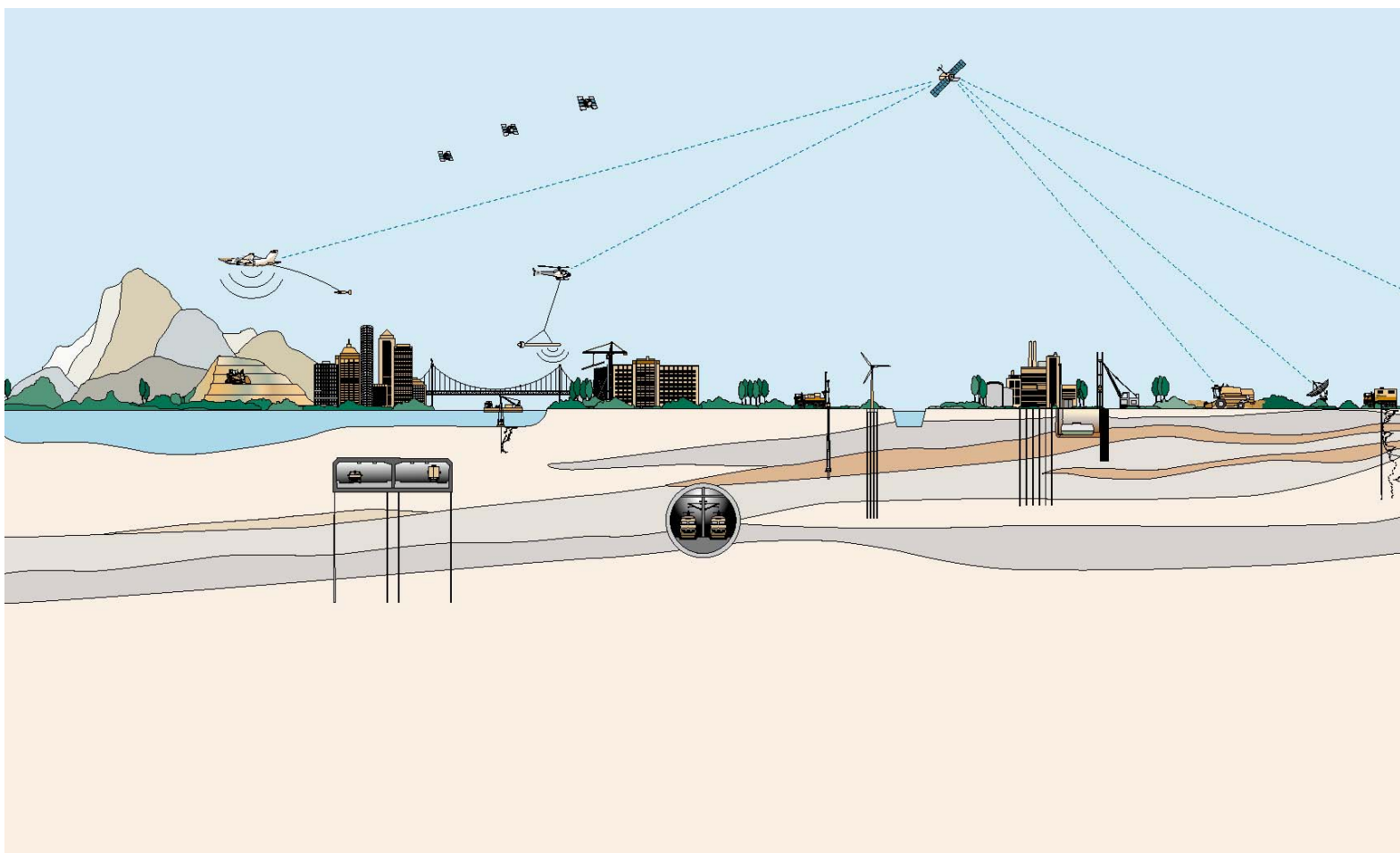


RAPPORT  
betreffende

**POV PIPING**

**DOORLATENDHEIDSSCHEMATISATIE IN  
PIPING ANALYSES O.B.V.  
HPT SONDERINGEN**

Opdrachtnummer: 1213-0101-000



RAPPORT  
betreffende

**POV PIPING**

**DOORLATENDHEIDSSCHEMATISATIE IN  
PIPING ANALYSES O.B.V.  
HPT SONDERINGEN**

Opdrachtnummer: 1213-0101-000

Opdrachtgever : Waterschap Aa en Maas  
Postbus 5049  
5201 GA 'S HERTOGENBOSCH

Projectleider : drs. B.M. Berbee

Opgesteld door : drs. B.M. Berbee  
Adviseur Waterbouw

Gecontroleerd door : ir. G.R. Van Goor  
Adviseur Waterbouw

VERSIE	DATUM	OMSCHRIJVING WIJZIGING	PARAAF PROJECTLEIDER
1	20 mei 2016	Versie 1.0	BMB
2	27 juni 2016	Versie 2.0, verduidelijkingen methoden opgenomen	BMB

