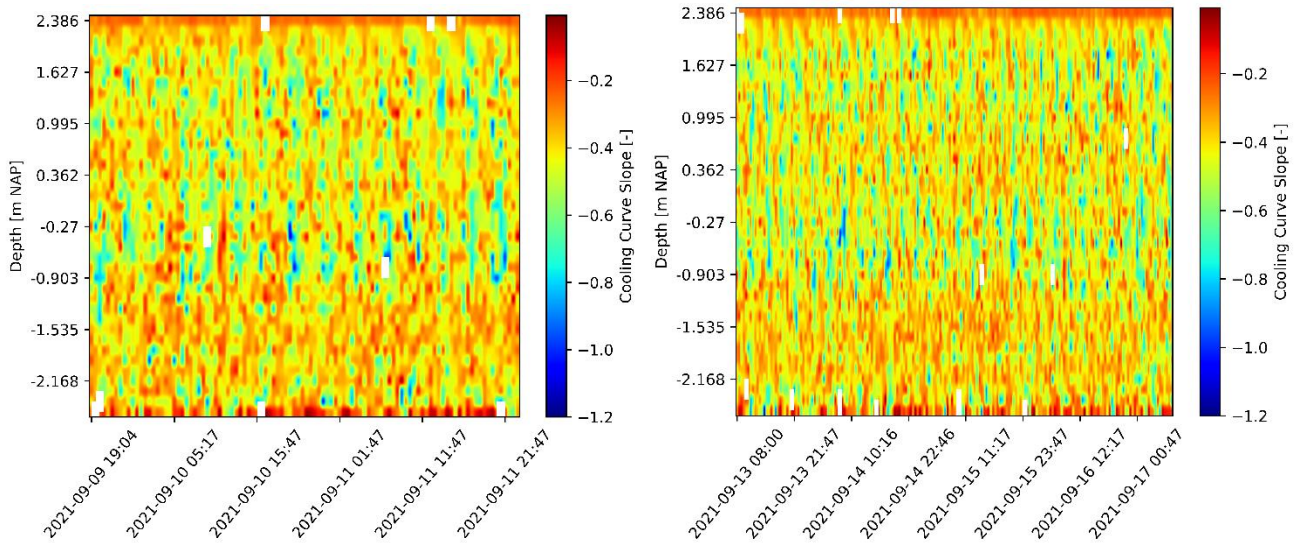
C5

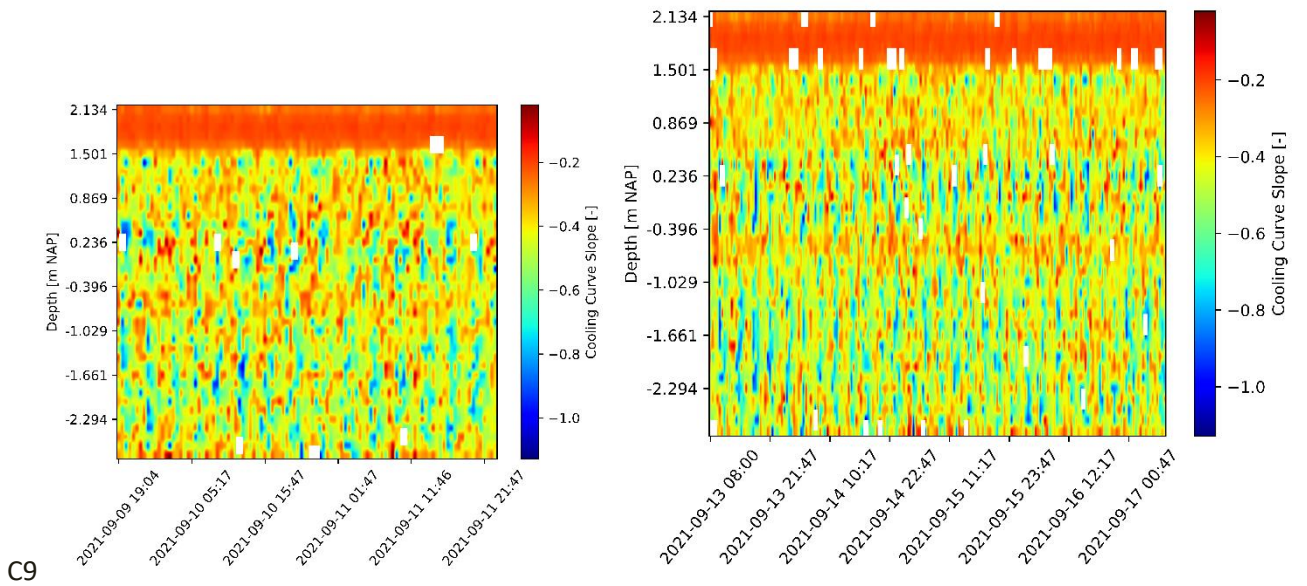


C7

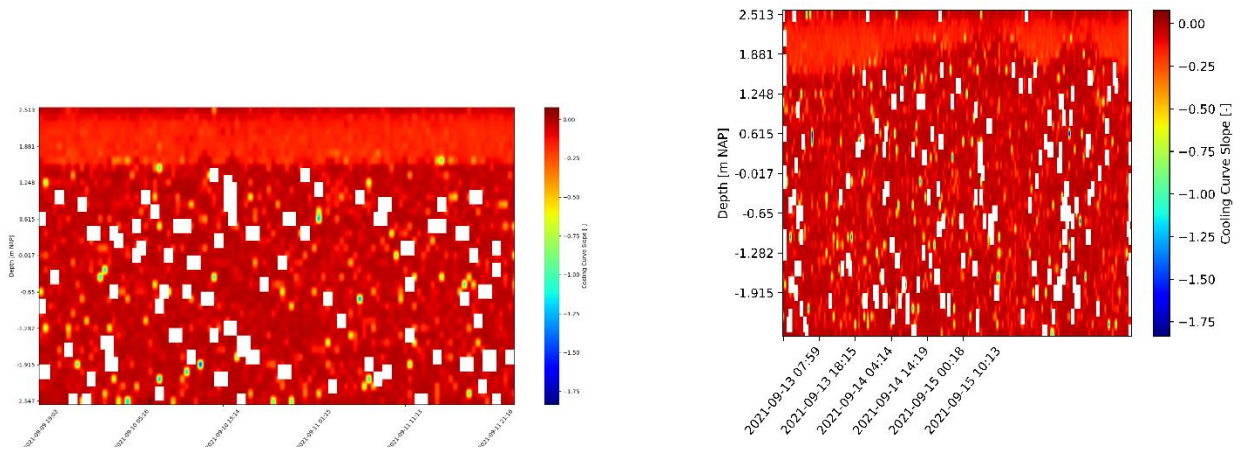


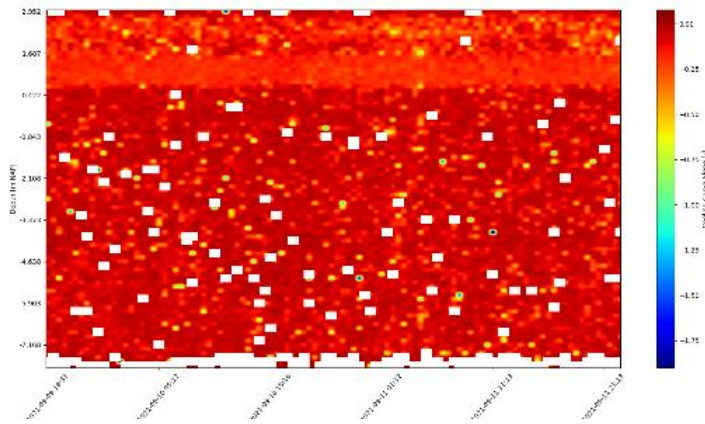
C8



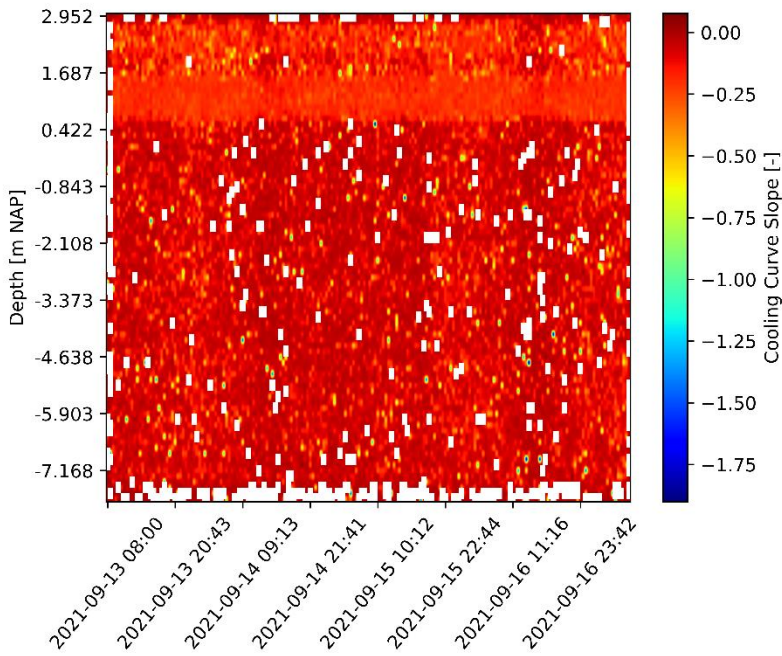


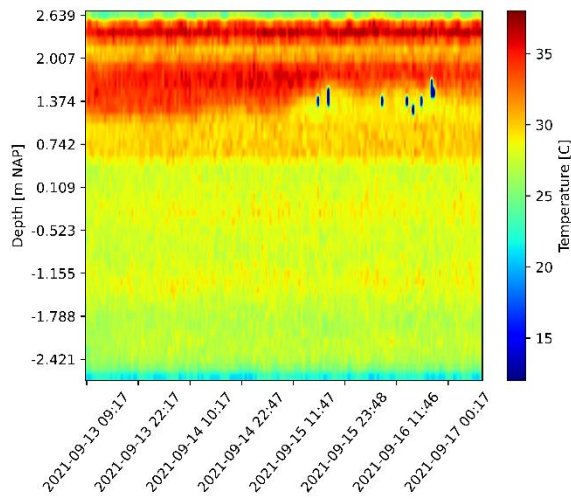
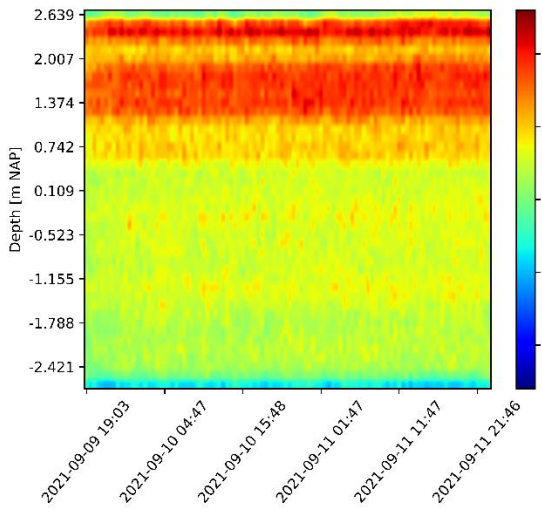
D1



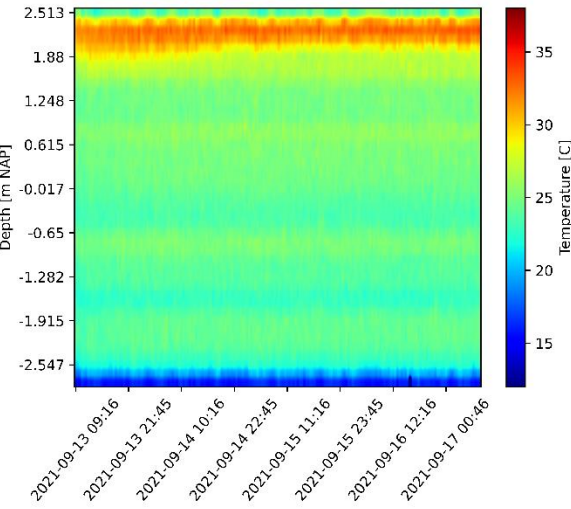
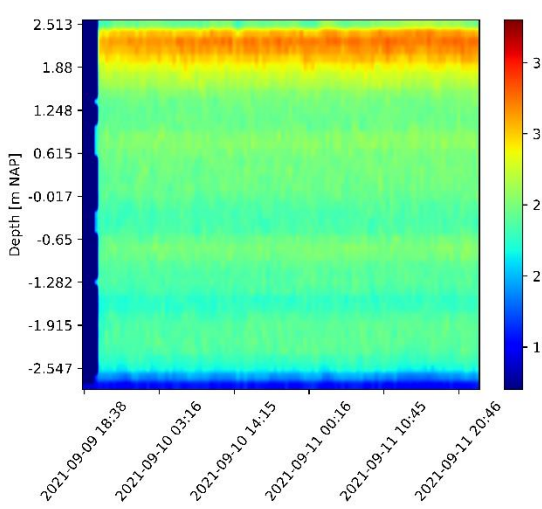


D2

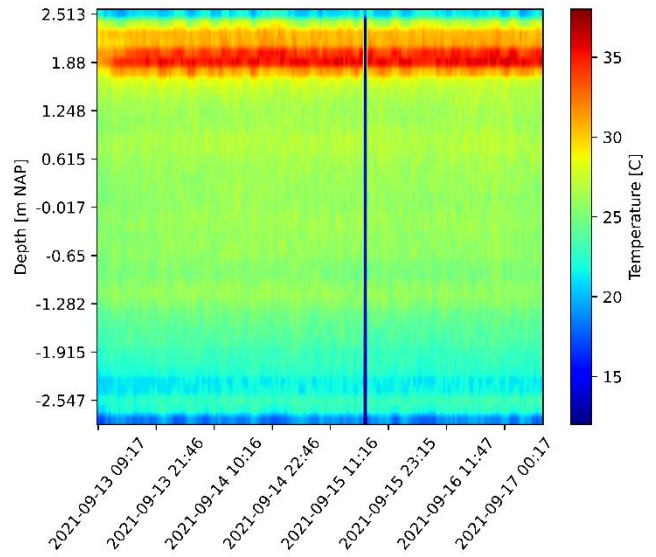
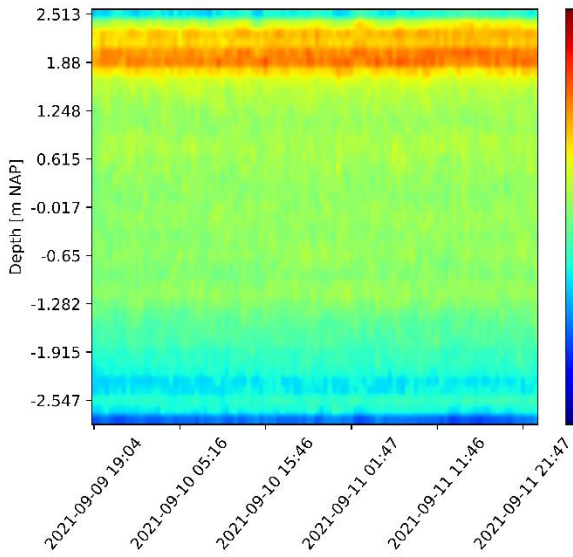




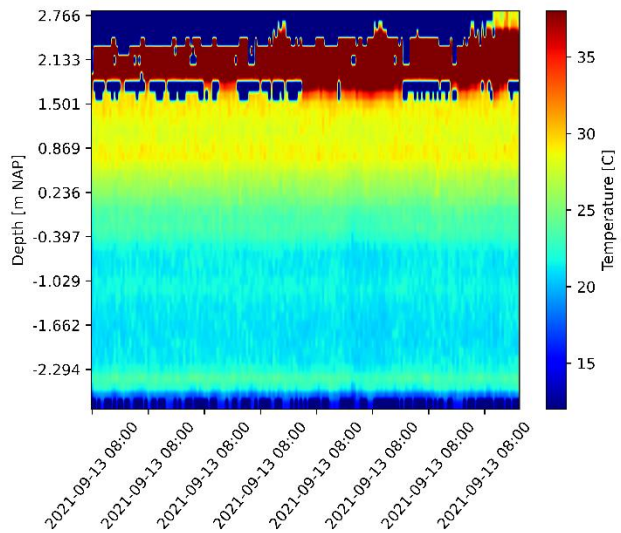
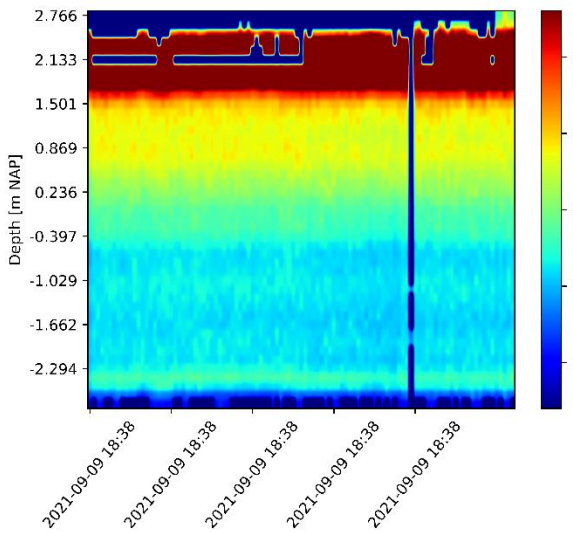
B1



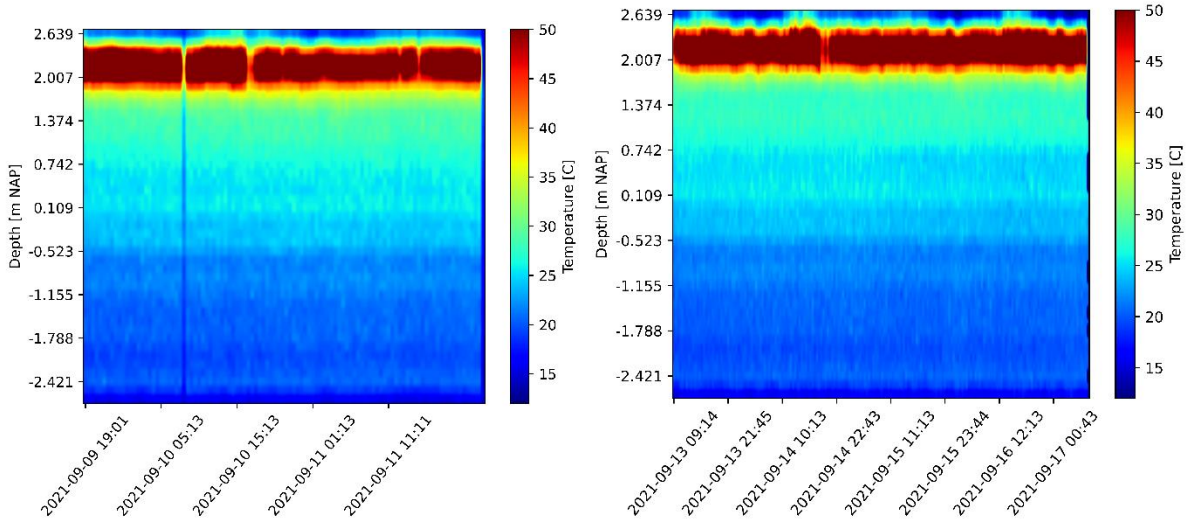
C2



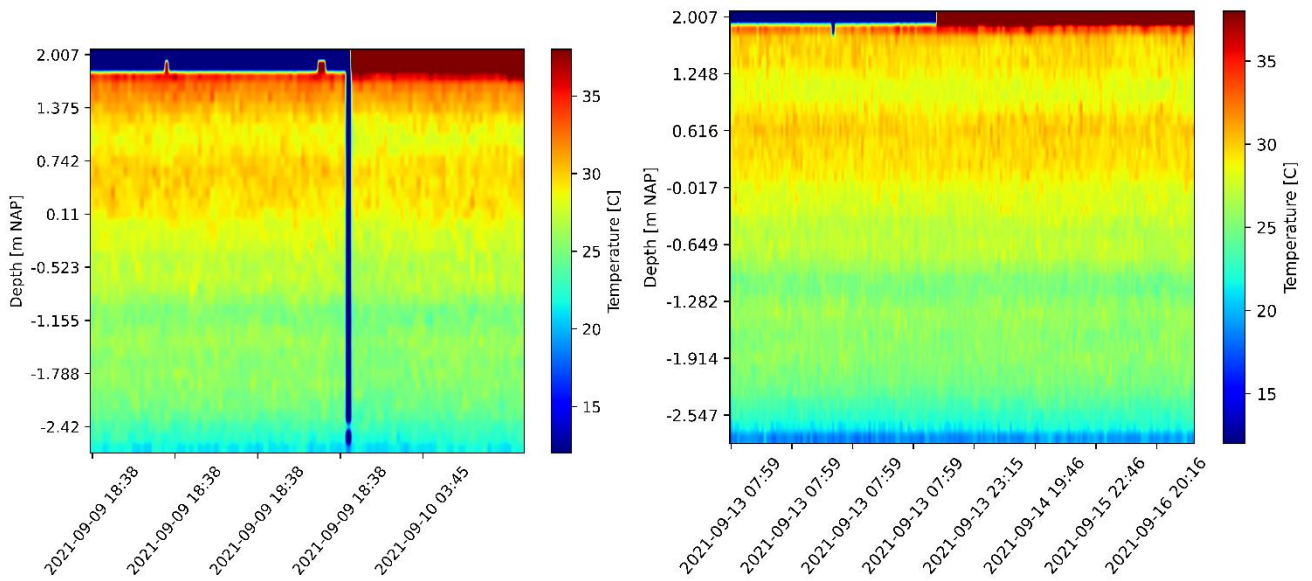
C4



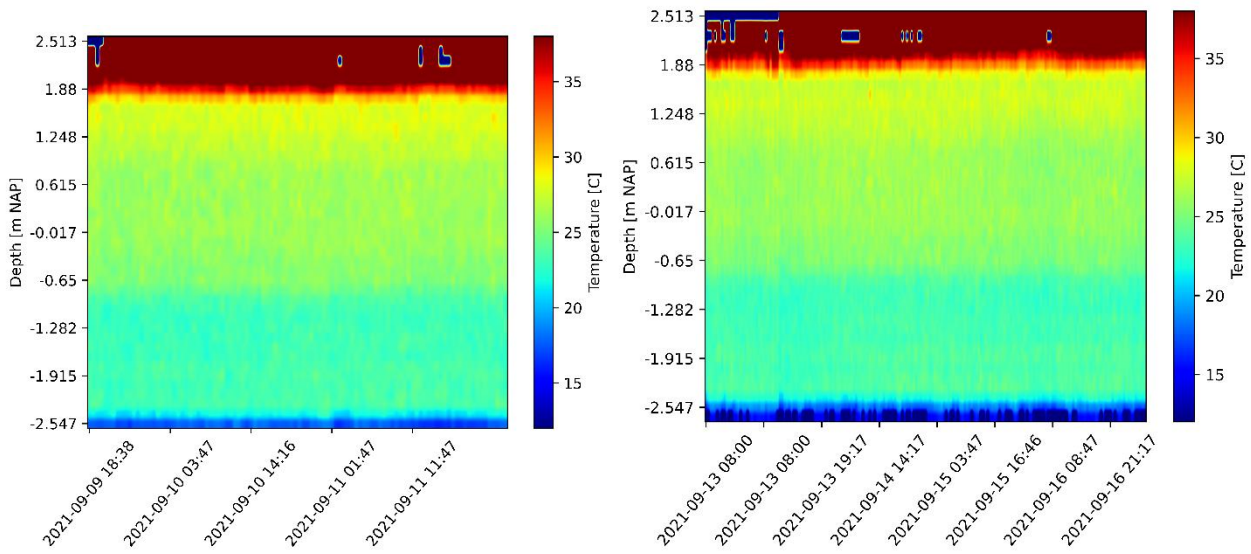
C5



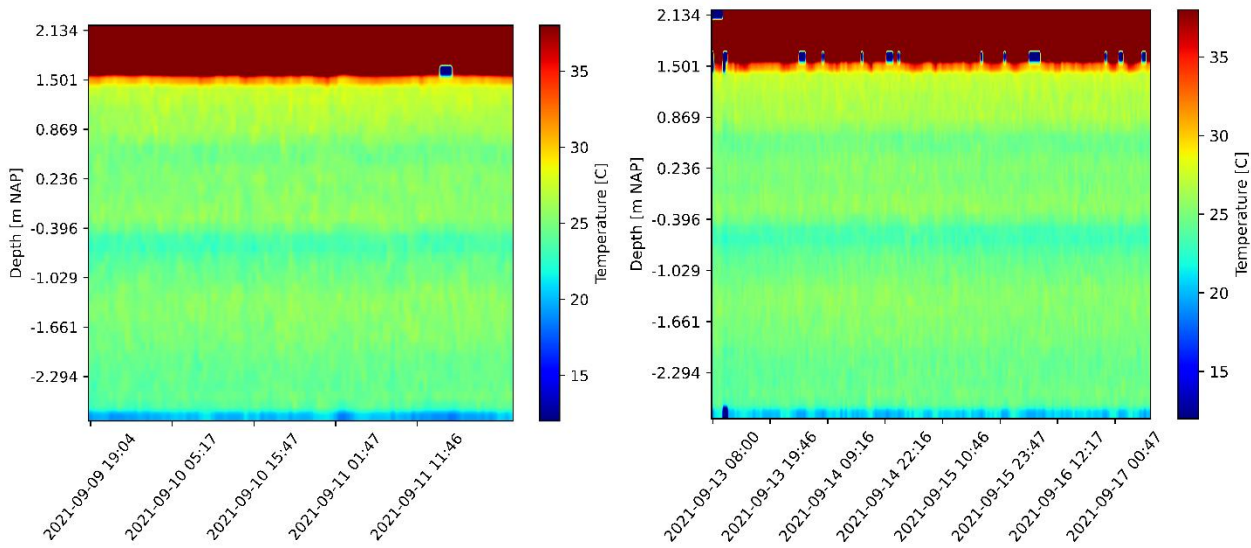
C6



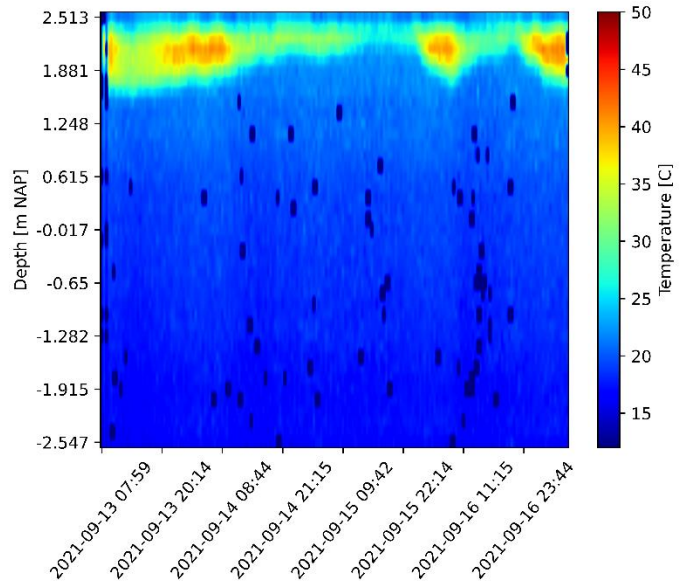
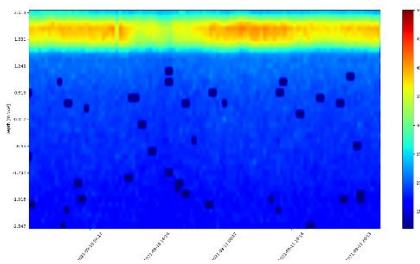
C7



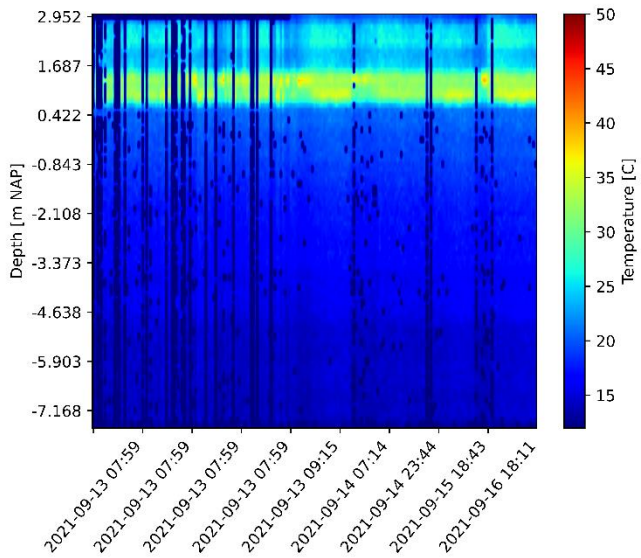
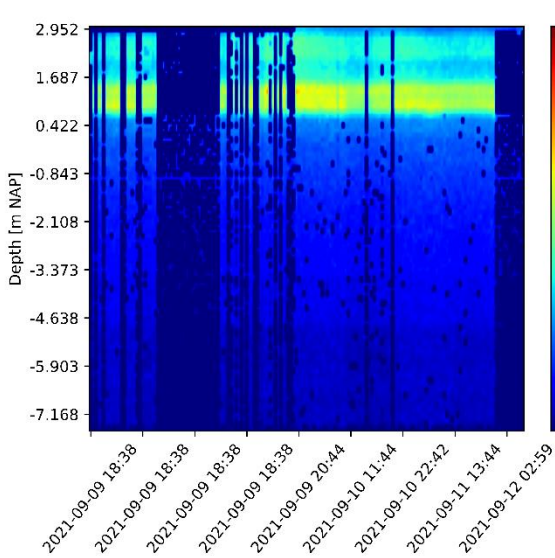
C8



C9



D1



D2

Appendix F

Achtergrondrapportage
stromings- en pipinganalyse



Piping in getijdenzand - Hedwigeproject

Stromings- en pipinganalyse

1220-164143 31 August 2022

V1.0

Waterschap Hollandse Delta

Documentbeheer

Documentgegevens

Projectnaam	Piping in getijdenzand - Hedwigeproject
Documentnaam	Stromings- en pipinganalyse
Documentnr.	Fugro project 1220-164143 / Deltares project 11204565
Versienummer	1.0
Opgesteld door	Deltares & Fugro NL Land B.V. &

Klantgegevens

Klant	Waterschap Hollandse Delta
Adres klant	Postbus 41 03, 2980 GC RIDDERKERK
Contactpersoon klant	Hans de Bart
Documentnr. klant	n.v.t.

Versiebeheer

Versie	Datum	Status	Omschrijving	Opgesteld door	Gecontroleerd door	Goedgekeurd door
1.0	31-8-2022	Concept ter controle	Definitief concept	VVB	GRG/MPH/NP/LVL	GRG/MB

Projectteam

Initialen	Naam	Rol / functie
VVB	Vera van Beek	Senior Adviseur / Onderzoeker Waterkeringen (Deltares)
MPH	Marc Hijma	Expert geoloog en projectleider (Deltares)
GRG	Gert-Ruben van Goor	Senior adviseur / projectmanager Waterbouw (Fugro)
LVL	Lisa van der Linde	Adviseur Waterbouw (Fugro)
NP	Noor Pruijn	Adviseur Waterveiligheid (WSHD)
MB	Maaïke Blauw	Afdelingshoofd Toegepaste Geologie en Geofysica (Deltares)

Inhoudsopgave

Documentbeheer	ii
Inhoudsopgave	i
1. Analyse grondwaterstroming	1
1.1 2D analyse	1
1.2 Geometrie en laagopbouw	1
1.3 Randvoorwaarden en observaties	5
1.4 Vak Noord	6
1.5 Vak Zuid	16
1.6 Samenvatting 2D analyse grondwaterstroming	22
1.7 3D analyse DgFlow	22
2. Analyse piping	28
2.1 Observaties en kritiek verval tijdens de proeven	28
2.2 2D analyse	29
2.3 3D analyse	33
2.4 Samenvatting	49
Appendix A Effect van drukval in opbarstkanaal op 3D berekening	0

1. Analyse grondwaterstroming

1.1 2D analyse

Er zijn 2D berekeningen uitgevoerd met Plaxis en DgFlow om vast te stellen voor welke opbouw van de ondergrond en doorlatendheid de beste fit wordt verkregen met de gemeten waterspanningen en debieten. De keuze voor twee modellen was gebaseerd op praktische redenen: met beide modellen kunnen grondwaterstromingsberekeningen worden gemaakt, bij Fugro is meer ervaring met Plaxis, bij Deltares is omwille van de pipingberekeningen gekozen voor DgFlow.

Voor deze analyse is gebruik gemaakt van PLAXIS 2D en DgFlow V1.4. PLAXIS 2D is een eindige elementen model voor grondmechanica en grondwaterstroming. In deze analyse is gebruik gemaakt van de "Flow Only" module, waarbij stationaire stroming is aangenomen. DgFlow is ook een eindige elementen model voor grondwaterstroming (Van Esch, 2016) en is het rekenhart van het in de praktijk toegepaste D-Geo Flow.

Omdat de pipe op een dieper niveau ontwikkelde dan verwacht, was er geen directe aansluiting van de sloot op het zandpakket. De relatief ondoorlatende laag die aanwezig is tussen de sloot en de pipinggevoelige laag wordt hier de slootbodem genoemd. In Plaxis is de doorlatendheid van de slootbodem gevarieerd en is gerekend met minimum, best guess en maximum waarden voor de doorlatendheid van de getijdenezandlagen in de ondergrond. In DgFlow is eveneens de doorlatendheid gevarieerd en is ook gekeken naar het effect van laagscheidingen. Een identieke berekening met beide modellen is uitgevoerd voor de best guess waarden van de ondergrond voor de Noordproef om de resultaten van beide modellen te vergelijken.

1.2 Geometrie en laagopbouw

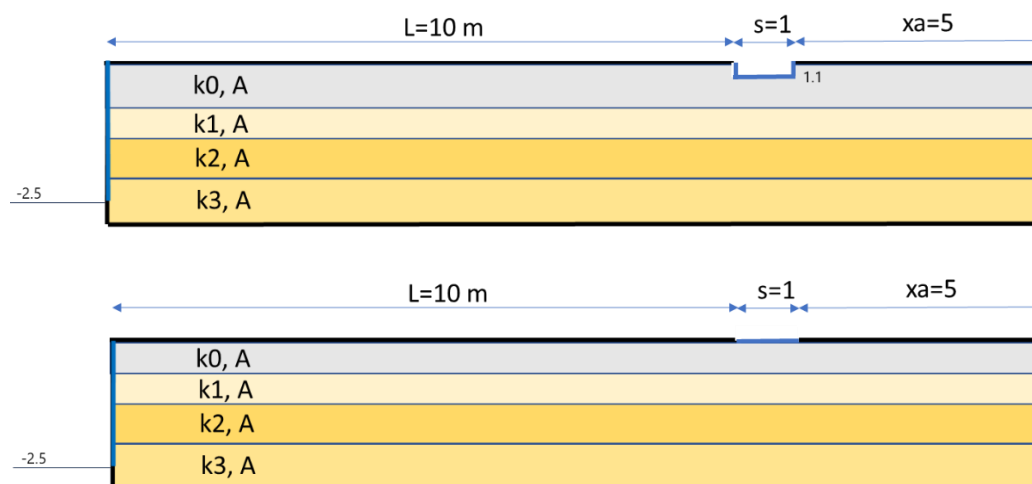
In Figuur 1-1 is de algemene opbouw van de modellen in DgFlow weergegeven. In Plaxis is een vrijwel identieke opbouw gehanteerd, waarbij ook de klei deklaag boven laag 0 is gesimuleerd en de veenlaag onder de zandlagen. Deze lagen zijn relatief ondoorlatend ten opzichte van het zand en hebben geen invloed op het resultaat, daarom zijn de klei en veenlagen in DgFlow niet gemodelleerd. In Plaxis zijn de slootbodem en bovenkant van laag 0 op gelijke hoogte gemodelleerd (Figuur 1-1) hiervoor was gekozen om de geometrie zo simpel mogelijk te houden. In DgFlow zijn beide schematisaties toegepast. Opgemerkt wordt dat de slootbodem onderdeel uitmaakt van laag 0, maar niet per definitie dezelfde eigenschappen heeft, ten gevolge van opbarsten en erosie.

