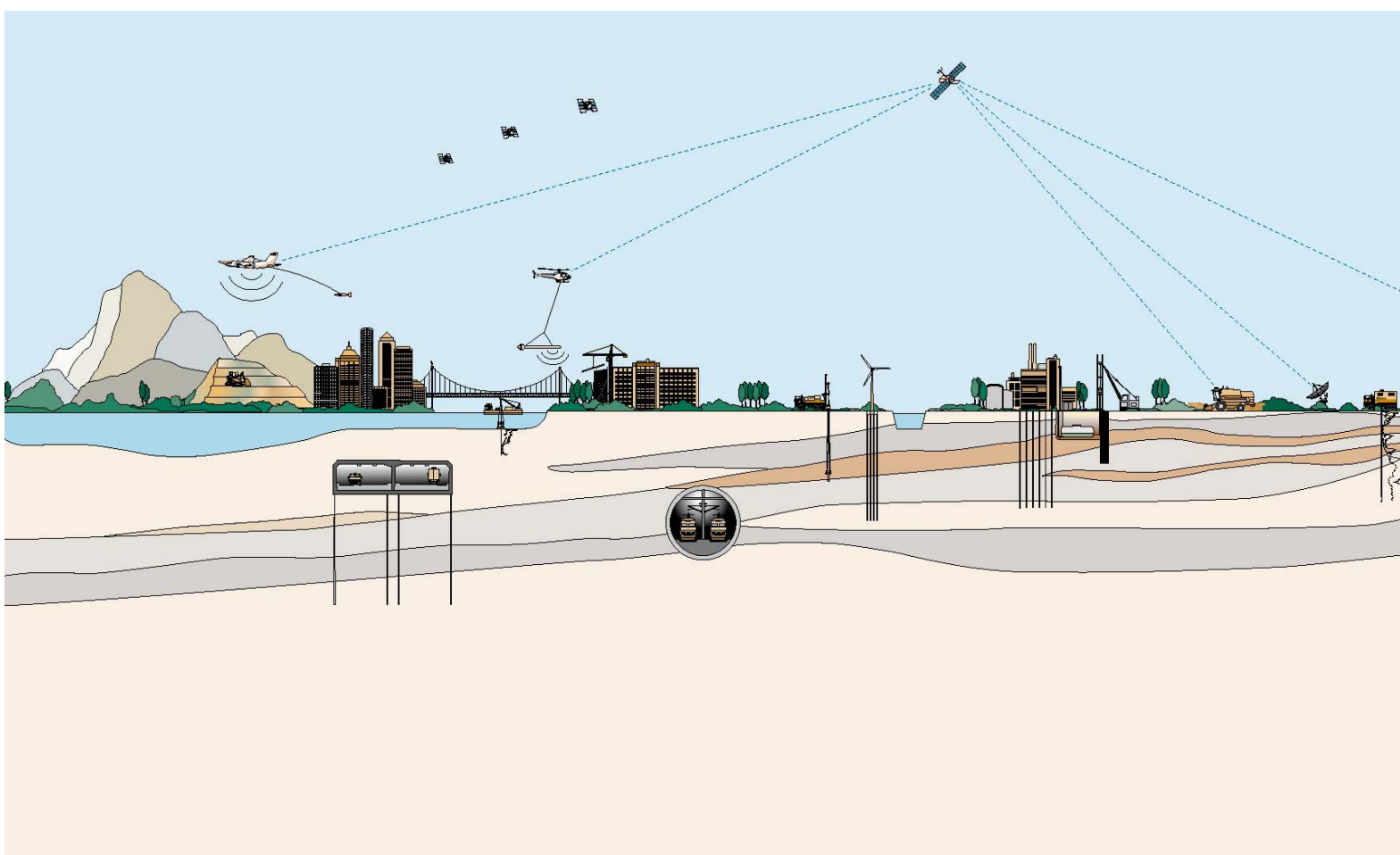


RAPPORT  
betreffende

**POV PIPING:  
CONTINUE  
DOORLATENDHEIDSPROFIELEN:  
VERDIEPEND INZICHT IN DE BODEM**

**ANALYSE VERGELIJKING  
DOORLATENDHEIDSMETINGEN EN HPT  
SONDERINGEN**

Oprachtnummer: 1213-0101-000



RAPPORT  
betreffende

**POV PIPING:  
CONTINUE  
DOORLATENDHEIDSPROFIELEN:  
VERDIEPEND INZICHT IN DE BODEM**

**ANALYSE VERGELIJKING  
DOORLATENDHEIDSMETINGEN EN HPT  
SONDERINGEN**

Oprichtnummer: 1213-0101-000

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

Projectleider : drs. B.M. Berbee  
Senior Projectleider

Opgesteld door : drs. B.M. Berbee  
Senior Projectleider

Gecontroleerd door : ir. G.R.P. van Goor  
Projectleider Waterbouw

VERSIE	DATUM	OMSCHRIJVING WIJZIGING	PARAAF PROJECTLEIDER
1	5 juni 2015	Versie 1.0	BMB

FILE: 1213-0101-000.R04 Analyse vergelijking doorlatendheidsmetingen en HPT sonderingen