FILE: 1213-0101-000.R06 Doorlatendheidsschematisatie in piping analyses obv HPT sonderingen

<u>INHOUDSOPGAVE</u>	<u>Blz.</u>
1. INLEIDING	3
1.1. Voorgaande onderzoeken	3
1.2. Leeswijzer	3
2. KARAKTERISTIEKE WAARDE BEPALING	4
2.1. Te hanteren formules	4
2.2. Aanpak bij HPT sonderingen	4
2.2.1. Variant 1: Eénlaags methode	4
2.2.2. Variant 2: Lithostratigrafische methode	5
2.2.3. Variant 3: Direct HPT methode	6
2.2.4. Variant 4: Werkelijke lagen methode	6
3. VARIANT 1: EÉNLAAGS METHODE	10
4. VARIANT 2: LITHOSTRATIGRAFISCHE METHODE	11
4.1. Formatie indeling en karakteristieke doorlatendheid per formatie	11
4.2. ISAC Piping analyse: grondwaterstromingsmodel	11
4.3. Welbreedte	12
4.4. Effectieve karakteristieke doorlatendheid Lithostratigrafische methode	13
5. VARIANT 3: DIRECTE HPT METHODE	14
5.1. ISAC Piping analyse: grondwaterstromingsmodel	14
5.2. Effectieve karakteristieke doorlatendheid Directe HPT methode	15
6. DISCUSSIE MOGELIJKE METHODEN PIPINGBEOORDELING	16
6.1. Afweging methoden	16
6.2. Resulterende doorlatendheden	16
REFERENTIES	18

## 1. INLEIDING

In het kader van de POV-piping is door Waterschap Aa en Maas, Deltares en Fugro GeoServices B.V. onderzoek gedaan naar diverse doorlatendheidsbepalingen voor de beoordeling van het faalmechanisme piping, specifiek ten aanzien van HPT sonderingen en MPT mini-pompproeven.

Uit dit onderzoek is naar voren gekomen dat toepassing van HPT sonderingen en MPT mini-pompproeven een forse besparing kan opleveren bij het ontwerp van versterkingen met het oog op piping. Dit omdat met deze techniek de gelaagdheid en variatie in doorlatendheid van zandlagen wordt meegenomen in pipinganalyses.

Belangrijk aspect bij het toetsen en ontwerpen van waterkeringen is dat een voldoende veilige schematisatie wordt gekozen op basis waarvan de beoordeling of het ontwerp wordt gebaseerd. Dit geldt tevens voor de parameterbepaling. Hierbij dient ook rekening te worden gehouden met variatie in de doorlatendheid, en de kans dat een test op een andere locatie minder gunstig uit zou kunnen vallen: het vlak van de geo-statistiek en bepaling van karakteristieke waarden.

In deze rapportage wordt geïllustreerd hoe uit HPT sonderingen op verschillende manieren tot een schematisatie van het vraagstuk en daarmee tot de bepaling van de karakteristieke doorlatendheid kan worden gekomen. Het effect wordt geïllustreerd met een pipinganalyse voor een kort dijkvak bij de Bijland meander nabij Lobith.

### 1.1. Voorgaande onderzoeken

In eerdere rapportages is ingaan op de uitwerking van HPT sonderingen naar doorlatendheidsprofielen, en de relatie van deze HPT doorlatendheidsprofielen met andere testen (slugtesten, dissipatietesten, laboratoriumtesten en korrelverdelingen) [4; *Vergelijking doorlatendheidsmetingen en HPT sonderingen*]. Tevens is geïllustreerd hoe de variatie in doorlatendheid via ondergrondmodellering en numerieke grondwaterstromingsberekeningen (ISAC|Piping methode) kan worden meegenomen in een pipinganalyse volgens de methode Sellmeijer [6; *Van complexe ondergrond naar pipinganalyse*].

Voor deze rapportage is onder andere gebruik gemaakt van grondonderzoeksgegevens die door de POV Piping verkenning Intreeweerstand beschikbaar zijn gesteld [9; *Doorlatendheidsonderzoek Westervoort, Pannerden en Lobith*].

### 1.2. Leeswijzer

Aangevangen wordt met een beschrijving van de huidige benaderingen van karakteristieke waarde bepaling in het werkveld waterkeringen, waarbij specifiek wordt ingegaan op de bepaling van de karakteristieke waarde van de doorlatendheid bij pipingvraagstukken. In de hoofdstukken daarop wordt ingegaan op 3 verschillende benaderingen van schematisatie van het pipingvraagstuk, en de bijbehorende keuze van een karakteristieke waarde op basis van HPT sonderingen en MPT mini-pompproeven. Afgesloten wordt met een overzicht van de bevindingen en een discussie over de effecten van lagen met verschillende doorlatendheden op de resultaten van pipinganalyses.