Voorafgaande aan de pipingproef is een inschatting gemaakt van de doorlatendheid van het watervoerend pakket op basis van HPT-(A)MPT sonderingen uit fase 2. Deze doorlatendheid is vervolgens gebruikt in het proefontwerp om het kritiek verval mee te berekenen. Na afloop van de pipingproef zijn aanvullende HPT sonderingen gedaan om deze doorlatendheid binnen het proefvak na installatie van de damwanden e.d. te valideren. Hoewel deze HPT

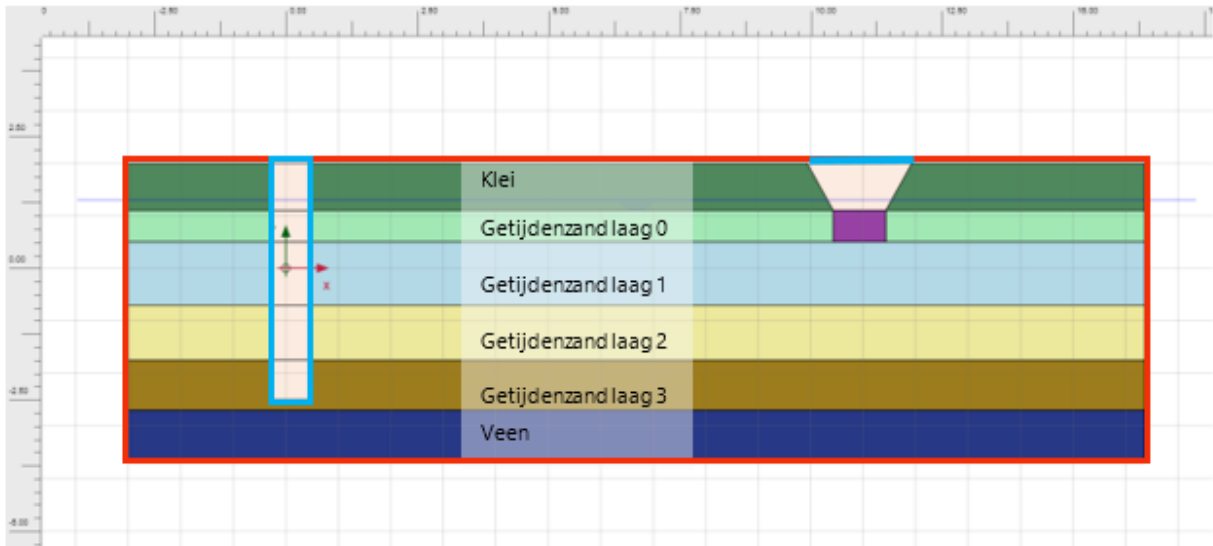
sonderingen ook met MPT testen zijn uitgevoerd, zijn deze niet verder uitgewerkt naar absolute doorlatendheden vanwege de complexiteit en onzekerheden in de uitwerking omdat de testen in een gesloten damwandkuip zijn uitgevoerd. De laagopbouw is samengevat in Tabel 1-1, in Figuur 1-1 is de schematisatie over de diepte weergegeven. De basisvariaties in doorlatendheid (minimum, maximum en best guess) van de verschillende lagen is weergegeven in Tabel 1-2. De infiltratiebuis is gemodelleerd in Plaxis als een verticale (2D) kolom, hieraan is een doorlatendheid van 10.000 m/d toegekend.

De geometrie wijkt op een paar kleine punten af voor de Noord- en Zuidbak:

- De laagscheiding tussen laag 0 en laag 1 ligt op NAP+0,5 m voor Noord en op NAP+0,55 m voor Zuid. In de modellen zijn deze verschillen meegenomen.
- De bovenkant van laag 0 ligt op NAP+1,3 m voor Noord en op NAP+1,1 m voor Zuid. In DgFlow zijn beide varianten voor Noord doorgerekend voor de best guess doorlatendheid, maar voor de overige varianten is met laagscheiding op NAP+1,3 m gerekend. Alle Plaxis berekeningen (Noord en Zuid) en alle DgFlow berekeningen voor zuid zijn uitgevoerd met laagscheiding op NAP+1,1m. De laagscheiding tussen laag 2 en 3 ligt op NAP-1,9 m voor Zuid en NAP-1,8 m voor Noord. Dit verschil heeft niet veel effect op de uitkomst en wordt in DgFlow niet meegenomen (voor beide modellen gemodelleerd op NAP-1,9 m, conform eerste schatting). In Plaxis is wel gedifferentieerd tussen de Noord- en Zuidbak.
- De bovenkant van de veenlaag ligt op NAP-2,7 m voor de Noordbak en NAP-3 m voor de Zuidbak. In de berekeningen is uitgegaan van NAP-2,7 m voor beide bakken, omdat deze informatie pas in een laat stadium beschikbaar kwam. Er is wel een gevoeligheidsstudie uitgevoerd voor de diepteligging van de veenlaag.



Figuur 1-1 Schematisatie ondergrond in grondwaterstromingsmodellen (klei- en veenlagen zoals gemodelleerd in Plaxis zijn niet weergegeven). Blauwe lijnen geven randvoorwaarden met constante stijghoogte weer, zwarte lijnen zijn gesloten randen.



Figuur 1-2 PLAXIS model opbouw, in het rood de gesloten randvoorwaarden, in het blauw de randvoorwaarden met een constante druk.

Tabel 1-1 Laagopbouw Noord- en Zuidproef

Laag	Noord			Zuid		
	Top [m + NAP]	Onderkant [m + NAP]	Dikte [m]	Top [m + NAP]	Onderkant [m + NAP]	Dikte [m]
getijdenzand laag 0	1,3 ²	0,5	0,8	1,1	0,55 ³	0,75
getijdenzand laag 1	0,5	-0,7	1,2	0,55	-0,7	1,25
getijdenzand laag 2	-0,7	-1,8 ¹	1,2	-0,7	-1,9	1,2
getijdenzand laag 3	-1,8*	-2,7	0,8	-1,9	-3,0 ⁴	0,8

1 gesimuleerd als -1,9 in Dgflow

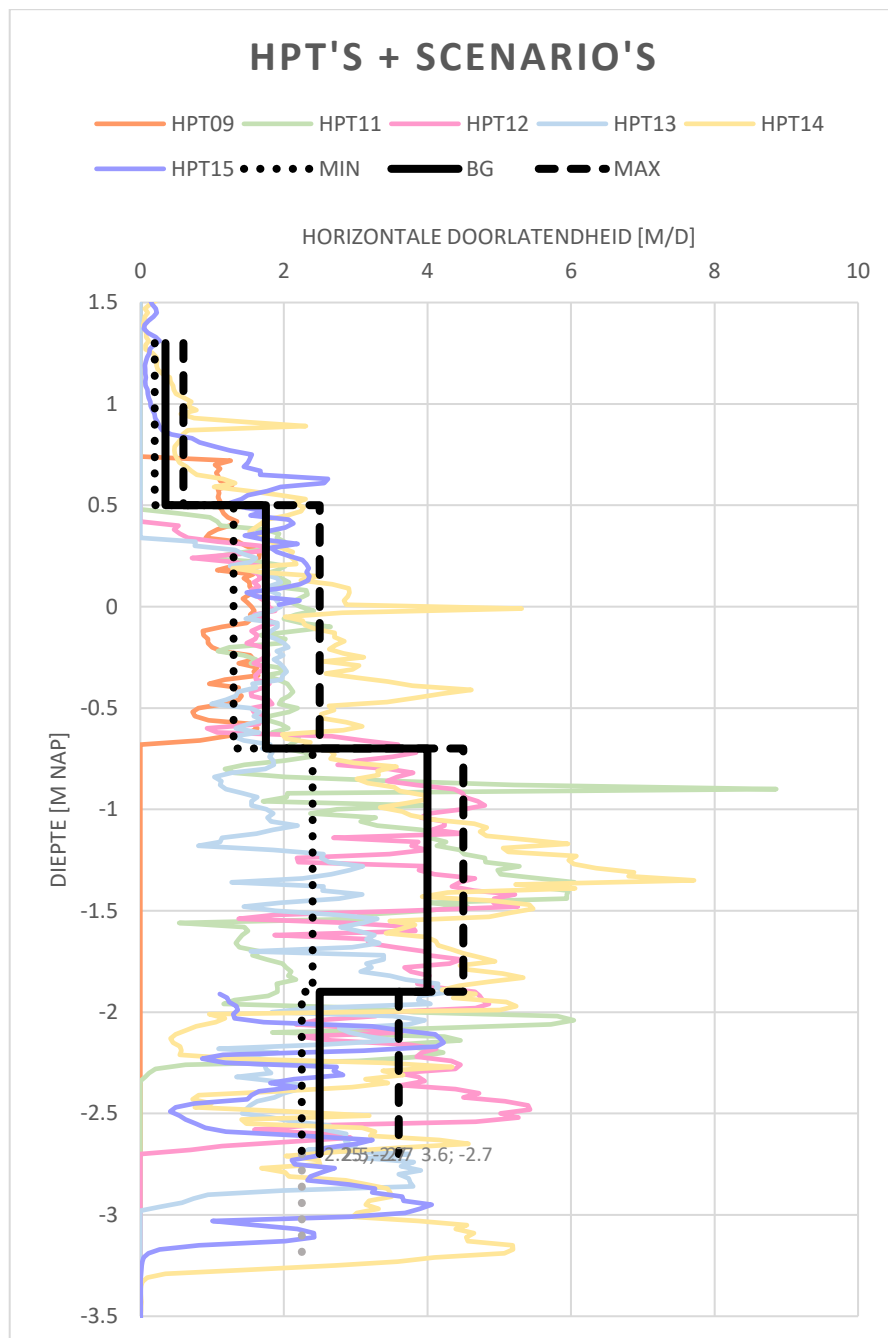
2 gesimuleerd als 1,1 in Plaxis

3 gesimuleerd als 0,6 in Plaxis

4 gesimuleerd als -2,7 in Plaxis en DgFlow

Tabel 1-2 Eigenschappen van verschillende lagen (k: doorlatendheid, κ intrinsieke doorlatendheid, A: anisotropiefactor). BG staat voor Best Guess, deze geeft de meest waarschijnlijk geachte waarde.

Laag	kh,BG [m/d]	kh,min [m/d]	kh,max [m/d]	$\kappa_{h,BG}^*$ [m ²]	$\kappa_{h,min}^*$ [m ²]	$\kappa_{h,max}^*$ [m ²]	A [-]
getijdenzand laag 0	0,35	0,2	0,6	5,37E-13	3,07E-13	9,20E-13	3,5
getijdenzand laag 1	1,75	1,3	2,5	2,68E-12	1,99E-12	3,83E-12	3,5
getijdenzand laag 2	4	2,4	4,5	6,14E-12	3,68E-12	6,90E-12	3,5
getijdenzand laag 3	2,5	2,25	3,6	3,83E-12	3,45E-12	5,52E-12	3,5



Figuur 1-3: De doorlatendheid weergegeven over de diepte. De laagscheidingen per HPT verschillen in sommige gevallen van de laagscheidingen in het model, dit is geïllustreerd met het doortrekken van de MIN lijn tot voorbij de laagscheiding in het model.

In DgFlow is de mesh verfijnd op laagscheiding 0/1 met een grootte van 0,05 m, omdat op deze diepte de pipe is ontstaan en voor de resterende elementen is een grootte van 0,1 m aangehouden.

In PLAXIS zijn de zijdes van de kleinste elementen ca. 0,06 m, de kleinste elementen bevinden zich bij het uittredepunt en bij de infiltratiebuizen, doordat de geometrie hier gecompliceerder is. De maximale element grootte is 0,6 meter, de grootste elementen bevinden zich in de veenlaag.

1.3 Randvoorwaarden en observaties

Door de gesloten damwandkuip, de onderliggende meter dikke veenlaag onder het watervoerend pakket en de proefterp met kleibasis is aangenomen dat het geïnfilterde water enkel via de uittredesloot kan uitstromen. Alle modelgrenzen zijn daarom als gesloten, "Closed", aangenomen met uitzondering van de infiltratiebuis en de slootbodemp. Zowel in de uittredesloot als in de infiltratiebuizen is gedurende de proeven een nagenoeg constant peil gehandhaafd door middel van pompen, welke stapsgewijs is verhoogd. In de modellen is daarom een constante drukhoogte opgelegd, overeenkomend met de drukhoogte bij het geselecteerde tijdstip.

Om tijdsafhankelijke effecten buiten beschouwing te laten is het noodzakelijk om deze analyse uit te voeren op een lange, constante en stabiele meetreeks. Daarnaast is het van belang dat er nog geen piping is opgetreden, omdat piping de waterspanningen en stroming sterk beïnvloedt.

Bij proefvak Noord is gedurende de tweede proefdag een lichte dalende trend waargenomen in de waterspanningen en op de derde proefdag (15 september) is duidelijk horizontale pipegroei waargenomen in de waterspanningsmeters. In de nacht tussen de eerste en tweede proefdagen (van 13 op 14 september 2021) is de waterstand constant gehouden voor meerdere uren zonder dat er horizontale pipegroei is waargenomen, daarom is dit de meest geschikte meetreeks, deze loopt van 14-09-2021 00:00 tot 14-09-2021 06:00. Voorafgaande aan deze meetreeks waren er al wel kleine zandmeevoerende wellen in de uittredesloot waargenomen als gevolg van het verticaal groeien van de pipe. Als gevolg van het verlagen van de belasting gedurende de nacht gaven de wellen enkel water zonder zand mee te voeren (zie ook logboek in Factual Report). De waterdrukken in de infiltratiebuizen zijn in de nacht van 14 september 2021 gemiddeld NAP +2,0 m. Het aantal zandmeevoerende wellen was op dat moment beperkt (aanwezige wellen zeer ondiep). De waterspanningsmeters tussen de infiltratiebuizen in tonen een vergelijkbaar beeld, daarom is deze waarde als randvoorwaarde in de modellen toegepast. Bij de uittredesloot is een drukhoogte van NAP +1,13 m overgenomen. Voor de waterspanningsmetingen binnen het proefvak is de gemiddelde waarde gedurende de meetreeks aangehouden.

In het zuidelijke proefvak is geen nachtreeks beschikbaar, omdat in de eerste nacht al piping is opgetreden. Om toch de doorlatendheid in het zuidelijke proefvak te analyseren is een relatief stabiele meetreeks van tijdens de ophoogstappen in de ochtend gebruikt. Deze meetreeks loopt van 11:00 tot 11:45. In vak zuid zijn al direct na aanvang van de proef een groot aantal (minimaal 15) water- en zandmeevoerende welletjes waargenomen.

Voor de waterdrukken in en tussen de infiltratiebuizen is de gemiddelde waarde op 6-9-2021 tussen 11:00 en 11:45 aangehouden die ca. NAP +2,26 m bedraagt, op basis van de WSM's en peilbuis in vak A. Voor de drukhoogte bij de uittredesloot is NAP+1,25 m gehanteerd.

De debieten zijn op twee verschillende manieren bepaald. Enerzijds is op basis van de waterdrukken in de infiltratiebuizen het ingaand debiet bepaald, anderzijds is op basis van

een combinatie van debietmeters en de waterstandsaling in de watercontainer het debiet bepaald. Dit is in het Factual Report nader toegelicht (1220-164143.R04 d.d. 25-3-2022). Het gemiddelde debiet gedurende deze reeksen is in Tabel 1-3 weergegeven voor de Noord- en Zuidbak. Het debiet afgeleid uit de infiltratiebuizen wordt als meest betrouwbaar beschouwd (zie ook Factual report Hedwige). Opvallend is het verschil in debiet tussen proefvak Noord en Zuid. Dit wordt veroorzaakt door het dikkere watervoerend pakket, de mindere aanwezigheid van kleilaagjes in laag 0 en de grotere hoeveelheid aan wellen in de uittredesloot (verminderde weerstand) in proefvak Zuid.

Tabel 1-3 Gemeten debieten

	Tijdperiode	Debiet infiltratiebuizen [L/min]	Debiet debietmeters [L/min]
Noord	14-09-2021 00:00 - 14-09-2021 06:00	2,34	3,37
Zuid	06-09-2021 11:00 - 06-09-2021 11:45	4,65	4,83

1.4 Vak Noord

1.4.1 Overzicht van uitgevoerde berekeningen

Tabel 1-4 en Tabel 1-5 geven een overzicht van de uitgevoerde berekeningen in DgFlow en Plaxis. In DgFlow en Plaxis zijn de doorlatendheden van het watervoerend pakket gevarieerd. In DgFlow is een extra variant berekend met de bovenkant van laag 0 op NAP +1,1 m voor het vergelijk met de Plaxis-som.

Een belangrijke variabele is de doorlatendheid van de slootbodem. In het basisscenario van de Plaxis-sommen (scenario 1) is de doorlatendheid (weerstand) in de slootbodem gelijk aan getijdensand laag 0. De verwachting is echter dat door de aanwezige zandmeevoerende wellen er minder weerstand in de slootbodem aanwezig is en de doorlatendheid in het model dus hoger moet zijn. Om dit te kalibreren zijn hier enkele variaties in aangebracht. Scenario's 1, 4 en 7 zijn gebruikt om een inschatting te maken van de doorlatendheid van de slootbodem. Scenario's 1 t/m 6 zijn gebruikt om de invloed van de meerlaagse doorlatendheidsvariatie van het getijdensand te bepalen. Scenario 8 is gebruikt om de optie van een hogere anisotropie in de bovenste laag verder te analyseren.

Tabel 1-4 Overzicht DgFlow berekeningen.

file no.	Watervoerend pakket doorlatendheden
P4_2D_N_BG	BG
P4_2D_N_min	Min
P4_2D_N_max	Max
P4_2D_N_BG_11*	BG

* bovenkant laag 0 op NAP+1,1 m

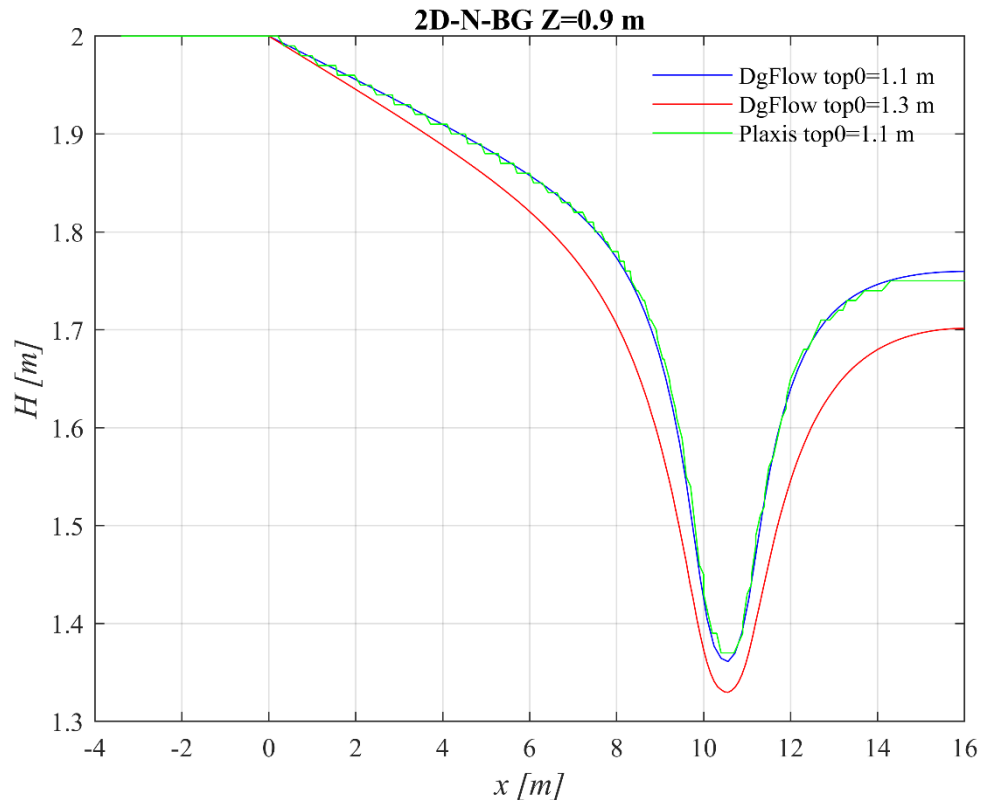
Tabel 1-5 :Overzicht Plaxis berekeningen – in scenario 1 t/m 3 is de doorlatendheid van de slootbodembodem gelijk aan de doorlatendheid van laag 0 gekozen.

Scenario	Slootbodembodem kh	Slootbodembodem kv	Watervoerend pakket doorlatendheden
1	0,35 m/d	0,1 m/d	HPT
2	0,2 m/d	0,06 m/d	Min
3	0,6 m/d	0,14 m/d	Max
4	0,6 m/d	0,15 m/d	HPT
5	0,6 m/d	0,15 m/d	Min
6	0,6 m/d	0,15 m/d	Max
7	1 m/d	1 m/d	HPT
8	0,7 m/d	0,2 m/d	Max, A-0 = 10 [-] *

* De anisotropie in laag 0 is aangepast tot 10 [-], de horizontale doorlatendheid in 0,7 m/d

1.4.2 Vergelijking DgFlow en Plaxis

Voor de best guess doorlatendheidsvariant zijn de resultaten tussen Plaxis en DgFlow vergeleken, voor de Noordbak. Hierbij is in DgFlow de bovenkant voor laag 0 gelijk gesteld aan de slootbodembodem (NAP+1,1m). Figuur 1-4 illustreert dat het stijghoogteverloop ter hoogte van de waterspanningsmeters in vak C gelijk is voor beide modellen. Het berekend debiet per strekkende meter is identiek: 0,14 L/min/m in het DgFlow model en 0,14 L/min/m in het Plaxis model.



Figuur 1-4 Berekend stijghoogteverloop op basis van DgFlow (bovenkant laag 0 op NAP+1,1 en 1,3 m) en Plaxis (bovenkant laag 0 op 1,1 m).

Figuur 1-4 toont ook het stijghoogteverloop uit de DgFlow berekening waarbij de bovenkant van laag 0 op 1,3 m ligt in plaats van 1,1 m. Het stijghoogteprofiel wordt hier sterk door beïnvloed. Het debiet in deze berekening is ook hoger (0,17 L/min/m). Met uitzondering van de bovenkant van laag 0 zijn de verschillen tussen de modellen dus verwaarloosbaar.

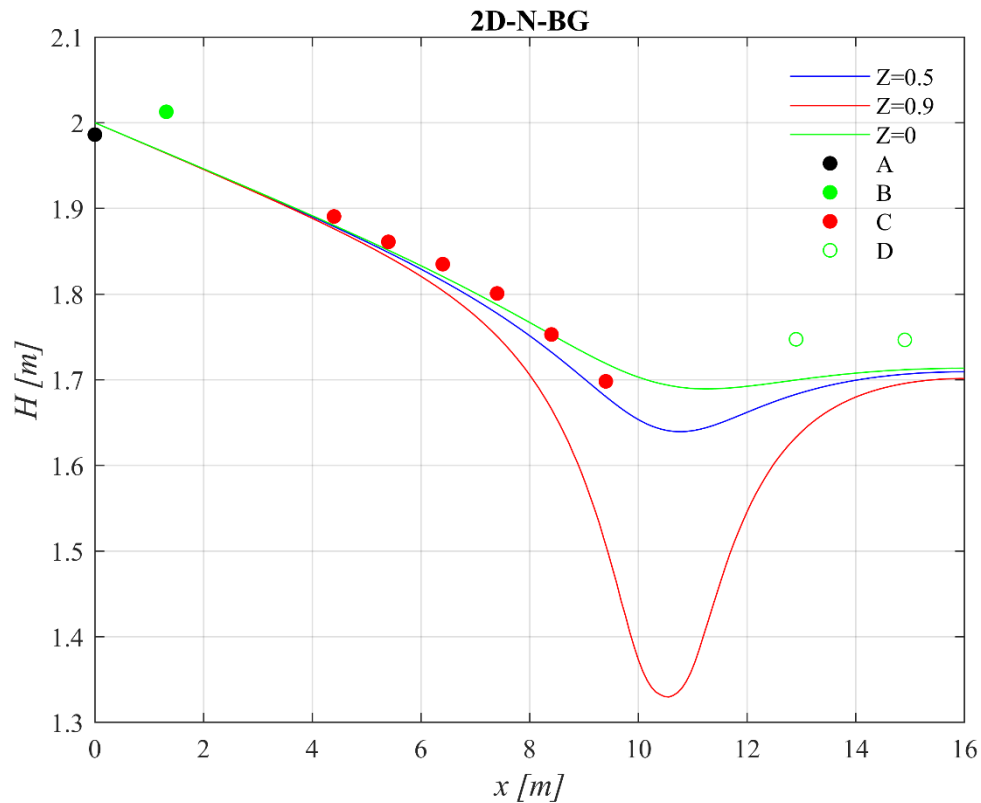
1.4.3 Effect van doorlatendheid en bodemopbouw - Noord

Voor beide modellen is het effect van doorlatendheid beschouwd en zijn berekende stijghoogteprofielen en debieten vergeleken met de gemeten waterspanningen en debieten. De doorlatendheid van de slootbodem is initieel gelijk gesteld aan die van laag 0 (scenario 1 t/m 3). Gezien het feit dat de welletjes die ten tijde van de stijghoogtemeting waren gevormd slechts enkele centimeters diep waren, lijkt dit een goede eerste aanname. Voor het Plaxis model is de bovenkant van laag 0 gelijk gelegd aan de slootbodem (NAP+1,1 m), voor het DgFlow model is deze op NAP+1,3 m gelegd. Op basis van de beschrijving van de profielwand lijkt NAP+1,3m een logische keuze (REF factual report), terwijl op basis van de slootbodem 1,1 m logisch lijkt.

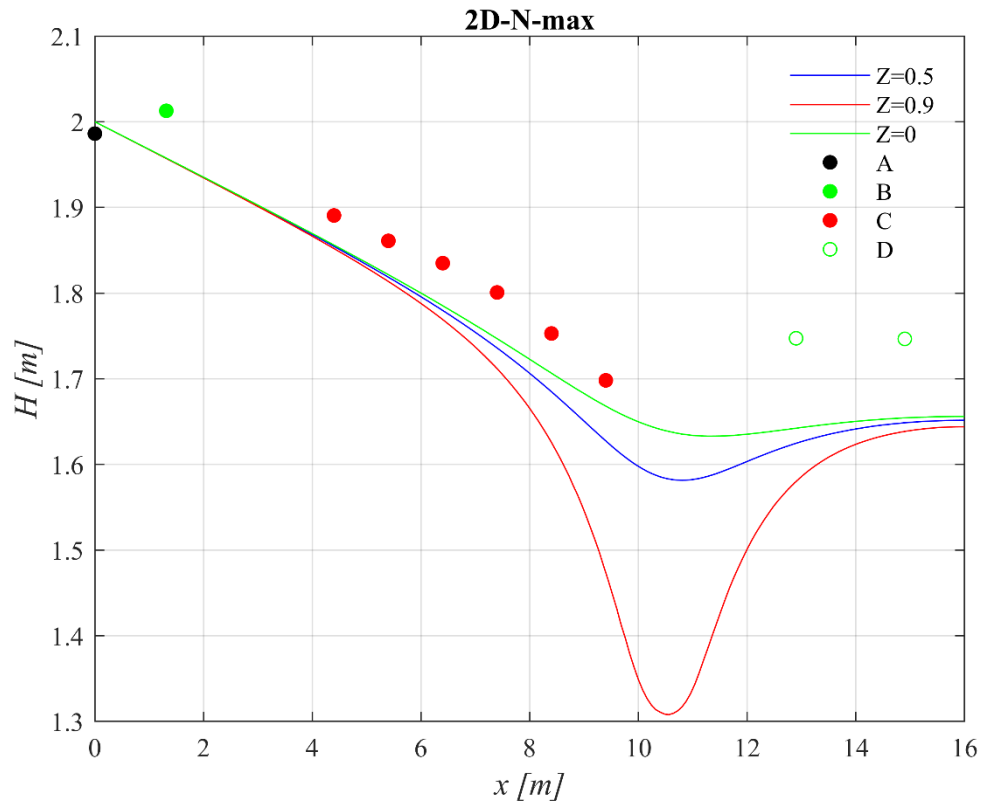
Figuur 1-5 t/m Figuur 1-7 laten het stijghoogteverloop voor beide modellen zien op verschillende hoogtes in het model, gecombineerd met de gemeten stijghoogtes. In Tabel 1-6 zijn de berekende debieten weergegeven voor vak Noord. De debieten per strekkende meter zijn vermenigvuldigd met de effectieve breedte om het totale debiet te bepalen (de effectieve breedte is bepaald op basis van de 3D berekeningen (zie §1.7). Het in de proef

gemeten debiet ligt tussen 2,34 en 3,37 L/min, afhankelijk van de methode waarmee het debiet bepaald is. De waarde van 2,34 L/min wordt als meest betrouwbaar verondersteld.

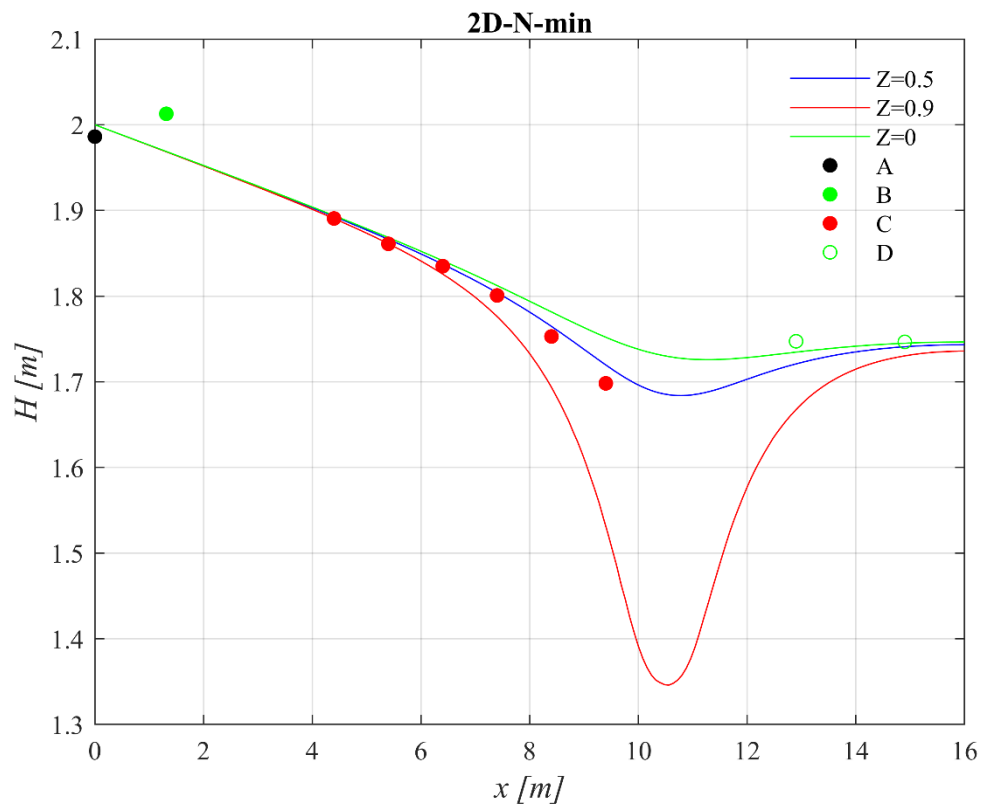
Het berekende stijghoogteprofiel is in alle DgFlow berekeningen, waarin de bovenkant van laag 0 op 1,3 m ligt, te laag (Figuur 1-5 t/m Figuur 1-7). De grootste afwijking wordt gevonden voor de maximale doorlatendheid, de kleinste afwijking wordt gevonden voor de minimale doorlatendheid. De berekeningen in Plaxis, waarin de bovenkant van laag 0 op 1,1 m ligt, geven een betere fit (Figuur 1-4).



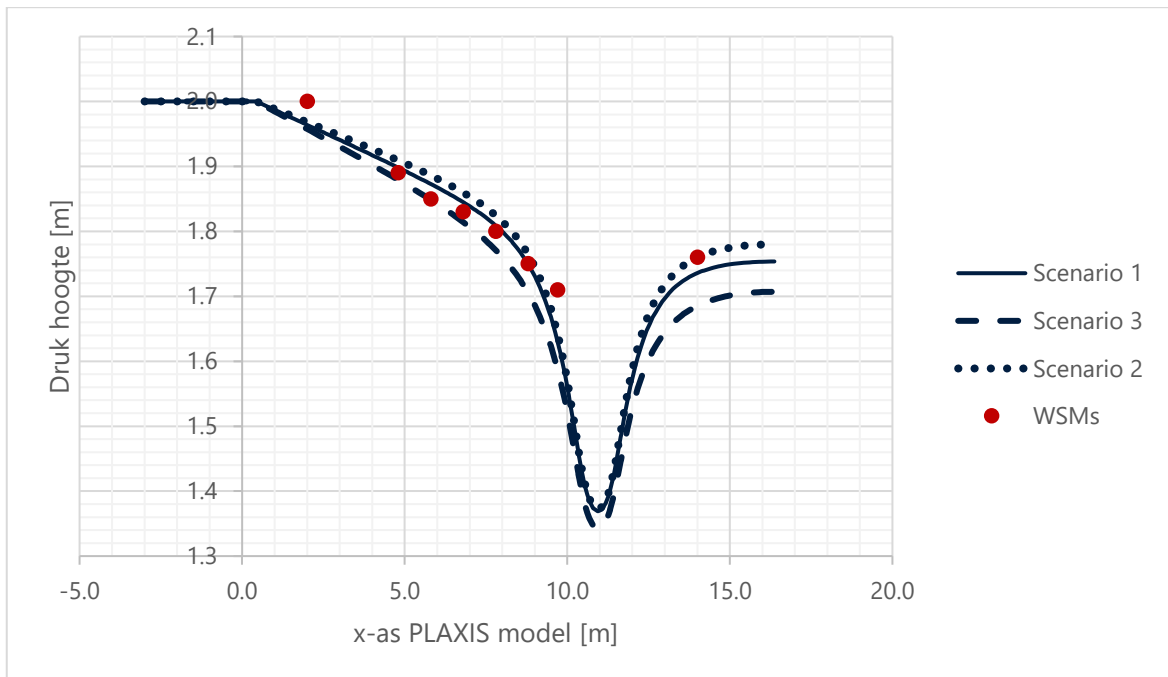
Figuur 1-5 Stijghoogteverloop en gemeten waterspanningen voor de best guess doorlatendheid (waterspanningsmeters in raai B en D liggen op hoogte Z=0 en raai C op Z=0,9 m), berekend met DgFlow.



Figuur 1-6 Stijghoogteverloop en gemeten waterspanningen voor de maximale doorlatendheid (waterspanningsmeters in raai B en D liggen op hoogte $Z=0$ en raai C op $Z=0,9$ m), berekend met DgFlow.



Figuur 1-7 Stijghoogteverloop en gemeten waterspanningen voor de minimale doorlatendheid (waterspanningsmeters in raai B en D liggen op hoogte $Z=0$ en raai C op $Z=0,9$ m), berekend met DgFlow.



Figuur 1-8: Drukhoogtes scenario 1, 2 & 3. Doorsnede op NAP +0,9 m, de diepte van de WSMs

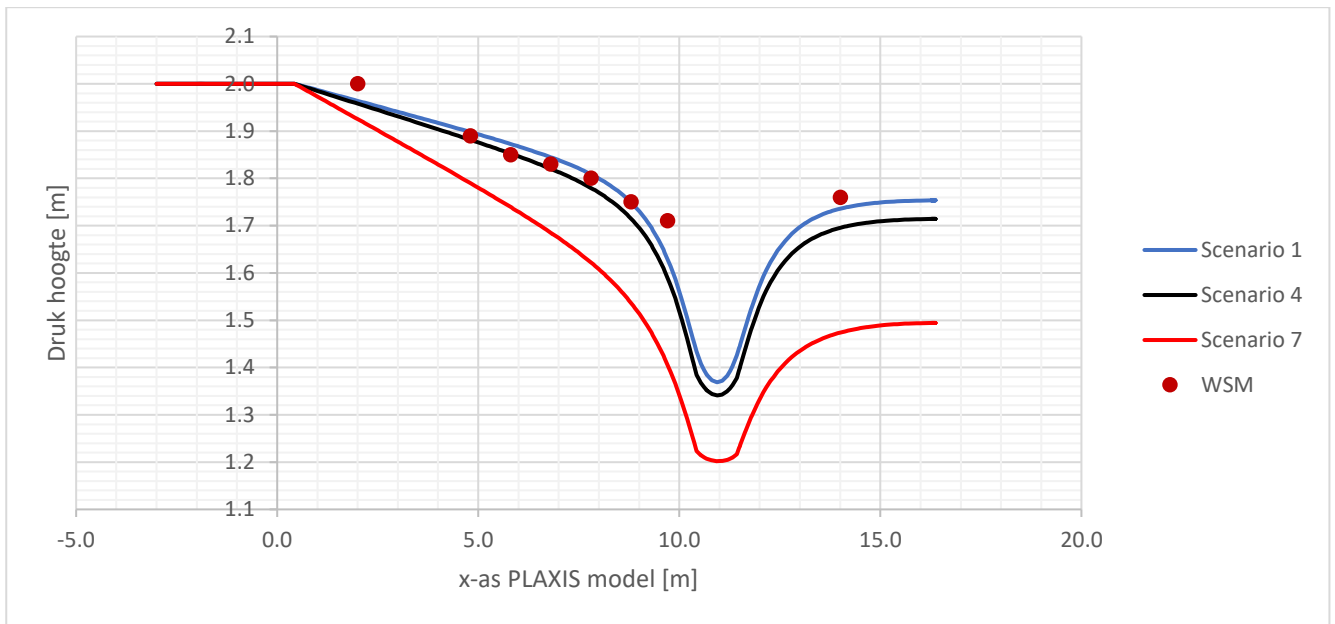
Tabel 1-6 Berekende debieten voor vak Noord bij een verval van 0,87 m

	scenario	Plaxis	DgFlow	Plaxis	DgFlow*
		Q [L/min/m]	Q [L/min/m]	Q [L/min]	Q[L/min]
BG	1	0,14	0,17	1,7	2,0
Min	2	0,09	0,10	1,1	1,2
Max	3	0,19	0,26	2,3	3,1

1.4.4 Effect van doorlatendheid slootbodem

Het effect van de doorlatendheid van de slootbodem op stijghoogte en debiet is berekend met Plaxis. De verticale doorlatendheid van de slootbodem is ten opzichte van de variant met best guess doorlatendheden verhoogd met een factor 2 (scenario 4, 5, & 6) en een factor 10 (scenario 7).

