

POV Piping Verkenning Doorlatendheid en continue doorlatendheidsprofielen (HPT sonderingen)

Samenvattende rapportage

FUGRO GEOSERVICES B.V.
drs. B.M. Berbee
ir. G.R.P. Van Goor

WATERSCHAP AA EN MAAS
ir. K.J. Leuvenink
P.J.M. Dobber

DELTARES
dr. M. Huber
ir. M. Van der Krogt

versie 1.0, juni 2016



Korte samenvatting

POV Piping verkenning 7: *Doorlatendheid & Continue doorlatendheidsprofielen*

De verkenning *Doorlatendheid & Continue doorlatendheidsprofielen*, uitgevoerd door Waterschap Aa en Maas, Fugro GeoServices BV en Deltares, richt zich met name op bepaling van de doorlatendheid van de ondergrond. De doorlatendheid van pipinggevoelige zandlagen is een belangrijke parameter in de gedetailleerde beoordeling van waterkeringen op piping. In de verkenning is de doorlatendheid bepaald met de, voor de dijkenwereld nieuwe, HPT sondeertechniek en mini-pompproef.

De conclusie op basis van vier proeflocaties langs de Maas en de Rijn is dat de doorlatendheid goed kan worden bepaald met de nieuwe technieken. Naast de meerwaarde bij het beoordelen van dijken zijn de resultaten van deze verkenning ook bruikbaar voor het ontwerpen van dijk(versterking)en.

De HPT sondering en mini-pompproeven leveren vergelijkbare doorlatendheden op als de klassieke pompproef, maar leveren in tegenstelling tot de klassieke pompproef ook inzicht in de gelaagdheid van het zandpakket waardoor met een reëler beeld kan worden gerekend. Dit maakt een scherpere en meer doelmatige beoordeling van dijken en ontwerp van versterkingsmaatregelen mogelijk. Verder zijn de kosten van het onderzoek lager dan de klassieke pompproef en kan het goed worden gecombineerd met regulier sondeeronderzoek langs waterkeringen. Voor de proeflocatie langs de Maas is op basis van het HPT-onderzoek een besparing van ca. 50% in de benodigde pipingberm behaald, ten opzichte van wanneer met de huidige werkwijze wordt ontworpen.

Naast dat de HPT sondeertechniek goed toepasbaar is voor onderzoek naar de doorlatendheid is ook meer inzicht verkregen in hoe om te gaan met de uitkomsten van verschillende typen directe en indirecte doorlatendheidsmetingen zoals korrelverdelingsmethodes en dissipatietesten.

In de verkenning is ook gekeken op welke wijze de resultaten zijn te combineren met o.a. stochastische ondergrondmodellering, hetgeen in de nieuwe beoordelingsronde gebruikt zal worden. Ook is er inzicht verkregen in de ruimtelijke variabiliteit van de doorlatendheid. Deltares heeft hiervoor beschreven hoe een eerste inschatting van de ruimtelijke variabiliteit van de doorlatendheid gemaakt kan worden met behulp van een rekentool. Uiteindelijk is het doel om te komen tot een betere, realistischer en meer uniforme manier voor het bepalen van doorlatendheid voor piping toets- en ontwerpgegevens.

Als afsluiting van de verkenning is de voorliggende samenvattende rapportage opgesteld. Hierin worden de toegepaste technieken toegelicht en de onderzoeksresultaten beschreven. Tevens is kort wordt beschreven hoe HPT sonderingen verwerkt kunnen worden voor toepassing in pipinganalyses volgens het Ontwerp Instrumentarium 2014 (OI2014v3). Voor gedetailleerde toelichting wordt verwezen naar de desbetreffende achtergrondrapportages.

Verder is er tijdens de verkenning een presentatie geweest bij ENW-techniek, de POV Piping werkgroep en zijn via een expertmeeting binnen de POV-Piping diverse experts betrokken die ook werken aan het wettelijk beoordelingsinstrumentarium.

Inhoudsopgave

Korte samenvatting	1
1 Inleiding	3
1.1 Aanleiding.....	3
1.2 Deelonderwerpen.....	3
1.3 Inhoud samenvatting.....	3
2 HPT sonderingen (Hydraulic Profiling Tool)	4
2.1 HPT-sonderingen (HPT)	4
2.2 Mini-pompproeven (MPT).....	4
3 Onderzoekslocaties	6
3.1 Onderzoekslocatie 1: Bergse Maas	6
3.2 Onderzoekslocatie 2-4: Rijn.....	7
4 Vergelijking en geostatistische analyse doorlatendheidsmetingen.....	8
4.1 Resultaten korrelverdelingsmethoden.....	8
4.2 Resultaten directe testen – in-situ testen	10
4.3 Schaaleffect	10
4.4 Geostatistische analyse en implicaties voor doorlatendheidsonderzoek.....	11
4.5 Conclusies vergelijking en geostatistische analyse doorlatendheidsmetingen	12
5 Aandachtspunten uitwerking HPT sonderingen.....	13
5.1 Drukcorrectie.....	13
5.2 Conversie relatieve doorlatendheid Q/P naar absolute doorlatendheid K.....	13
6 Schematisatie van HPT sonderingen voor 1-laagspipinganalyses.....	14
6.1 Vier verschillende methode voor schematisering.....	14
6.2 Methode 1: Eénlaags methode	14
6.3 Methode 2: Lithostratigrafische methode	14
6.4 Methode 3: Direct HPT methode	15
6.5 Methode 4: Werkelijke lagen methode	15
7 Overzicht deelrapportages.....	17

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

De doorlatendheid van pipinggevoelige (zand)lagen is een belangrijke parameter in de gedetailleerde beoordeling van waterkeringen op piping. In de huidige praktijk wordt de doorlatendheid van deze lagen veelal bepaald op basis van (enkele) korrelverdelingen en/of een aantal in-situ doorlatendheidsmetingen in de bovenste laag van het zandpakket. De resultaten van deze doorlatendheidsmetingen zijn sterk afhankelijk van de toegepaste methodes en formules en bieden vaak geen of beperkt inzicht in de doorlatendheid van het watervoerende (zand)pakket dat daadwerkelijk bijdraagt aan de voeding van een pipe.