## 2. KARAKTERISTIEKE WAARDE BEPALING

### 2.1. Te hanteren formules

In deterministische pipinganalyses wordt voor de doorlatendheid aanbevolen te rekenen met een hoge representatieve waarde. Gebruikelijk is om deze waarde te berekenen in plaats van te schatten. Hiervoor kunnen de formules gebruikt worden zoals beschreven [1; *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen, bijlage B*]. De hieronder weergegeven formules zijn afkomstig uit dat onderzoeksrapport.

Voor een schatting van de karakteristieke waarden van een 'puntwaarde' dient te worden gehanteerd:

$$p_{kar} = p_{gem} \pm t_{N-1}^{0,95} s_p \quad (2.1)$$

De formule voor de karakteristieke schatting van de laaggemiddelde waarde van 'p' (lokaal waarnemingsbestand) luidt:

$$p_{gem, kar} = p_{gem} \pm t_{N-1}^{0,95} \frac{s_p}{\sqrt{N}} \quad (2.2)$$

Waarin  $P_{gem}$  het steekproefgemiddelde vormt,  $s_p$  de standaarddeviatie en N het aantal waarnemingen.

In geval van grote spreiding in de data, en de situatie dat een parameter fysisch gezien niet negatief kan worden, wordt aanbevolen bovenstaande formules toe te passen op de log-getransformeerde data, zodat geen negatieve waarden worden berekend. Een toelichting op de keuze tussen karakteristieke schatting van een puntwaarde of een karakteristieke waarde van het gemiddelde is opgenomen in [1; *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen*], [2; TR] en [7].

### 2.2. Aanpak bij HPT sonderingen

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 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 tot gunstiger uitgangspunten leidt.

#### 2.2.1. Variant 1: Eénlaags methode

Het meest gebruikte rekenmodel voor piping (Sellmeijer) is gebaseerd op één homogeen watervoerend pakket oftewel een éénlaagsmodel. De informatie uit de HPT(s) wordt in deze variant 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 beschouwd als enkele honderden separate doorlatendheidsmetingen (iedere 2 cm sondeerdiepte is er in principe een waarde beschikbaar) in het bewuste watervoerend pakket, en wordt formulering 2.2 toegepast. Hieruit volgt een karakteristieke waarde van de gemiddelde doorlatendheid die in het éénlaagsmodel van Sellmeijer kan worden toegepast.

Indien meerdere HPT sonderingen beschikbaar zijn voor een gebied neemt het aantal datapunten voor de bepaling van de karakteristieke waarde van het gemiddelde over het watervoerend pakket verder toe.

Aanbevolen wordt altijd te zorgen voor meerdere sonderingen om voldoende grip te krijgen op ruimtelijke variatie.

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 niet mogelijk is als gevolg van het logischerwijs beperkte aantal proeven.

Voordeel:

- eenvoudig, spreadsheet-toepasbaar;
- direct toepasbaar in toetsregel voor piping op basis van Sellmeijer.

Nadeel:

- informatie over gelaagdheid en doorlatendheidsverschillen gaat verloren;
- daarmee mogelijk conservatisme of onterecht optimisme in beoordeling en/of ontwerp.

### **2.2.2. Variant 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...). Deze lithostratigrafische eenheden volgen uit archief- en grondonderzoek. Daarnaast kan worden aangesloten bij de bodemeenheden zoals gedefinieerd in het Stochastisch Ondergrondschematisatie (SOS) dat als onderdeel van het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI) is opgesteld. In dit SOS zijn mogelijke bodemopbouwen voor dijktrajecten opgenomen.

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, en wordt formulering 2.2 toegepast. De hieruit volgende karakteristieke waarden kunnen vervolgens worden toegepast in een numeriek grondwaterstromingsberekening zoals bedoeld in paragraaf 5.3.5.1 uit het [1; *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen*] en in [2; *TR Controle mechanisme piping*], waarbij voor de dikte van diverse lithostratigrafische eenheden een maatgevende schematisering aangehouden dient te worden.

Indien meerdere HPT sonderingen beschikbaar zijn neemt het aantal datapunten voor de bepaling van de karakteristieke waarde van het gemiddelde over de diverse lithostratigrafische eenheden verder toe. Aanbevolen wordt altijd te zorgen voor meerdere sonderingen om voldoende grip te krijgen op ruimtelijke variatie in dikte van de diverse lagen.

Voordeel:

- eenvoudig, spreadsheet-toepasbaar;
- gelaagdheid op lithostratigrafisch niveau wordt meegenomen, wattof een realistischer pipinganalyse leidt.

Nadeel:

- informatie over detailgelaagdheid en natuurlijke doorlatendheidsverschillen binnen eenheden gaat verloren;
- vereist numerieke grondwaterstromingsanalyses in bv. Plaxis, FeFlow, DGFlow etc.