De scenario's met variatie in de doorlatendheid van de slootbodem zijn weergegeven in Figuur 1-9. Te zien is dat scenario 4 (doorlatendheid slootbodem x 2) hier het beste overeenkomt met de gemiddelde waarden van de waterspanningsmeters. Het debiet neemt ook toe met de toename van slootdoorlatendheid (Tabel 1-7).



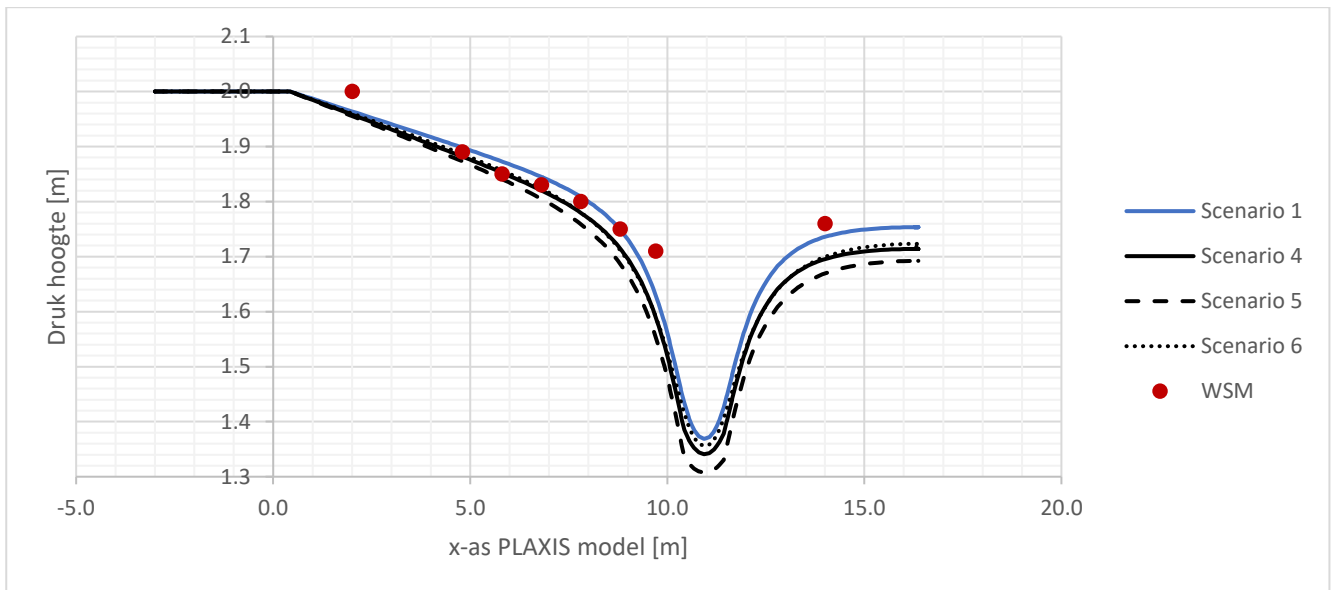
Figuur 1-9 Gevoeligheid doorlatendheid slootbodembodem voor BG variant (scenario 4: slootdoorlatendheid x 2, scenario 7: slootdoorlatendheid x 10) . Doorsnede op NAP +0,9 m, de diepte van de WSMs

Tabel 1-7 Debieten scenario 1, 4 en 7

scenario	Q [L/min/m]	Q [L/min]
1	0,14	1,7
4	0,16	1,9
7	0,29	3,5

Het meer doorlatend maken van de slootbodembodem leidt ook tot een goede fit met de waterspanningsmetingen. Daarom zijn ook de varianten met minimum en maximum doorlatendheid doorgerekend met de slootbodembodemdoorlatendheid uit scenario 4: 0,15 m/d (2x BG laag0).

Figuur 1-10 toont de waterspanningen in dezelfde doorsnede op NAP +0,9 m van scenario's 4, 5 en 6. Hierin is de doorlatendheid van het watervoerend pakket gevarieerd in combinatie met een meer doorlatende slootbodembodem. In het rood zijn de gemiddelde waterspanningen per raai geplotted. Scenario 6 geeft op het oog uiteindelijk de beste fit. Dit is de variant met maximum doorlatendheid voor de zandlagen.

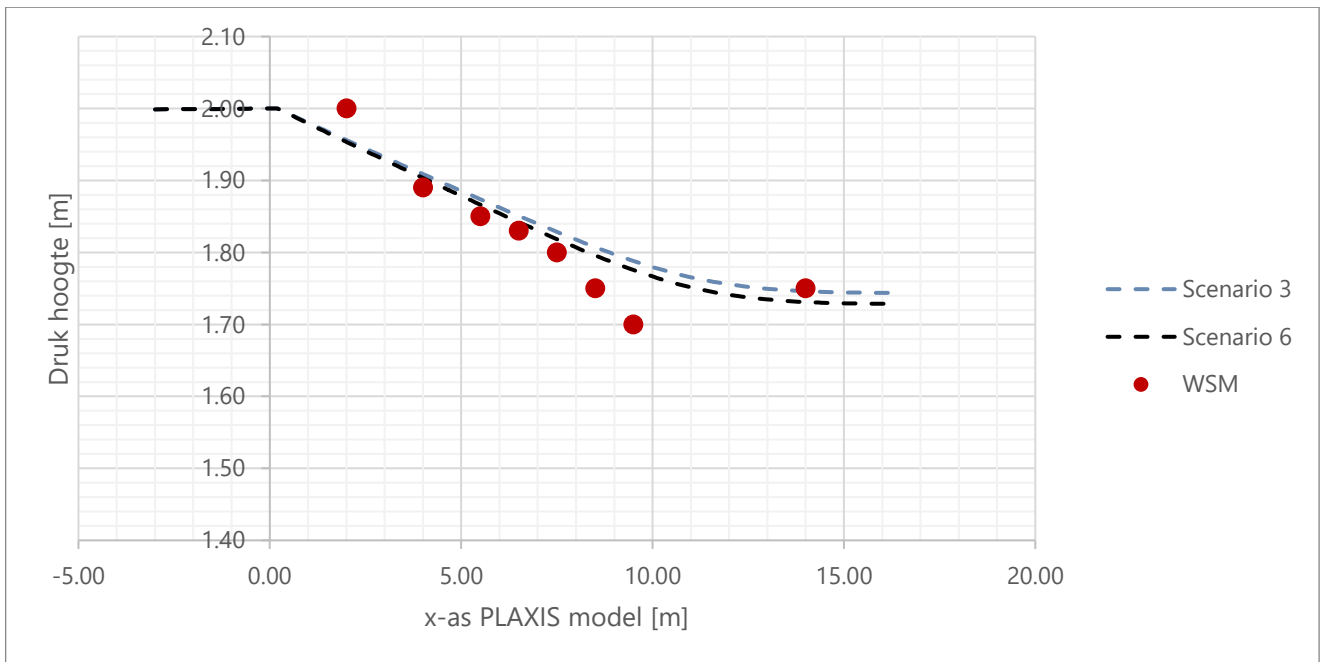


Figuur 1-10: Gevoeligheid doorlatendheid watervoerend pakket in combinatie met 2x doorlatendere slootbodembodem (Scenario 1: BG, Scenario 4: BG met 2x doorlatendere slootbodembodem, Scenario 5: als 4, maar met minimum doorlatendheden voor zandlagen, Scenario 6: als 4 maar met maximum doorlatendheden voor zandlagen). Doorsnede op NAP +0,9 m, de diepte van de WSMs.

Tabel 1-8 Debieten scenario 4, 5 en 6

scenario		Q [L/min/m]	Q [L/min]
BG	4	0,16	1,9
Min	5	0,13	1,6
Max	6	0,20	2,4

De afwijkende fit op de gemeten waterspanningen achter de sloot is te verklaren door de diepere plaatsing, de doorsnede geeft hierdoor een andere waterspanning weer dan is gemeten. Indien een doorsnede op NAP -1m (in dezelfde laag als waar de meeste WSM's van vakken B en D geplaatst zijn) genomen wordt ziet het waterspanningsverloop er uit als in Figuur 1-11 Scenario 3 en 6 lijken beiden goed overeen te komen met de gemeten waterspanningen. Scenario 6 onderschat de waterspanningen achter de sloot licht, dit is te verklaren door 3D effecten, want in werkelijkheid heeft de uittredesloot niet de volledige breedte van de damwandkuip.

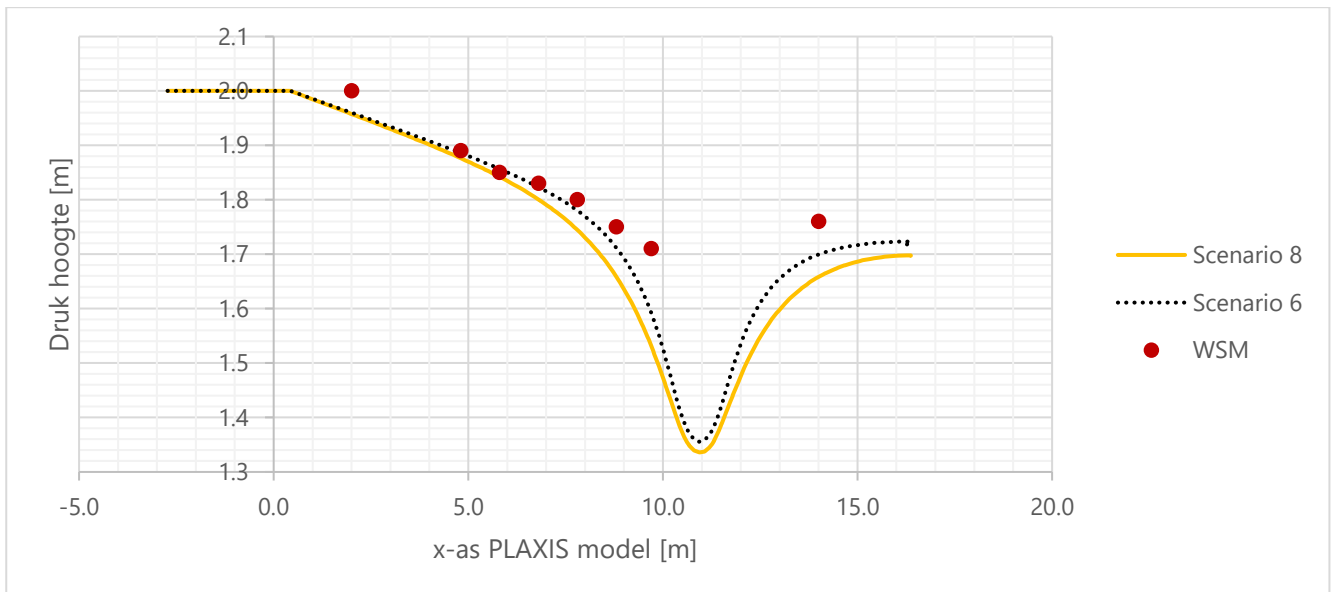


Figuur 1-11: Waterspanningen op NAP -1 m

De diepere plaatsing van de waterspanningsmeters in vak B (tussen de infiltratiebuizen en vak C) zorgt niet voor een significante verandering in de waterspanningen. De oorzaak van de relatief hoge gemeten waterdruk is in dit geval mogelijk deels veroorzaakt door de zettingen onder de proefterp waardoor de plaatsingsniveau van de WSMs iets dieper kan zijn komen te liggen, hiervoor is niet gecorrigeerd. Eerder zijn de zettingen als niet significant beschouwd, maar enkele centimeters verschil zouden dit verschil tussen model en meting al kunnen verklaren.

1.4.5 Effect van anisotropie laag 0

Om de invloed van anisotropie in de bovenste laag te bestuderen is een scenario uitgerekend met een anisotropie van 10 [-] en een horizontale doorlatendheid van 0,7 m/d (zie Figuur 1-12). De verticale doorlatendheid van de slootbodembodem is verder verhoogd naar 0,2 m/d om de fit te verbeteren. De waterspanningen uit dit model sluiten iets minder goed aan op de metingen, desondanks wordt dit scenario nog steeds als realistisch beschouwd, omdat een hoge anisotropie aansluit op de sterke gelaagdheid die visueel is geobserveerd in het veld. Het debiet in scenario 8 is 0,3 L/min/m (3,6 L/min) wat hoger is dan de gemeten debieten.



Figuur 1-12 Waterspanningen op NAP +0,9 m. Vergelijking verhoogde anisotropie laag 0 voor maximale doorlatendheidsvariant.

1.4.6 Evaluatie analyse 2D grondwaterstroming

Er zijn analyses met DgFlow en Plaxis uitgevoerd om te beschouwen welke bodemopbouw en doorlatendheidskarakteristieken het beste overeenkomt met de gemeten debieten en stijghoogtemetingen voorafgaand aan (horizontale) pipevorming. Voor de zandlagen is een range van doorlatendheden opgesteld, die in 3 varianten doorgevoerd zijn in de berekeningen: minimum, best guess en maximum. Daarnaast is gekeken naar de hoogteligging van de bovenkant van laag 0, die veel invloed bleek te hebben op het stijghoogteprofiel en naar de doorlatendheid van de slootbodem.

Uit de simulaties bleek dat met de verwachte hoogteligging van de bovenkant van laag 0 van NAP+1,3 m geen goede fit bereikt kon worden: de simulaties met hoogteligging van NAP+1,1 m gaven een betere overeenkomst met de stijghoogtemetingen.

Voor de verschillende zandlagen is in eerste instantie dezelfde anisotropiefactor aangehouden ($A=3,5$). Aangezien laag 0 veel meer fines bevat dan de overige lagen en uiteindelijk ook als een dak voor de pipe heeft gefungeerd, lijkt het echter logisch dat de anisotropiewaarde van deze laag hoger is. Het bleek echter uit de berekeningen dat een betere fit in stijghoogte behaald wordt door de doorlatendheid van de slootbodem te verhogen. In de analyse voor piping (zie §2.2), is wel gecontroleerd wat het effect van een hogere anisotropiewaarde voor laag 0 geweest zou kunnen zijn.

Van de scenario's beschreven in Tabel 1-5 komen scenario 1, 3, 4 en 6 het beste overeen met de waterspanningsdata. Scenario's 3 en 6 sluiten het best aan op de debietmetingen. Omdat scenario 3 en 6 zowel goed op de waterspanningsdata als de debietmetingen passen worden deze scenario's als het meest aannemelijk beschouwd (maximale doorlatendheid voor WVP, doorlatendheid slootbodem (nagenoeg) gelijk aan laag0). Het is echter mogelijk dat door

verdere optimalisatie en door meer te variëren met de doorlatendheden en anisotropie in de lagen een andere goede fit gevonden worden. Op basis van het debiet is een relatief hoge bulkdoorlatendheid wel aannemelijk.

Gezien de fit met stijghoogtemetingen en debiet lijkt de minimum-doorlatendheidsvariant het minst waarschijnlijk. In het proefontwerp is uitgegaan van doorlatendheden die ongeveer overeen komen met het Best Guess Scenario, uit deze analyse is gebleken dat de doorlatendheid in het watervoerend pakket hoger ligt dan initieel is bepaald op basis van het HPT-AMPT onderzoek. Een oorzaak hiervan kan zijn dat als proeflocatie het minst verstoorde getijdenzandpakket is uitgekozen. Door het gebrek aan kleine stoorlaagjes is de gemiddelde doorlatendheid hoger. Door meer te variëren met de doorlatendheden en ook verschillen tussen de lagen is het mogelijk dat er andere goede fits gevonden worden op de data, er zullen vele mogelijke combinaties van doorlatendheden, laagscheidingen en anisotropie die goed aansluiten op de metingen, op basis van het eerder uitgevoerde HPT-AMPT onderzoek wordt er echter vanuit gegaan dat dit een realistische berekening is van de doorlatendheid van de ondergrond.

1.5 Vak Zuid

1.5.1 Overzicht van uitgevoerde berekeningen

Tabel 1-4 en Tabel 1-5 geven een overzicht van de uitgevoerde berekeningen in DgFlow en Plaxis. In DgFlow en Plaxis zijn de doorlatendheden van het watervoerend pakket gevarieerd. In Plaxis is daarbij de doorlatendheid van de slootbodem gevarieerd.

Tabel 1-9 Overzicht DgFlow berekeningen

file no.	Watervoerend pakket doorlatendheden
P4_2D_Z_BG	BG
P4_2D_Z_min	Min
P4_2D_Z_max	Max

Tabel 1-10 Overzicht Plaxis berekeningen – in scenario 1 t/m 3 is de doorlatendheid van de slootbodembodem gelijk aan de doorlatendheid van laag 0.

Scenario	Slootbodembodem kh	Slootbodembodem kv	Watervoerend pakket doorlatendheden
1	0,35 m/d	0,1 m/d	BG
2	0,7 m/d	0,2 m/d	BG
3	0,35 m/d	0,35 m/d	BG
4	1 m/d	1 m/d	BG
5	1 m/d	1 m/d	Max
6	0,7 m/d	0,2 m/d	Max
7	0,7 m/d	0,5 m/d	Max

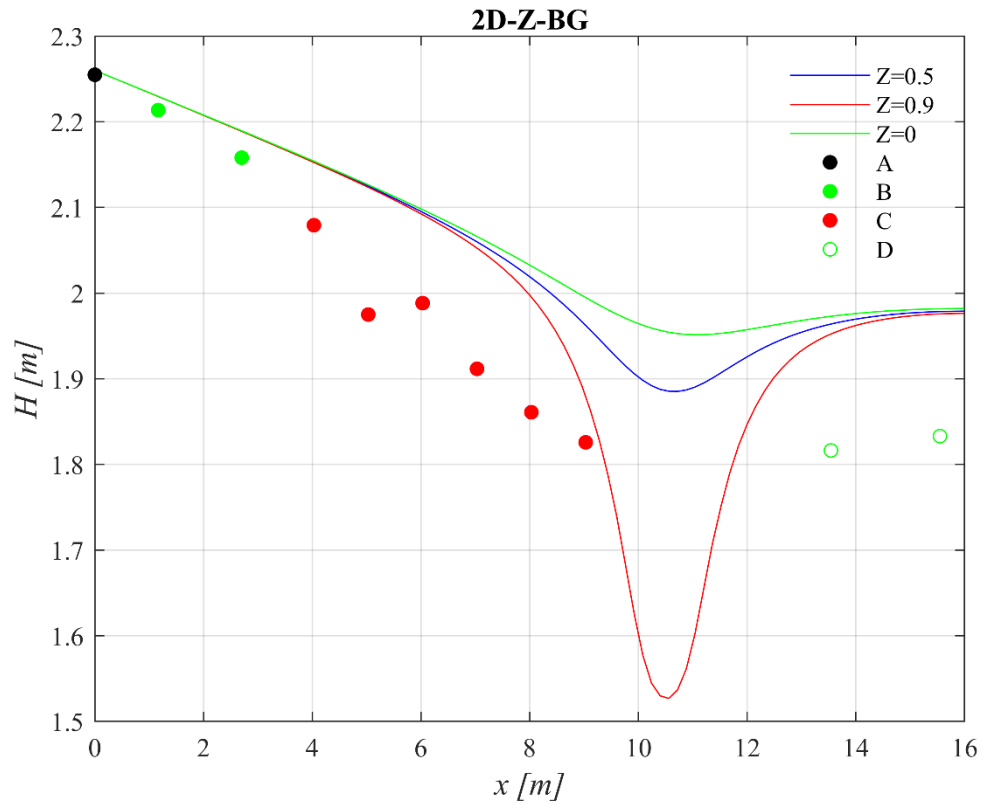
1.5.2 Effect van doorlatendheid WVP

Het effect van doorlatendheid zonder aanpassing van de slootbodembodemdoorlatendheid is uitgevoerd met DgFlow. Figuur 1-13 t/m Figuur 1-15 laten het stijghoogteverloop voor de drie varianten zien op basis van de proefdata en de modeldata. In Tabel 1-11 zijn de gemodelleerde debieten weergegeven voor de drie varianten.

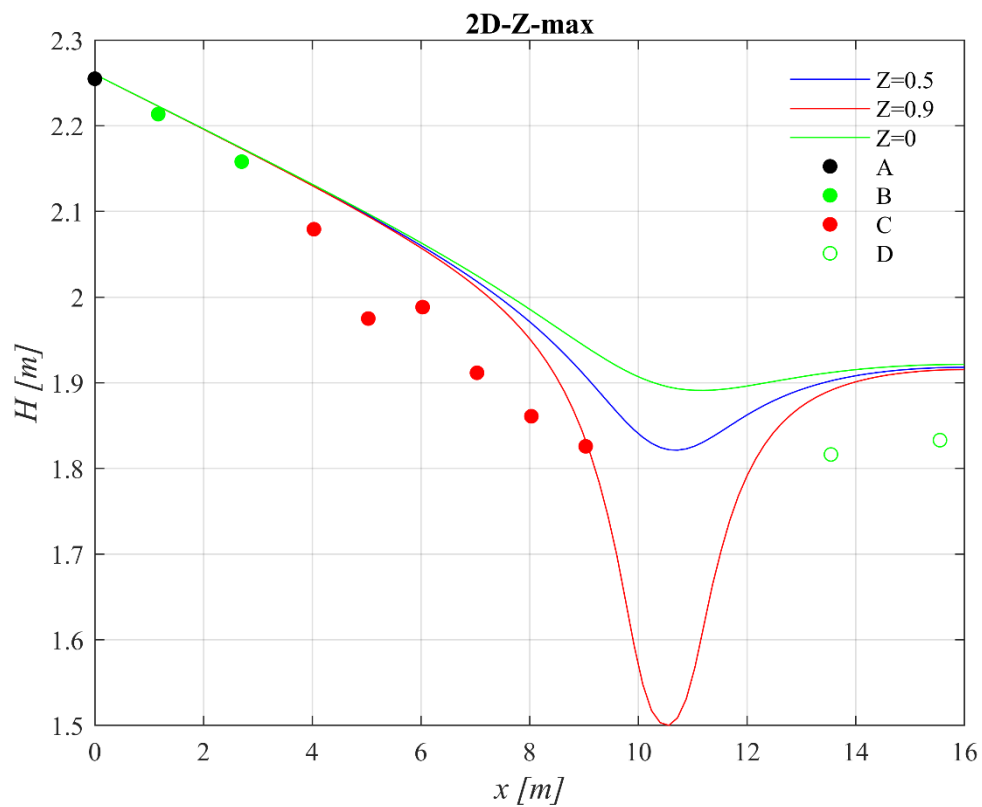
Uit deze figuren wordt direct duidelijk dat de slootbodembodem veel doorlatender is dan in proef Noord. Dit heeft vermoedelijk te maken met het grotere aantal wellen. De slootbodembodem is in vak Zuid zandiger van samenstelling (minder uitgesproken sublaagjes met verhoogde percentages lutum en silt), wat vermoedelijk heeft geleid tot het grotere aantal wellen ten opzichte van vak Noord. Het berekende debiet (berekend met een effectieve breedte van 13 m, bepaald met 3D berekeningen, zie paragraaf Resultaten in hoofdstuk 3D analyse DgFlow) is ook voor alle varianten lager dan het gemeten debiet uit de proef (4,65 – 4,83 L/min).

Tabel 1-11 Debieten scenario 4, 5 en 6

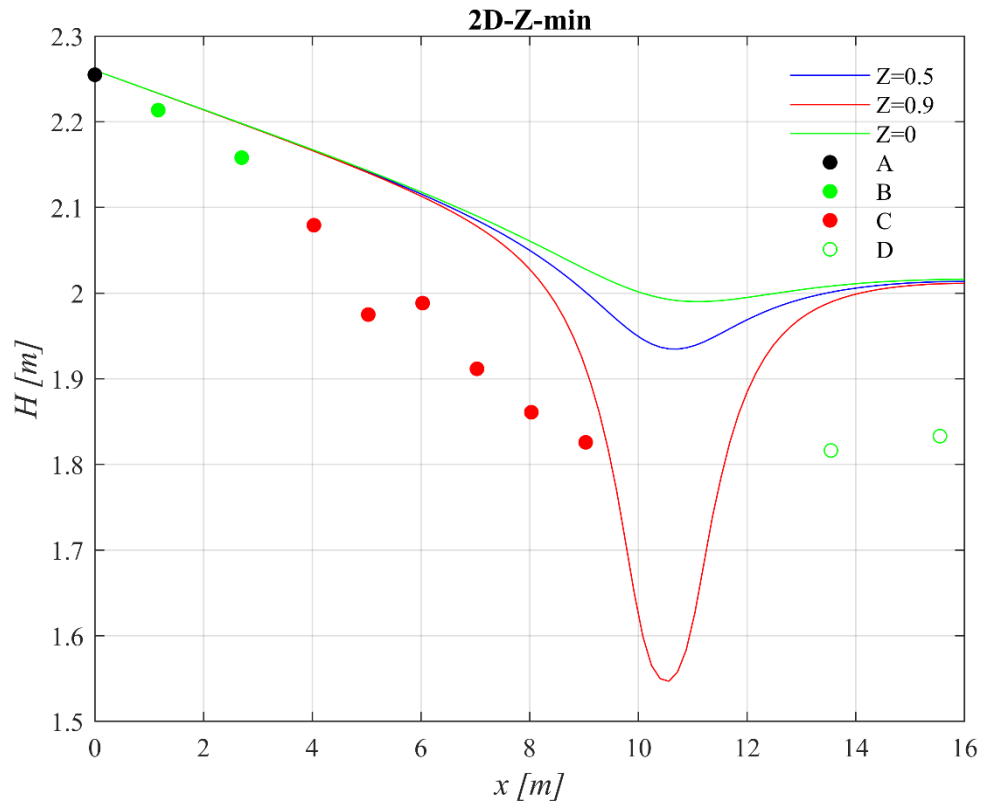
berekening		Q [L/min/m]	Q [L/min]
BG	2D-Z-BG	0,16	2,12
Min	2D-Z-min	0,10	1,30
Max	2D-Z-max	0,25	3,31



Figuur 1-13 Stijghoogteverloop en gemeten waterspanningen voor de best guess doorlatendheid (waterspanningsmeters in raai B en D liggen op hoogte $Z=0$ en raai C op $Z=0,9$ m), berekend met DgFlow.



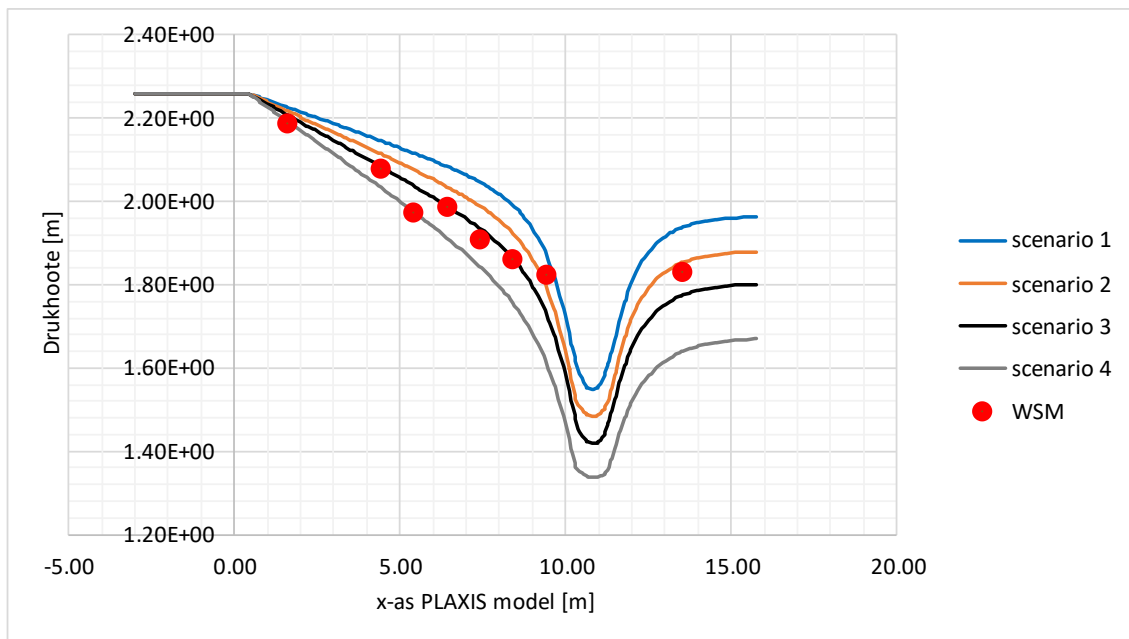
Figuur 1-14 Stijghoogteverloop en gemeten waterspanningen voor de maximum doorlatendheid (waterspanningsmeters in raai B en D liggen op hoogte $Z=0$ en raai C op $Z=0,9$ m), berekend met DgFlow.



Figuur 1-15 Stijghoogteverloop en gemeten waterspanningen voor de minimum doorlatendheid (waterspanningsmeters in raai B en D liggen op hoogte $Z=0$ en raai C op $Z=0,9$ m), berekend met DgFlow.

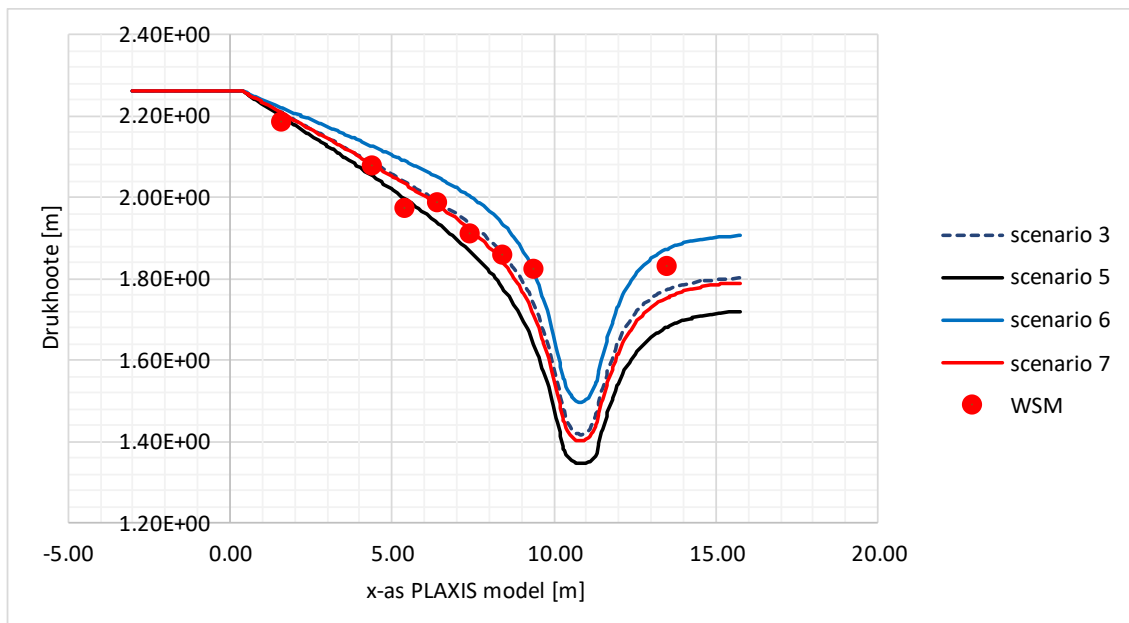
1.5.3 Effect van doorlatendheid slootbodem

Op NAP +0,9 m is een doorsnede genomen en zijn de waterspanningen uitgezet in verschillende grafieken. Deze doorsnede hoogte is gekozen op de hoogte waar de WSMs in vak C geplaatst zijn. De scenario's met variatie in de doorlatendheid van de slootbodem, waarbij de ondergronddoorlatendheid conform de gemiddelde HPT waarde is aangehouden, zijn weergegeven in Figuur 1-16. In het rood zijn de gemiddelde waterspanningen per raai geplot. Te zien is dat scenario 3 (doorlatendheid slootbodem en WVP conform best guess, maar met $A=1$) hier het beste overeen komt met de gemiddelde waarden van de waterspanningsmeters. Hierbij is goed te zien dat het verhogen van de doorlatendheid van de slootbodem een daling van de waterspanningen veroorzaakt.



Figuur 1-16 Gevoeligheid slootbodembij ondergronddoorlatendheid conform best guess van hoge (1) tot lage slootweerstand (4)

Figuur 1-17 toont de waterspanningen in dezelfde doorsnede op NAP +0,9 m van scenario's 3, 5, 6 en 7. Hierin is de eveneens in de doorlatendheid van de slootbodembij gevarieerd maar daarnaast is uitgegaan van de maximale doorlatendheden van het watervoerend pakket uit het HPT onderzoek. Scenario 3 is toegevoegd als vergelijking. Uit de resultaten volgt dat scenario 3 en 7 gelijkwaardige resultaten geven. Scenario 6 is gelijk aan het meest waarschijnlijke scenario bij proefvak Noord (maximale doorlatendheid WVP, slootbodembij doorlatendheid $kh=0,7$ m/d, $A=3,5$).



Figuur 1-17: Gevoeligheid slootbodembij ondergronddoorlatendheid conform het maximale scenario. Scenario 3 geeft de beste fit voor ondergrond conform HPT doorlatendheid.

Het totale uitstromende debiet is in Tabel 1-12 weergegeven. Het infiltratiedebiet op basis van de infiltratiebuizen bedraagt 4,6 l/min. Uit de resultaten volgt dat alleen scenario 5 in de buurt komt maar dat er een afwijking is van ca. 10%. Daarnaast is de fit van scenario 5 op de WSM data matig vergeleken met scenario's 3 en 7. De uitstroomdebieten van scenario's 3 en 7 verschillen van elkaar. Vergeleken met het inkomende debiet (4,65 L/min) komt scenario 7 het best overeen. Scenario 7 wordt daarom als meest waarschijnlijk beschouwd, dit is ook het scenario dat naast scenario 3 het beste overeenkomt met de waterspanningen in het proefvak. Scenario 7 is het scenario met een verminderde slootweerstand ($K_v = 0,5$ m/d) en hoge waarden voor de doorlatendheid van de getijdenezandlagen.