Om het risico op piping beter, en daarmee scherper te beoordelen, is het van belang om inzicht te krijgen in de variatie van de doorlatendheid in het zandpakket. Samen met de dikte van het zandpakket bepaalt dit het vermogen om water door te laten. Vanwege de heterogeniteit van de bodem, de beperkingen van de huidige technieken en de hoge kosten die aan in-situ metingen zijn verbonden, is het bepalen van een betrouwbare waarde en de dieptevariatie van de doorlatendheid een lastige en kostbare opgave.

Door toepassing van de Hydraulic Profiling Tool (HPT) is een gedetailleerd beeld van de (variatie in) doorlatendheid van de bodem op te stellen. Deze HPT-sondeertechniek is ontwikkeld binnen het milieuwerkveld om een continu profiel van de in-situ doorlatendheid te bepalen. Het toepassen van deze continue doorlatendheidsprofielen draagt bij aan een realistische en scherpere schematisatie van de ondergrond voor het beoordelen van het faalmechanisme piping.

1.2 Deelonderwerpen

Binnen de verkenning zijn de volgende 3 deelonderzoeken uitgevoerd verspreid over 4 projectlocaties (1 langs de Maas en 3 langs de Rijn):

- Vergelijking van diverse methoden van doorlatendheidsmetingen;
- Analyse naar heterogeniteit in de ondergrond en aanbevelingen voor de dichtheid van doorlatendheidsmetingen;
- Ontwikkeling van verschillende methoden waarbij de HPT doorlatendheidsmetingen in een 1-laags pipingmodel zijn te verwerken.

1.3 Inhoud samenvatting

De resultaten van de verkenning zijn opgenomen in diverse deelrapportages. De voorliggende samenvatting bevat een beschrijving op hoofdlijnen van de belangrijkste bevindingen en aanbevelingen. Achtereenvolgens wordt een beschrijving gegeven van de HPT sondering en wordt aangegeven welke 'traditionele' onderzoekstechnieken zijn toegepast op de verschillende projectlocaties. Daarna wordt beschreven wat de bevindingen zijn ten aanzien van de verschillende methoden van doorlatendheidsbepaling en hoe hiermee rekening mee moet worden gehouden bij het geostatistisch verantwoord opzetten van een doorlatendheidsonderzoek. Vervolgens zijn de belangrijkste aandachtspunten bij het uitvoeren van HPT sonderingen voor piping beschreven, en is een beschrijving gegeven van de wijze waarop de resultaten van het HPT-onderzoek kunnen worden toegepast in een 1-laags pipingmodel op basis van de rekenregel van Sellmeijer (conform Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen).

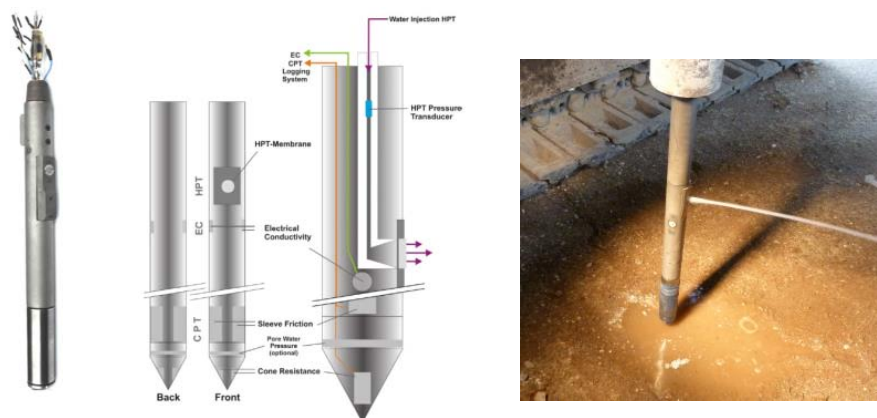
2 HPT sonderingen (Hydraulic Profiling Tool)

Een gedetailleerde beschrijving van de HPT en MPT technieken zijn opgenomen in:

- “Resultaten dataverzameling (factual report)” ; kenmerk: 1213-0101-000.R01
- “Analyse vergelijking doorlatendheidsmethoden en HPT sonderingen” ; kenmerk 1213-0101-000.R04

2.1 HPT-sonderingen (HPT)

Met de HPT sondeertechniek (HPT = Hydraulic Profiling Tool) wordt tijdens het sonderen via een speciaal hiervoor ontwikkeld systeem, water met een constant debiet in de bodem geïnjecteerd. Vervolgens wordt de drukrespons in de bodem, ter plaatse van het injectiepunt, gemeten. De verhouding debiet/druk (Q/P) biedt iedere 2 cm een relatieve maat van de doorlatendheid over de gehele sondeerlengte. De HPT-conus is afgebeeld in figuur 2-1.