### 2.2.3. Variant 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 [1; *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen*] en beschreven in [2; *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 effectieve gemiddelde doorlatendheden is het effect van gelaagdheid dus meegenomen, maar is (nog) geen karakteristieke waarde bepaald.

De aldus verkregen doorlatendheden worden representatief geacht voor de 'laaggemiddelde'-waarde op de betreffende locatie waardoor formulering 2.2 is toegepast voor het bepalen van de karakteristieke waarde. Hieruit volgt een karakteristieke waarde van de gemiddelde doorlatendheid die in het éénlaagsmodel van Sellmeijer kan worden toegepast.

Voordeel:

- Gelaagdheid op alle niveaus wordt meegenomen, wat tot een realistischer pipinganalyse leidt.

Nadeel:

- vereist numerieke grondwaterstromingsanalyses in bv. Plaxis, FeFlow, DGFlow etc.
- Relatief bewerkelijke variant.

### 2.2.4. Variant 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 [1; *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen*] en in [2; *TR Controle mechanisme piping*] wordt uitgevoerd. Hieruit volgt een effectieve gemiddelde waarde van de doorlatendheid voor piping per profiel, waarin het werkelijke laagverloop (inclusief het uitwigen van lagen) is meegenomen. In de resulterende effectieve gemiddelde doorlatendheden is het effect van de

werkelijke gelaagdheid dus meegenomen, maar is (nog) geen karakteristieke waarde bepaald.

De aldus verkregen doorlatendheden worden representatief geacht voor de 'laaggemiddelde'-waarde op de betreffende locatie waardoor formulering 2.2 is toegepast voor het bepalen van de karakteristieke waarde. Hieruit volgt een karakteristieke waarde van de gemiddelde doorlatendheid die in het éénlaagsmodel van Sellmeijer kan worden toegepast.

Voordeel:

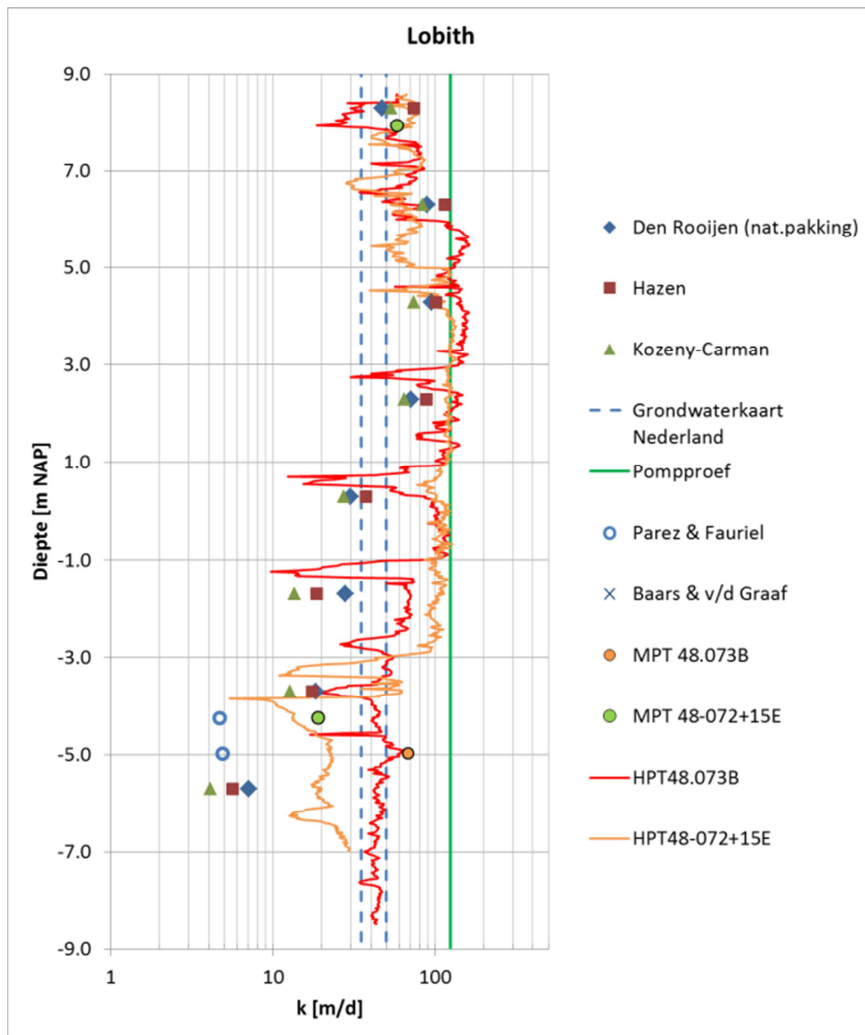
- Gelaagdheid en het doorlopen van lagen op alle niveaus wordt meegenomen, wat tot een realistischer pipinganalyse leidt.

Nadeel:

- vereist numerieke grondwaterstromingsanalyses in bv. Plaxis, FeFlow, DGFlow etc..
- Bewerkelijker dan Variant 2.