Tabel 1-12 Uitstroom debieten PLAXIS 2D in de verschillende scenario's

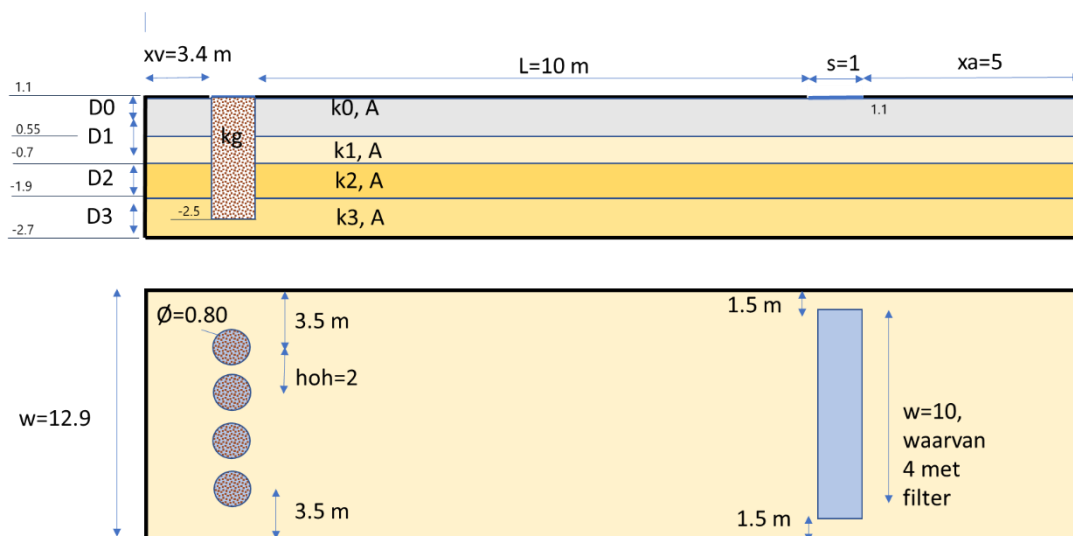
Scenario	Debiet per meter model	Debiet totaal
1	0,18 L/min	2,3 L/min
2	0,23 L/min	3,0 L/min
3	0,28 L/min	3,6 L/min
4	0,36 L/min	4,7 L/min
5	0,41 L/min	5,3 L/min
6	0,27 L/min	3,5 L/min
7	0,35 L/min	4,6 L/min

1.5.4 Evaluatie analyse 2D grondwaterstroming vak Zuid

Uit de resultaten van de modelanalyses voor proefvak Zuid volgt dat het hanteren van waarden voor de slootbodem gelijk aan laag 0 tot te lage debieten en te hoge waarden voor de stijghoogte leidt. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het opbarsten van de slootbodem en de aanwezigheid van (zandmeevoerende) wellen.

Uit de berekeningen met verhoogde slootdoorlatendheid volgt dat scenario 7 (maximale doorlatendheid WVP en verhoogde verticale doorlatendheid slootbodem $k_h=0,7$ m/d en $k_v=0,5$ m/d) het best overeenkomt met de meetdata. De waterspanningen bepaald in PLAXIS komen nagenoeg perfect overeen met de waterspanningen gemeten tijdens de proef. Het debiet van het PLAXIS model is vergelijkbaar met het debiet afgeleid op basis van de waterspanningen in de infiltratiebuizen.

In de Noordbak liggen de buizen en de sloot iets decentraal. In de Noordbak is een drain aanwezig, die het pipingproces ter plaatse van de drain waarschijnlijk beïnvloed heeft. Tijdens de CSI is vastgesteld dat de pipe boven en onder de drain door is gegroeid. In de grondwaterstromingsberekeningen, waarin het pipingproces niet beschouwd is, heeft de drain naar verwachting (nog) geen invloed, omdat het stromingsbeeld dan nog grotendeels tweedimensionaal is, en is daarom niet gemodelleerd. Uit de 2D analyse van de Noordbak is gebleken dat de bovenkant van laag 0 waarschijnlijk wat lager ligt dan NAP+1,3 m, op NAP+1,1 m. Om een exacte vergelijking mogelijk te maken tussen de 2D en 3D berekeningen is hier echter de waarde van NAP+1,3 m aangehouden – deze keuze heeft naar verwachting geen effect op het beantwoorden van de vragen. Het volume in de sloot (tussen NAP+1,1 en 1,3 m) is opgevuld met zeer doorlatend materiaal. De slootbodem is als aparte eenheid gemodelleerd, zodat de doorlatendheid onafhankelijk van laag 0 gevarieerd kan worden.



Figuur 1-19 Geometrie Zuidbak

In de Zuidbak liggen de infiltratiebuizen wel centraal en is de berekening dus symmetrisch, waardoor slechts de helft van de geometrie gemodelleerd hoeft te worden. De slootbodem is gelijk aan de bovenkant van laag 0. De breedte van de bak is afgerond op 13 m in het model (6,5 m in de halve geometrie). Een ander verschil met de Noordbak is de hoogte van de onderkant van laag 0: deze is op basis van de CSI op NAP+0,55m gelegd.

Een overzicht van gehanteerde doorlatendheden is weergegeven in Tabel 1-2. Voor de slooten de infiltratiebuizen is een doorlatendheid van 10.000 m/d aangehouden. De meshgrootte is 0,25 m.

1.7.2 Randvoorwaarden

Voor beide modellen zijn alle randen gesloten, met uitzondering van de bovenkant van de infiltratiebuizen en het oppervlak van de sloot waar een constante stijghoogte is aangebracht. Het verval is voor beide bakken constant gehouden op 1 m (stijghoogte infiltratiebuizen 1 m, slootpeil 0 m). Voor de beantwoording van de vragen, zoals genoemd in

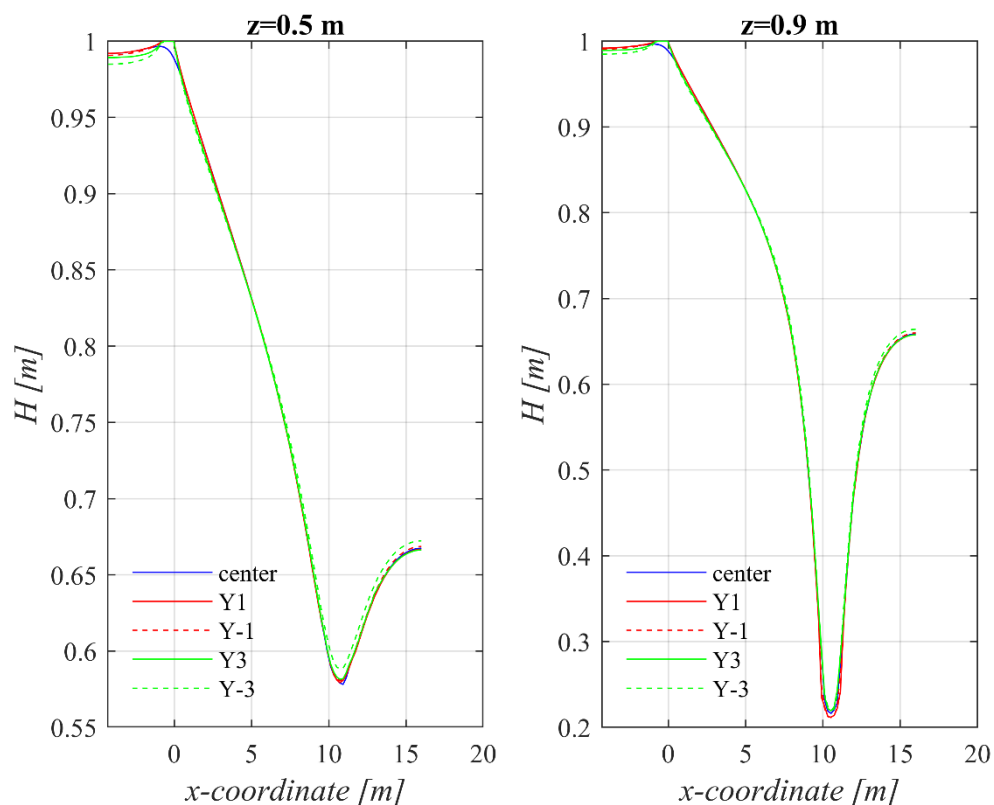
de introductie van deze paragraaf, is het niet van belang om de exacte proefomstandigheden na te bootsen (qua verval).

1.7.3 Overzicht van uitgevoerde berekeningen

Voor zowel de noord- als zuidbak zijn berekeningen uitgevoerd met de 3 variaties in doorlatendheid zoals weergegeven in Tabel 1-2, best guess, minimum en maximum.

1.7.4 Resultaten Noordbak

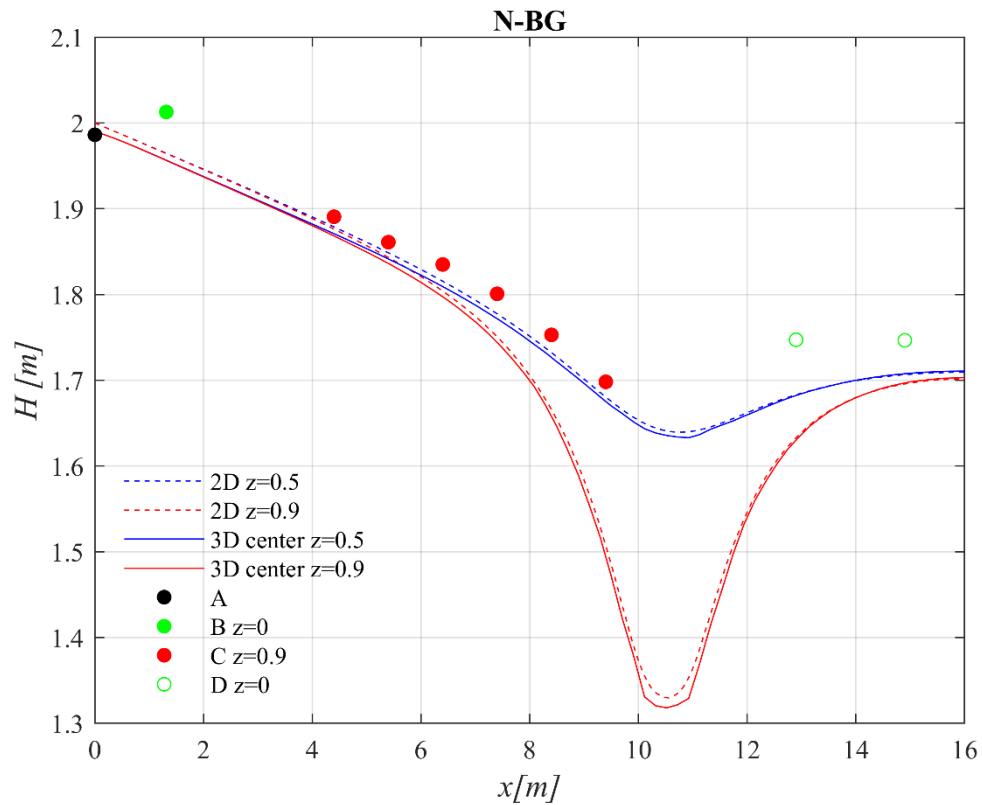
In de Noordbak liggen de buizen decentraal. Dit roept de vraag op of dit het stromingspatroon beïnvloed heeft. Figuur 1-20 toont het stijghoogteverloop in de x-richting van de bak, voor verschillende dieptes ($Z = \text{NAP} + 0,9 \text{ m}$ – hoogte waarop de meeste drukopnemers geplaatst zijn, en $Z = \text{NAP} + 0,5 \text{ m}$ – bovenkant pipinggevoelige laag) en voor verschillende Y-waarden. In de figuren is te zien dat het stijghoogteverloop langs de breedte van de sloot (van $Y = -3$ tot $Y = +3 \text{ m}$) vrijwel gelijk is. Het effect van de decentrale buizen op het stijghoogteverloop is dus zeer beperkt.



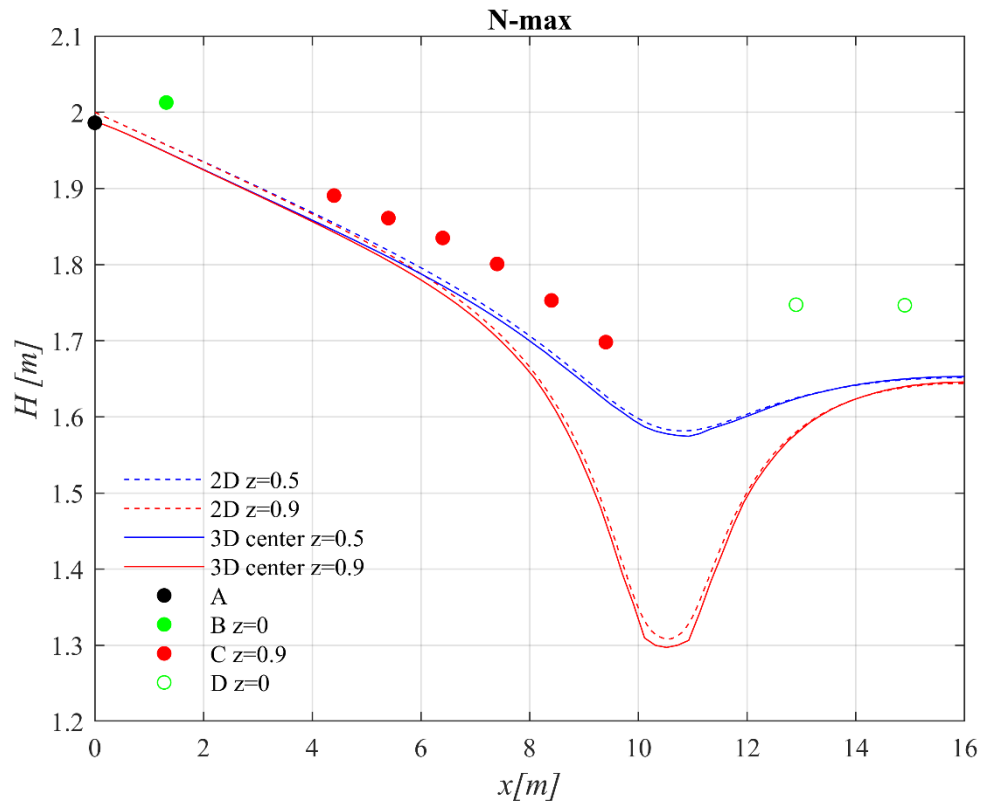
Figuur 1-20 Stijghoogteverloop voor berekening 3D-N-BG voor verschillende Z- en Y waarden

Figuur 1-21 t/m Figuur 1-23 tonen het stijghoogteverloop voor de 2D en 3D berekeningen voor de noordbak, voor de drie variaties in doorlatendheid, voor $Y = 0$ (centrale lijn tussen de middelste 2 infiltratiebuizen) en voor 2 verschillende dieptes ($Z = \text{NAP} + 0,5 \text{ m}$ en $Z = \text{NAP} + 0,9$). Het stijghoogteverloop is geschaald naar de situatie beschreven in §1.7.2, met een stijghoogte in de buizen van $\text{NAP} + 2,0 \text{ m}$ en een slootpeil van $\text{NAP} + 1,13 \text{ m}$. Uit de figuren blijkt dat de resultaten van de 2D en 3D analyse zeer vergelijkbaar zijn. De figuren illustreren

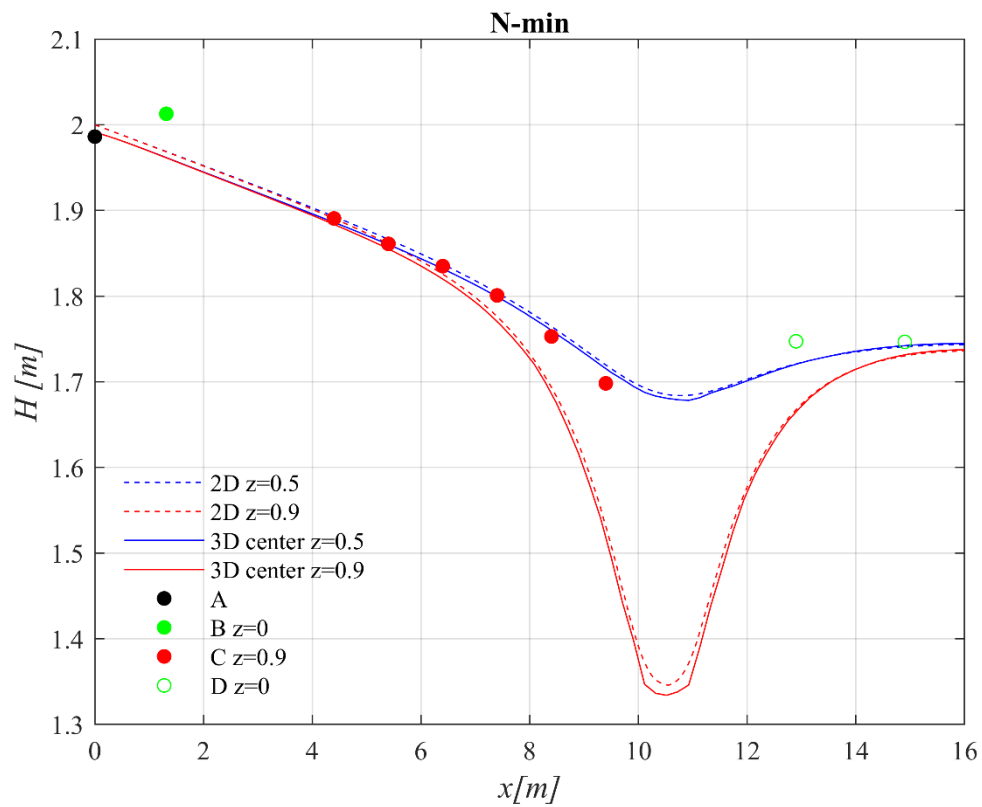
daarmee dat met de 4 buizen en de brede sloot het gelukt is om een 2D situatie te creëren, en dat de 2D analyses daarmee dus bruikbaar zijn voor de analyse van waterspanningen. Zoals al in §1.4.3 is aangegeven is het verschil tussen de stijghoogtemetingen en berekeningen te verklaren door de ligging van de bovenkant van laag 0.



Figuur 1-21 Vergelijking van stijghoogteverloop bij 2D en 3D berekeningen voor best guess variant.



Figuur 1-22 Vergelijking van stijghoogteverloop bij 2D en 3D berekeningen voor maximum doorlatendheid variant.



Figuur 1-23 Vergelijking van stijghoogteverloop bij 2D en 3D berekeningen voor minimum doorlatendheid variant.

In Tabel 1-13 zijn de debieten per strekkende meter uit de 2D berekeningen en de debieten uit de 3D berekeningen weergegeven, allen voor een verval van 0,87 m. Het 3D debiet kan goed voorspeld worden op basis van de 2D berekeningen als een effectieve breedte van 12 m wordt aangehouden. Deze effectieve breedte is toepasbaar voor alle varianten.

Tabel 1-13 Debieten 2D en 3D berekeningen

	2D	2D_breedte 12 m	3D
	Q [L/min/m]	Q [L/min]	Q [L/min]
BG	0,17	2,01	2,01
Min	0,10	1,24	1,24
Max	0,26	3,10	3,10

1.7.5 Resultaten Zuidbak

In de Zuidbak zijn de buizen wel centraal geplaatst. Gezien de resultaten van de Noordbak is de verwachting dat voor de Zuidbak de stijghoogtes uit de 3D berekening ook vergelijkbaar zijn met de stijghoogtes uit de 2D berekening. Deze analyse is daarom niet herhaald. Wel is voor de best guess variant bepaald wat de effectieve doorstroombreedte is, waarmee de debieten uit de 2D analyses geconverteerd kunnen worden. De effectieve doorstroombreedte blijkt 13 m te zijn. Deze waarde is groter dan bij vak Zuid, omdat door de centraal geplaatste buizen, de breedte effectiever benut wordt dan bij proef Noord, waar de buizen decentraal staan.

Tabel 1-14 Debieten 2D en 3D berekeningen

	2D	2D_breedte 13 m	3D
	Q [L/min/m]	Q [L/min]	Q [L/min]
BG	0,16	2,12	2,12

1.7.6 Samenvatting

Er zijn 3D grondwaterstromingsberekeningen gemaakt met DgFlow om vast stellen in hoeverre het stijghoogteverloop voorafgaand aan pipevorming afwijkt ten opzichte van een 2D berekening. De 2D en 3D berekeningen geven een vergelijkbaar stijghoogteverloop voor de situatie voorafgaand aan pipevorming en zijn dus een goed uitgangspunt voor scenario-analyse. De decentrale buizen in het noordvak hebben geen invloed op het stijghoogteverloop. De debieten per strekkende meter uit de 2D berekeningen kunnen geconverteerd worden door deze te vermenigvuldigen met de effectieve breedte: deze is 12 m voor vak Noord en 13 m voor vak Zuid.

2. Analyse piping

Nu op basis van de grondwaterstromingsanalyse is vastgesteld welk scenario qua doorlatendheid het meest waarschijnlijk is, is met behulp van DgFlow een pipinganalyse uitgevoerd. Hiervoor zijn zowel 2D berekeningen als 3D berekeningen uitgevoerd.

De proef is ontworpen met een 2D configuratie, met uitstroming van water over de gehele breedte van de sloot. Onderzoek heeft aangetoond dat het 2D Sellmeijer model een goede predictie geeft van het kritiek verval voor deze configuratie (Van Beek et al., published ahead of print). Tijdens uitvoering van de proef is echter gebleken dat dat pipe op een dieper (circa 0,6 m dieper) niveau ontwikkelde dan initieel gedacht. Een verticale pipe is ontstaan door de slootbodem heen totdat de pipinggevoelige laag is bereikt. Hierdoor is de uitstroming geconcentreerd naar enkele uitstroompunten en was van 2D uitstroming door de sloot geen sprake meer. Er is daardoor toch een 3D situatie ontstaan. Het 2D Sellmeijer model kan het kritiek verval in deze situatie niet goed voorspellen. Onderzoek heeft aangetoond dat het kritiek verval ongeveer een factor 2 lager is dan het model van Sellmeijer voorspelt in experimenten waarin de uitstroom gesloten is, met uitzondering van een enkel gat (Van Beek et al., 2015). Het is onduidelijk hoe deze factor extrapoleert naar de praktijk of naar situaties waarin de deklaag niet volledig afsluit. Daarom zijn er, naast de reguliere 2D Sellmeijer berekeningen, ook 3D berekeningen uitgevoerd om het effect van een gedeeltelijk doorlatende slootbodem op het stromingspatroon en het kritiek verval te begrijpen.

2.1 Observaties en kritiek verval tijdens de proeven

Het laatste verval (kolompeil – slootpeil), waarbij de pipes nog in evenwicht zijn gekomen is gelijk aan 2,4 m voor de Noordbak. Na het aanbrengen van een verval van 2,4 m kwam de pipe in evenwicht, waarna het verval verder is verhoogd naar 2,5 m. De pipe was op dat moment nog niet bij de drain aangekomen (Figuur 10 in 1220-164143.M24), pipe op ca. 4,4 m vanaf de sloot, drain op ca. 6,9 m vanaf de sloot). Het stagneren van de pipegroei bij een verval van 2,4 m heeft dus niet te maken met het bereiken van de drain. Het kritiek verval is daarom vastgesteld op 2,5 m. De drukval in de verticale pipe zorgt voor een reductie van het kritiek verval (de drukval in het opbarstkanaal draagt immers niet bij aan de pipevorming) en is bepaald op 0,15 m, op basis van de gemeten gradiënt van 0,25 in het opbarstkanaal en de hoogte van het opbarstkanaal van 0,6 m. Hierdoor is het netto kritiek verval gelijk aan 2,35 m

Bij de Zuidbak was er bij een verval (kolompeil – slootpeil) van 2,4 m vrij plotseling kanaalontwikkeling zichtbaar in de waterspanningsmetingen. De pipe bereikt op 21-09-06 22:00 raai 1 en groeit bij gelijkblijvend verval door tot raai 5 om 2021-09-07 07:30 (Figuur 6 in 1220-164143.M24). Bij het verval van 2,4 m is de proef gestopt en dit wordt beschouwd als het kritiek verval. De drukval in de verticale pipe wordt geschat op 0,14 m, op basis van gemeten gradiënt in proef Noord van 0.25 en de hoogte van het opbarstkanaal van 0.55 m, waardoor het netto kritiek verval gelijk is aan 2,26 m.

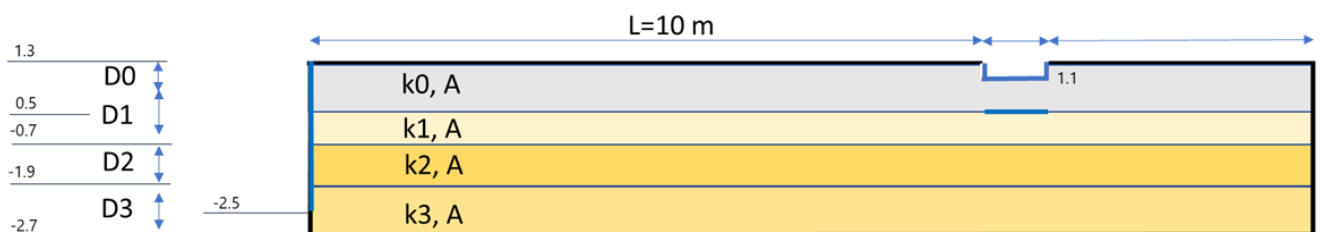
2.2 2D analyse

Voor de pipinganalyse is het kritieke verval en de kritiek pipelengte berekend voor verschillende variaties van de ondergrond, voor zowel de Noord- als de Zuidbak.

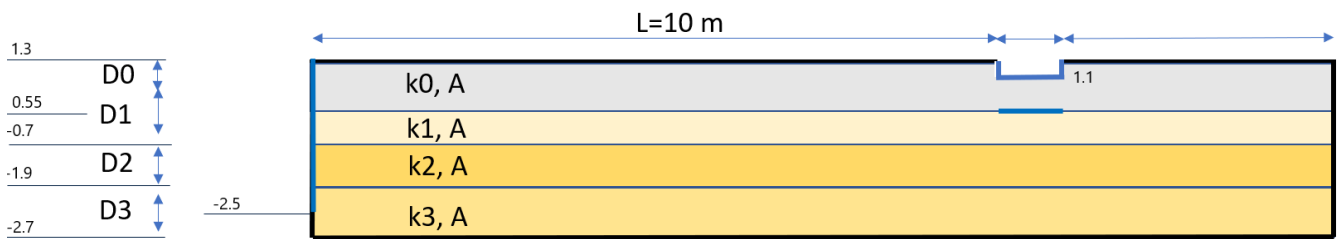
2.2.1 Geometrie en randvoorwaarden

De opbouw van de bodemlagen is bepaald met behulp van onderzoek op proeflocaties en is vergelijkbaar met de waarden gegeven in Tabel 1-1. Figuur 2-1 en Figuur 2-2 laten de schematische weergave van laagopbouw en de randvoorwaarden zien. Hoewel uit de grondwaterstromingsanalyse is gebleken dat de bovenkant van laag 0 waarschijnlijk op NAP+1,1 m ligt in plaats van NAP+1,3 m is in deze berekeningen uitgegaan van de eerder aangenomen waarde van NAP+1,3 m+. Ook ligt in de Zuidbak de scheiding met de veenlaag dieper dan gemodelleerd, op NAP-3 m, in plaats van NAP-2,7 m. Opgemerkt wordt dat er een klein verschil is in de laagopbouw tussen de bak Noord- en Zuid: de locatie van de pipe ligt op NAP+0,5 m voor de Noordbak en op NAP+0,55 m voor de Zuidbak, wat meegenomen is in de modellering. Op de effecten van deze kleine afwijkingen wordt bij het bespreken van de resultaten ingegaan.

De randen van het model zijn gesloten met uitzondering van de verticaal georiënteerde instroom ter plaatse van de kolommen en de slootrand, waar een constante stijghoogte is aangebracht. De pipe is gevormd in laag 1. Tijdens de proef is een drukval waargenomen in de verticale pipe door de slootbodem. De gemeten gradiënt van ca. 0,20-0,25 in het opbarstkanaal in proef Noord is vertaald naar een drukval in de berekeningen. Voor de berekeningen is verondersteld dat de gradiënt tijdens beide proeven gelijk was: de waarde van 0,25 is hiervoor aangehouden als veilige keuze. De drukval is daardoor aangenomen als 0,15 m voor proef Noord (0,25x0,60m) en 0,14 m voor proef Zuid (0,25x0,55). Deze stijghoogte is als extra randvoorwaarde aangebracht onder de slootbodem. Door het opleggen van deze randvoorwaarde is de doorlatendheid van de slootbodem niet meer van belang.



Figuur 2-1 Schematische weergave van de laagopbouw en de randvoorwaarden van bak Noord (zwart = gesloten rand, blauw = constante stijghoogte). L=kwelweglengte



Figuur 2-2 Schematische weergave van de laagopbouw en de randvoorwaarden van bak Zuid (zwart = gesloten rand, blauw = constante stijghoogte). L=kwelweglengte

Voor zowel de noord- als zuidbak is gerekend met de 3 varianten in doorlatendheid (minimum, best guess en maximum). De waarden voor deze doorlatendheden zijn gelijk aan die gebruikt voor de analyse van grondwaterstroming en weergegeven in Tabel 1-2. De maximum waarden voor doorlatendheid gaven in de vergelijking met debieten en stijghoogte de beste fit, maar de berekeningen zijn uitgevoerd voor alle drie de varianten (minimum, best guess en maximum) om een gevoel te krijgen voor de spreiding in sterktefactor bij variatie van doorlatendheid. Daarnaast is voor de 'best guess doorlatendheid' bekeken wat het effect is van de ligging van de bovenkant van laag 0 (NAP+1,1 m in plaats van NAP+1,3 m) en het effect van een hogere anisotropiefactor voor laag 0 (10 in plaats van 3,5). Er is geen afwijkende doorlatendheid toegekend aan de slootbodem, de verwachting is dat dit geen effect heeft op het kritiek verval in de 2D berekening.

2.2.2 Sellmeijer model

Met het programma DgFlow zijn de 2D-pipingberekeningen uitgevoerd volgens het Sellmeijer model. Voor de berekeningen is gebruik gemaakt van het aangepaste model¹ (zoals ook toegepast in D-Geo Flow en beschreven in Sellmeijer et al., 2011). Daarnaast zijn berekeningen uitgevoerd met de aangepaste *regel* van Sellmeijer. Deze rekenregel is afgeleid van MSEP-berekeningen en verschillende schaalproeven en houdt geen rekening met meerlaagsheid, anisotropie of afwijkende geometrie.

2.2.3 Model parameters

De pipe is opgelegd op de laagscheiding tussen laag 0 en laag 1. De relevante parameters voor het model van Sellmeijer zijn in

Tabel 2-1 gegeven. De d70 is gekozen op basis van de metingen die uitgevoerd zijn tijdens de CSI. De waarden voor d70 die gevonden werden in, onder en naast de pipe (respectievelijk

mu [Pa S]	rho_w [kg/m ³]	rho_p [kg/m ³]	g	Mpicard [-]	Stapgrootte stijghoogte [m]	d70 [mm]
1,30E-03	1000	2650	9,81	1000	0,01	0,135

¹ Om consistentie te behouden tussen de resultaten van de rekenregel en DgFlow, wordt de factor 0,89 toegepast op het erosie criterium. Deze factor is ook (onzichtbaar voor gebruikers) verwerkt in D-Geo Flow.

0,138 mm, 0,129 mm, 0,136 mm) werden hiervoor als meest representatief geacht. Er is op basis van deze waarden gekozen voor een d70 van 0,135 mm.

Tabel 2-1 parameters relevant voor de pipingberekeningen (mu: viscositeit water, rho_w: dichtheid water, rho_p: korrelgewicht, g: zwaartekrachtversnelling, MPicard: parameter voor stapgrootte pipediepte)

mu [Pa S]	rho_w [kg/m3]	rho_p [kg/m3]	g	MPicard [-]	Stapgrootte stijghoogte [m]	d70 [mm]
1,30E-03	1000	2650	9,81	1000	0,01	0,135

2.2.4 Mesh

In de simulatie is een ongestructureerde mesh toegepast. De gebruikte meshgrootte [m] in (GiD programma) is weergegeven in Tabel 2-2. Deze waarden zijn gekozen met het oog op de afmetingen van de proef en zijn klein genoeg om over meerdere elementen per laag te beschikken.

Tabel 2-2 Mesh grootte [m] in DgFlow

	Meshgrootte[m]
Langs de lengte van de pipe	0,05
oppervlakte sloot	0,05
Rest van model	0,1

2.2.5 Resultaten

De pipingberekeningen geven als resultaat een waarde voor het kritiek verval en de kritieke pipelengte. Tabel 2-3 laat de resultaten van pipelengte (lc) en kritiek verval (Hc) voor gevallen van best guess, maximale en minimale doorlatendheid voor de Zuid- en Noordproef zien. Het kritieke verval is met een nauwkeurigheid van 1 cm bepaald. Hc_min is het kritiek verval en komt overeen met het verval waarbij de pipe nog juist niet doorgroeit en Hc_max komt overeen met het verval waarbij de pipe juist is doorgegroeit naar de bovenstroomse randvoorwaarde. Het kritiek verval is ook met de rekenregel bepaald. De rekenregel gaat uit van een homogene laag zonder anisotropie. De gewogen gemiddelde doorlatendheid is berekend met de volgende vergelijking:

$$k_{eq} = \frac{\sum d_i k_i}{D}$$

waarin d de dikte van de laag is, k de bijbehorende doorlatendheid en D de totale dikte van het zandpakket.

De resultaten laten zien dat, zoals verwacht, de kritieke vervallen voor de Zuid- en Noordproef dicht bij elkaar liggen. Dit betekent dat in de verdere analyses voor piping slechts 1 configuratie hoeft te worden toegepast voor beide proefbakken. De kritieke vervallen wijken niet veel af van de vervallen die voorafgaand aan de proef voorspeld waren (1.65 - 2.25 m) (1120-164143.R02 Ontwerpnota).

Tabel 2-3 Resultaten van de Sellmeijer regel en berekeningen voor de Noord- en Zuidproef

file no.	Hc_regel [m]	Hc_DgFlow [m]	lc [m]
P4_2D_N_P_BG	1,92	1,78	3,25
P4_2D_N_P_max	1,77	1,65	2,85
P4_2D_N_P_min	2,17	2,01	3,50
P4_2D_Z_P_BG	1,92	1,78	3,45
P4_2D_Z_P_max	1,77	1,65	3,35
P4_2D_Z_P_min	2,17	2,00	3,25

De anisotropiefactor is voor alle lagen gelijk gehouden. Laag 0 is echter aanzienlijk fijner dan de overige lagen en het is waarschijnlijk dat de anisotropiefactor van deze laag hoger is. Om het effect van anisotropie op pipelengte en kritieke verval verder te beoordelen, werd de factor 10 toegepast voor laag 0 en de resultaten worden getoond in Tabel 2-4. Het is gebleken dat het gebruik van een anisotropiefactor van 10 voor laag 0 geen grote invloed heeft op de pipelengte en kritieke verval.

Tabel 2-4 Resultaten van berekeningen voor de Noordproef voor anisotropiefactor van 10 voor laag 0

file no.	Hc_regel [m]	Hc_DgFlow [m]	lc [m]
P4_2D_N_P_A010_BG	1,92	1,78	3,00
P4_2D_N_P_A010_max	1,77	1,64	2,95
P4_2D_N_P_A010_min	2,17	2,00	3,3

In Tabel 2-5 zijn de berekeningsresultaten bij een verlaagde topligging van laag 0 weergegeven (NAP+1,1 m in plaats van NAP+1,3 m). Hoewel de hoogteligging van deze laag veel invloed had op het stijghoogteverloop voorafgaand aan piping, is het effect van op het kritiek verval en de pipelengte minimaal. Dit betekent dat het voor de vergelijking met de proefresultaten niet uitmaakt of er met een laagscheiding van NAP+1,1m of NAP+1,3 m gerekend wordt.

Tabel 2-5 Resultaten van berekeningen voor de noordproef, best guess variant en verlaagde bovenkant laag 0 naar NAP+1,1 m in plaats van NAP+1,3 m.

file no.	Hc_DgFlow [m]	lc [m]
P4_2D_N_P_BG_11	1,78	3,35

In onderstaande tabel zijn de berekeningsresultaten weergegeven voor een diepere ligging van de bovenkant van het veen (op NAP – 3m, wat in de Zuidbak mogelijk het geval kan zijn). De verdiepte ligging zorgt voor een iets grotere dikte van het totale zandpakket, waardoor het kritiek verval lager is. Het verschil met de eerder uitgevoerde berekeningen voor Zuid (BG doorlatendheid, $H_c=1,78$ m, $l_c=3,45$ m) is echter klein.

Tabel 2-6 Resultaten van berekeningen voor de Zuidproef, best guess variant en verlaagde onderkant onderste zandlaag NAP-3 m in plaats van NAP-2,7 m.

file no.	Hc_DgFlow [m]	lc [m]
P4_2D_Z_P_BG_veen-3	1,74	3,0

2.2.6 Evaluatie en sterkefactoren

Uit de analyse van de grondwaterstroming voorafgaand aan pipevorming is gebleken dat de maximale doorlatendheid de beste fit geeft met de stijghoogte en debieten voor zowel de Noord- als de Zuidbak. De best guess doorlatendheid zou ook mogelijk zijn op basis van de waterspanningsmeters, maar de minimale doorlatendheidsvariant lijkt onwaarschijnlijk. Tabel 2-7 laat de sterktefactoren voor proef Noord en Zuid zien op basis van de berekende en gemeten kritieke vervallen (netto – gecorrigeerd voor drukval in de verticale pipe) voor de best guess en maximale doorlatendheid, op basis van de 2D berekening.