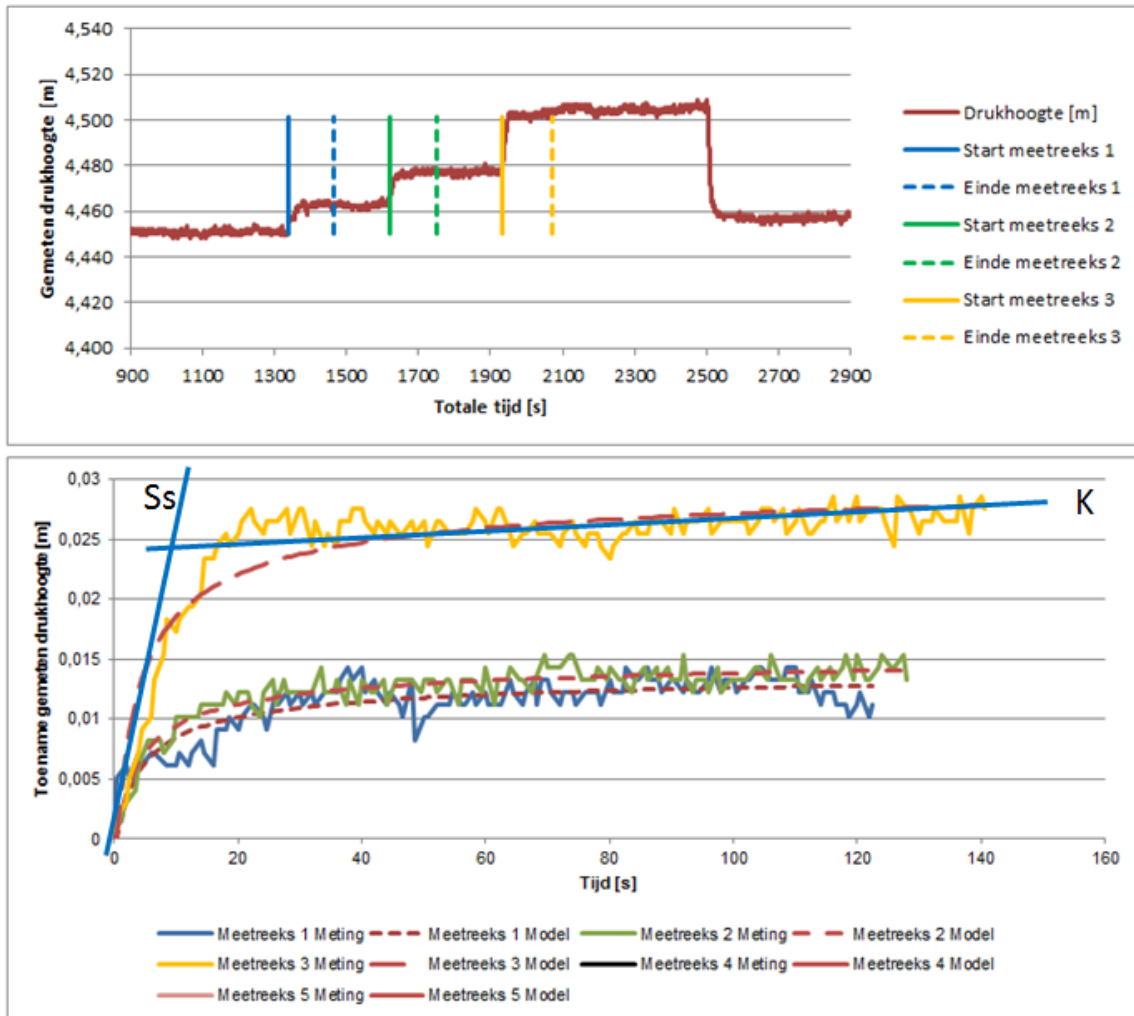


Figuur 2-1: HPT conus (geheel rechts: op project in Apeldoorn met groot debiet)

2.2 Mini-pompproeven (MPT)

De resultaten van de HPT-sondering biedt een relatieve maat van de doorlatendheid. Een absolute maat is echter noodzakelijk voor toepassing in pipinganalyses. Deze vertaling naar een absoluut doorlatendheidsprofiel kan op basis van een pompproef. De kosten hiervan zijn echter zeer hoog, te meer omdat men meerder pompproeven zou willen uitvoeren afhankelijk van de grootte van het projectgebied. Fugro heeft daarom een test ontwikkeld waarmee op een efficiënte wijze en tegen relatief lage kosten de vertaling naar een absoluut doorlatendheidsprofiel kan worden gemaakt. Tijdens deze test, de mini-pompproef (MPT = Mini Pumping Test), wordt op basis van dezelfde principes als een pompproef de stijghoogterespons van de bodem op een afstand van een puntbron gemeten. Door het fitten van een rekenmodel op de gemeten waarde kan de doorlatendheid en bergingscoëfficiënt van de ondergrond worden berekend. De MPT testen worden met de HPT meetopstelling uitgevoerd en kunnen worden gecombineerd met de HPT sondering.

In deze verkenning zijn op diverse HPT sondeerlocaties en op verschillende dieptes MPT-testen uitgevoerd. Hiertoe is de sondering op een bepaalde diepte stopgezet, waarna met verschillende debieten water in de bodem geïnjecteerd. De stijghoogterespons in de omgeving is gemeten door middel van een druksensor op U1-locatie in de punt van de HPT conus. Op de gemeten drukverhoging is een model gefit om de parameters K (doorlatendheid) en Ss (begingscoëfficiënt) per debietstap te bepalen (zie figuur 2-2). De bergingscoëfficiënt is van belang voor het uitvoeren van tijdsafhankelijke grondwaterstromingsberekeningen.



Figuur 2-2: Voorbeeld uitwerking MPT meetreeks

3 Onderzoekslocaties

Hieronder worden de 4 onderzoekslocaties bondig beschreven en wordt aangegeven welk onderzoek per locatie is uitgevoerd.

Een gedetailleerde beschrijving van de projectlocaties en de onderzoek is opgenomen in:

- "Resultaten dataverzameling (factual report)"; kenmerk: 1213-0101-000.R01
- "Uitwerking doorlatendheidsmethoden 2^e projectlocatie"; kenmerk: 1213-0101-000.R08

3.1 Onderzoekslocatie 1: Bergse Maas

De eerste onderzoekslocatie is gelegen bij Doeveren in het beheergebied van waterschap Aa en Maas (zie Figuur 3-1). Op deze locatie is het meeste onderzoek uitgevoerd dat uiteindelijk de basis heeft gevormd voor deze verkenning. Het betreft het traject bij dijkpaal 973 (+/- 200 m) tussen Heusden/Heesbeen) en Doeveren. Op deze locatie zijn binnen- en buitendijks de volgende (doorlatendheids)metingen uitgevoerd:

Sondeer- en boorwerkzaamheden

- HPT sonderingen
- Waterspanningssonderingen (DKMP);
- Dissipatietesten bij de DKMP en HPT sonderingen, uitwerking methode Van Baars & Van de Graaf en methode Perez & Fauriel;
- Mini-pompproeven op verschillende dieptes tijdens een HPT sondering (zie paragraaf 2.2).
- Mechanische boringen (MB) inclusief ongeroerde monsternamen. In de boringen zijn op verschillende diepten slugtesten uitgevoerd. Deze zijn uitgewerkt met de methoden Hvorslev en Bouwer-Rice.
- Handboringen (HB) met peilbuizen. In de peilbuizen zijn eveneens slugtesten uitgevoerd. De slugtesten zijn uitgewerkt met de methoden Hvorslev en Bouwer-Rice.

Laboratoriumwerkzaamheden

- Laboratoriumclassificatie van geroerde en ongeroerde monsters;
- Volumegewicht- en watergehalte bepaling;
- Falling head test op de ongeroerde monsters;
- Korrelverdeling van de ongeroerde monsters (zeving en areometerproef).

Op basis van de korrelverdelingen zijn een groot aantal berekeningsmethoden, zoals Hazen en Den Roijen, toegepast om de doorlatendheid af te leiden.