In de volgende hoofdstukken wordt een beschrijving gegeven van een bepaling van karakteristieke waarden via de éénlaags, lithostratigrafische en directe HPT methoden. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een tweetal HPT sonderingen die uitgevoerd zijn in het beheergebied van Waterschap Rijn en IJssel. De Werkelijke Lagen methode is separaat beschreven in [6; *Van complexe ondergrond naar pipinganalyse*].





Figuur 2-1: Doorlatendheidsmetingen locatie Lobith. Deze locatie vertoont beduidend minder variatie dan de metingen bij onderzoekslocatie Doeveren.

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	>>	>>	$\bar{K}_{kar} = \bar{K} + t_{0.95} \frac{S_{0.95}}{\sqrt{N}}$	Traditionele piping analyse (één karakteristieke waarde voor doorlatendheid)  (conform 1-laags model [ORZW])  	Toenemende nauwkeurigheid pipinganalyse >>>
	Litho-stratigrafische	>>	1x 			
	Directe HPT	>>	N x 			
	Werkelijke lagen		N x 			
Workflow >>>>>						

Figuur 2-2: Methoden van karakteristieke waarde bepaling vanuit HPT sonderingen.

### 3. VARIANT 1: EÉNLAAGS METHODE

De karakteristieke waarde van de gemiddelde doorlatendheid is bepaald zoals beschreven in paragraaf 2.2.1, Variant 1, de éénlaags methode. Merk op dat als gevolg van het hoge aantal metingen (iedere 2 cm in de verticaal) de karakteristieke schatting van het gemiddelde dicht bij de gemiddelde waarde van de metingen gelegen is.

*Tabel 3-1: Karakteristieke waarde doorlatendheid Variant 1*

<b>Parameter</b>	<b>Waarde</b>
Aantal meetwaarden	1634
Gemiddelde [m/d]	76,5
95%+ value [md/]	78,1

## 4. VARIANT 2: LITHOSTRATIGRAFISCHE METHODE

De karakteristieke waarde van de gemiddelde doorlatendheid is bepaald zoals beschreven in paragraaf 2.2.2, Variant 2, de lithostratigrafische methode. Achtereenvolgens wordt beschreven welke formatie indeling gehanteerd is en welke karakteristieke doorlatendheden hierbij horen. Daarna wordt toegelicht hoe tot één effectieve karakteristieke doorlatendheid voor gebruik in een Sellmeijer piping analyse wordt gekomen, waarbij gebruik wordt gemaakt van de methode ISAC|Piping. De aanpak hiervan is beschreven in [6; *Van complexe ondergrond naar pipinganalyse*].

### 4.1. Formatie indeling en karakteristieke doorlatendheid per formatie

Op basis van archiefonderzoek en de sondeerprofielen is een globale formatie-indeling bepaald voor de diverse locaties, waarbij is aangesloten bij [9; *Doorlatendheidsonderzoek Westervoort, Pannerden en Lobith*]. De formatie-indeling is niet middels een sedimentanalyse geverifieerd.

De aangehouden indeling is in onderstaande tabel weergegeven. De volgende afkortingen zijn hierbij gehanteerd:

HLC = Holocene zand (Formatie van Echteld)  
 KRE = Formatie van Kreftenheije – goed doorlatende laag  
 KT1 = Overgangszone naar Formatie van Kreftenheije – laag van Twello  
 KT2 = Laag van Twello (kleinige Deltaïsche afzettingen)  
 OK = Onderkant  
 BK = Bovenkant

Tabel 4-1: Lithostratigrafische eenheden in HPT sonderingen [m NAP]

		GWS [m NAP]	OK_HLC	OK_KRE	OK_KT1	BK_KT2
Lobith	48-073B	8,6	6	-1	-9	-9
Lobith	48-072+15E	8,6	5	-3	-7	-7

De volgende karakteristieke schattingen van de laaggemiddelde waarden zijn hierbij gehanteerd op basis van 2 HPT sonderingen:

Tabel 4-2: Karakteristieke waarden doorlatendheid lithostratigrafische eenheden

Echteld		Kreftenheije		Overgangszone naar Twello	
Parameter	Waarde	Parameter	Waarde	Parameter	Waarde
Aantal waarden	310	Aantal waarden	750	Aantal waarden	574
Gemiddelde k [m/d]	60,1	Gemiddelde	112,5	Gemiddelde	38,3
95%+ value k [m/d]	61,6	95%+ value	114,0	95%+ value	39,4