Hierbij wordt opgemerkt dat 3D effecten nog niet zijn meegewogen.

Tabel 2-7 Overzicht berekende en gemeten kritieke vervallen en sterktefactoren voor best guess doorlatendheid en maximale doorlatendheid

proef	Hc_proef [m]	Hc_BGk [m]	F_BGk [-]	Hc_maxk [m]	F_maxk [-]
Noord	2,35	1,78	1,32	1,65	1,42
Zuid	2,26	1,78	1,27	1,65	1,37

2.3 3D analyse

2.3.1 Inleiding 3D analyse

In de inleiding van dit hoofdstuk is toegelicht waarom een 3D pipinganalyse nodig is: doordat de pipe op een lager niveau is ontwikkeld dan vooraf gedacht, is de stroming sterk geconcentreerd naar de wel en zorgt de slootbodem ervoor dat het water niet over de gehele breedte kan afstromen.

Op dit moment is het nog niet mogelijk om een 3D pipingberekening uit te voeren met het Sellmeijer model, zodanig dat er direct een betrouwbaar kritiek verval uit komt. Het is echter

wel mogelijk om een 3D piping berekening uit te voeren om de gevoeligheid voor de doorlatendheid van de slootbodem af te tasten.

Bij een 3D pipingberekening met het model van Sellmeijer wordt net als in een 2D berekening de pipe gemodelleerd met lijnelementen. Volgens dezelfde criteria als bij een 2D pipingberekening wordt bepaald of een pipe kan doorgroeien bij het aangebrachte verval. Waar bij een 2D berekening wordt verondersteld dat een pipe oneindig breed is, is dit echter bij een 3D berekening niet het geval. Het instromende debiet moet verdeeld worden over de breedte van de pipe. Daar de pipe-elementen in het model geen fysieke breedte hebben, wordt de breedte toegepast in de vergelijkingen voor stroming door de pipe, waarmee de equivalente doorlatendheid van de pipe elementen wordt bepaald. Hierbij wordt verondersteld dat de breedte-diepte verhouding van de pipe constant is. Opgemerkt wordt dat de vorm van de pipe – breed en ondiep – is afgeleid uit laboratoriumproeven. Uit het CSI van de Hedwigeproeven is echter gebleken dat de pipes ook rond kunnen zijn. Daar is het model nog niet op aangepast. Daarnaast is verondersteld dat de pipe een rechte lijn volgt en dat de stroming in de pipe laminair is. De invloed van turbulentie en meandering is voor 3D situaties nog onvoldoende onderzocht.

Meer detail over 3D Sellmeijer berekeningen wordt gegeven in Van Beek et al. (published ahead of print). Uit deze studie is gebleken dat het 2D Sellmeijer model voor 2D configuraties, zoals in eerste instantie beoogd met de Hedwigeproeven, een betere voorspelling geeft dan het 3D model. Er zijn geen grote schaal proeven met 3D configuratie beschikbaar ter validatie van het 3D model.

In deze studie wordt daarom het 3D effect afgemeten op basis van een gevoeligheidsstudie en verdisconteerd aan de hand van de kritieke vervallen uit het 2D model. De mate van 3D stroming wordt afgeleid uit berekeningen met variërende doorlatendheid voor de slootbodem – van hoge doorlatendheid, waarmee een 2D configuratie is verkregen, tot een zeer lage doorlatendheid, representatief voor een volledig gesloten configuratie (volledig 3D). Ook is gekeken naar de invloed van één enkele pipe, door de breedte van het zandpakket te versmallen. Voor het Sellmeijer model is daarnaast gekeken naar het effect van doorlatendheid en breedte-diepte verhouding. Naast berekeningen met het Sellmeijer model zijn ook berekeningen uitgevoerd met een kunstmatig aangebrachte pipe. Deze pipe bestaat uit een lijnstuk waarvoor een constante stijghoogte is aangebracht. Deze berekeningen zijn uitgevoerd omdat er nog geen validatie is voor het Sellmeijer model in 3D. Het Sellmeijer model is gebaseerd op het evenwicht van korrels in de pipe. Recent onderzoek toont echter aan dat ook de erosie aan de kop van de pipe van belang is. In de berekeningen met kunstmatige pipe is gekeken naar het effect van slootdoorlatendheid op het verhang bovenstrooms van de pipe, voor twee verschillende pipelengtes.

In proef Noord was een drain aanwezig in het pad van de pipe. Deze drain kan er tijdens pipevorming voor gezorgd hebben dat de stroming weer meer 2D is geworden. Het effect van de drain is daarom ook in een 3D berekening bestudeerd. Gezien de vergelijkbare

kritieke vervallen die in de proeven zijn gevonden voor de Noord- en Zuidbak is een eerste veronderstelling dat de invloed niet groot is geweest.

Opgemerkt wordt dat deze analyses en bijbehorende factoren specifiek voor deze proefopstelling zijn uitgevoerd. Voor andere situaties zijn andere factoren van toepassing.

2.3.2 Geometrie en randvoorwaarden

De geometrie is gebaseerd op proefvak Zuid en is weergegeven in Figuur 2-3. Gezien de beperkte invloed van de decentrale buizen in vak Noord is uitgegaan van een symmetrische opbouw, waarbij de resultaten voor zowel proefvak Noord als proefvak Zuid van toepassing zijn. Bij een symmetrische opbouw hoeft slechts de helft van het model gemodelleerd te worden.

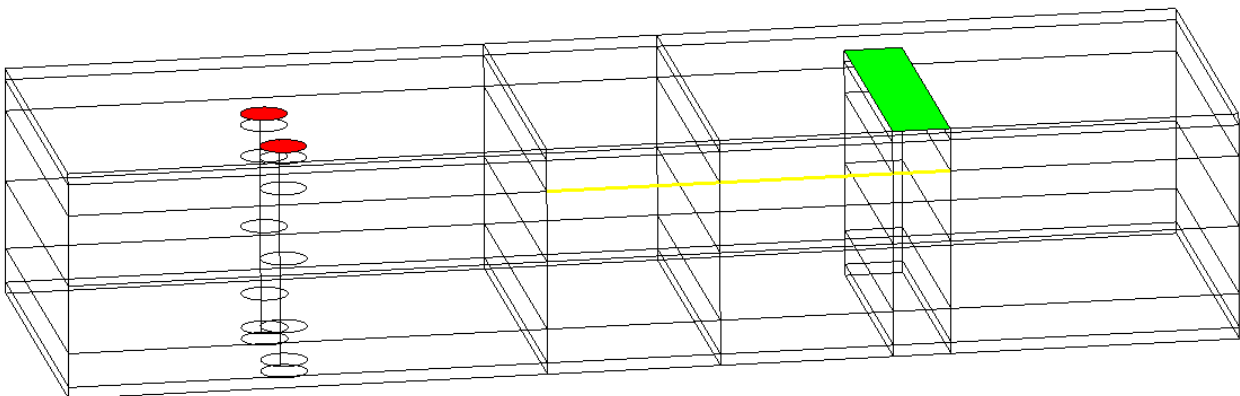
De randvoorwaarden zijn gelijk aan die van de 3D berekeningen voor de grondwaterstroming, met een constante stijghoogte aanbracht bij de sloot en bij de bovenkant van de infiltratiebuizen (variabel). Daarbij zijn twee extra randvoorwaarden opgelegd om de pipingberekening met het Sellmeijer model mogelijk te maken: de randvoorwaarde bij het uittredepunt van de pipe en de randvoorwaarde aan de bovenstroomse zijde van de pipe die gelijk is gemaakt aan de stijghoogte in de buizen (Figuur 2-3). De bovenstroomse randvoorwaarde aan de rand van het model is nodig omdat de pipe van randvoorwaarde naar randvoorwaarde moet ontwikkelen en het niet wenselijk is om de pipe diagonaal van het midden van de sloot naar één van de buizen te laten ontwikkelen. Er is daarom aangenomen dat de stijghoogte aan de rand van het model, ter plaatse van de buizen gelijk is aan de stijghoogte in de buizen. Figuur 1-20 (GWS analyse 3D), waarin de stijghoogte tussen de buizen is getoond voor de situatie voorafgaand aan piping, laat zien dat dit een goede aanname is: de stijghoogte tussen de buizen is vrijwel gelijk aan die in de buizen.

Bij de gevoeligheidsstudie naar de slootdoorlatendheid zijn twee varianten toegepast voor de drukval in de wel. In de meeste sommen zijn het slootpeil en het peil aan de benedenstroomse zijde van de pipe aan elkaar gelijk gesteld (0 m). De drukval is genegeerd, omdat een zeer doorlatende slootbodem niet tot een drukval van 0,15 m in het opbarstkanaal kan leiden. De wel gaat dan functioneren als een bron, terwijl dit in de praktijk niet mogelijk is. Er is ook een variant doorgerekend waarbij de weerstand wel is meegenomen, wat tot een toename van afstroming naar de sloot leidt ten opzichte van de situatie waarbij het niet is meegenomen. In deze sommen is de drukval echter relatief groot ten opzichte van het kritieke verval. De sommen worden daardoor minder betrouwbaar beschouwd.



Figuur 2-3 Geometrie en randvoorwaarden met constante stijghoogte in het model voor de pipingberekeningen met het Sellmeijer model

In Figuur 2-4 zijn de geometrie en randvoorwaarden weergegeven voor de situatie met kunstmatige aangelegde pipe (als randvoorwaarde). Er zijn twee pipelengtes gemodelleerd, 3 en 6 m.



Figuur 2-4 Geometrie en randvoorwaarden met constante stijghoogte in het model voor de pipingberekeningen met kunstmatige pipe. In de figuur is de pipelengte 6 m, er is ook een variant uitgevoerd met pipelengte van 3 m.

Om de invloed van de drain in het 3D-model te onderzoeken is een nieuw model gebouwd, inclusief een drain die 5 cm onder de pipe in de laag 1 is aangebracht. Om deze drain toe te voegen, wordt een vierkante doorsnede aangenomen die een vergelijkbare oppervlaktewaarde heeft als de gepresenteerde cirkel van 55 mm diameter. De drain ligt op 6.9 m afstand van de sloot.

2.3.3 Model parameters

De modelparameters zijn vrijwel gelijk aan die van de 2D pipinganalyse met aanvullingen voor initiële pipediepte en breedte-diepte verhouding van de pipe. Voor de breedte-diepte verhouding van de pipe zijn waarden van 20 en 40 aangehouden (volledig model, voor een

half model 10 en 20). Deze waarden komen overeen met fits uit laboratoriumproeven (Van Beek et al, 2019). Het MPicard getal bepaalt de stapgrootte waarmee gezocht wordt naar een evenwichtsdiepte in de pipe. Een hoger getal geeft een nauwkeuriger resultaat. Voor de berekeningen met variatie van w/a en zanddoorlatendheid is een waarde van 1000 aangehouden, voor de gevoeligheidsanalyse met betrekking tot slootdoorlatendheid is een waarde van 500 aangehouden. Aangezien het in de laatstgenoemde berekeningen vooral om de trend gaat, geeft deze waarde voldoende nauwkeurigheid. De initiële pipediepte is de startdiepte van de pipe: hierbij wordt verondersteld dat deze diepte niet kleiner kan zijn dan 1x de korreldiameter.

Tabel 2-8 parameters relevant voor de pipingberekeningen met het Sellmeijer model (mu: viscositeit water, rho_w: dichtheid water, rho_p: korrelgewicht, g: zwaartekrachtversnelling, MPicard: parameter voor stapgrootte pipediepte)

mu [Pa S]	rho_w [kg/m ³]	rho_p [kg/m ³]	g	Mpicard [-]	Stapgrootte stijghoogte [m]	D70 [mm]
1,30E-03	1000	2650	9,81	500/1000	0,01	0,135

2.3.4 Mesh

De meshgrootte in het model is weergegeven in Tabel 2-9.

Tabel 2-9 Eigenschappen mesh

	Meshgrootte[m]
Langs de lengte van de pipe	0,1
Rest van model	0,2

2.3.5 Resultaten

In Tabel 1-9 zijn de kritieke vervallen en kritieke pipelengtes weergegeven voor de uitgevoerde pipingberekeningen met variatie van breedte-diepte verhouding van de pipe (w/a) en doorlatendheid. Zoals te verwachten neemt het kritiek verval toe met toenemende breedte-diepte verhouding (w/a) en afnemende doorlatendheid. Door het toenemen van de breedte-diepte verhouding wordt het instromende water verdeeld over een groter oppervlak. Hierdoor wordt de belasting op de korrels kleiner en moet het verval verder verhoogd worden om de pipe te laten doorgroeien. Een afname van de doorlatendheid zorgt voor een lagere belasting en dus ook een hoger kritiek verval. In Figuur 1-6 zijn de stijghoogten langs het pipepad weergegeven.

In (Van Beek et al., 2021) is het effect van breedte-diepte verhouding op het kritiek verval geanalyseerd voor het 3D model van Sellmeijer, bij gelijkblijvende geometrie en zandkarakteristieken:

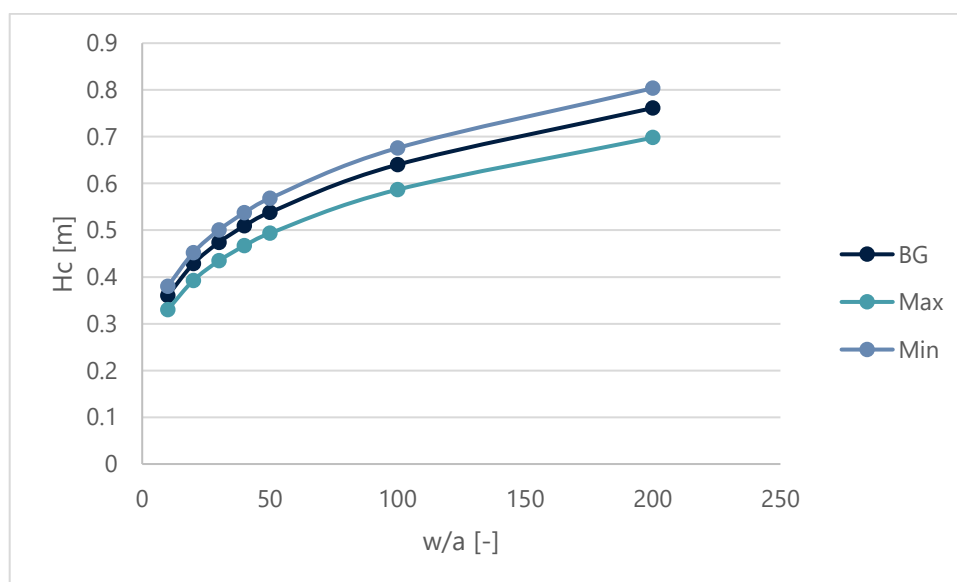
$$\frac{H_c}{L} \propto \sqrt[4]{\frac{w}{a}}$$

vergelijking
1.

Ter controle van de vergelijking is deze vergelijking toegepast om het kritiek verval te bepalen voor de simulaties met $w/a = 20$ (half model) op basis van de simulaties met $w/a = 10$ (half model). In tabel 10 is te zien dat de vergelijking inderdaad een goede predictie geeft voor het kritiek verval bij $w/a = 20$. Dit betekent dat vergelijking 1 kan worden toegepast om het kritiek verval bij andere waarden voor w/a te bepalen. Hieruit volgt bijvoorbeeld dat een zeer grote w/a verhouding nodig is, om qua kritiek verval in de buurt te komen bij het verval uit de proeven (zelfs zonder extra sterkte door fines). Dit is geïllustreerd in Figuur 0.5. Dit geeft aan dat het moeilijk is een goede fit te verkrijgen met het huidige 3D model.

Tabel 2-10 Kritiek verval en kritieke pipelengte 3D Sellmeijer berekeningen

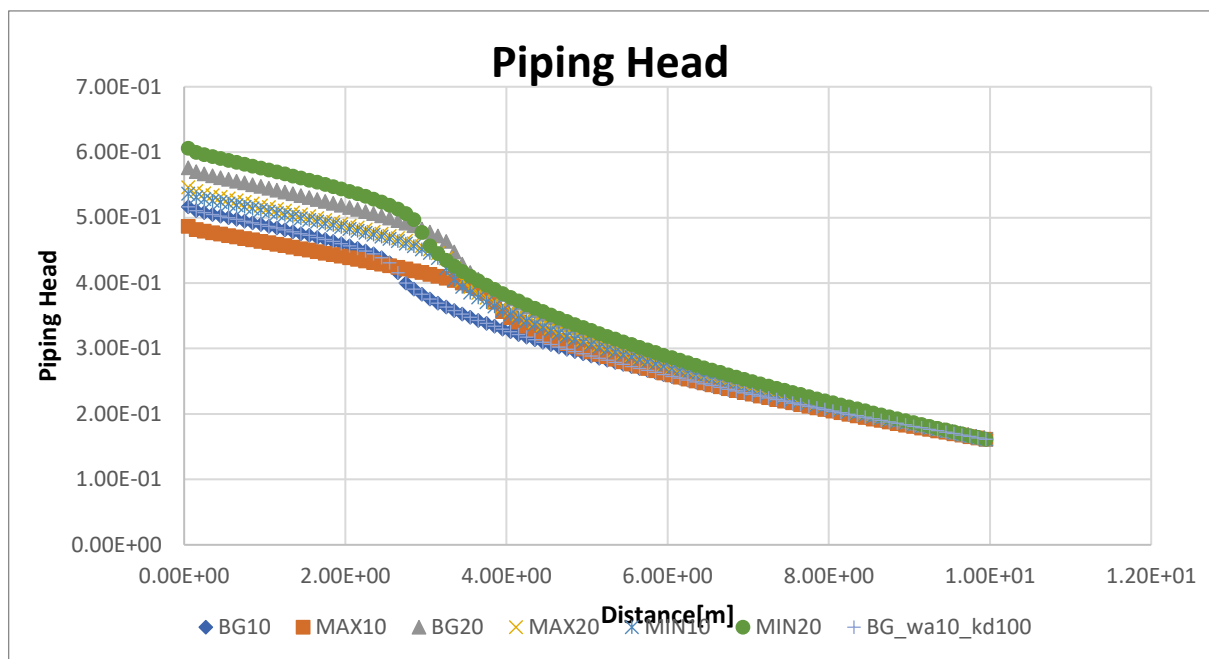
file no.	Hc_DgFlow [m]	lc [m]	Hc_verg. 1 [m]
P4_3D_BG_wa_10	0,36	7,3	n.a.
P4_3D_BG_wa_20	0,42	6,6	0,43
P4_3D_max_wa_10	0,33	6,1	n.a.
P4_3D_max_wa_20	0,39	6,6	0,39
P4_3D_min_wa_10	0,38	6,7	n.a.
P4_3D_min_wa_20	0,45	7,0	0,45



Figuur 2-5 Kritiek verval op basis van w/a volgens vergelijking 1, uitgaande van het berekende kritiek verval in DgFlow bij een w/a verhouding van 10.

De kritieke vervallen die zijn berekend, zijn in alle gevallen veel lager dan wat berekend is met het Sellmeijer model in 2D, gemiddeld een factor 4,5 lager. Mogelijk heeft dit te maken met de keuze voor w/a , de representatie van de pipe, het erosie criterium of aannames ten

aanzien van de stroming in de pipe. Door het afwijkende verval is een vergelijking met de gemeten waterspanningen niet zinvol.



Figuur 2-6 Stijghoogteverloop langs het pipepad (x-as is de afstand vanaf de infiltratiebuizen) voor de verschillende pipingberekeningen met het model van Sellmeijer

Van Beek et al. (2015) heeft aangetoond dat het verschil tussen een proef in 3D en het 2D Sellmeijer model ongeveer een factor 2 is. Het is echter onbekend of deze factor ook geldig is in de praktijk. Van Beek et al. (published ahead of print) laat ook zien dat voor een goede fit tussen 3D Sellmeijer berekening en laboratoriumproeven de breedte-diepte verhouding veel groter moet zijn dan 20. De vraag is echter of een zeer brede ondiepe pipe realistisch is: dit wordt in proeven in elk geval niet waargenomen. Aan de absolute waarde van het kritiek verval uit de 3D berekening moet daarom niet teveel waarde worden gehecht.

De verhouding tussen de 3D kritieke vervallen en 2D kritieke vervallen varieert voor de variaties in doorlatendheid: de invloed van doorlatendheid is anders in de 2D berekening dan in de 3D berekening (Tabel 2-11). Een vaste factor tussen 3D en 2D configuraties lijkt daarom niet aannemelijk.

Tabel 2-11 Vergelijking kritiek verval 2D en 3D Sellmeijer berekeningen

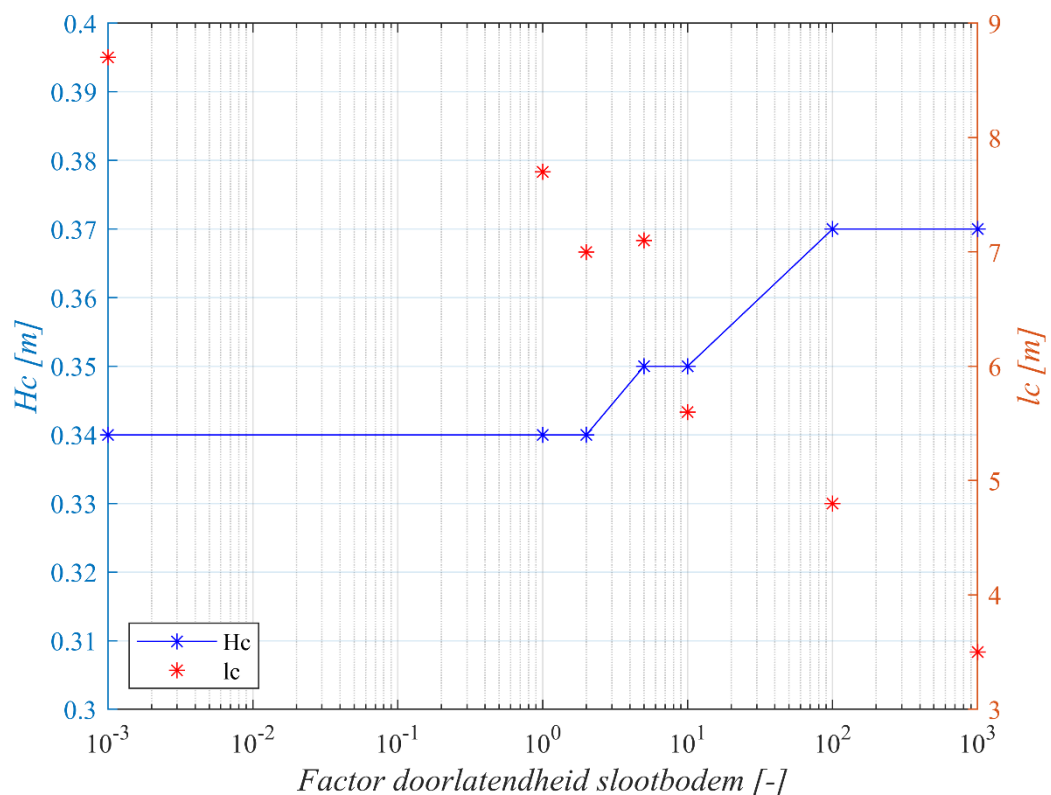
file no.	Hc_3D [m]	Hc_2D	Hc_3D/Hc_2D [-]
P4_3D_BG_wa_10	0,36	1,78	0,20
P4_3D_BG_wa_20	0,42	1,78	0,24
P4_3D_max_wa_10	0,33	2,00	0,17
P4_3D_max_wa_20	0,39	2,00	0,20
P4_3D_min_wa_10	0,38	1,65	0,23
P4_3D_min_wa_20	0,45	1,65	0,27

In Figuur 2-7 zijn de kritieke vervallen en pipelengtes weergegeven voor berekeningen met gevarieerde slootbodendoorlatendheid. In proefvak Noord was de doorlatendheid van de slootbodembodem vergelijkbaar met die van laag0. In proefvak Zuid was de geschatte doorlatendheid echter iets hoger, ca. 3* k_{zand0} .

Deze berekeningen zijn met best guess doorlatendheid uitgevoerd, maar omdat het hier een trend betreft en absolute waarden niet direct met 2D berekeningsresultaten worden vergeleken is dat acceptabel. In Figuur 2-7 is uitgegaan van de berekeningsresultaten zonder drukval in het opbarstkanaal. In appendix A wordt ingegaan op de achterliggende gedachte voor deze keuze en worden andere modelonzekerheden besproken. Wat direct opvalt is dat het kritiek verval niet sterk beïnvloed wordt door de doorlatendheid van de slootbodembodem, zelfs niet als deze zeer doorlatend wordt gemaakt. Dit heeft waarschijnlijk te maken met het feit dat er slechts 1 pipe aanwezig is die voor alle berekeningen bij het kritiek verval nog behoorlijk lang is (>3 m). De invloed van de slootbodembodemdoorlatendheid is dan relatief beperkt.

De kritieke pipelengte neemt wel af met toenemende doorlatendheid van de slootbodembodem.

De berekening waarin de drain is toegevoegd geeft een identiek kritiek verval als dezelfde berekening zonder drain. Het effect van enige wijziging van de grondwaterstroming ten gevolge van de drain op het kritiek verval is dus verwaarloosbaar. Wel moet hierbij aangegeven worden dat het omhoog of omlaag groeien van de pipe wel tot extra weerstand kan hebben geleid, wat hier niet is gemodelleerd.



Figuur 2-7 Effect van doorlatendheid slootbodembodem (aantal x doorlatendheid laag 0) op het kritiek verval (H_c) en kritieke pipelengte (l_c)

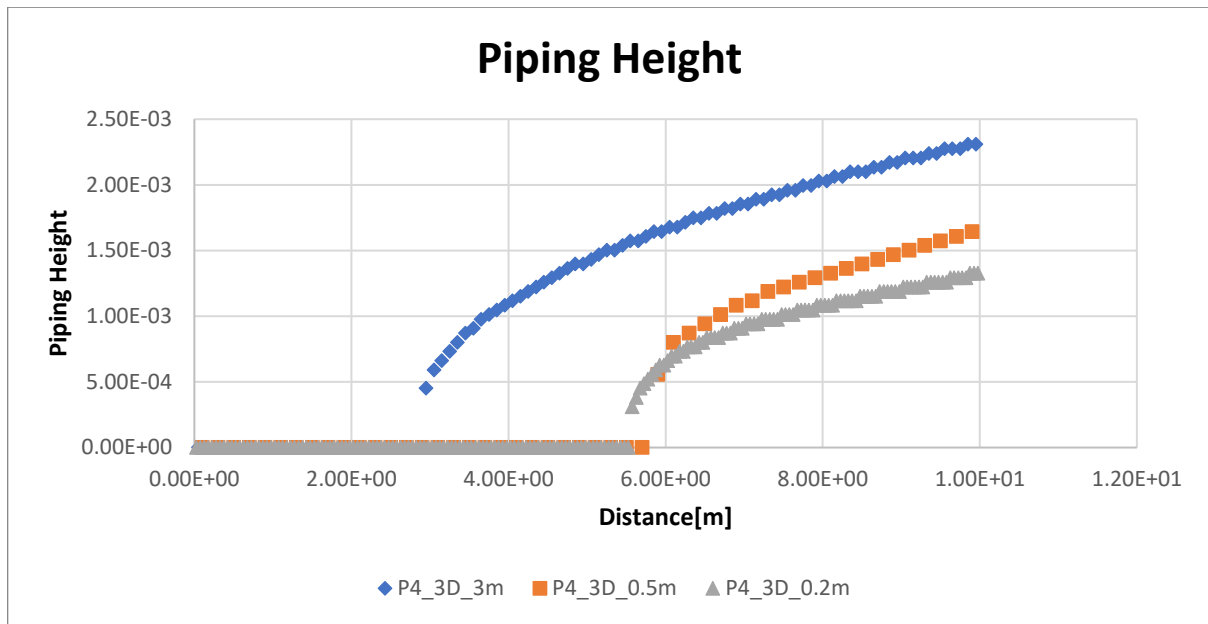
Het 3D effect kent twee aspecten: enerzijds de uitstroom naar het achterland (volledig naar 1 punt: 3D, vrije uitstroming naar het achterland 2D) en anderzijds het aantal pipes dat vormt (pipe patroon 2D, enkele pipe 3D). In de voorgaande analyse is het effect van de uitstroom bekeken. Hieruit bleek dat ook bij een zeer doorlatende slootbodem, er slechts een beperkte afname van het kritiek verval was ten opzichte van een gesloten slootbodem. Het pipepatroon was dus dominant. Wanneer er een patroon van pipes ontstaat wordt de stroming verdeeld over de verschillende pipes. Proeven bij de Deltagoot laten zien dat de afstand tussen deze pipes relatief klein kan zijn (0,2-0,5 m). Om te bekijken wat het 3D effect van een enkele pipe is ten opzichte van een pipe patroon (waarvoor het Sellmeijer 2D model geldig is), is een pipe patroon gesimuleerd door de breedte van het model te verkleinen. De analyse laat zien dat vanaf een breedte van ca. 3 m, het verval niet veel meer verandert. Naarmate de breedte kleiner wordt neemt het kritiek verval sterker toe. Het verschil tussen de situatie met volledige breedte en een zeer smalle breedte (0,2 m – halfspace model) blijkt ca. een factor 1,8 te zijn. Wanneer de breedte nog kleiner wordt gemaakt neemt het kritiek verval misschien nog verder toe, waardoor de factor nog verder toeneemt. De vraag hierbij is wat realistisch is: pipes zullen van nature ook op enige afstand van elkaar ontwikkelen. Zoals te verwachten is, neemt ook de kritieke pipelengte af met afnemende breedte.

Tabel 2-12 Meshgrootte van de modellen

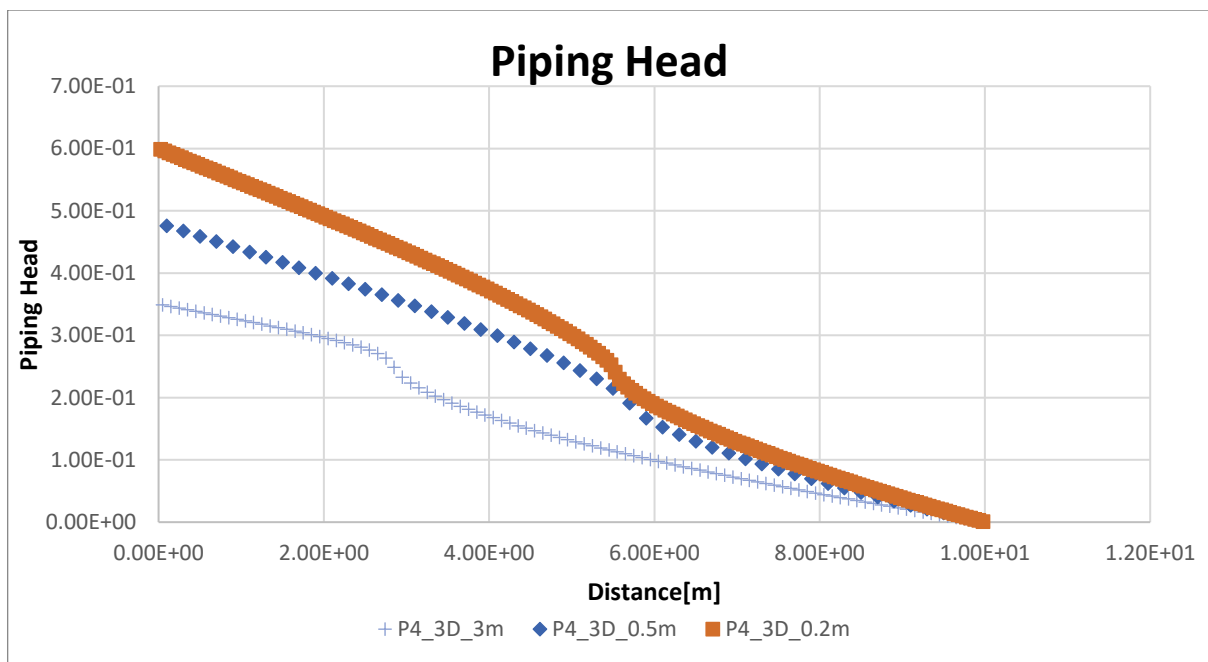
Meshgrootte[m]	P4_3D_3m	P4_3D_0.5m	P4_3D_0.2m
Langs de lengte van de pipe	0,1	0,2	0,05
Rest van model	0,5	0,3	0,1

Tabel 2-13 Kritiek verval en kritieke pipelengte 3D Sellmeijer berekeningen met beperkte breedte

file no.	Hc_DgFlow [m]	lc [m]
P4_3D_3m	0,35	7,1
P4_3D_0.5m	0,48	4,2
P4_3D_0.2m	0,60	4,45



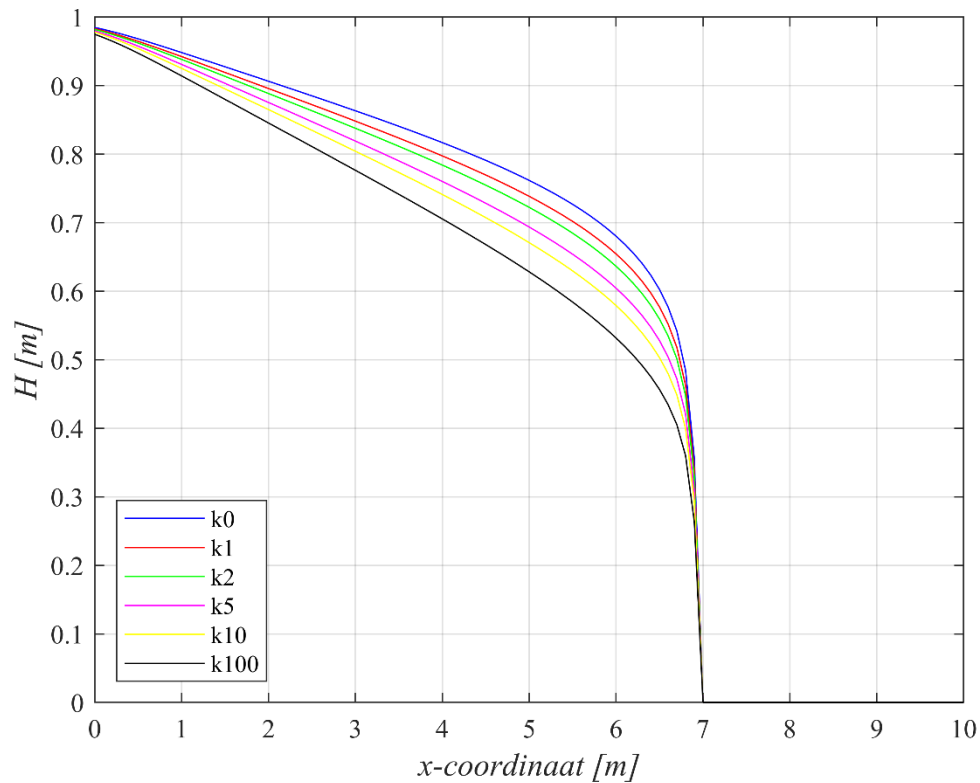
Figuur 2-8 Piping hoogte langs het pipepad (x-as is de afstand vanaf de infiltratiebuizen) voor de verschillende pipingberekeningen met het model van Sellmeijer



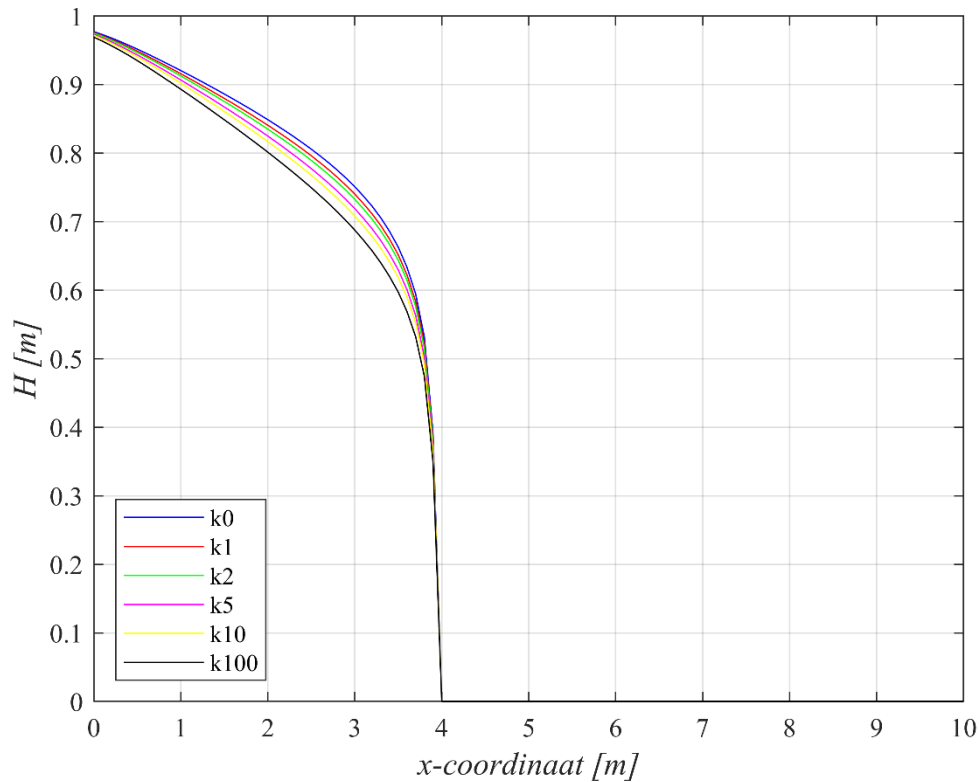
Figuur 2-9 Stijghoogteverloop langs het pipepad (x-as is de afstand vanaf de infiltratiebuizen) voor de verschillende pipingberekeningen met het model van Sellmeijer

Voor de berekeningen met kunstmatige pipe is eveneens gekeken naar het effect van slootbodendoorlatendheid. Ook in deze berekeningen is gevarieerd met de drukval in het opbarstkanaal, maar om in de Appendix A genoemde redenen is uitgegaan van een gelijke stijghoogte in pipe en sloot. Figuur 2-10 en Figuur 2-11 laten het stijghoogteverloop langs het pipepad zien voor verschillende doorlatendheden van de slootbodem en een verval van 1

m. In deze figuren is te zien dat het verhang bovenstrooms van de pipe groter is, wanneer de doorlatendheid van de slootbodem kleiner is. Dit is te verklaren doordat bij een hoge slootbodendoorlatendheid meer water afstroomt naar de sloot: hierdoor neemt de druk op de pipe af. De invloed van de slootdoorlatendheid is echter veel kleiner voor een sloot van 6 m dan een sloot van 3 m. Bij een langere pipe draineert de pipe zelf al voldoende en heeft de afstroming naar de sloot minder effect.