Stijghoogterespons analyse

Continue peilbuismetingen van 1 hoogwatergolf en getijwerking, analyse van de stijghoogterespons op de buitenwaterstand. Uitwerking op basis van instationaire numerieke modellering.



Figuur 3-1: Projectlocatie 1 langs de Bergsche Maas

3.2 Onderzoekslocatie 2-4: Rijn

Naast de hierboven beschreven onderzoekslocatie is ook gebruik gemaakt van gegevens van de POV Piping Verkenning Voorlanden. Deze verkenning betreft 3 trajecten langs de Rijn, te weten nabij Lobith, nabij Pannerden en nabij Westervoort. Het meeste grondonderzoek is vanuit de POV Piping Verkenning Voorlanden uitgevoerd en aan deze verkenning aangeleverd.

Veldwerkzaamheden

- Waterspanningssonderingen (DKMP);
- HPT sonderingen incl. dissipatietesten;
- Mini-pompproeven op verschillende dieptes tijdens een HPT sondering (zie paragraaf 2.2);
- Mechanische boringen (MB) inclusief geroerde monsternamen;
- Handboringen (HB) met peilbuizen;
- Pompproeven.

Laboratoriumwerkzaamheden

- Korrelverdeling van de ongeroerde monsters (zeving).

Toegepaste berekeningsmethoden doorlatendheid op basis van korrelverdelingen

Den Rooijen, 1992

Hazen-original, 1892

Kozeny-Carman, 1953

4 Vergelijking en geostatistische analyse doorlatendheidsmetingen

Een uitgebreidere uitwerking van de vergelijken tussen methoden is opgenomen in:

- “Analyse vergelijking doorlatendheidsmethoden en HPT sonderingen”; kenmerk 1213-0101-000.R04
- “Uitwerking doorlatendheidsmethoden 2^e projectlocatie”; kenmerk: 1213-0101-000.R08

De uitwerking van de geostatistische analyses en de implicaties voor doorlatendheidsonderzoek zijn beschreven in:

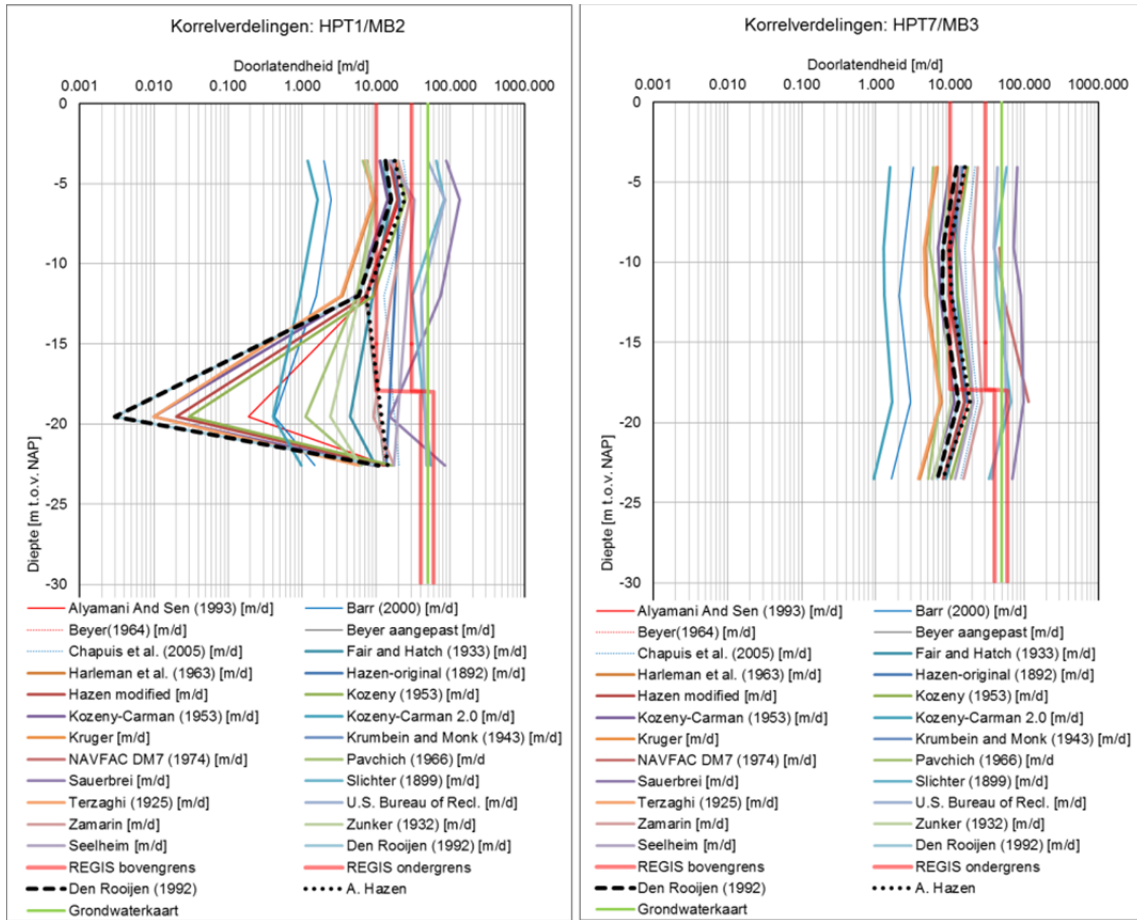
- “Analysis of permeability heterogeneity and its implications in piping assessment”; kenmerk: 1209637-000-GEO-0008

Met betrekking tot doorlatendheidsmetingen zijn er indirecte testen en directe testen uitgevoerd. Indirecte testen zijn gebaseerd op empirische relaties met korrelverdelingen, terwijl directe testen neerkomen op doorlatendheidsmetingen in situ of op een laboratoriummonster. De verschillende testen zijn met elkaar vergeleken door de voorspellende waarde van de testen te beoordelen.

4.1 Resultaten korrelverdelingsmethoden

Voor diverse monsters is de doorlatendheid bepaald met behulp van empirische relaties op basis van korrelverdelingen. Meer dan 25 beschikbare relaties zijn hiervoor gebruikt. In figuur 4-1 zijn de resultaten van de diverse doorlatendheidsbepalingen op basis van korrelverdelingsmethoden weergegeven. Er zijn grote verschillen tussen de berekende doorlatendheden (factor 100-1000) uit de verschillende methoden, ondanks dat er wel degelijk rekening is gehouden met de toepassingsgebieden van de methoden. Daarnaast laat de (voor waterkeringen veelvuldig gehanteerde) methode Den Rooijen een overwegend onderschatting van de referentie-doorlatendheid (REGIS) zien.