### 4.2. ISAC|Piping analyse: grondwaterstromingsmodel

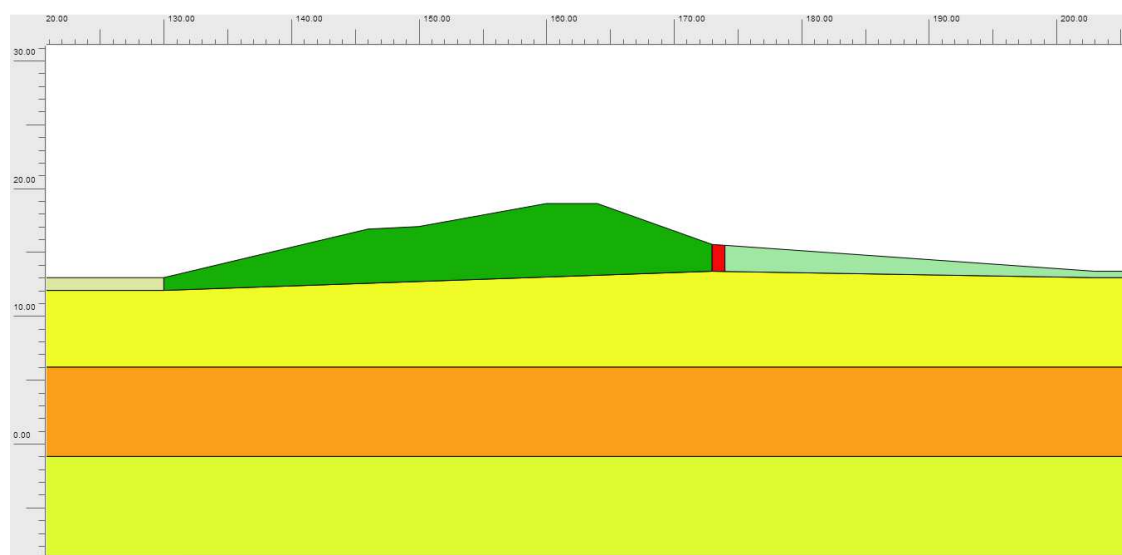
De effectieve karakteristieke waarde kan worden bepaald via een numerieke grondwaterstromingsmodellering waarin opbouw van de bodem met verschillende lithostratigrafische lagen wordt opgenomen. Hiertoe is gebruik gemaakt van een grondwatermodellering in Plaxflow, op basis van de aanpak zoals beschreven in het onderzoek ISAC|Piping voor de projectlocatie Doeveren [6; *Van complexe ondergrond naar*

*pipinganalyse*]. Daarbij wordt de effectieve doorlatendheid bepaald op basis van de potentiaalgradiënten in de watervoerende zandlaag.

Met behulp van het model wordt de geïdealiseerde situatie met een homogeen watervoerend pakket gemodelleerd. De doorlatendheid die aan dit geïdealiseerde pakket is toegekend wordt in de maatwerkanalyse echter gekalibreerd op basis van grondwaterstromingsberekeningen voor de situatie waarin de zandlaagopbouw en bijbehorende doorlatendheidscontrasten zijn gemodelleerd.

De filosofie achter deze aanpak is ontleend aan paragraaf 5.3.5.1 uit [1; *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen*] en in [2; *TR Controle mechanisme piping*]. Hierin is gesteld dat de potentiaalgradiënten in de watervoerende zandlaag ter plaatse van het uittreepunt dominant belang zijn voor het erosiemechanisme. Deze gradiënten zijn evenredig met het uittreedebiet.

In figuur 4-1 is een uitsnede van het hydrologische model weergegeven zoals geschematiseerd in Plaxflow. De verschillende kleuren van de grondlagen geven de mate van doorlatendheid aan: des te roder de kleur des te hoger de doorlatendheid.



Figuur 4-1: Plaxismodel met lithostratigrafische indeling en wel

Aan de buitendijkse zijde is het model doorgezet tot ca. 500 m vanaf de dijk. Aan de binnendijkse zijde is het model tot ca. 1500 m vanaf de dijk doorgezet. Beide zijn bepaald aan de hand van een geohydrologische analyse van het invloedsgebied van het stromingsproces.

Voor de diepteligging en dikte van de lagen is uitgegaan van de opbouw bij sondering 48-073B, waar de goed doorlatende Kreftenheije laag relatief dicht onder maaiveld gelegen is (conservatieve keuze). De grondlagen zijn, buiten het gebied waar veldonderzoek heeft plaatsgevonden, recht doorgezet tot aan de modelranden.

### 4.3. Welbreedte

In het model is een wel geschematiseerd met een breedte van 1,0 m. De keuze voor de welbreedte is van invloed op het stromingspatroon onder de dijk. Onder welbreedte wordt in

dit geval de breedte van het voedingskanaal verstaan, niet de breedte van het zandlichaam of de kraterdiameter bij droogvallen.

Op basis van een gevoeligheidsanalyse waarbij de welbreedte is gevarieerd volgt dat de gecorrigeerde doorlatendheid voor de geïdealiseerde situatie (één homogeen WVP) lager wordt wanneer een relatief smalle welbreedte wordt aangehouden. Het is dan ook zaak een conservatieve bovengrens voor de welbreedte (kanaal) aan te houden. Een welbreedte van 1,0 m wordt geacht een conservatieve keus te zijn op basis van het shadebeeld bij welvorming. In figuur 4-2 zijn een aantal foto's van wellen opgenomen uit het ORZW [1]. Uit internationale literatuur lijkt de breedte beperkt tot ca. 0,5 m [e.g. 11]. . Aanbevolen wordt dit in de toekomst eventueel nader te onderzoeken.