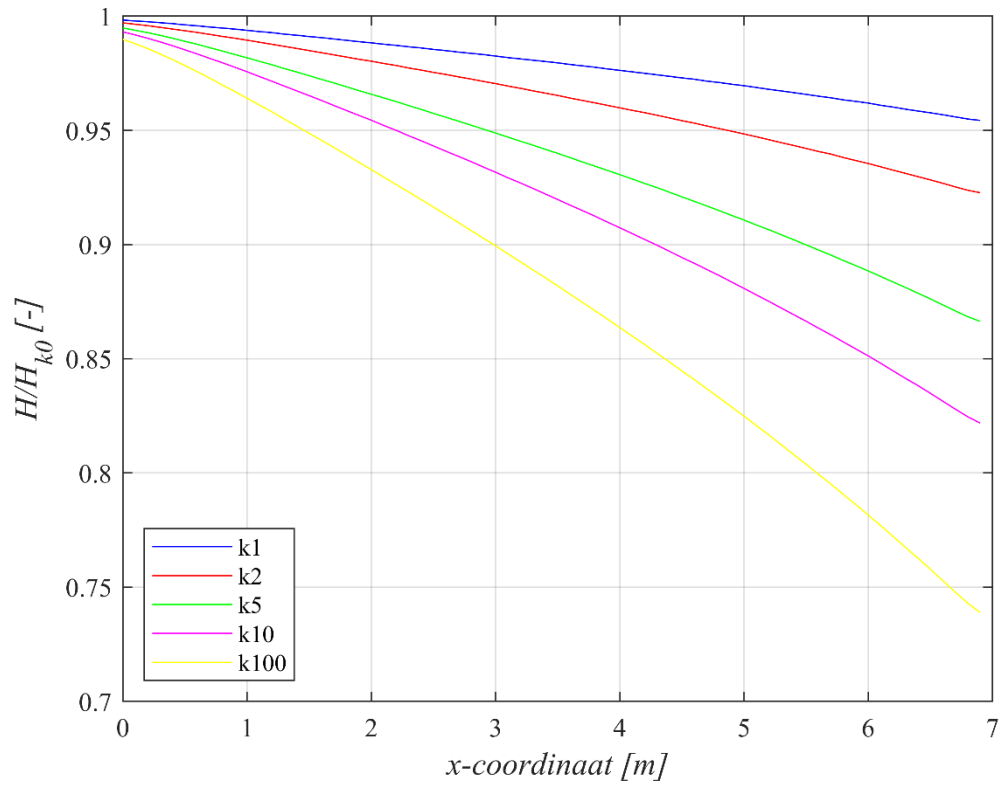


Figuur 2-10 Stijghoogteverloop langs het pipepad (gemeten vanaf infiltratiebuis) voor een pipe van 3 m lang.

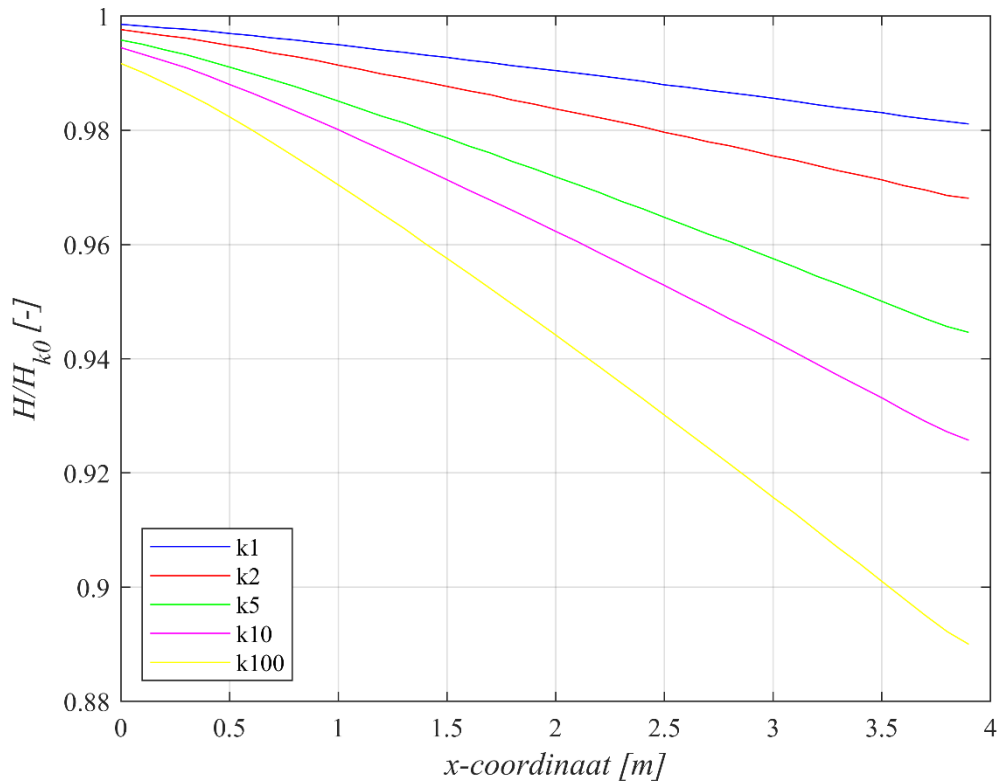


Figuur 2-11 Stijghoogteverloop langs het pipepad (gemeten vanaf infiltratiebuis) voor een pipe van 6 m lang.

De situatie waarbij de sloot een doorlatendheid van $1/1000 \cdot k_{\text{zand0}}$ heeft, kan gezien worden als een 3D uitstroom. De afgenomen belasting op de pipe ten gevolge van uitstroom door de slootbodem kan bepaald worden door de stijghoogte te delen op de stijghoogte van de situatie met 3D uitstroom (Figuur 2-12 en Figuur 2-13). De afname van de belasting op de pipe is relatief beperkt in de range die verwacht is in de proef ($\{1-4\} \cdot k_{\text{zand0}}$), met name voor een wat langere pipe. Voor een lange pipe is de afname van verhang een factor 0,97 voor $1 \cdot k_{\text{zand0}}$ en ca. 0,94 voor $5 \cdot k_{\text{zand0}}$. Voor een kortere pipe van 3 m zijn deze factoren ca. 0,95 en 0,87. Zelfs een volledig open slootbodem heeft maar een beperkt effect op de belasting op de pipe, omdat er maar 1 pipe gemodelleerd is.

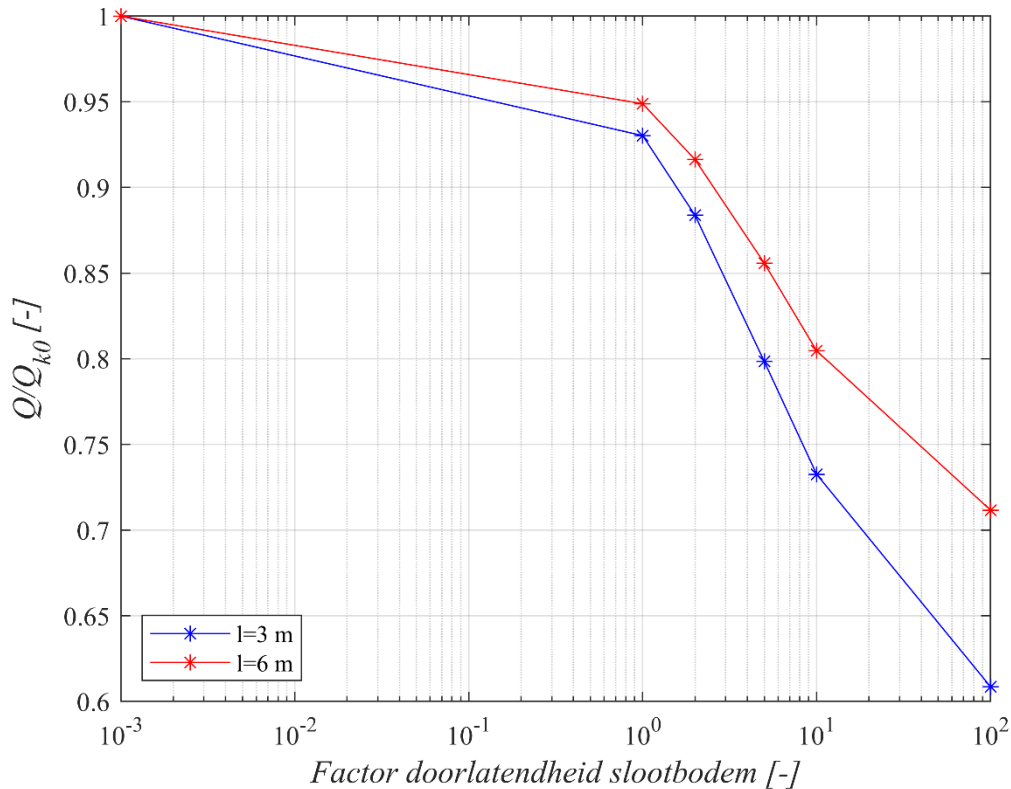


Figuur 2-12 Stijghoogteverloop genormaliseerd met het stijghoogteverloop bij $k_{\text{slootbodem}}=1/1000 \cdot k_{\text{zand0}}$, voor een pipelengte van 3 m.



Figuur 2-13 Stijghoogteverloop genormaliseerd met het stijghoogteverloop bij $k_{\text{slootbodem}}=100 \cdot k_{\text{zand0}}$, voor een pipelengte van 6 m.

Het effect van de variatie in slootbodemdoorlatendheid op het debiet is weergegeven in Figuur 2-14. Er is echter geen directe correlatie tussen het debiet en het kritiek verval, waardoor deze gegevens moeilijker te interpreteren zijn. De figuur bevestigt wel het eerdere beeld dat de invloed van de doorlatendheid van de slootbodem groter is bij een kleinere pipelengte.



Figuur 2-14 Debiet genormaliseerd met het debiet bij $k_{\text{slootbodem}}=1/1000 \cdot k_{\text{zand0}}$, voor een pipelengte van 3 en 6 m.

2.3.6 Evaluatie

Er zijn 3D berekeningen uitgevoerd met het model van Sellmeijer en met een kunstmatige pipe om vast te stellen in hoeverre de slootbodem in de proef voor afstroming heeft kunnen zorgen ten opzichte van een 2D-uitstroom of een volledig dichte sloot. De pipingberekeningen met het model van Sellmeijer laten zien dat de parameter breedte-diepte verhouding van de pipe een grote invloed heeft op het kritiek verval. Deze waarde is onbekend, waardoor de absolute waarde van het kritiek verval uit de 3D berekeningen weinig waarde heeft. De berekeningen zijn daarom vooral gebruikt om trends te duiden. De variatie van slootbodemdoorlatendheid had vrijwel geen invloed op het kritiek verval. Dit heeft mogelijk te maken met de relatief lange kritieke pipelengte in deze berekeningen en het feit dat er maar 1 pipe gemodelleerd is voor de gehele breedte.

Het effect van de pipelengte en het aantal pipes is eerder bestudeerd in laboratorium- en veldproeven. In laboratoriumproeven zien we dat wanneer een 2D uitstroom toegepast wordt (bijvoorbeeld een natuurlijke helling of een vlak – zie bijv. van Beek et al. (2011), het kritiek verval goed wordt voorspeld door het model van Sellmeijer, ook wanneer er slechts één pipe is. In deze proeven is de kritieke pipelengte altijd kort. Doordat de pipe kort is, is de 2D uitstroom zeer dichtbij en kan het stromingsmodel om die reden daarom vergeleken worden met het 2D Sellmeijer model, die een oneindige breedte van de pipe aanneemt. Ook veldproeven als de IJkdijkproeven en de Deltagootproeven (Silvis, 1991) wordt het kritiek verval goed voorspeld door het 2D model. Bij de IJkdijkproeven was de kritieke pipelengte

ook erg kort, waarschijnlijk door het grote uitstroomoppervlak. Bij de deltagootproeven was de pipelengte niet kort, maar ontstond er wel een patroon van pipes, waardoor ook hier sprake was van een 2D situatie. Samenvattend: voor proeven met 2D uitstroom én een relatief korte kritieke pipelengte (denk hierbij aan ca $<1/10$ van de kwelweglengte) of een pipepatroon is het model van Sellmeijer geschikt. In de modellering van de Hedwigeproeven zien we dat er geen sprake is van een patroon met meerdere pipes (modelkeuze ivm observaties in proef) en ook geen korte kritieke pipelengte. Bij de kritieke lengte voelt de pipe de invloed van de sloot minder sterk, waardoor de invloed van de doorlatendheid klein is.

De berekeningen met kunstmatige pipe laten ook zien dat het effect van de slootdoorlatendheid veel kleiner is voor grote pipelengtes dan voor relatief kleine lengtes. In beide gevallen (lengte 3 m en lengte 6 m) is de invloed op het stijghoogteverloop in het pad van de pipe beperkt.

Dat betekent dat het 3D model met 1 pipe en zeer doorlatende uitstroom niet overeenkomt met een 2D model en daarmee ook niet vergeleken kan worden. Wel is duidelijk dat het kritiek verval niet sterk beïnvloed wordt door de slootbodendoorlatendheid, waardoor de proef sterk vergelijkbaar is in kritiek verval met een situatie waarbij de sloot volledig gesloten zou zijn (een volledig 3D situatie).²

Dit roept de vraag op of het oorspronkelijke ontwerp met de sloot überhaupt tot een 2D situatie had kunnen leiden dat met het 2D Sellmeijer model te voorspellen is. Bij een volledige 2D uitstroom zou er de mogelijkheid geweest zijn dat er meerdere pipes richting de infiltratiebuizen ontwikkelen, zoals ook geobserveerd is in de deltagootproeven. In dat geval was het 2D Sellmeijer model wel toepasbaar geweest.

Om het 3D effect, veroorzaakt door een enkele pipe, te onderzoeken zijn analyses uitgevoerd met een kleinere modelbreedte. De kleinere modelbreedte simuleert het kleinere aanstroomgebied, wat je ook zou hebben bij een patroon van pipes. Uit deze analyse blijkt dat een modelbreedte van 0,2 m (representatief voor een afstand tussen pipes van 0,4 m) tot een ca. 1,8 keer hoger verval leidt dan een model met volledige breedte. Dit geeft een indruk van het 3D effect veroorzaakt door de aanwezigheid van een enkele pipe. In Deltagootproeven is een afstand tussen pipes van ca. 0,2-0,5 m waargenomen.

Welke factor gehanteerd zou moeten worden voor het 3D effect, in dit geval met name veroorzaakt door het ontstaan van een enkele pipe en in mindere mate door de afstroming naar de sloot, blijft wel een mate van onzekerheid hebben. Bij labschaalproeven is hiervoor een factor 2 gevonden, maar het niet bekend of deze factor geëxtrapoleerd kan worden naar veldomstandigheden. Uit analyse van variatie van de modelbreedte lijkt deze factor qua ordegrrootte bevestigd te worden. Verder wordt aanbevolen om het effect van de breedte-diepte verhouding van de pipe op de kritieke pipelengte te onderzoeken. De invloed van de doorlatendheid van de slootbodem neemt namelijk toe wanneer de pipelengte korter wordt.

² Hierbij wordt opgemerkt dat de keuze van de breedte-diepte ratio van de pipe mogelijk invloed heeft op de kritieke pipelengte.

Tenslotte wordt aanbevolen om nog aanvullend te bekijken wat het effect is van de drukval in het opbarstkanaal in een berekening waarbij aanvullende weerstand tegen erosie is meegenomen, zodat het kritiek verval qua orde-grootte goed voorspeld wordt.

2.4 Samenvatting

In dit hoofdstuk zijn 2D en 3D pipingberekeningen gerapporteerd. Hoewel de proeven ontworpen waren voor een 2D uitstroom, zodat het kritiek verval voorspeld kon worden met een 2D model, is in de proeven gebleken dat de pipe op een dieper niveau ontwikkelde. Daardoor was er geen sprake van een open uitstroom en ontwikkelde er maar 1 pipe. De slootbodem was echter niet geheel ondoorlatend.

De gekozen aanpak voor de analyse was om met het 2D Sellmeijer model kritieke vervallen te berekenen en aan de hand van 3D berekeningen vast te stellen wat de mate van 3D stroming was ten gevolge van de semi-doorlatende slootbodem.

Uit de 2D pipingberekening volgt dat de sterktefactoren in de orde-grootte van 1.3-1.4 zijn voor zowel bak Noord als bak Zuid, afhankelijk van de gekozen doorlatendheidsvariant. De proeven hebben ondanks het verschil in debiet een vergelijkbare ondergrond en daarmee een vergelijkbaar kritiek verval. Het verschil in variatie in debiet werd voornamelijk veroorzaakt door een verschil in slootbodemdoorlatendheid, welke geen invloed heeft op het kritiek verval in de 2D berekening.

Uit de 3D berekeningen volgt dat de invloed van de slootbodemdoorlatendheid op het kritiek verval niet groot is (kritiek verval is een paar procent hoger ten opzichte van een situatie met volledig dichte sloot). Dit heeft te maken met de relatief lange kritieke pipelengte, waardoor de afstand van pipekop tot de sloot vrij groot is. De situatie kan door de aanwezigheid van 1 enkele pipe richting de filtratiebuizen daarom als vrijwel volledig 3D gezien worden.

Er is nog beperkte kennis beschikbaar over het 3D modelleren van piping. Daarom is ook aan de hand van een kunstmatige gemodelleerde pipe gekeken naar het verhang bovenstrooms van de pipe. Deze berekeningen bevestigen dat de invloed van de slootbodemdoorlatendheid groter is voor kortere pipes. Het verhang bovenstrooms van de pipe is iets lager voor een semi-doorlatende slootbodem, zoals in de proeven, dan voor een ondoorlatende slootbodem, alhoewel de verschillen niet groot zijn (maximaal ca. 15%), zeker niet voor langere pipes.

Voor laboratoriumproeven wordt een 3D factor van 2 gehanteerd bij een gesloten opstelling met 1 pipe (3D configuratie). Een gevoeligheidsstudie naar de modelbreedte duidt op een factor die qua orde-grootte vergelijkbaar is. Dit zou voor de Hedwigeproeven resulteren in sterktefactoren rond 2,6-2,8. Het is echter nog niet duidelijk hoe betrouwbaar deze factor is. Hiervoor is meer kennisontwikkeling rondom 3D piping benodigd, wat buiten de scope van het onderzoek valt.

Appendix A

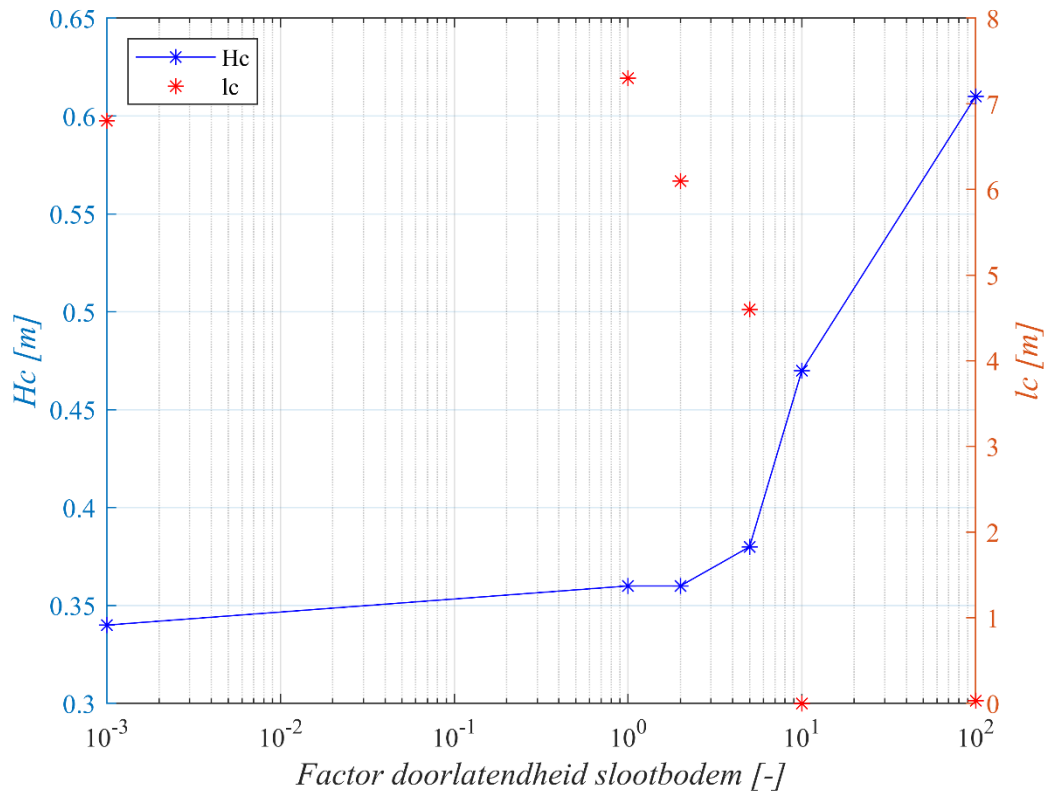
Effect van drukval in
opbarstkanaal op 3D berekening

In deze appendix zijn resultaten van 3D pipingberekeningen opgenomen waarin rekening is gehouden met een drukval in het opbarstkanaal. Deze berekeningen zijn uitgevoerd met dezelfde schematisatie en randvoorwaarden als beschreven in §2.3, maar met het verschil dat er bij het uitstroompunt van de pipe een verval van 0,15 m is aangebracht in plaats van 0 m.

In de berekeningen uitgevoerd met deze randvoorwaarde is de doorlatendheid van de slootbodem gevarieerd. Figuur 2-15 laat het effect zien van het verhogen en verlagen van de doorlatendheid van de slootbodem met een factor $F \cdot k_{\text{zand}0}$. De berekeningen zijn uitgevoerd met een w/a verhouding die eerder in laboratoriumproeven is uitgevoerd. Zoals ook in §2.3 is uitgelegd, geeft deze waarde voor de simulatie van de proeven een zeer laag kritiek verval. Voor het bestuderen van trends is dit normaliter geen probleem. In de simulaties met drukval over het opbarstkanaal van 0.15 m is de verhouding tussen het kritiek verval (ordegrootte 0,3 – 0,4 m) en de drukval echter onrealistisch groot. De sloot trekt dan onevenredig veel water aan, waardoor de invloed van de sloot veel groter wordt. Daarnaast kan de drukval van 0,15 m onrealistisch worden bij hogere slootbodemdoorlatendheden: de pipe gaat dan als bron fungeren, waarbij het water van de pipe naar de sloot stroomt. Daarom is voor de analyse in het hoofdrapport uitgegaan van de situatie zonder drukval in de pipe.

Om het effect van de drukval in het opbarstkanaal te beschouwen zou een simulatie moeten worden uitgevoerd waarbij het kritiek verval dichtbij het verval uit de proef ligt. Hiervoor moet waarschijnlijk de breedte-diepte verhouding van de pipe verhoogd worden, evenals de weerstand tegen erosie. Het is mogelijk dat de drukval in het opbarstkanaal een verhoging van het effect van de slootbodemdoorlatendheid veroorzaakt. In het bereik van de doorlatendheid van de proef is dit effect naar verwachting echter klein.

Hoewel de uitgevoerde berekeningen met drukval van 0,15 cm, resulterend in een laag kritiek verval, niet realistisch zijn, geven ze toch inzicht in het gedrag bij verschillende doorlatendheden van de slootbodem. Naarmate de slootbodem meer doorlatend wordt neemt het kritiek verval steeds verder toe en de pipelengte steeds verder af. De situatie met pipelengte 0, wat gevonden wordt bij een doorlatendheid van $k_{\text{sand}0} \cdot 100$ zou overeen kunnen komen met een 2D uitstroom. Het kritiek verval is 0,47, wat ongeveer 1,4 maal zo hoog is als het verval waarbij de sloot volledig dicht is. Dit suggereert een lagere 3D factor dan bij de laboratoriumproeven wordt gevonden. Het is echter mogelijk dat de pipe bij deze situatie al als bron fungeert waardoor de waarde van het kritiek verval onbetrouwbaar is. Een betere manier om in een 3D berekening dichterbij een 2D situatie te komen, en daarmee een inschatting te maken van de 3D factor, is het simuleren van een pipepatroon.



Figuur 2-15 Effect van doorlatendheid slootbodemb (aantal x doorlatendheid laag 0) op het kritiek verval (Hc) en kritieke pipelengte (lc) bij een drukval in het opbarstkanaal van 0,15 m.

Appendix G

Bepaling debieten en
(bulk)doorlatendheid (Darcy)

Grootschalige pipingproef Hedwigepolder

Aan: Projectteam Hedwigepolder
Van: Luuk Barendse; Gert-Ruben van Goor
Datum: 14 juni 2022
Ref nr.: 1220-164143.M28 v2.0
Onderwerp: Bepaling debieten, (bulk)doorlatendheid zand en vergelijk met doorlatendheidsvariatie uit proefontwerp (fase 2 en 3)

1. Debietbepaling

De debieten geven inzicht in de processen die zich afspelen in de ondergrond en zijn nodig is voor de verificatie van de doorlatendheid. De debietmeters bleken tijdens de proef niet accuraat de netto ingaande debieten te kunnen meten vanwege het niet meten van terugstromend water (REF Factual). In de infiltratiebuizen zelf wordt de waterstand echter continu gemeten met waterspanningsmeters en op basis daarvan kunnen infiltrerende debieten ook worden bepaald: het infiltrerende water leidt tot een waterstandsverlaging die omgerekend kan worden naar een debiet. De waterstanden zijn met waterspanningsmeters met een frequentie van 10 s gemeten. Door het verschil in waterstand over een bepaalde tijdsperiode te bepalen, kan hiermee het debiet worden bepaald met onderstaande formule:

$$Q_{in} = \frac{\Delta H}{\Delta T} * A_{buis}$$

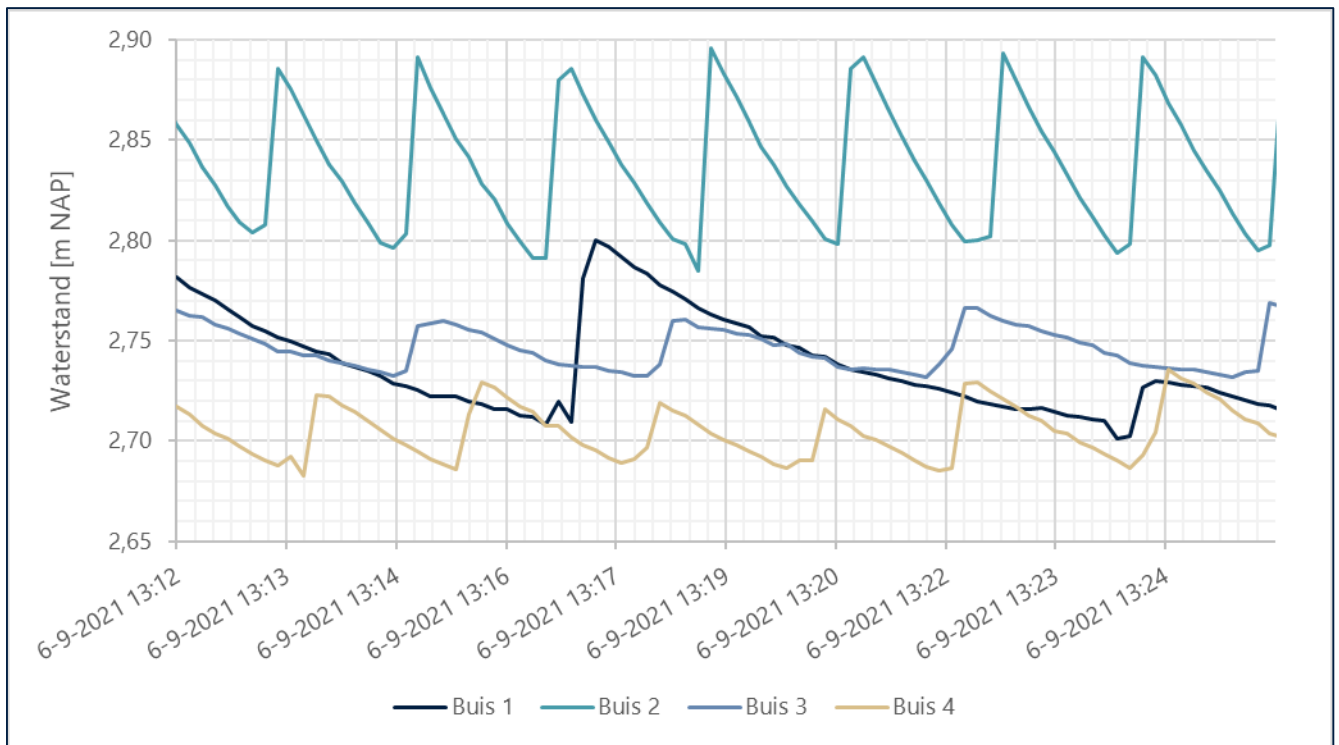
Met;

Q_{in} = infiltrerend debiet [m^3/s]
 ΔH = verschil in waterstand [m]
 ΔT = verschil in tijd [s]
 A_{buis} = inwendig oppervlakte infiltratiebuis [m^2]

De inwendige diameter van de infiltratiebuizen bedraagt 0,2966 m, wat neerkomt op een inwendig oppervlakte van 0,0691 m^2 . Een voorbeeld van de veranderingen in waterstand is te zien in Figuur 1.1. De volledige tijdreeksen van de proefuitvoering zijn te zien in Figuur 1.2 en Figuur 1.4. De pieken van Buis 3 en 4 in het Noordelijke proefvak in de ochtend van 13 september werden veroorzaakt doordat deze infiltratiebuizen nog niet goed waren afgesteld, waardoor de infiltratiebuizen voller liepen dan beoogd. Na 13 september 12:00 zijn de infiltratiebuizen goed afgesteld. Omdat deze waterstanden nog niet tot een hoog verval leidde, heeft dit geen invloed op de verdere proef gehad.

Hierbij wijzen de toenames in waterstand op het bijvullen van de infiltratiebuis. Na dit bijvullen is er een afname te zien, wat duidt op infiltratie van het water in de ondergrond. In de debietbepaling is deze afname van belang, omdat hieruit het infiltratiedebiet kan worden bepaald. Over elke tijdstap van 10 seconde ($\Delta T=10$ s) is het verschil in waterstand (ΔH) over die 10 seconde bepaald. Dit leidt tot een debiet per tijdstap, wat voor elke buis individueel kan worden bepaald. Door deze debieten op te tellen, is er een totaal debiet bepaald over elke tijdstap van 10 s.

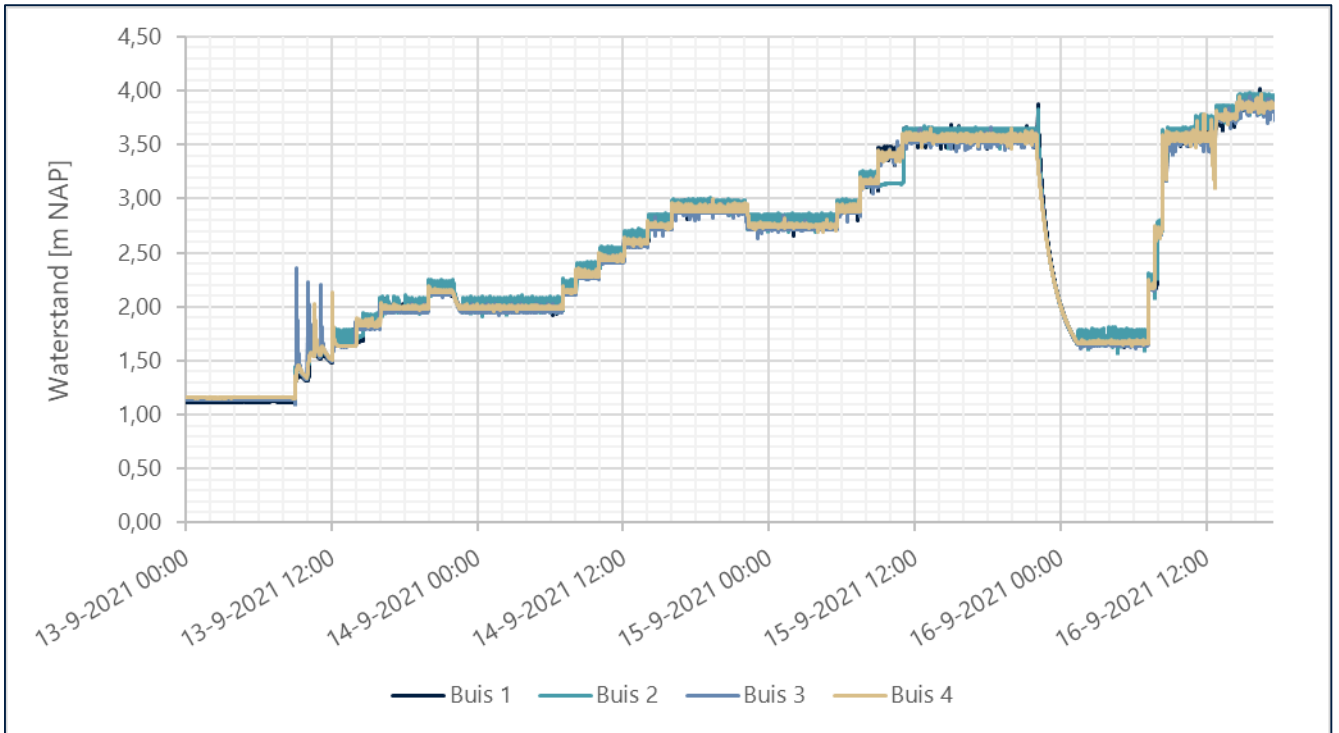
Dit totale debiet per 10 s is uiteindelijk gemiddeld over 15 minuten (90 tijdstappen). Dit geeft het verloop van debiet zoals te zien in Figuur 1.3 en Figuur 1.5. Het debiet bepaald op basis van de waterstanden in de infiltratiebuizen wordt in deze rapportage ook wel 'Q_{in}-buizen' genoemd.