In de doorlatendheden berekend op basis van (lokale) korrelverdelingen wordt de variatie van de doorlatendheid met de diepte, zoals die volgt uit bijvoorbeeld REGIS of de Grondwaterkaart, niet teruggevonden.

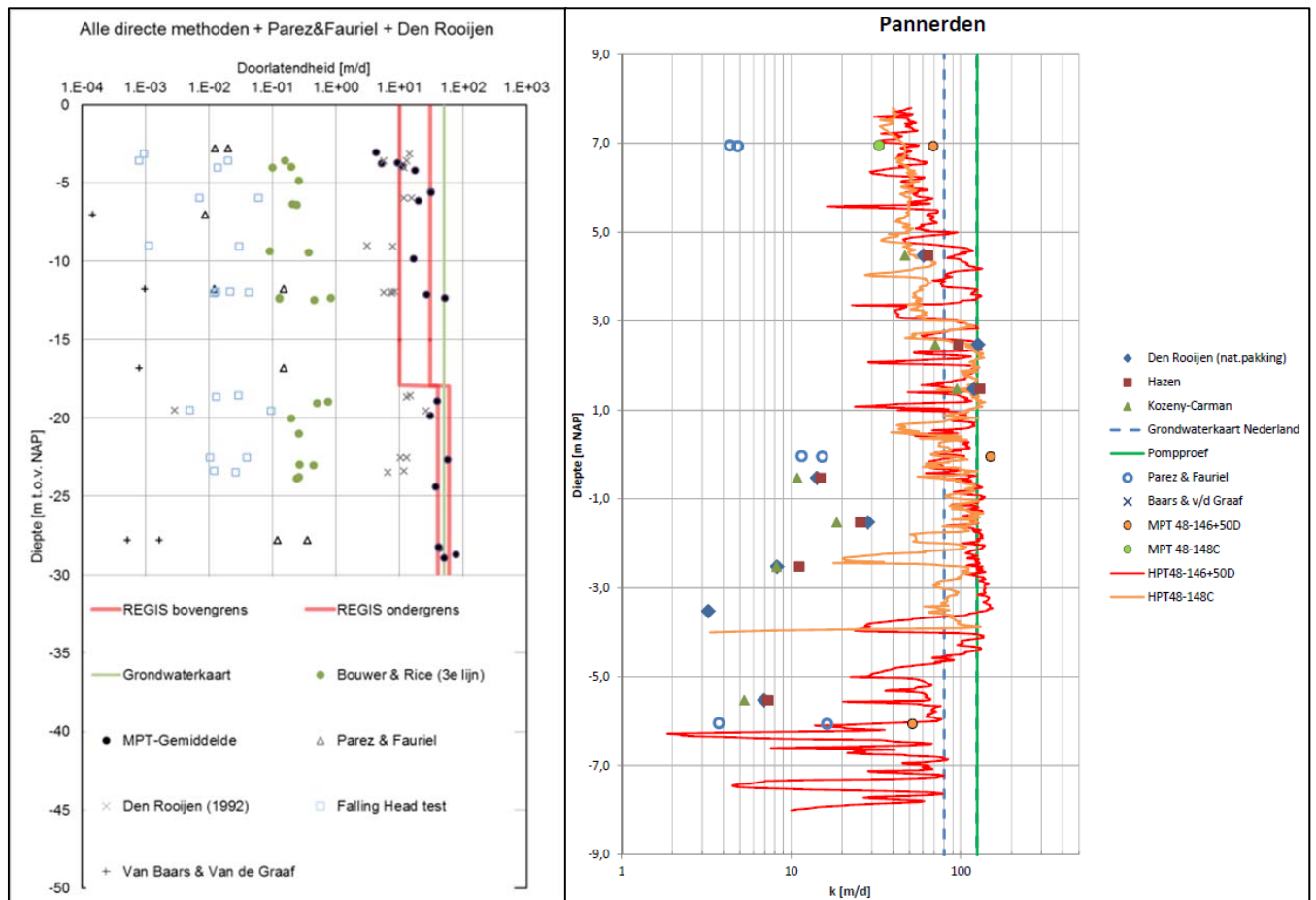


Figuur 4-1: Berekende doorlatendheden op onderzoeklocaties: indirecte methoden o.b.v. korrelverdelingen

4.2 Resultaten directe testen – in-situ testen

In figuur 4-2 zijn de resultaten van diverse directe testen weergegeven. De variatie van de doorlatendheid met de diepte (zoals te zien in de referentie-doorlatendheid REGIS) is hier in meer of mindere mate te zien.

Wanneer de doorlatendheden op basis van REGIS en de Grondwaterkaart als referentie worden genomen blijkt dat vrijwel alle directe testen lage tot zeer lage doorlatendheden opleveren. Een uitzondering hierop is de stijghoogte-respons analyse, de mini-pompproef (MPT-test) en de HPT sondering. Deze geven doorlatendheden die goed overeenkomen met de referentie-doorlatendheden uit REGIS, Grondwaterkaart en pompproeven.



Figuur 4-2: Berekende doorlatendheden op onderzoekpunten: directe methoden (onderzoeklocatie Doeveren en onderzoeklocatie Pannerden)

4.3 Schaaleffect

De resultaten van de directe doorlatendheidstesten zijn zeer variabel. De variatie is dusdanig dat het aannemelijk is dat op basis van dissipatietesten, laboratoriumtesten of slugtesten het grootste deel van de primaire keringen van de versterkingslijst afgehaald kunnen worden, althans ten aanzien van piping. Dat lijkt niet reëel. Veel van de keringen hebben immers wel een geschiedenis van geobserveerde zandmeevoerende wellen. De oorzaak lijkt te liggen in de proefgrootte: het schaaleffect.