Figuur 4-2: Zandmeevoerende wellen, overgenomen uit het ORZW [1]

#### 4.4. Effectieve karakteristieke doorlatendheid Lithostratigrafische methode

De volgende karakteristieke waarde van de doorlatendheid is gevonden voor de geïdealiseerde situatie met één homogeen watervoerend pakket op basis van Lithostratigrafische methode: 72,0 m/d.

Tabel 4-3: Karakteristieke waarde doorlatendheid Lithostratigrafische methode

Parameter	Waarde
K - lithostratigrafisch	72,0 m/d

## 5. VARIANT 3: DIRECTE HPT METHODE

De karakteristieke waarde van de gemiddelde doorlatendheid is bepaald zoals beschreven in paragraaf 2.2.3, Variant 3, de Directe HPT methode. De werkmethode kent overeenkomsten met de lithostratigrafische methode, met de afwijking dat de bepaling van de karakteristieke waarde plaats vindt nádat een numerieke grondwaterstromingsberekening heeft plaatsgevonden. Voor de modellering wordt wederom gebruik gemaakt van de ISAC|Piping modelleertechniek in PlaxFlow. De aanpak hiervan is beschreven in [6; *Van complexe ondergrond naar pipinganalyse*].

### 5.1. ISAC|Piping analyse: grondwaterstromingsmodel

Voor de modellering zijn dezelfde randvoorwaarden gehanteerd als voor het model uit Variant 2. Voor de schematisatie van de doorlatendheidscontrasten die volgen uit de HPT sonderingen in het model, is per sondering de gemiddelde doorlatendheid bepaald over lagen van 0,5 m. Deze lagen zijn geschematiseerd in het geohydrologisch model, waarbij de doorlatendheid naar boven is afgerond op 10 m/d.

Aangezien de HPT sonderingen geen data bevatten voor de onverzadigde zone, in dit specifieke geval de eerste meters onder de deklaag, is voor deze lagen een doorlatendheid aangehouden van 60 m/d, overeenkomstig met de gemiddelde doorlatendheid over de diepten die wél in het Holoceen pakket gemeten zijn.

In figuur 5-1 is een uitsnede van het hydrologische model weergegeven voor HPT072. De verschillende kleuren van de grondlagen geven de mate van doorlatendheid aan: des te roder de kleur des te hoger de doorlatendheid.



Figuur 5-1: Plaxismodel met gelaagdheid uit HPT 072.

Met behulp van het model is de geïdealiseerde situatie met een homogeen watervoerend pakket gemodelleerd. De doorlatendheid die aan dit geïdealiseerde pakket is toegekend is in de maatwerkanalyse echter gekalibreerd op basis van grondwaterstromingsberekeningen voor de werkelijke situatie met doorlatendheidscontrasten in de ondergrond.

## 5.2. Effectieve karakteristieke doorlatendheid Directe HPT methode

De karakteristieke waarde van de gemiddelde doorlatendheid die hieruit bepaald wordt, is 74,3 m/d. Deze waarde is bepaald op basis van de doorlatendheden zoals de volgen uit de analyses van de 2 uitgevoerde HPT sonderingen. In projecten zal men meestal meer HPT sonderingen uitvoeren waardoor de onzekerheid in de resultaten zal afnemen (komt mede tot uitdrukking in een lagere Student-t factor).

Tabel 5-1: Berekende gekalibreerde doorlatendheden en karakteristieke waarde Directe HPT methode

Parameter	Waarde
Directe HPT-072	72.6
Directe HPT-073	73.9
K – Directe HPT	74.3



## 6. DISCUSSIE MOGELIJKE METHODEN PIPINGBEOORDELING

### 6.1. Afweging methoden

In deze rapportage zijn de volgende methoden aangedragen om op basis van HPT sonderingen tot een karakteristieke schatting van de gemiddelde doorlatendheid voor piping analyses te komen, volgens de vigerende deterministische aanpak conform OI2014. Dit betreft de methoden:

- Variant 1: Eénlaags methode
- Variant 2: Lithostratigrafische methode
- Variant 3: Directe 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 tot gunstiger uitgangspunten leidt.

Per methode verschilt de informatie die in de schatting van de karakteristieke waarde wordt meegenomen, en dus de mate van realisme van de bepaalde waarde. Daarnaast verschilt echter per methode ook de benodigde inspanning om tot een inschatting te komen. Per projectfase zal dus een keuze moeten worden gemaakt welk schematiseringsniveau gewenst is op basis van onder meer budget en doelstelling. Voor een gedetailleerde toetsing kan wellicht volstaan worden met de Eénlaags methode, terwijl voor een verkenning van een versterking de Werkelijke lagen methode de voorkeur kan hebben. In onderstaande tabel is dit per methode inzichtelijk gemaakt.