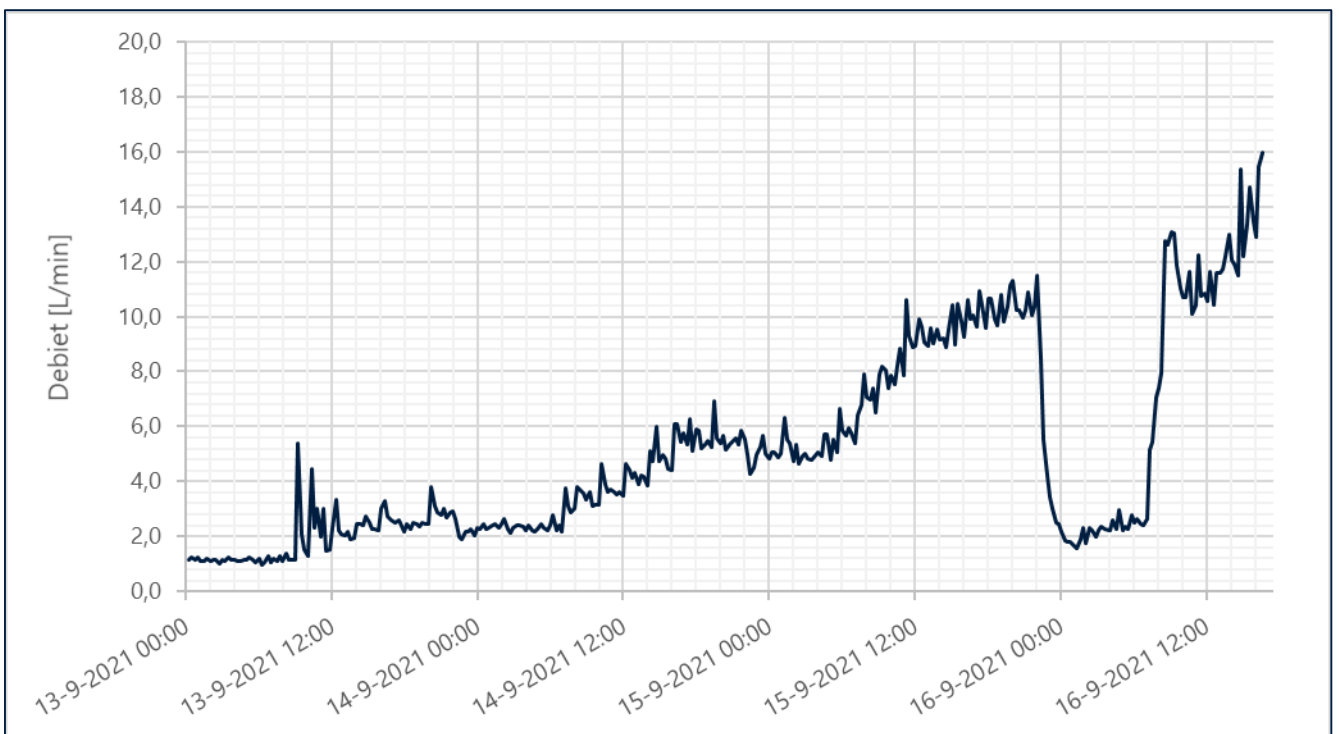
Figuur 1.1: Verandering van waterstand in Buis 1 t/m 4 van het zuidelijke proefvak.

Bij toenemend verval neemt het debiet logischerwijs toe. In de middag van 15 september 2021, toen horizontale pipegroei is waargenomen in het Noordvak, lag het debiet rond 9 à 10 L/min op basis van Q_{in}-buizen_noord. Hoewel het verval vanaf die tijd gelijk is gehouden in de middag is een lichte toename van het debiet te zien hetgeen duidt op de drainerende werking van een groeiende pipe. Dit effect is ook zichtbaar in de resultaten van het Zuidelijke proefvak waar bij een constant verval in de nacht op 7 september de pipe bleef groeien en het debiet blijft toenemen. In dit proefvak zorgt het uitvallen van de pompen, door een stroomstoring in de avond van 6 september, voor pieken die daardoor als niet representatief kunnen worden beschouwd. Rond het moment van (horizontale) pipegroei lijkt het debiet in het Zuidelijke proefvak hoger dan in Noord. In deze analyse is het moment van pipegroei gelijk genomen aan het tijdstip waarop het waterstandniveau is verhoogd naar de waterstand waarop piping optrad.

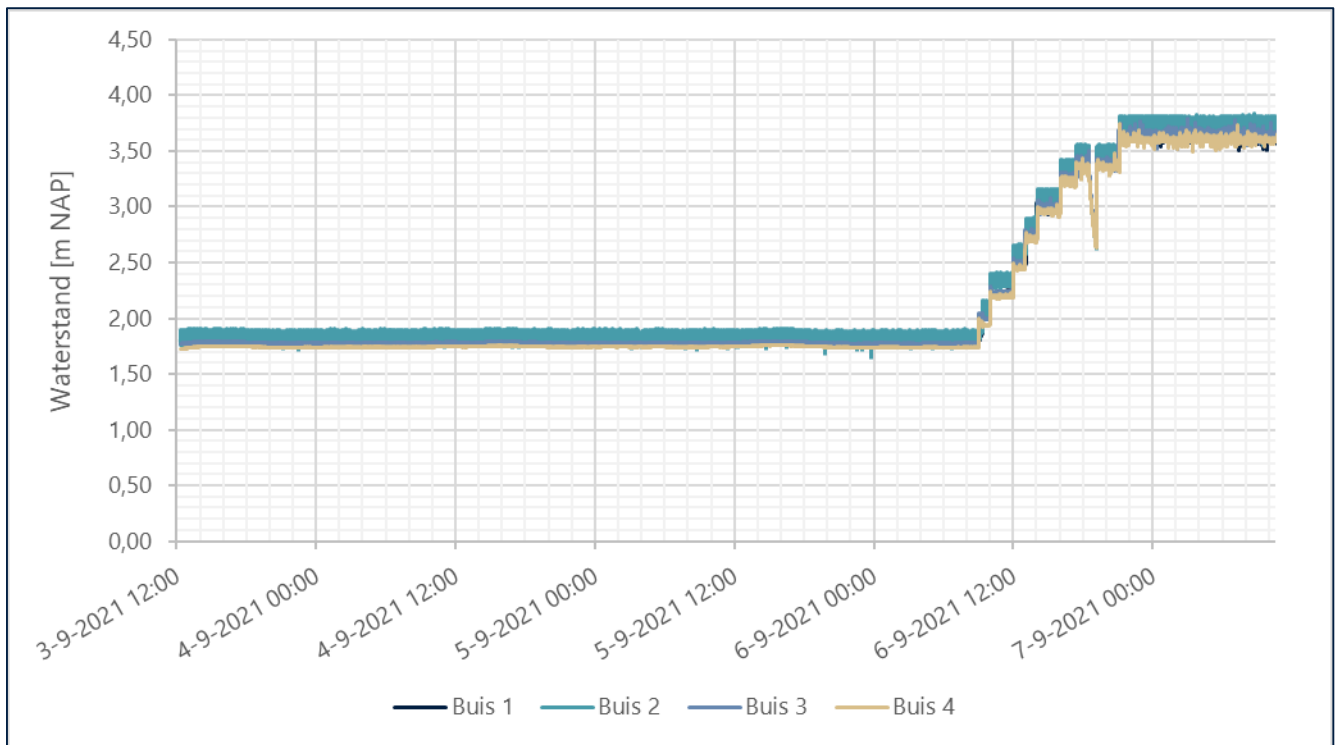
Overigens is in het veld waargenomen dat sommige buizen minder frequent werden bijgevuld. Uit de data blijkt eveneens dat de waterstand in een buis soms mee omhoog beweegt met het bijvullen van een naastgelegen buis. De waterstandtoename laat in dat geval geen scherpe toename zien, maar een geleidelijk oplopende waarde door de stromingsweerstand in de ondergrond. Het effect hiervan is onderzocht door een voorwaarde te stellen aan de snelheid van bijvullen, het verschil met de analyse zonder deze voorwaarde bleek niet significant.



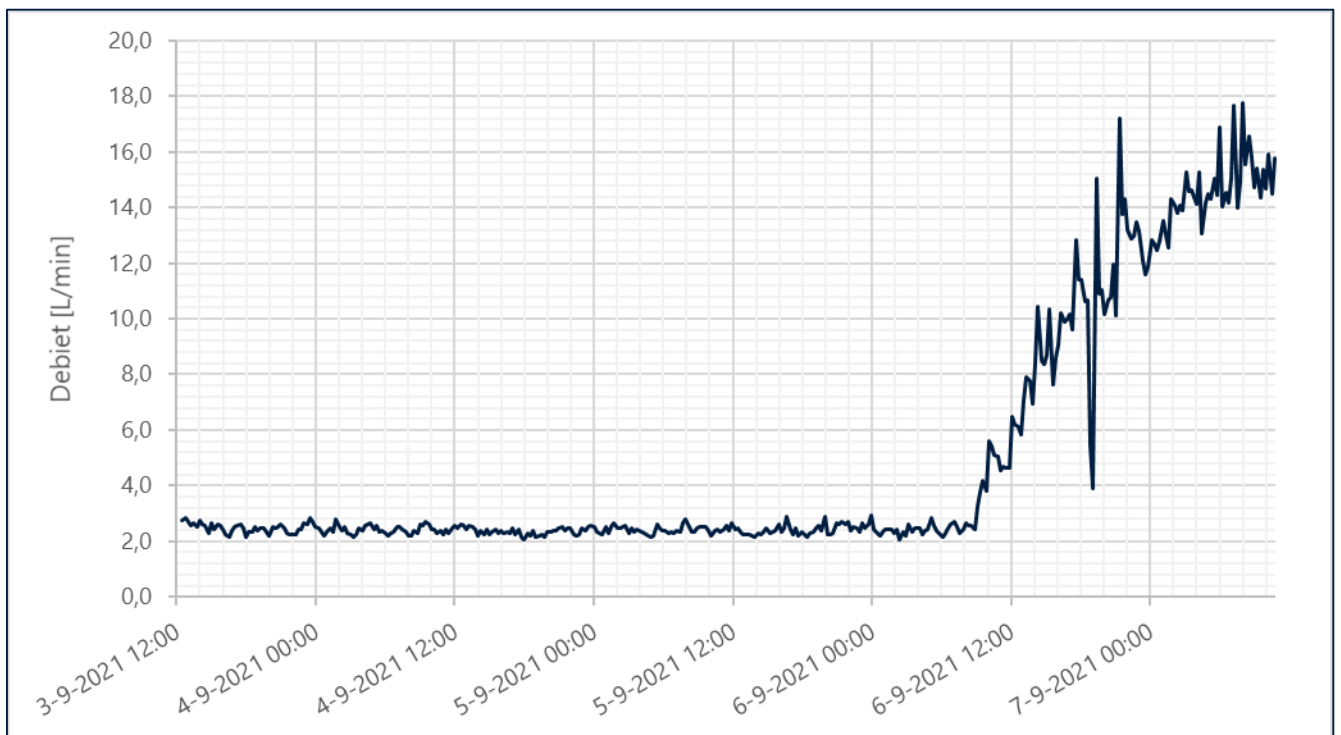
Figuur 1.2: Waterstand per infiltratiebuis in het Noordelijke proefvak.



Figuur 1.3: Totale infiltratiedebiet gemiddeld over 15 minuten in het Noordelijke proefvak (Q_{in}-buizen_noord).



Figuur 1.4: Waterstand per infiltratiebuis in het Zuidelijke proefvak.



Figuur 1.5: Totale infiltratiedebiet gemiddeld over 15 minuten in het Zuidelijke proefvak (Q_{in} -buizen_{zuid}).

2. Bulkdoorlatendheid

2.1 Bulkdoorlatendheid op basis van debietmetingen

Op basis van het verval, de debieten en de afmetingen van de proefopstelling is er een inschatting gemaakt van de (bulk)doorlatendheid van het getijdenzandpakket met behulp van Darcy. Hierbij wordt opgemerkt dat deze formule uitgaat van een homogeen, isotroop medium, terwijl het getijdenzandpakket heterogeen en anisotroop is. Ook het effect van gekromde stroombanen vanwege opwaartse stroming bij de wel is hierin niet meegenomen.

$$k = \frac{Q_{in}}{A * i} = \frac{\Delta L}{A} * \frac{Q}{\Delta H}$$

Met;

- k = doorlatendheid [m/dag]
- A = doorstroomoppervlak [m²]
- Q_{in} = infiltrerend debiet [m³/dag]
- ΔL = onderlinge horizontale afstand [m]
- ΔH = verval behorende bij de onderlinge afstand [m]

Het doorstroomoppervlak is 3,3 m x 13,05 m in het noordelijke en 3,5 m x 12,91 m in het zuidelijke proefvak. Hierbij is de afstand tussen het hart van de damwandplanken en de ligging van het veenpakket (Noord: ca. NAP -2,8 m en Zuid: ca. NAP -3,0 m) ten opzichte van het pipeniveau (ca. NAP +0,5 m) gebruikt. Hierbij moet worden opgemerkt dat de laag tussen 0,5 m en 1,1 m NAP niet is meegenomen als doorstroomoppervlak omdat deze een relatief lage doorlatendheid bevat van 0,35 m/dag. Deze laag is in de pipingmodellen wel meegenomen, waardoor de hier bepaalde bulkdoorlatendheid dus licht overschat wordt ten opzichte van de doorlatendheden volgend uit de pipingmodellen.

De horizontale afstand en de waterstand van de sloot varieert tussen Noord en Zuid, zoals te zien in Tabel 2.1. De onderlinge horizontale afstand is bepaald tussen de filteromstorting en slootbodem.

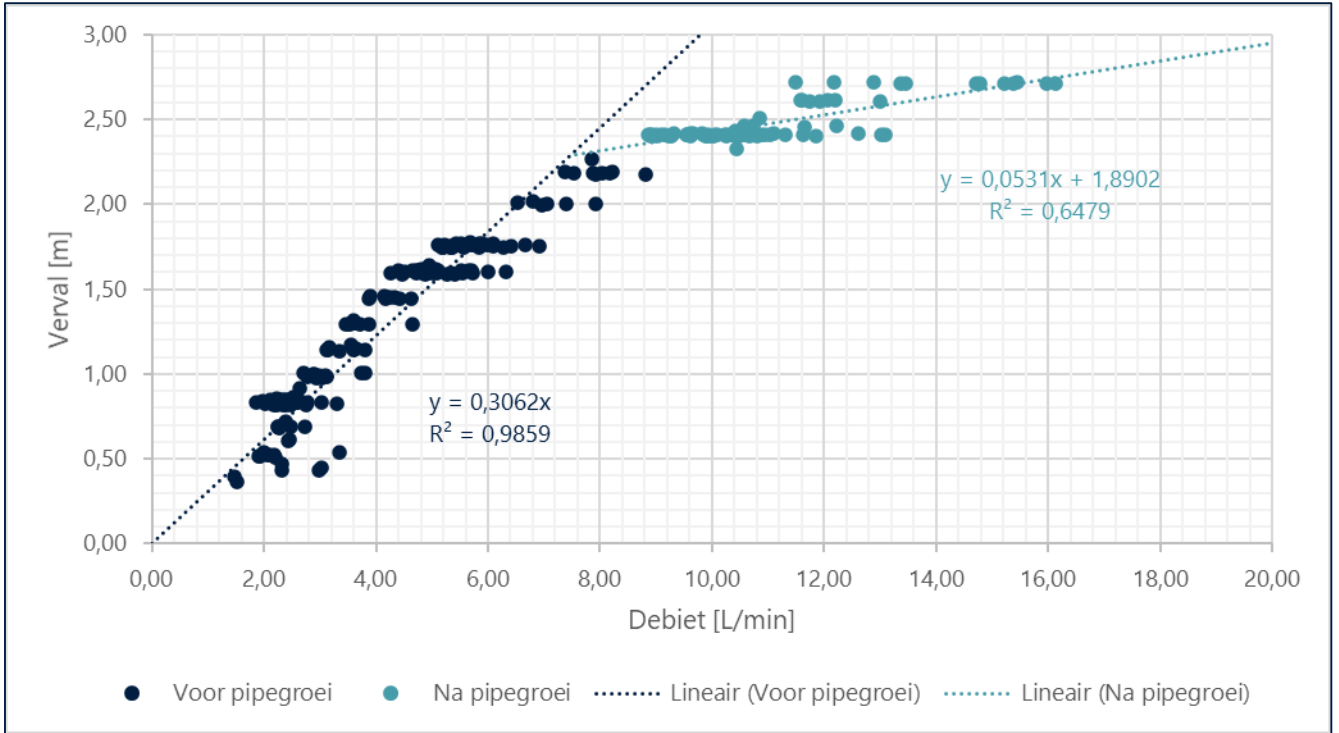
Tabel 2.1: Parameters doorlatendheid

	Noord	Zuid
A [m ²]	43,1	45,2
ΔL [m]	10,21	9,89
H _{sloot} [m NAP]	1,15	1,25

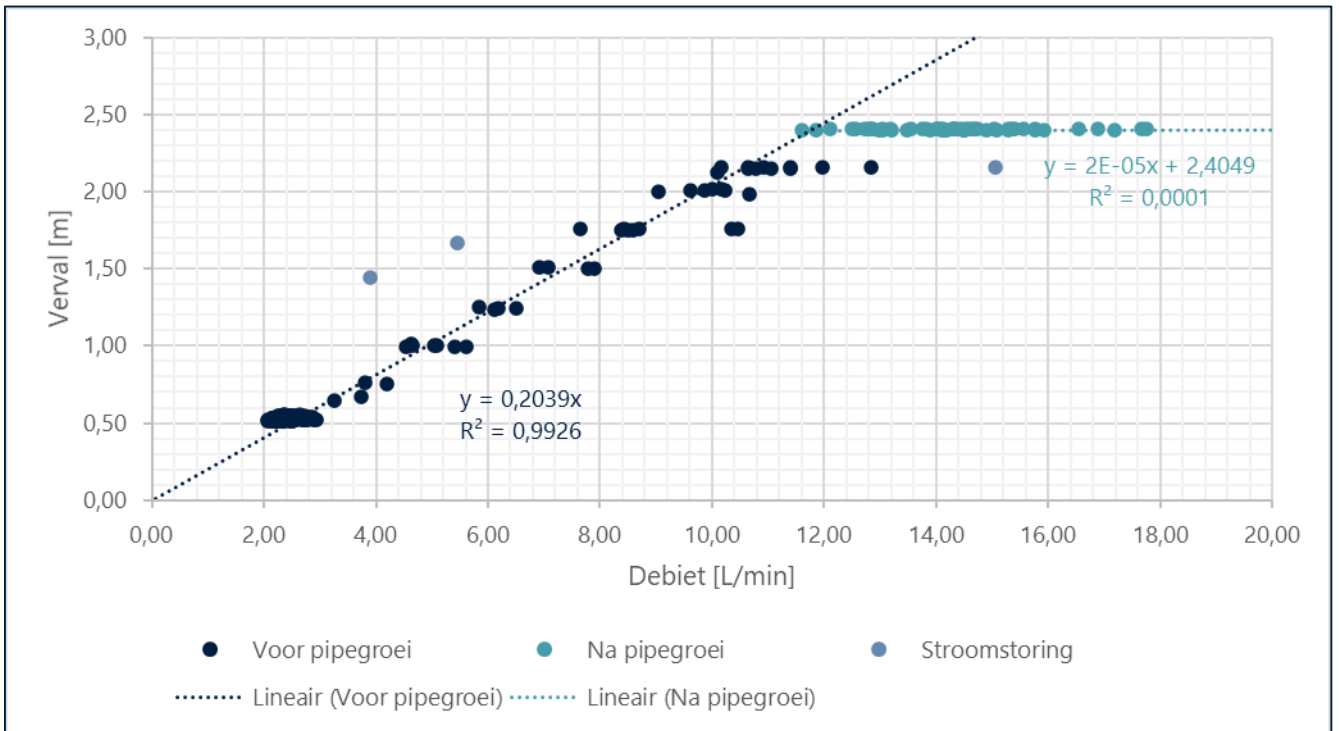
Aan de hand van de eerder bepaalde debieten per 15 minuten en bovengenoemde parameters is de bulkdoorlatendheid per tijdstap bepaald. Hierbij is het debiet (Q_{in}-buizen) uitgezet tegenover het verval dat in de proef stapsgewijs is verhoogd totdat waterspanningen en/of zandtransport op de wellocatie waren gestabiliseerd.

Figuur 2.1 en Figuur 2.2 laten het verloop van het debiet ten opzichte van het verval zien. Dit laat een gelijkwaardige trendlijn zien waarbij het debiet in Noord met 3,27 L/min per meter verval toeneemt. In het Zuidelijke proefvak is dit 4,91 L/min per meter toename in verval. In de debieten na pipegroei van Figuur 2.1 zijn de debieten tussen 15 september 22:00 en 16 september 07:00 buiten beschouwing gelaten. Tijdens deze nacht zijn de waterstanden in de infiltratiebuizen bewust tijdelijk lager ingesteld

om te voorkomen dat de pipe in de nacht door zou groeien. In Figuur 2.2 zijn de datapunten naar aanleiding van de stroomstoring in de avond van 6 september uit de bepaling gelaten. Na de pipegroei is duidelijk te zien dat het debiet toenam bij hetzelfde verval, wat duidt op een groeiende pipe.



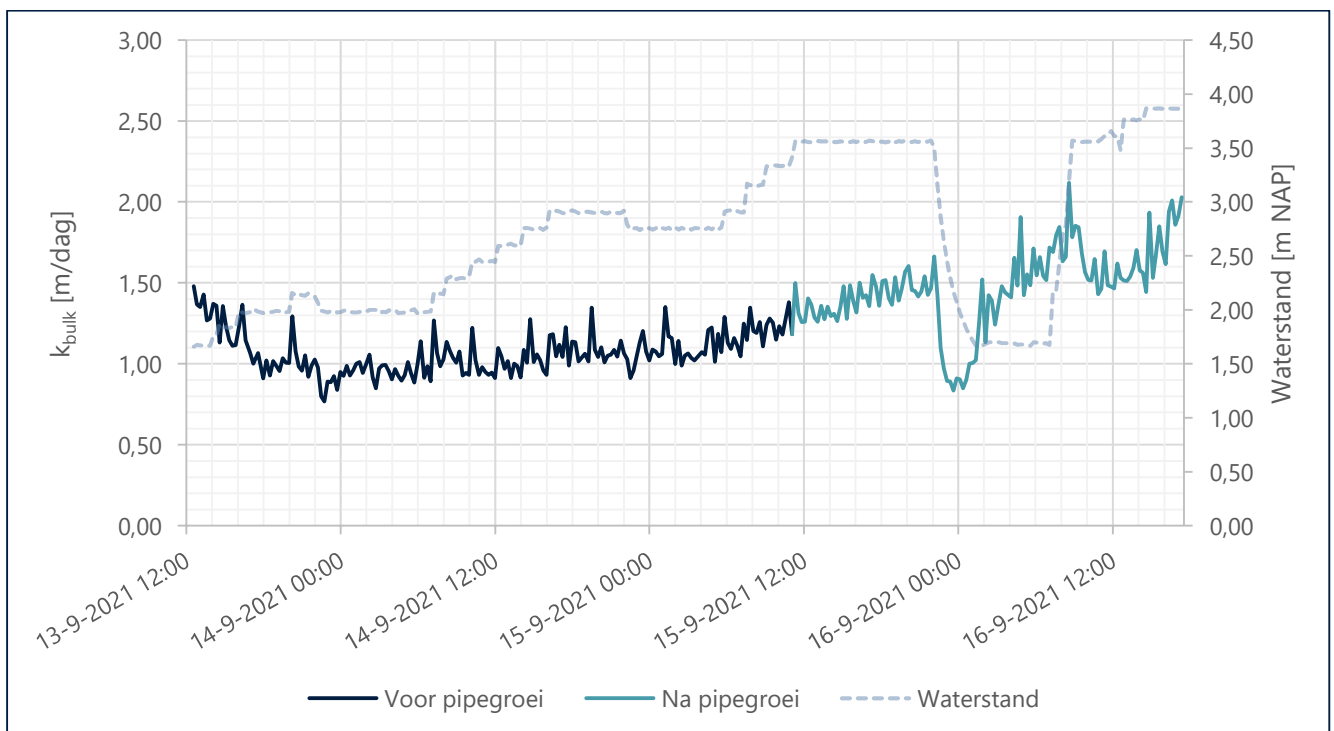
Figuur 2.1: Debiet ten opzichte van het verval voor en na het ontstaan van pipegroei in het Noordelijke proefvak.



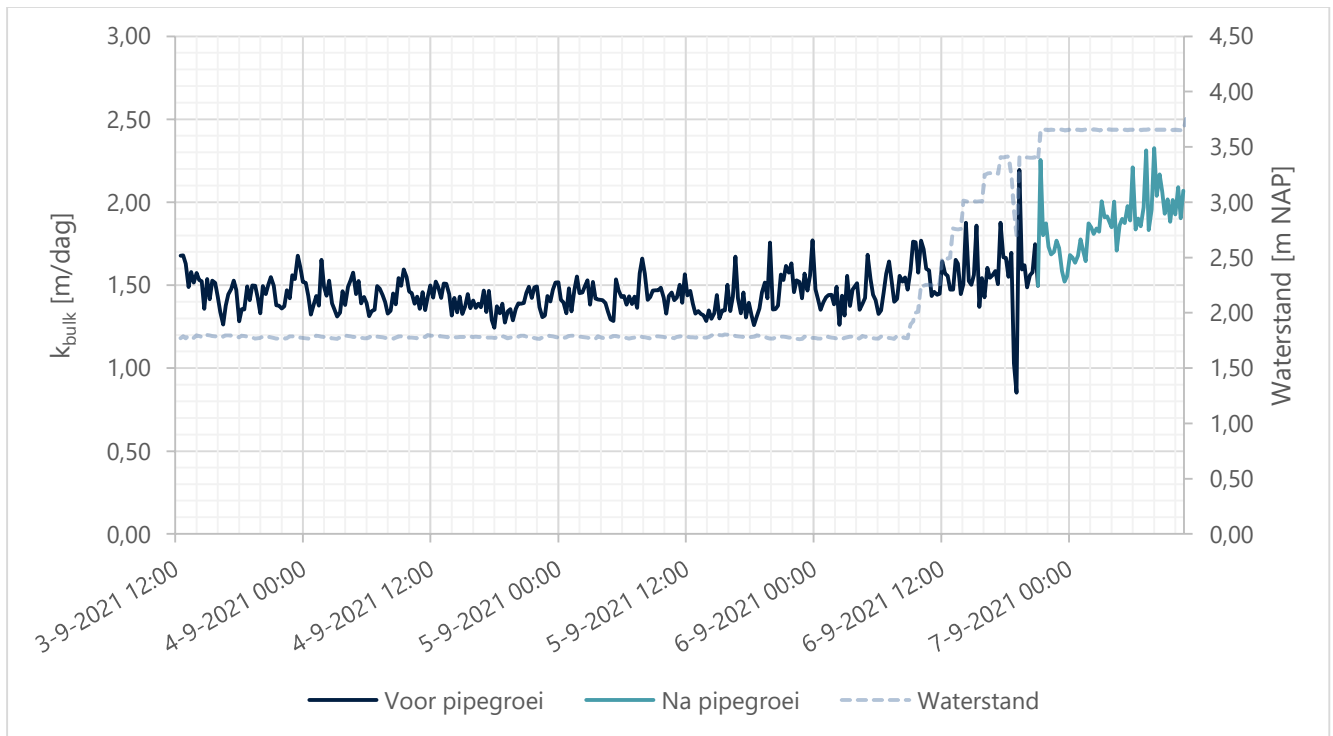
Figuur 2.2: Debiet ten opzichte van het verval voor en na het ontstaan van pipegroei in het Zuidelijke proefvak. Lichtblauwe punten zijn datapunten naar aanleiding van stroomstoring op 6-9 rond 18:50 en zijn buiten beschouwing gelaten.

De bulkdoorlatendheid van proefvak Noord en Zuid zijn, wederom per tijdstap, opgenomen in Figuur 2.3 en Figuur 2.4. Hierin wordt ook de waterstand getoond om te laten zien in welke belastingtrap de proef zich op dat moment bevond. De debieten en dus ook de bulkdoorlatendheid nemen toe bij verdergaande pipegroei. Er is in het Noordelijke proefvak sprake van een 'instelperiode' vanaf 12:00 tot ongeveer 17:00, waarbij het debiet relatief gelijk blijft en de waterstand toeneemt. Er is te zien dat na deze instelperiode een constante bulkdoorlatendheid wordt bereikt.

De beste voorspelling van de bulkdoorlatendheid wordt dus verkregen door de reeksen voor het ontstaan van de (horizontale) pipegroei te nemen. De gemiddelde bulkdoorlatendheid-waarde aan de hand van de reeksen voor horizontale pipegroei zijn te zien in Tabel 2.2. In deze figuren valt op dat de bulkdoorlatendheid in beide proefvakken al lijkt toe te nemen voor het instellen van de hoogste belastingtrap waarbij doorgaande pipegroei is vastgesteld. Dit duidt er op dat er voor deze belastingtrap al een pipe is gaan groeien. In proefvak Noord neemt de bulkdoorlatendheid in de nacht van 15-9 rond 04:00 toe. In proefvak Zuid is een dergelijk knippunt minder duidelijk zichtbaar, mede vanwege de stroomstoring in de avond van 6-9, maar ook hier lijkt het debiet / doorlatendheid voor het instellen van de laatste belastingtrap al toe te nemen, ongeveer vanaf 7-9 om 16:00.



Figuur 2.3: Bulkdoorlatendheid en gemiddelde waterstand van de 4 buizen in het Noordelijke proefvak.



Figuur 2.4: Bulkdoorlatendheid en gemiddelde waterstand van de 4 buizen in het Zuidelijke proefvak.

Tabel 2.2: Gemiddelde bulkdoorlatendheid per proefvak op basis van moment voor pipegroei

	Noord	Zuid
k_{bulk} [m/dag]	1,02	1,44

2.2 Doorlatendheidsprofiel op basis van de bulkdoorlatendheid

Op basis van de bulkdoorlatendheid zoals die in voorgaande paragrafen is afgeleid kan een vergelijking worden gemaakt met de meerlaagse doorlatendheidsvariatie zoals die in het ontwerp op basis van HPT-onderzoek is bepaald. De bulkdoorlatendheid is in combinatie met de HPT-sonderingen gebruikt voor het opzetten van een doorlatendheidsprofiel. De HPT-resultaten geven een relatief doorlatendheidsprofiel van het getijdenzand door iedere 2 cm het geïnjecteerde debiet (Q) versus de injectiedruk (P) te meten. Deze Q/P waarde [ml/min/kPa] geeft inzicht in de relatieve doorlatendheidsvariatie in de verticaal op de locatie van de HPT-sondering. Aan de hand van de bulkdoorlatendheid k_{bulk} [m/dag], de dikte van het zandpakket D_{zand} [m] en de som van alle Q/P waarden in dit zandpakket [m³/dag/kPa], is een kalibratieconstante C_{kal} bepaald voor elke HPT-sondering:

$$C_{kal} = \frac{k_{bulk} * D_{zand}}{\sum Q/P}$$

Deze C-waardes worden gebruikt om op basis van de relatieve k-profielen (Q/P) te komen tot een profiel van de absolute (horizontale) doorlatendheid. Dit geeft de C_{kal} -waardes voor de verschillende HPT-sonderingen zoals te zien in Tabel 2.3.

Tabel 2.3: C_{kal} per HPT-sondering.

Sondering	Proefvak	Projectfase	C_{kal} [1 / m kPa]
HPT12	Noord	Fase 2/3	3,68E-04

Sondering	Proefvak	Projectfase	C _{kal} [1 / m kPa]
HPT11	Tussen Noord - Zuid	Fase 2/3	5,47E-04
HPT09	Zuid	Fase 2/3	1,03E-03
HPT14	Zuid	Fase CSI	5,08E-04
HPT15	Zuid	Fase CSI	9,48E-04

De doorlatendheid per laag $k_{h,i}$ wordt vervolgens berekend met onderstaande formule. Hierin is C_{kal} de bovengenoemde kalibratiewaarde, $(Q/P)_i$ de verhouding debiet/injectiedruk [ml/min/kPa] van die laag, en D_i de laagdikte [m].

$$k_{h,i} = \frac{C_{kal} * \left(\frac{Q}{P}\right)_i}{D_i}$$

Op basis van bovenstaande zijn doorlatendheidsprofielen opgesteld voor elke HPT-sondering. In het ontwerp is op basis van het o.a. HPT-onderzoek het getijdenpakket onderverdeeld in 4 lagen met onderscheidende horizontale doorlatendheid (zie ook Factual Report: 1220-164143.R04 v2.0; d.d. 25 maart 2022). De volgende doorlatendheidsvariatie is daarbij afgeleid:

Tabel 2.4: Meerlaagse indeling getijdenzandpakket o.b.v. vooronderzoek en CSI.

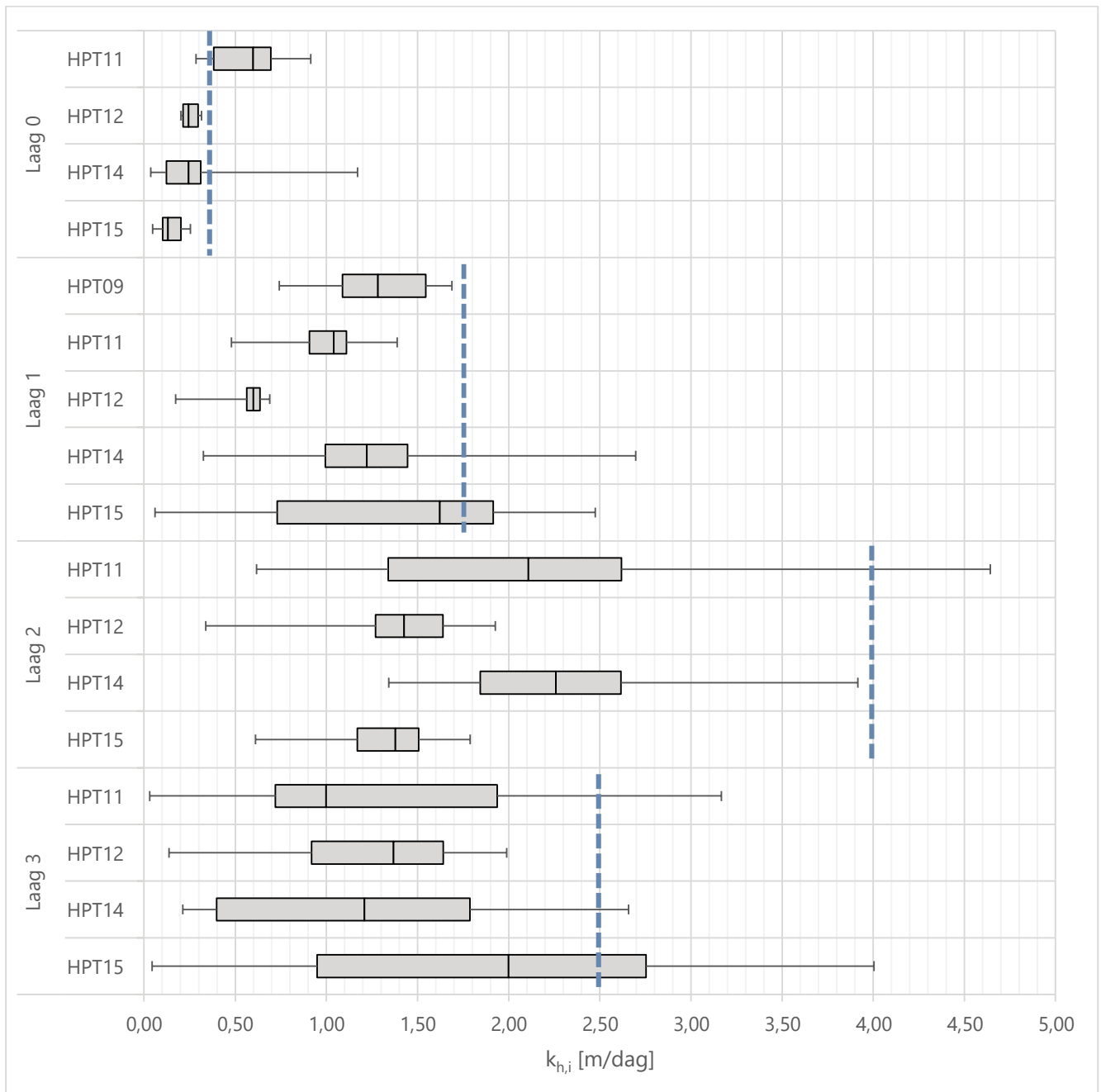
Laagnr.	Kh [m/d]	Bovenkant [m NAP] (gemiddeld)	Onderkant [m NAP] (gemiddeld)
0	0,35	1,3 (vanaf deklaag)	0,7
1	1,75	0,5	-0,7
2	4,0	-0,7	-1,75
3	2,5	-1,75	-2,7 (tot veenlaag)

Op basis van de doorlatendheidsprofielen is per HPT de laagscheiding afgeleid (zie Tabel 2.5).