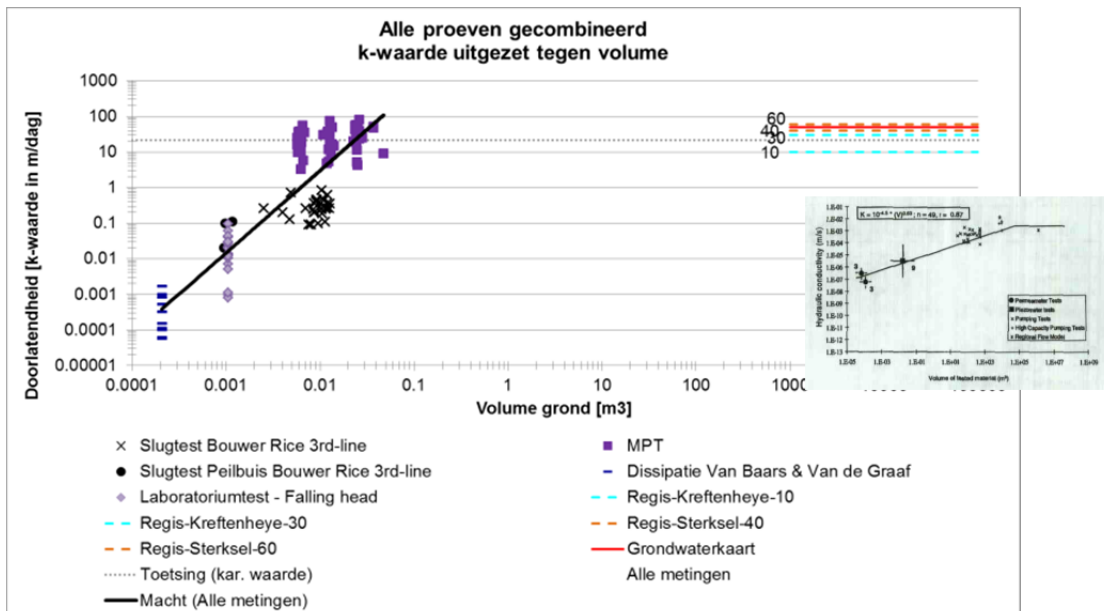
Het schaaleffect is bekend uit de internationale literatuur, zie bijvoorbeeld (Schulze-Makuch, Carlson, Cherkauer, & Malik, 1999).

Er is een relatie tussen het schaalniveau van de test en doorlatendheid bij heterogene formaties, waarbij met toenemende schaalgrootte van de proef een hogere doorlatendheid wordt gevonden, tot een bepaalde bovengrens, waarna de toename tot nul reduceert (zie inzet figuur 4-3). Er is in dit

onderzoek een conceptuele methode opgesteld om kleinschalige proeven om te rekenen naar een voor piping representatieve doorlatendheid. Deze methode is beschreven binnen deze verkenning in de “Handreiking omgang met schaafeffecten bij Doorlatendheidsmetingen” (kenmerk: 1213-0101-000.R06). Hierbij wordt opgemerkt dat de methode voor het omgaan met dit schaafeffect zeker niet pleit voor het gebruik van dissipatietesten en korrelverdelingsmethoden, omdat de onzekerheid niet beschouwd is:

- 1) De fit is alleen gemaakt voor één specifieke case en is niet generiek toepasbaar voor alle gronden in Nederland,
- 2) Het beïnvloede volume grond is een grove schatting van de orde van grootte. Daarnaast is dit volume op zichzelf ook afhankelijk van de doorlatendheid.
- 3) De spreiding in de afzonderlijke meetpunten is dermate groot dat de onzekerheid in de fit ook groot is.

De methode kan wel helpen bij het inschatten van de doorlatendheden als er echt niet anders beschikbaar is, omdat het resultaat van de opgeschaalde gegevens in ieder geval een betere benadering is dan wordt verkregen via korrelverdelingen en dissipatietesten is. **Echter, voor piping is de bulk doorlatendheid van veel groter belang. Het is in dat geval altijd beter om de REGIS doorlatendheid als eerste inschatting te gebruiken.**



Figuur 4-3: Schaafeffect, combinatie Kreftenheye & Sterksel formatie, inzet: bevindingen Schulze-Makuch et al. (1999)

4.4 Geostatistische analyse en implicaties voor doorlatendheidsonderzoek

Vervolgens zijn diverse geostatistische methoden toegepast om de onzekerheid in de doorlatendheidsmetingen te kwantificeren en analyseren. Daarnaast is de heterogeniteit van de doorlatendheid in de ondergrond beschouwd door de correlatielengte van de diverse doorlatendheidsberekeningen te berekenen voor de testlocatie bij Doeveren met behulp van een rekentool (Maximum Likelihood methode). Dit rekentool is binnen dit onderzoek beschikbaar gesteld. De berekende horizontale correlatielengtes liggen in de orde van 10m tot 680m en laten een grote variabiliteit zien.

De berekende correlatielengtes zijn vervolgens gebruikt bij de uitmiddeling van de lokale spreiding. Dit had tot gevolg dat de onzekerheid in doorlatendheid kleiner werd en de karakteristieke (reken)waarde gunstiger werd. Deze waarden zijn toegepast in semi-probabilistische piping berekeningen conform OI2014v3.

Door rekening te houden met de lokale uitmiddeling met behulp van de horizontale correlatielengte, werd de berekende benodigde berm lengte om te voldoen aan de norm verkleind. Echter, de onzekerheid in de correlatielengte maakt het onmogelijk om hieraan eenduidige conclusies te verbinden voor de toepassing van de methode. Daarnaast, zoals al eerder is gerefereerd, zijn er grote verschillen in de berekende waarden van de doorlatendheid, welke een nog grotere invloed hebben op het eindresultaat van de berekeningen.

4.5 Conclusies vergelijking en geostatistische analyse doorlatendheidsmetingen

Op basis van deze verkenning kunnen de volgende (belangrijkste) conclusies worden getrokken:

- HPT sonderingen en mini-pompproeven sluiten qua gemeten doorlatend goed aan op pompproeven en REGIS/Grondwaterkaart, met het verschil dat HPT sonderingen ook inzicht geven in de gelaagdheid van de zandlaag.
- Indirect bepaalde doorlatendheden, die berekend zijn uit korrelverdelingen, wijken af van de doorlatendheid uit bijvoorbeeld pompproeven en/of REGIS. De methode Den Rooijen komt ten opzichte van de andere korrelverdelingsmethoden dicht bij de doorlatendheid uit pompproeven en/of REGIS, maar geeft daarbij wel een onderschatting.
- Direct bepaalde doorlatendheden zijn onderhevig aan een schaaleffect. Aanbevolen wordt zoveel mogelijk gebruik te maken van grootschalige proeven: responsanalyses, pompproeven, HPT sonderingen in combinatie met mini-pompproeven en/of regionale modelstudies. Deze grootschalige proeven sluiten het beste aan bij het schaalniveau waarop het pipingproces zich afspeelt. Er is in dit onderzoek een conceptuele methode ontwikkeld om het schaaleffect bij kleinschalige proeven te ondervangen.
- Het is aangetoond dat met behulp van de horizontale correlatielengte de lokale onzekerheid kan worden verkleind. In deze specifieke case is de onzekerheid in correlatielengtes echter zo groot, dat er geen generieke conclusies getrokken kunnen worden met betrekking tot de heterogeniteit van de doorlatendheid van de ondergrond.