Tabel 6-1: Karakteristieke waarde doorlatendheid Lithostratigrafische methode

Nr.	Methode	Voordeel	Nadeel
1	Eénlaags	Volledig spreadsheet	Alle informatie over gelaagdheid weggegooid
2	Lithostratigrafische	Gelaagdheid beperkt mee te nemen	Eén eenvoudige numerieke grondwaterstromingsberekening
3	Directe HPT	Gelaagdheid volledig mee te nemen	Meerdere eenvoudige numerieke grondwaterstromingsanalyses
4	Werkelijke lagen	Gelaagdheid én ruimtelijk laagverloop mee te nemen	Ondergrondmodellering en meerdere gedetailleerde numerieke grondwaterstromingsanalyses

Tijdens het onderzoek kwam als variant op methode 1 naar voren dat er bij meerdere HPT sonderingen voor gekozen kan worden om per HPT het steekproefgemiddelde te bepalen, en vervolgens op basis van het steekproefgemiddelde van meerdere HPTs een karakteristieke doorlatendheid te bepalen. Op deze wijze wordt het effect van eventuele ruimtelijke variatie mogelijk beter in beeld gebracht. Deze aanpak is in het kader van dit onderzoek niet verder uitgewerkt, maar wordt bij toekomstig gebruik als aanbeveling meegegeven.

Aanbevolen wordt om altijd te zorgen voor meerdere HPT sonderingen over het dijktraject, om te zorgen dat de ruimtelijke variatie goed in beeld wordt gebracht. Deze werkmethode is vergelijkbaar aan de methode voor grondmechanische sterkte onderzoek.

### 6.2. Resulterende doorlatendheden

In deze rapportage zijn diverse methoden toegepast. Hieruit komt naar voren dat tussen de Eénlaags methode en bijvoorbeeld de Lithostratigrafische methode een verschil wordt

gevonden van 10% in doorlatendheid. Het effect hiervan verschilt per methode. Zo blijkt de Directe HPT methode juist te leiden tot een iets hogere doorlatendheid dan de Lithostratigrafische methode, mogelijk doordat binnen de schematisatie met afrondingen is gewerkt.

Bedacht moet worden dat de gelaagdheid per project kan verschillen. Voor de onderzoekslocatie Doeveren bleek bijvoorbeeld wel een groot verschil aanwezig te zijn tussen de werkelijke lagen methode en de éénlaags methode [6].

Voor het ene project kan het gedetailleerd meenemen van gelaagdheid de inzichten niet wezenlijk veranderen, terwijl het voor een ander project juist tot een fors kleinere versterkingsopgave kan leiden.

In alle gevallen ontstaat echter een realistischer beeld dan wanneer gewerkt wordt met een pompproef en/of REGIS/Grondwaterkaart. Daarbij ontstaat geen inzicht in gelaagdheid én is vaak ook onvoldoende informatie voor statistische bewerking voorhanden.

Tabel 6-2: Karakteristieke waarde doorlatendheid Lithostratigrafische methode

Nr.	Methode	Berekende kar. waarde K [m/d]
1	Eénlaags	78,1
2	Lithostratigrafische	72,0
3	Directe HPT	74,3
4	Werkelijke lagen	Niet uitgevoerd voor deze locatie

## REFERENTIES

- [1] Rijkswaterstaat. (2012). Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen. Versie maart 2012.
- [2] Calle en Weijers (1994) Technisch Rapport voor controle op het mechanisme piping bij rivierdijken. Januari 1994.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Fugro GeoServices B.V. (2015). POV Piping - Continue doorlatendheidsprofielen: verdiepend inzicht in de bodem. Invloed bepaling k-waarde op piping-toets. 5 juni 2015. Kenmerk: 1213-0101-000.R02.
- [6] Fugro GeoServices B.V. (2016). POV Piping – ISAC|Piping Van complexe ondergrond naar pipinganalyse. 22 april 2016. Kenmerk: 1213-0101-000.R05.
- [7] Calle E., Vrouwenvelder T., Lindenberg J., Hannink G. en Bruijn E., Statistiek bij regionale proevenverzamelingen Geotechniek nr. 2, april 2008
- [8] Rijkswaterstaat (2014) Werkwijzer Piping
- [9] Fugro GeoServices B.V. (2015) Rapportage geotechnisch Veldwerk-Doorlatendheidsonderzoek Westervoort, Pannerden & Lobith. 125-0052-000.R01v1
- [10] Deltares (2015) Analysis of permeability heterogeneity and its implications in piping assessment, 1209637-000
- [11] Glyn, M., Kuzmaul, J. (2004) Prediction of Piping Erosion Along Middle Mississippi River Levees-An Empirical Model. USAC