Figuur 2.5 laat de variatie binnen elke laag zien van de verschillende HPT-sonderingen die zijn gekalibreerd aan de bulkdoorlatendheid. Hierin is te zien dat met name in laag 2 en 3 de variatie groot is, door de aanwezigheid van enkele dunne, slecht doorlatende, stoorlagen. De blauwe lijnen geven de meerlaagse doorlatendheidsvariatie weer zoals toegepast in het ontwerp en is verfijnd op basis van HPT-sonderingen tijdens de CSI-fase. Hier is te zien dat in laag 0 en 1, de meerlaagse doorlatendheidsvariatie goed overeenkomt met de afgeleide Q/P - k_{bulk} . In laag 2 en 3 is de doorlatendheid op basis van de bulkdoorlatendheid lager dan de meerlaagse k -variatie zoals afgeleid op basis van HPT-AMPT metingen. De reden hiervoor is dat bovenstaande aanpak, op basis van Darcy en de kenmerken van de proefopstelling, leidt tot een onderschatting van de bulkdoorlatendheid (zie ook §3.2: Discussie).

Tabel 2.5: Grondwaterspiegel (GWS), Bovenkant (BK) en Onderkant (OK) van lagen in HPT-sonderingen.

	HPT09		HPT11		HPT12		HPT14		HPT15	
	BK [m NAP]	OK [m NAP]	BK [m NAP]	OK [m NAP]	BK [m NAP]	OK [m NAP]	BK [m NAP]	OK [m NAP]	BK [m NAP]	OK [m NAP]
GWS	0,80		0,70		0,70		Verzadigd		Verzadigd	
Laag 0	-	-	0,70	0,46	0,52	0,40	1,30	0,70	1,51	1,21
Laag 1	0,72	-0,68	0,46	-0,74	0,40	-0,60	0,70	-0,70	1,21	-0,40
Laag 2	-	-	-0,74	-1,54	-0,60	-2,00	-0,70	-1,90	-0,40	-1,80
Laag 3	-	-	-1,54	-2,34	-2,00	-2,70	-1,90	-2,70	-1,80	-3,20

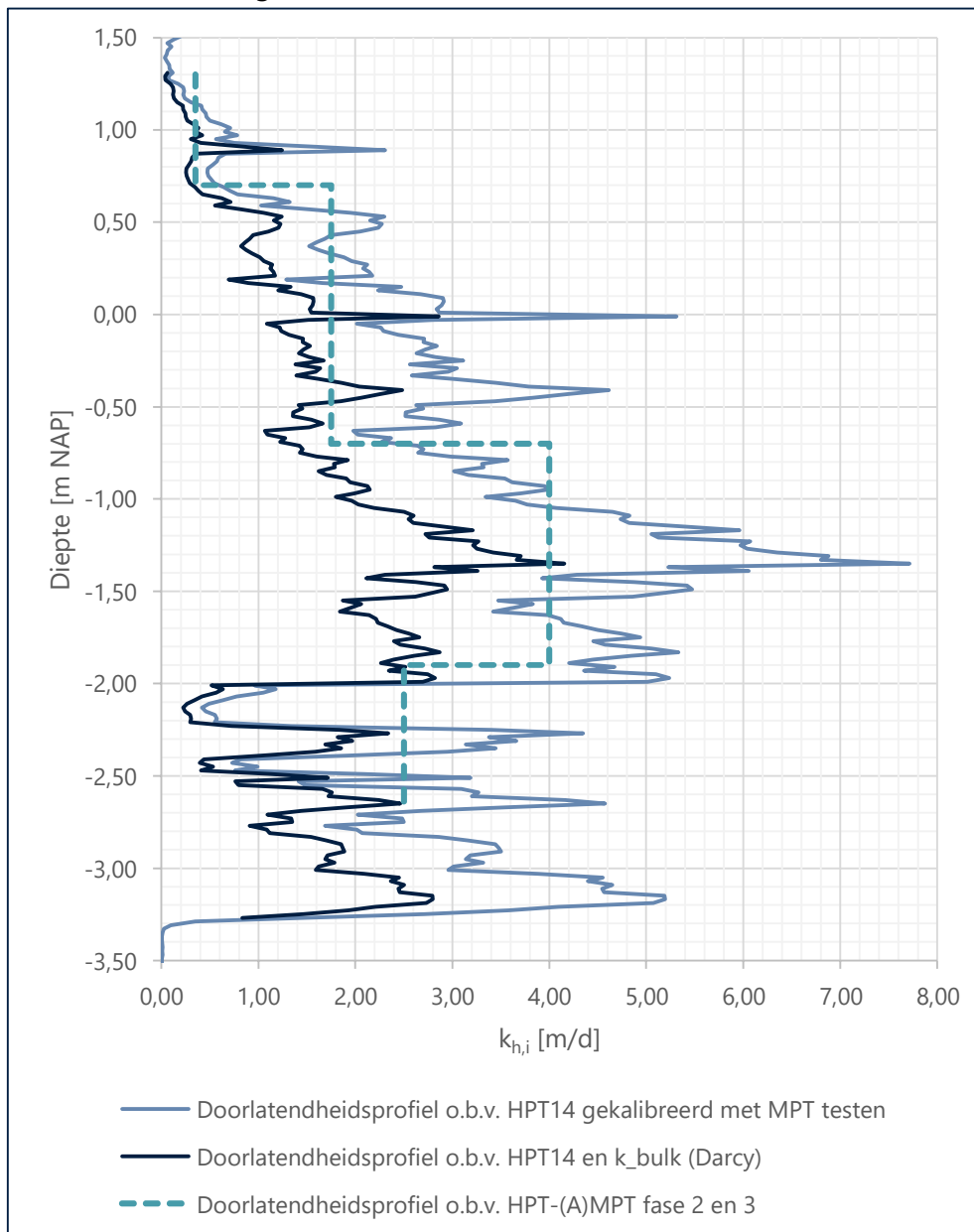


Figuur 2.5: Boxplot met minimum, maximum en in het grijs het eerste kwartiel, mediaan en derde kwartiel van sonderingen per laag. De blauwe lijnen geven de meerlaagse doorlatendheidsvariatie weer zoals toegepast in het ontwerp en is verfijnd op basis van HPT-sonderingen tijdens de CSI-fase.

In Figuur 2.6 worden ter nadere illustratie de volgende doorlatendheidsprofielen getoond:

1. HPT-profiel gekalibreerd met MPT-testen;
2. HPT-profiel gekalibreerd aan de bulkdoorlatendheid van het getijdenzandpakket;
3. Meerlaagse opbouw op basis van HPT-MPT onderzoek fase 2 (vooronderzoek) en 3 (CSI).

Hier is te zien dat het HPT-profiel gekalibreerd aan de bulkdoorlatendheid van het getijdenzandpakket lager uitvalt dan het HPT-profiel gekalibreerd met MPT-testen. Zoals verwacht komt het doorlatendheidsprofiel op de locatie van HPT14 goed overeen met de meerlaagse opbouw zoals bepaald op de gehele dataset van HPT-(A)MPT's. Op de locatie van HPT14 is de veenlaag wat dieper gelegen dan aangenomen in de globale opbouw. In de onderste laag (laag 3) wordt een wat grilliger verloop van het doorlatendheidsprofiel gevonden door de aanwezigheid van enkele slecht doorlatende stoorlagen.



Figuur 2.6: Doorlatendheidsprofiel op basis van HPT14 gekalibreerd o.b.v. de MPT testen en k_{bulk} (Darcy). De blauwe lijnen geven de meerlaagse doorlatendheidsvariatie weer zoals toegepast in het ontwerp en is verfijnd op basis van HPT-sonderingen tijdens de CSI-fase. Er is met name in laag 0, 1 en 2 een overeenkomst te zien tussen het doorlatendheidsprofiel van op basis van HPT14 en k_{bulk} (Darcy) en de meerlaagse doorlatendheidsvariatie.

3. Conclusies en discussie

3.1 Conclusies

Het debiet, zoals bepaald op basis van de waterstanden in de infiltratiebuizen, is afgezet tegen het verval in beide proefvakken. Hieruit is op basis van de wet van Darcy een bulkdoorlatendheid per proefvak afgeleid. Uitzetten van het debiet tegen het verval geeft inzicht in het moment van piping. In het Noordelijke proefvak is vanaf 15-9 rond 04:00 een toename in bulkdoorlatendheid te zien, hetgeen duidt op pipegroei. Dit moment hoeft niet per se samen te vallen met de start van horizontale pipegroei, verdergaande verticale pipegroei door de deklaag onder de sloot kan ook tot een toename in debiet hebben geleid. In proefvak Zuid is een dergelijk knikpunt minder duidelijk zichtbaar, mede vanwege de stroomstoring in de avond van 6 september, maar ook hier lijkt de bulkdoorlatendheid voor het instellen van de laatste belastingtrap al toe te nemen. Het precieze moment dient nader bepaald te worden. De hogere debieten wijzen op een hogere (bulk)doorlatendheid van het zand in het zuidelijke proefvak. De gemiddelde bulkdoorlatendheid per proefvak is ca. 1 m/d in proefvak Noord en 1,4 m/d in proefvak Zuid (40% hoger).

De bulkdoorlatendheden zijn vervolgens gebruikt om de relatieve doorlatendheidsprofielen van enkele HPT-sondering mee te kalibreren om te komen tot absolute (horizontale) doorlatendheidsprofielen. Deze profielen zijn vergeleken met de meerlaagse indeling zoals afgeleid o.b.v. het HPT-MPT onderzoek uitgevoerd in fase 2 (vooronderzoek) en fase 3 (CSI). De vergelijking laat zien dat de schematisatie in vier onderscheiden lagen en de relatieve doorlatendheidscontrasten standhoudt. De absolute doorlatendheid per laag verschilt wel: de bepaling op basis van de bulkdoorlatendheid ligt voor alle lagen lager, met name voor de onderste twee meter in laag 2 en 3. De reden hiervoor is waarschijnlijk dat de bovenste, slechter doorlatende lagen, relatief een groter effect hebben op de bepaling van de bulkdoorlatendheid.

3.2 Discussie

Voor het bepalen van de bulkdoorlatendheid is gebruik gemaakt van de debieten zoals bepaald op basis van het bijvullen van de infiltratiebuizen. Uit de data van de infiltratiebuizen blijkt dat de waterstand in een buis soms mee omhoog beweegt met het bijvullen van een naastgelegen buis. De waterstandtoename laat in dat geval geen scherpe toename zien, maar een geleidelijk oplopende waarde door de stromingsweerstand in de ondergrond. Het effect hiervan is onderzocht door een voorwaarde te stellen aan de snelheid van bijvullen, het verschil met de analyse zonder deze voorwaarde blijkt niet significant.

De (bulk)doorlatendheid van het getijdenzandpakket is bepaald met behulp van Darcy. Hierbij wordt opgemerkt dat deze formule uitgaat van een homogeen, isotroop medium, waar in werkelijkheid het getijdenzandpakket meerlaags en anisotroop is. Ook het effect van gekromde stroombanen vanwege opwaartse stroming bij de wel wordt hierin niet meegenomen. Hierdoor zullen de bovenste, slechter doorlatende lagen een relatief groot

effect hebben op de bepaling van de effectieve bulkdoorlatendheid. In deze analyse zal dit effect leiden tot een onderschatting van de daadwerkelijke bulkdoorlatendheid. Het toepassen van een stromingsmodel waarin de complexe bodemopbouw en waterstroming wordt meegenomen geeft hier inzicht in. Een dergelijk gedetailleerd stromingsmodel (Plaxflow en DgFlow) zal worden gebruikt voor de pipinganalyses.

Appendix H

Analyse opbarsten, heave en
verticale piping

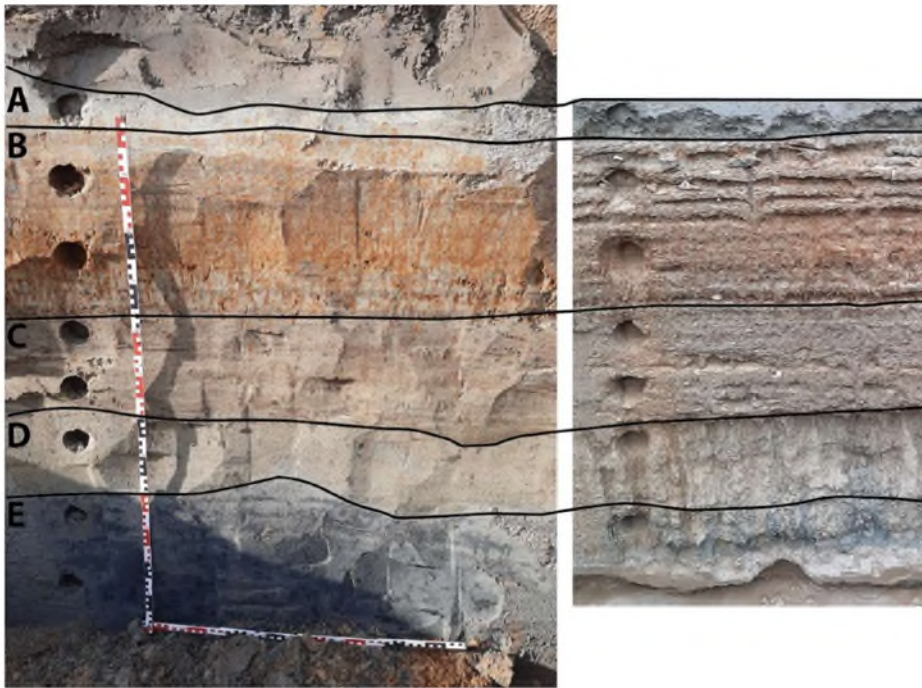
Hedwigeproject: Piping in getijdenzand

To: Projectteam Hedwigepolder
From: Gert-Ruben van Goor, Lisa van der Linde
Date: 23 mei 2022
Ref no.: 1220-164143.M30 V1.0
Subject: Analyse opbarsten, heave en verticale piping in grootschalige pipingproeven t.b.v. analyserapport

Tijdens de grootschalige pipingproeven in de Hedwigepolder heeft terugschrijdende erosie plaatsgevonden, waarbij een erosiepipe in het getijdenzand is gevormd. De proefopstelling is ontworpen met een uittredesloot die insnijdt tot de top van het pipinggevoelige zandpakket waardoor de deelmechanismen opbarsten en heave geen rol zouden spelen. Tijdens de proefuitvoering bleek dat zich toch eerst een verticaal uittredekanaal ontwikkelde waarna de pipe, op een dieper niveau, horizontaal verder groeide. In zowel proefvak Noord als Zuid is de slootbodem gelegen op NAP +1,1 m, de horizontale pipe ligt op een niveau tussen NAP +0,45 en +0,6 m. Ter plaatse van het uittredepunt lag het pipeniveau gemiddeld op ca. NAP +0,55 m in beide proefvakken, dit is 0,55 m onder de slootbodem. Vanwege dit gegeven en de observaties in het zuidelijke proefvak, waarbij de slootbodem deels leek te worden opgedrukt, is een analyse uitgevoerd naar de mate van opdrijven/-barsten, heave en verticale piping. Voor een beschrijving van het proefverloop en de ligging van de pipes wordt verwezen naar het Factual Report (1220-164143.R04 d.d. 25-3-2022).

Opdrijven en opbarsten

Het deel van het getijdenzand tussen de slootbodem en de diepte waarop de pipe horizontaal is gaan groeien wordt gekenmerkt door een uiterst tot sterk siltig zandpakket met klei- en siltlaagjes. Het bovenste deel van dit pakket bevat ook veel roestvlekken als gevolg van oxidatie, met name rondom wortelstelsels. Figuur 1 is overgenomen uit het Factual Report (1220-164143.R04 d.d. 25-3-2022) en illustreert de opbouw in proefvak Zuid. De pipe is horizontaal gegroeid in de top van laag D. Proefvak Noord kende een vergelijkbare opbouw in dit bovenste deel van het zandpakket, maar met meer kleilaagjes in de aangegeven lagen B en C. De lagen tussen de slootbodem en het horizontale pipeniveau worden in deze analyse beschouwd als deklaag waarvoor de grenspotential is afgeleid op basis van het gewicht van de grond en water in de sloot. De dikte van deze laag is met 0,55 m dunner dan de slootbodembreedte (1 m) waardoor er geen rekening is gehouden met taludwerking.



Figuur 1: Profielwand in proefvak zuid. Links het droge, afgestoken profiel. Rechts: hetzelfde profiel na afspoeling met water. Voor gedetailleerde laagomschrijving: zie Factual Report (1220-164143.R04 d.d. 25-3-2022).

Op basis van een drietal monsters (Z114/115/116) gestoken in de bovenste lagen is het gemiddeld volumegewicht van de grond bepaald. In de uittredesloot is de waterstand nagenoeg constant gehouden op NAP +1,25 en +1,15 m in respectievelijk proefvak Zuid en Noord. De laagste waterstand is aangehouden in de berekening van de grenspotential.

De grenspotential ($\varphi_{z,g}$ [m NAP]) is bepaald volgens het grensevenwicht:

$$(\varphi_{z,g} - h_{pipe})\gamma_w = (h_p - h_{slootbodem})\gamma_w + (h_{slootbodem} - h_{pipe})\gamma_{nat}$$

In deze formule is:

h_{pipe} = niveau van de horizontale pipe cq. onderkant deklaag (NAP +0,55 m)

$h_{slootbodem}$ = niveau van de slootbodem (NAP +1,1 m)

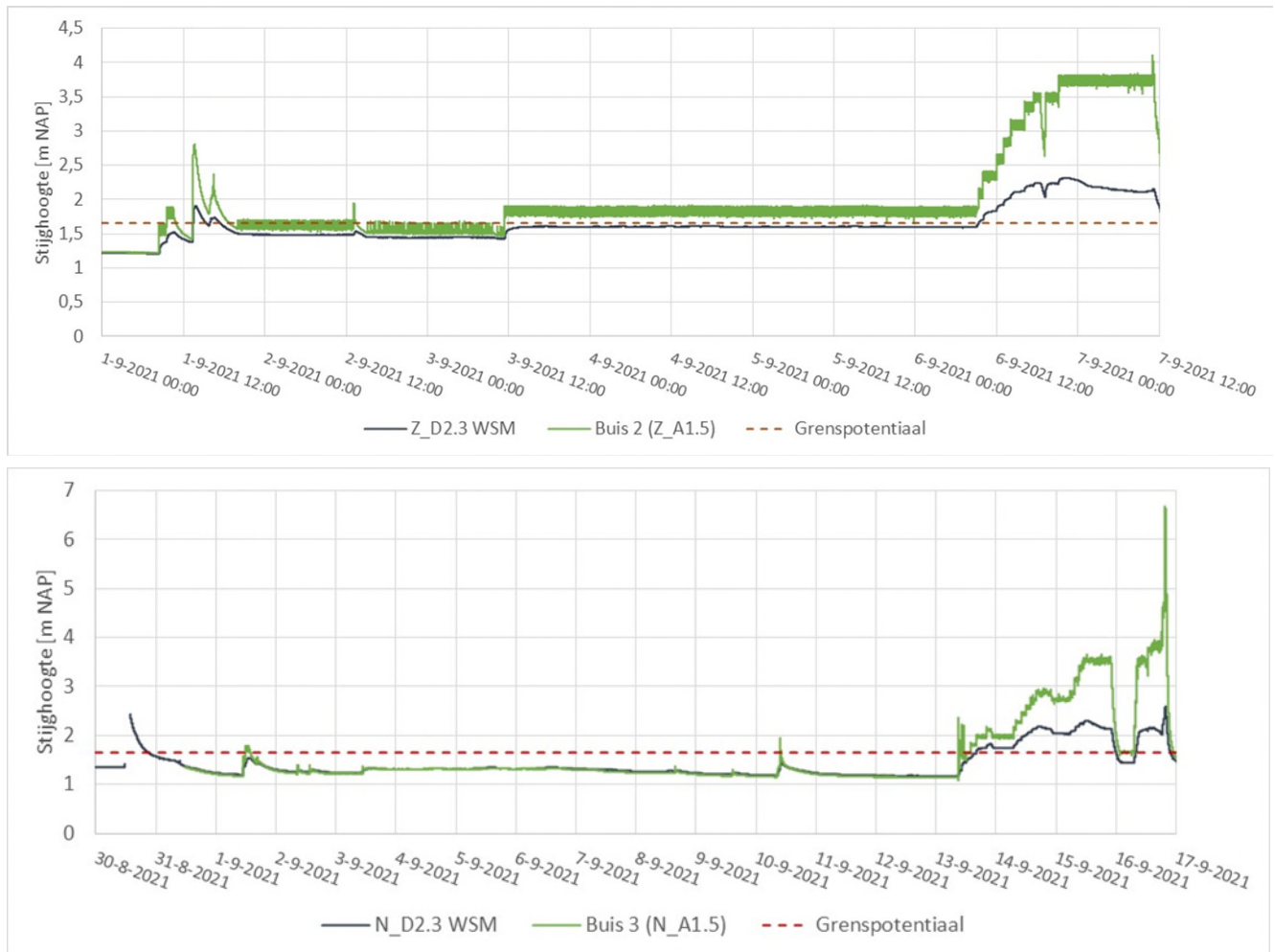
h_p = waterstand boven maaiveld (NAP +1,15 m)

γ_w = volumegewicht van water (9,81 kN/m³)

γ_{nat} = nat volumegewicht van de grond (18,9 kN/m³)

Hieruit volgt: $\varphi_{z,g} \approx$ NAP +1,65 m (1,1 m waterkolom t.o.v. pipeniveau (h_{pipe})).

In onderstaande figuren is de grenspotential uitgezet tegenover de gemeten stijghoogte tijdens de twee proeven in vak Zuid en Noord. Hiervoor zijn de meetreeksen gebruikt van de waterspanningsmeters (WSMs) in het vak achter de uittredesloot (segment D). De WSMs in dit vak zijn op verschillende dieptes in het getijdenzand geplaatst met de hoogste plaatsing op NAP-niveau. De gemeten stijghoogtes achter de sloot zijn nagenoeg gelijk, ongeacht locatie en diepte. In onderstaande figuren is daarom enkel de waarde van de WSM in het midden achter de sloot gebruikt (Z_D2.3 en N_D2.3), deze sensoren waren geplaatst op NAP -1 m.



Figuur 2: Stijghoogte in buizen en zandpakket incl. berekende grenspotentiaal (boven: proefvak zuid; onder: noord)

Uit bovenstaande figuren blijkt dat de grenspotentiaal relatief snel na aanvang van de proefbelasting is overschreden in beide proefvakken. In onderstaande paragrafen wordt hier nader op ingegaan.

Testweek systemen

Tijdens de week van 30-8-2021 (testweek systemen) is in beide proefvakken 1 buis per abuis flink bijgevuld door de aannemer. Dit werd direct geconstateerd en de verhoogde waterstanden waren daarom kort aanwezig (< 10 min). Dit bijvullen resulteerde in een piek in de stijghoogte binnen beide proefvakken. In proefvak zuid bedroeg de maximale stijghoogte hierdoor ca. NAP +1,9 m en in het noordelijke proefvak ca. NAP +2,5 m. In beide vakken werd het grenspotentiaal enkele uren tot maximaal een halve dag overschreden. Tijdens deze testweek van de systemen is geen vervorming van de slootbodems waargenomen. Wel vormde zich in proefvak zuid al enkele kleine zandmeevoerende welletjes, zie Figuur 3. Nadat de drukken waren gedissipeerd is er geen zandtransport meer waargenomen. In het noordelijke proefvak zijn in deze week helemaal geen zandmeevoerende welletjes waargenomen.



Figuur 3: Kleine zandmeevoerende welletjes in proefvak zuid tijdens bijvullen van 1 van de buizen tijdens de testweek van de systemen

Proefuitvoering

Tijdens de daadwerkelijke proefweken is, door het incrementeel verhogen van de belasting, de grenspotential op een gegeven moment overschreden. In beide proefvakken binnen de eerste testdag (zuid: 6-9-2021 omstreeks 11:00 en noord: 13-9-2021 omstreeks 16:00).

In proefvak Zuid werden bij aanvang van de proef de eerdere welletjes direct weer watervoerend, zonder zandtransport. Tijdens het begin van de middag omstreeks 13:00 werd duidelijk dat de slootbodembodems lichtjes omhoogkomt en waren er scheuren zichtbaar op de slootbodembodem. De stijghoogte in het zandpakket bedroeg toen ca. NAP +1,9 m; 0,25 m boven de berekende grenspotential. De scheuren manifesteerden zich in de sliblaag op de slootbodembodem nabij de zakbaak en hadden een beperkte diepte. Er is geen wellend water (stroming) uit de scheuren waargenomen. Omstreeks 14:00 uur is weer zandtransport waargenomen bij een verval van 1,75 m. De stijghoogte in zandpakket bedroeg op dat moment ca. NAP +2 m.

In proefvak Noord wordt bij een verval van 0,85 m in de namiddag van 13-9-2021 omstreeks 16:55 de eerste zandmeevoerende wel zichtbaar in de uittredesloot. Een korte tijd (\approx 1 uur) na het overschrijden van de grenspotential in de zandlaag. In het noordelijke proefvak is geen vervorming van de slootbodembodem waargenomen.

Deelconclusie opbarsten

Hoewel overwegend zandig van samenstelling, werd de bodem onder de uittredesloot van het zuidelijke proefvak opgedrukt tijdens de proefbelasting. Wanneer de grond tussen slootbodembodem en horizontaal pipeniveau als deklaag wordt beschouwd is aangetoond dat opdrijven en gedeeltelijk

opbarsten van deze grond, voorafgaand aan de vervolgprocessen (heave / verticale piping en terugschrijdende erosie), aannemelijk is.

In proefvak Zuid is door de belasting in de testweek van de systemen de grond mogelijk al gedeeltelijk verzwakt waarbij de samenhang tussen de gronddeeltjes lokaal is verstoord. Door deze verstoringen zal het water meer geconcentreerd uitstromen hetgeen heeft geleid tot een heavesituatie / verticale piping. In het noordelijke proefvak heeft deze situatie zich enkel tijdens de daadwerkelijke proefuitvoering gemanifesteerd. Als reden hiervoor wordt aangedragen dat in dit proefvak de top van het getijdenpakket, tussen sloot en horizontaal pipeniveau, meer laagjes bevatten met verhoogde percentages lutum en silt. Vanwege de grotere cohesie in deze laagjes zal de grond een hogere weerstand hebben tegen vervormingen en opbarsten. Dat zandmeevoerende wellen uiteindelijk zijn waargenomen bij een lagere stijghoogte dan in de eerste testweek van de systemen kan mogelijk verklaard worden door de relatief korte piekbelasting op 30-8-2021.

Heave

De optredende heavegradiënt is bepaald op het moment dat er zandmeevoerende wellen zijn waargenomen tijdens de proefbelasting. Er wordt uitgegaan van een verticale kwelstroom vanuit het diepere zandpakket richting de uittredesloot. De heavegradiënt (i) is bepaald met:

$$i = \frac{\varphi_z - h_p}{D_{deklaag}}$$

In deze formule is:

- φ_z = stijghoogte in zandpakket bij start zandmeevoerende wellen
(NAP +2,0 / +1,65 m (zuid / noord))
- h_p = waterstand boven maaiveld (NAP +1,25 / +1,15 m (zuid / noord))
- $D_{deklaag}$ = laagdikte tussen slootbodem en horizontaal pipeniveau (0,55 m)

Hieruit volgt:

$$i_{Zuid} = 1,36 [-]$$

$$i_{Noord} = 0,91 [-]$$

Het kritiek verhang is afhankelijk van de porositeit van het zandige materiaal en ligt doorgaans tussen 0,9 en 1,1 [-]. Het optredende verval is gelijk of groter dan deze kritieke waarde waardoor de korrelspanningen wegvallen en er zandtransport kan plaatsvinden als gevolg van de kwelstroom (verticale piping). Bij het beoordelen van dijken wordt bij een heavesituatie door een (opbarst)scheur in de deklaag een rekenwaarde van 0,3 [-] aangehouden als kritiek verhang. Dit heeft te maken met de aanwezigheid van een vloeibaar zand-water mengsel in het uittredekanaal, met als gevolg een aangenomen drukval van 0,3 keer de hoogte van het uittredekanaal (0,3d).

De observaties tijdens de proefbelasting wijzen overigens niet in de richting dat dieper gelegen zand via een openstaand opbarstkanaal of scheur is getransporteerd. Er zijn geen scheuren of kanalen waargenomen vanaf slootbodem naar het diepere pakket. De zandmeevoerende wellen zijn zette enkel zand van direct onder het oppervlak af, waarbij het erosiefront zich een weg naar beneden baande en

de wel in diameter toenam. Dit volgt ook uit een chronologische analyse van de korrelverdelingen bepaald van de zandmonsters die zijn weggeschept op de wellocatie van proefvak Noor. Hierin wordt een trend waargenomen waarbij het percentage aan fijne fractie eerst afneemt en daarna stabiliseert (zie 1220-164143.M29 v3.0 d.d. 15-7-2022). Dit in lijn met de 'fining upward' trend in het getijdenpakket waarbij het percentage fijne fractie toeneemt naar de bovenkant van de geulafzetting. Een initieel hogere fijne fractie duidt erop dat, tijdens het proces van verticale pipegroei, het erosiefront zich naar beneden heeft gebaand.

Verticale piping

Verticale piping is het fenomeen waarbij de pipe in plaats van horizontaal verticaal propageert. Dit kan optreden bij kwelschermen of bij het uittredepunt. Bij de pipingproef in de Hedwigepolder is verticale piping geconstateerd. Voor het verticale pipingproces bestaan vooralsnog geen gangbare rekenmodellen. Het proces wordt ook vaak aangehaald in relatie tot kwelschermen waar het heavemechanisme als maatgevend wordt beschouwd. Hieronder wordt de methode voor het bepalen van verticale pipegroei kwalitatief en kwantitatief beschreven.

Stokes' vergelijking

Het verticale verhang dat nodig is voor het uitspoelen van zandkorrels zal groter zijn dan die voor fluïdisatie (heave). Er kan dus vanuit worden gegaan dat de korrels al in suspensie zijn voordat piping begint. In het onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen (ORZW, 2012) wordt de vergelijking van Stokes gebruikt om een minimale opwaartse stroomsnelheid af te leiden waarmee zand zou worden uitgespoeld. Deze opwaartse stroomsnelheid dient groter te zijn dan de bezinksnelheid van de korrels (v) zoals bepaald met:

$$v = \frac{2}{9} r^2 g \frac{(\rho_k - \rho_w)}{\mu}$$

Met:

- r = straal van het bolvormige object (de korrel) $0,054E^{-3}$ [m] - D50 o.b.v. labonderzoek
- g = zwaartekrachtversnelling $9,81$ [m/s^2]
- ρ_k = dichtheid van de korrel 2650 [kg/m^3]
- ρ_w = dichtheid van het water 1000 [kg/m^3]
- μ = dynamische viscositeit water $1,23E^{-3}$ [$kg/(m*s)$] 12 °C

Hieruit volgt een sedimentatie- / kritieke stroomsnelheid van $0,008$ m/s.

De uitstromende debieten door de wel zijn niet direct bepaald, maar in proefvak Noord is wel een duidelijke toename in debieten te zien wanneer de zandmeevoerende wel begint te groeien (zie 1220-164143.M28 v2.0 d.d. 14-6-2022). De debieten nemen al toe voordat horizontale pipegroei is geconstateerd doordat de weerstand in de slootbodemp afneemt. De toename in uitstroming tussen 15-09-2021 00:00 $5,1$ L/min (toename debieten) en 15-09-2021 12:00 $8,9$ L/min (horizontale piping zichtbaar in de WSM-data) is $3,8$ L/min, aangenomen wordt dat deze toename in debiet voornamelijk wordt veroorzaakt door de verminderde weerstand in de slootbodemp doordat hier een zandmeevoerende wel aanwezig is.

$$v_{meting} = \frac{Q_{meting}}{A_{wel} * n}$$

met:

v_{meting} = opwaartse stroomsnelheid = filtersnelheid [m/s]

$Q_{meting,wel}$ = debiet dat door de wel stroomt [m³/s]

A_{wel} = oppervlakte van de wel [m²]

n = De porositeit van de ondergrond [-] – 0,45 0.b.v labonderzoek

Wanneer er nog geen zandmeevoerende wel is, is er nog geen extra uitstroming door het oppervlak. Dus is de 5 L/min uitstromend debiet eerlijk verdeeld over de slootbodempl. filterconstructie (10 x 1 m²). Dit leidt tot een debiet van 0,5 L/min per vierkante meter en een filtersnelheid van 1,9E⁻⁵ m/s. Echter zal door preferente stroompaden deze stroomsnelheid in werkelijkheid vele malen hoger kunnen liggen.

Wanneer de wel bijna volgroeid is, bedraagt het uitstromend debiet 3,8 L/min meer dan voorheen, dit wordt allemaal toegewezen aan de verminderde weerstand in de wel. Door dit op te tellen bij het initiële debiet komt het totale debiet op 4,3 L/min (3,8 + 0,5 L/min). Het oppervlak waardoor dit debiet voornamelijk stroomt is klein (een diameter van 5 cm wordt aangenomen), hiermee is de stroomsnelheid 0,04 m/s (n=1). Dat is ruim 5 maal zo groot als de eerder berekende kritieke stroomsnelheid.

Bovenstaande analyse gaat uit van een uniforme korrelverdeling, een volledig gelijkmatige verticale opwaartse waterstroming en dat de debiettoename door één wel stroomt. Ook negeert bovenstaande analyse de heterogeniteit in de ondergrond waardoor, vanwege doorlatendheidsvariaties en bijvoorbeeld eventuele verstoringen als gevolg van opbarsten en niet-uniforme fluïdisatie, grondwaterstroming zich zal concentreren. Dit kan lokaal tot hogere stroomsnelheden leiden en dus een hogere belasting leiden. Het erosiefront dat zich naar beneden beweegt zal voor een toenemende, geconcentreerde stroming en progressieve erosie leiden. Toch sluit de analyse aan bij de veldobservaties waarbij de start van verticale piping is waargenomen bij relatief lage vervallen van ca. 0,85 m (eerste welletjes in proefvak Noord) tot 1,75 m (re-activatie van welletjes in proefvak Zuid).

Conclusies

Hoewel overwegend zandig in samenstelling werd de bodem onder de uittredesloot van het zuidelijke proefvak opgedrukt tijdens de proefbelasting. Wanneer de grond tussen slootbodempl en horizontaal pipeniveau als deklaag wordt beschouwd is aangetoond dat opdrijven en gedeeltelijk opbarsten van deze grond, voorafgaand aan de vervolgprocessen (heave, verticale piping en terugschrijdende erosie), aannemelijk is. Een eventuele verstoring in de deklaag als gevolg van het opdrijven of lokaal opbarsten kan, boven op de inherente heterogeniteit van de grond, hebben bijgedragen aan een geconcentreerde uitstroom van water op de waargenomen wellocaties.

Bij het ontstaan van de zandmeevoerende wellen tijdens de proefbelasting was de stijghoogtegradiënt over de deklaag voldoende om een heavesituatie te creëren waarbij korrelspanningen wegvallen. De grond fluïdiseert (lokaal) en het stromende water zorgt voor verdergaande verticale piping. Het mechanisme verticale piping is op een theoretische wijze benaderd

op basis van de vergelijking van Stokes waaruit bleek dat de stroomsnelheid van het grondwater groter was dan de bezinksnelheid van de geïdealiseerde bolvormige zandkorrels. Analyse van de korrelverdelingen van het afgeschepte zandmateriaal op de wellocaties tonen aan dat er sprake is geweest van verticale piping, waarbij het erosiefront zich in de verticaal, naar beneden gericht ontwikkelde. De korrelverdelingen laten namelijk een geleidelijke afname in fijne fractie gezien, gelijk met de opbouw van de toplaag van het getijdenzand die ook steeds iets minder fines bevat over de diepte (zie 1220-164143.M29). Het is daarom niet aannemelijk dat dieper gelegen zand, gelegen op het horizontale pipeniveau, zich direct via een opbarstkanaal heeft afgezet op de wellocaties.

Verder volgt uit de analyses naar opbarsten, heave en verticale piping dat de belasting voor het optreden van deze deelmechanismen lager is dan die voor terugschrijdende, horizontale pipegroei. Van een 'overshoot', waarbij de belasting voor bovengenoemde initiële mechanisme groter is dan die voor horizontale pipegroei, is geen sprake. Dit volgt eveneens uit het proefverloop waarbij de (horizontale) pipegroei bij een belasting lager dan het kritiek verval stagneerde. Het kritiek verval voor dit laatste mechanisme is bepaald op ca. 2,4-2,5 m, terwijl de grenspotentiaal, kritieke heavegradiënt en de geconcentreerde stromingsbelasting voor verticale piping eerder is bereikt.