5 Aandachtspunten uitwerking HPT sonderingen

Een uitgebreidere uitwerking is opgenomen in:

- “Analyse vergelijking doorlatendheidsmethoden en HPT sonderingen”;
kenmerk 1213-0101-000.R04

In het voorgaande hoofdstuk is ingegaan op de resultaten van verschillende technieken en methoden om de doorlatendheid te bepalen. Hierin is tevens ingegaan op de HPT sondering, die qua schaalniveau goed lijkt aan te sluiten bij het piping proces. In dit hoofdstuk worden enkele specifieke aandachtspunten benoemd bij het uitvoeren van HPT sonderingen, zoals deze tijdens het project naar voren zijn gekomen.

5.1 Drukcorrectie

Tijdens het uitvoeren van een HPT sondering wordt een totaaldruk ter plaatse van het injectiepunt gemeten. Deze dient te worden gecorrigeerd voor

- luchtdruk;
- systeemdrukken;
- hydrostatische waterdruk.

Op basis van de gecorrigeerde totaaldrukken kan het voor de HPT sondering kenmerkende ratio Q/P (ml/min/kpa) kan worden bepaald.

5.2 Conversie relatieve doorlatendheid Q/P naar absolute doorlatendheid K

In Amerika (GeoProbe; McCall & Christy, 2010) is in het verleden een empirische conversieformule ontwikkeld om de absolute doorlatendheid uit een HPT meting te berekenen. Deze formule leverde bij toepassing in Nederland echter doorlatendheden die niet reëel lijken te zijn voor de Nederlandse situatie.

In het kader van dit onderzoek is daarom een op de vergelijking van Darcy gebaseerde formule afgeleid voor de relatie tussen Q/P en K. Er blijkt een lineaire relatie te bestaan:

$$k = \left[\frac{1}{C} \right] * \frac{Q}{P} \quad \text{met } [1/C] = \text{constante}$$

Deze relatie blijkt afzettings-afhankelijk te zijn.

Op basis van de uitgevoerde HPT metingen is onderzocht wat de waarde van de constante [1/C] is. Dit kan worden bepaald door de relatieve doorlatendheid (Q/P) te correleren met metingen van de absolute doorlatendheid met mini-pompproeven. Aanbevolen wordt om per project met HPT sonderingen altijd ten minste 3 mini-pompproeven per afzetting uit te voeren, om de constante [1/C] goed te kunnen bepalen. Op basis van deze constante kan het relatieve continue doorlatendheidsprofiel op basis van de HPT resultaten worden vertaald naar een continu profiel van de absolute doorlatendheid van de ondergrond.

6 Schematisatie van HPT sonderingen voor 1-laagspipinganalyses

Dit onderwerp is verder uitgediept in de volgende rapportages:

Een uitgebreidere uitwerking van de vergelijken tussen methoden is opgenomen in:

- “ISAC | Piping: van complexe ondergrond naar pipinganalyse”;
kenmerk: 1213-0101-000.R05
- “Doorlatendheids-schematisatie in piping analyses o.b.v. HPT sonderingen”;
kenmerk: 1213-0101-000.R06

De vigerende rekenmethode bij het ontwerpen op piping is het 1-laags pipingmodel (Sellmeijer model) zoals deze staat beschreven in het Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen. De HPT sondering levert een continu doorlatendheidsprofiel, en biedt daardoor nauwkeurig inzicht in de gelaagdheid van een zandpakket.

In deze verkenning is onderzocht hoe de resultaten van het HPT onderzoek kunnen worden vertaald naar een 1-laags pipinganalyse en op welke wijze de karakteristieke waarde van de doorlatendheid kan worden bepaald.

6.1 Vier verschillende methode voor schematisering

Bij HPT sonderingen zijn beide methoden voor bepaling van de karakteristieke waarde in principe mogelijk. De te hanteren methode is afhankelijk van de wijze van schematisering.

Op basis van de onderzoeksresultaten op basis van de HPT sonderingen zijn er , met toename van detailniveau, vier verschillende wijzen van schematisering verkend:

- Variant 1: Eénlaags methode
- Variant 2: Lithostratigrafische methode
- Variant 3: Direct HPT methode
- Variant 4: Werkelijke lagen methode

Hierbij wordt opgemerkt dat het verschil tussen de varianten is dat er meer detail wordt meegenomen. Variant 4 leidt daarbij bijvoorbeeld tot een realistischer schematisering dan bijvoorbeeld variant 1. Het is nadrukkelijk niet zo dat Variant 4 altijd tot gunstiger uitgangspunten leidt, wel tot realistischere uitgangspunten.

6.2 Methode 1: Eénlaags methode

De informatie uit de HPT(s) wordt in deze methode terug geschematiseerd tot één watervoerende laag met één doorlatendheid. Voor het bepalen van de karakteristieke waarde van deze watervoerende laag worden de doorlatendheden uit de HPT(s) beschouwd als enkele honderden separate doorlatendheidsmetingen (iedere 2 cm sonderdiepte is er een waarde) in het bewuste watervoerend pakket. De hieruit verkregen karakteristieke doorlatendheid wordt toegepast in de pipinganalyse.

Deze methode lijkt op het uitvoeren van een pompproef, met dat verschil dat nu een karakteristieke schatting van het gemiddelde kan worden afgeleid. Bij een pompproef is een statistische analyse veelal niet mogelijk als gevolg van het beperkte aantal proeven.

6.3 Methode 2: Lithostratigrafische methode

De gegevens uit de HPT(s) worden terug geschematiseerd tot enkele lithostratigrafische eenheden of lagen (bv. zand F. Echteld geul 1, F. Echteld geul 2, zand F. Boxtel, zand F. Kreftenheye etc.). Voor het bepalen van de karakteristieke waarde per lithostratigrafische laag worden de doorlatendheden uit de HPT beschouwd als enkele honderden separate doorlatendheidsmetingen in de bewuste eenheid. De hieruit volgende karakteristieke waarden kunnen vervolgens worden toegepast in een numerieke

grondwaterstromingsberekening zoals bedoeld in paragraaf 5.3.5.1 uit het [*Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen*] en in [*TR Controle mechanisme piping*]. De hieruit verkregen karakteristieke doorlatendheid wordt toegepast in de pipinganalyse.

6.4 Methode 3: Direct HPT methode

Deze methode vereist meerdere HPTs. Het volledige doorlatendheidsprofiel uit één HPT wordt opgenomen in een numerieke grondwaterstromingsberekening zoals bedoeld in paragraaf 5.3.5.1 uit het [*Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen*] en beschreven in [*TR Controle mechanisme piping*]. Hieruit volgt een effectieve gemiddelde waarde van de doorlatendheid voor piping op basis van één HPT sondering. Dit wordt voor iedere HPT separaat uitgevoerd. In de resulterende doorlatendheden is het effect van gelaagdheid dus meegenomen. Op basis van deze doorlatendheden wordt een karakteristieke waarde bepaald die in het 1-laagsmodel van Sellmeijer kan worden toegepast.

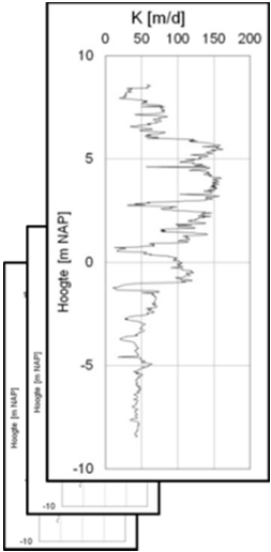

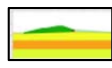
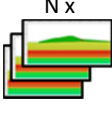
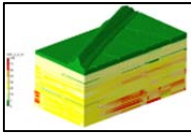
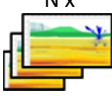
6.5 Methode 4: Werkelijke lagen methode

Deze methode vereist meerdere HPTs in het voor- én het achterland van de waterkering. De diverse beschikbare bodemgegevens (HPTs, maar ook bijvoorbeeld ‘traditionele’ sonderingen en boringen, Multi-EM Electromagnetische metingen en/of pompproefgegevens) worden opgenomen in een 3D bodeminformatie systeem. Op basis hiervan wordt een 3D ondergrondmodel gebouwd bestaande uit zowel een lithologisch, lithostratigrafisch en geohydrologische component. Dit is vergelijkbaar met bijvoorbeeld TNO-DINO ondergrondmodellen als DGM, REGIS en GeoTop, met dat verschil dat het hier om een projectspecifiek model gaat, met een fors hogere resolutie (typisch ca. 5 x 5 x 0,1 m).

Uit dit model worden op regelmatige afstanden doorsneden gegenereerd op basis waarvan een numerieke grondwaterstromingsberekening zoals bedoeld in paragraaf 5.3.5.1 uit het [*Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen*] en in [*TR Controle mechanisme piping*] worden uitgevoerd. Hieruit volgt een effectieve doorlatendheid voor piping per profiel, waarin het werkelijke laagverloop (inclusief het uitwigen van lagen) is meegenomen. Op basis van deze doorlatendheden wordt een karakteristieke waarde bepaald die in het 1-laagsmodel van Sellmeijer kan worden toegepast.

Voor de onderzoekslocatie 1 (Doeveren) is deze methode toegepast. Hiermee is door het meenemen van gelaagdheid een besparing behaald van ca. 50% piping bermlengte ten opzichte van een ontwerp op basis van REGIS.

In figuur 6-1 zijn de 4 methoden schematisch weergegeven.

Basisdata HPT sondering(en)	Methode	Stap 1 Ondergrond model	Stap 2 Geo- hydro- logisch model	Stap 3 Kar. waarde bepaling	Stap 4 Piping analyse	
	Eénlaags	>>	>>		Traditionele piping analyse (één karakteristieke waarde voor doorlatendheid) (conform 1-laags model [ORZW]) 	Toenemende nauwkeurigheid pipinganalyse >>>
	Litho-strati-grafische	>>	1x 	$\bar{K}_{kar} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K_i$		
	Directe HPT	>>	N x 			
	Werkelijke lagen		N x 			
Workflow >>>>>						

Figuur 6-1: Methoden van karakteristieke waarde bepaling vanuit HPT sonderingen.

7 Overzicht deelrapportages

Onderstaand een overzicht van de diverse deelrapportages die in het kader van dit POV-onderzoek opgesteld:

Geoprobe (2010) McCall and Christy, Development of a hydraulic conductivity estimate of the hydraulic profiling tool (HPT)

Deltares (2016) Analysis of permeability heterogeneity and its implications in piping assessment, 1209637-000. January 2016.

Fugro GeoServices B.V. (2015). POV Piping - Continue doorlatendheidsprofielen: verdiepend inzicht in de bodem. Resultaten dataverzameling (factual report). 5 januari 2015. Kenmerk: 1213-0101-000.R01.

Fugro GeoServices B.V. (2015). POV Piping - Continue doorlatendheidsprofielen: verdiepend inzicht in de bodem. Invloed bepaling k-waarde op pipingtoets. 5 juni 2015. Kenmerk: 1213-0101-000.R02.

Fugro GeoServices B.V. (2015). POV Piping - Continue doorlatendheidsprofielen: verdiepend inzicht in de bodem. Analyse vergelijking doorlatendheidsmetingen en HPT sonderingen. 13 april 2015. Kenmerk: 1213-0101-000.R04.

Fugro GeoServices B.V. (2016). POV Piping – ISAC|Piping: Van complexe ondergrond naar pipinganalyse. 22 april 2016. Kenmerk: 1213-0101-000.R05.

Fugro GeoServices B.V. (2016). POV Piping – Doorlatendheidsschematisatie in piping analyses o.b.v. HPT sonderingen. 20 mei 2016. Kenmerk: 1213-0101-000.R06.

Fugro GeoServices B.V. (2016). POV Piping – Handreiking omgang met schaaffecten bij doorlatendheidsmetingen. 20 mei 2016. Kenmerk: 1213-0101-000.R07.

Fugro GeoServices B.V. (2015). Uitwerking doorlatendheidsmethoden 2^e projectlocatie. 21 december 2015. Kenmerk 1213-0101-000.M03