<u>INHOUDSOPGAVE</u>	<u>Blz.</u>
1. INLEIDING	2
1.1. Projectopzet	2
1.2. Leeswijzer	2
2. PROJECTLOCATIE EN GEO(HYDRO)LOGISCHE GESTELDHEID	3
2.1. Projectlocatie	3
2.2. Geo(hydro)logische gesteldheid	3
3. METHODEN DOORLATENDHEIDSBEPALING: ARCHIEFGEGEVENS	5
3.1. REGIS en DGM	5
3.2. Grondwaterkaart	6
3.3. Pompproeven	6
3.4. Doorlatendheden gehanteerd bij toetsronden	6
4. DOORLATENDHEDEN UIT VELD- EN LABORATORIUMMETINGEN	7
4.1. Overzicht gehanteerde methoden	7
4.1.1. <i>Slugtest (directe methode)</i>	8
4.1.2. <i>Falling head test op ongeroerde monsters (directe methode)</i>	9
4.1.3. <i>Mini-pompproef MPT test (directe methode)</i>	9
4.1.4. <i>Dissipatietest uitwerking methode Van Baars en van de Graaf (directe methode)</i>	10
4.1.5. <i>Dissipatietest uitwerking methode Parez en Fauriel (indirecte methode)</i>	10
4.1.6. <i>Korrelverdelingsmethoden (indirecte methoden)</i>	11
5. VERGELIJKING DOORLATENDHEIDSMETINGEN	13
5.1. Het probleem van de 'werkelijke' doorlatendheid: schaalafhankelijkheid	13
5.2. Vergelijking doorlatendheden korrelverdelingsmethoden	13
5.2.1. <i>Vergelijking</i>	13
5.2.2. <i>Conclusies korrelverdelingen</i>	16
5.3. Vergelijking doorlatendheden directe methoden	17
5.3.1. <i>Vergelijking</i>	17
5.3.2. <i>Analyse doorlatendheden directe testen</i>	20
5.3.3. <i>Conclusies doorlatendheden overige methoden</i>	23
5.4. Algemene conclusies ten aanzien van doorlatendheidsmetingen	23
6. HPT SONDEERTECHNIEK: RELATIE MET DOORLATENDHEID	25
6.1. HPT sondering	25
6.2. Uitgevoerde metingen	25
6.3. Correctie hydrostatische druk	26
6.3.1. <i>Resultaten HPT sonderingen</i>	27
6.4. Relatie relatieve doorlatendheid Q/P met absolute doorlatendheid K	28
6.4.1. <i>Internationaal gehanteerde methode</i>	28
6.4.2. <i>Theoretische afleiding alternatieve methode</i>	29
6.4.3. <i>Praktisch uitwerking: bepaling factor 1/C</i>	30
7. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	38
7.1. Bevindingen directe en indirecte doorlatendheidsmetingen	38
7.2. Bevindingen HPT sondeertechniek	38
LITERATUUR	40

## 1. INLEIDING

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 in de bovenste laag van het zandpakket of op basis van archiefgegevens (REGIS/ Grondwaterkaart). De resultaten van deze bepalingen variëren sterk.

Binnen de Projectoverstijgende Verkenning Piping (POV-Piping) hebben Waterschap Aa en Maas, Fugro en Deltares onderzoek gedaan naar verschillende doorlatendheidsmetingen, inclusief de innovatieve HPT sondeertechniek, en de variatie (in diepte en ruimtelijke zin) van de doorlatendheid.

Doel van de pilot is om te komen tot een nauwkeurige bepaling van het pipingrisico door een betere en scherpere schematisatie van de ondergrond. Om dit doel te bereiken is de toepasbaarheid van de innovatieve HPT sondeertechniek onderzocht en is een vergelijking gemaakt met de meer gevestigde methode om de doorlatendheid te bepalen.

Voor een dijkvak langs de Maas zijn verschillende methoden om de doorlatendheid van de ondergrond te bepalen toegepast. In dit rapport zijn deze methode nader beschreven en zijn de resultaten met elkaar vergeleken.

### 1.1. Projectopzet

Het pilotproject heeft bestaan uit een voorbereidingsfase, een dataverzamelingsfase en een analysefase. In de voorbereidingsfase is in gezamenlijk overleg een projectlocatie gekozen en een grondonderzoeksplan opgesteld. In de dataverzamelingsfase is grond- en laboratoriumonderzoek uitgevoerd. In de analysefase zijn deze gegevens geanalyseerd. Het pilotproject voorziet nog in een mogelijke validatiefase op een andere projectlocatie. Het nut en noodzaak van de validatiefase wordt in de loop van het project bepaald.

In deze rapportage worden de resultaten van de analyse van de doorlatendheidsmetingen gepresenteerd.

### 1.2. Leeswijzer

In deze rapportage is in hoofdstuk 2 een beschrijving gegeven van de projectlocatie en bodemopbouw. Vervolgens worden in hoofdstuk 3 de reeds bekende gegevens ten aanzien van de doorlatendheid beschreven. In hoofdstuk 4 worden de verzamelde data en hiervoor gebruikte methoden toegelicht. De resultaten van de directe en indirecte methoden van doorlatendheidsbepaling zijn vervolgens in hoofdstuk 5 met elkaar vergeleken. De innovatie HPT-sondeertechniek wordt in hoofdstuk 6 beschreven, waarbij onder meer wordt ingegaan op de relatie tussen de meetwaarde uit deze techniek (Q/P waarde) en de doorlatendheid K. In het laatste hoofdstuk zijn de belangrijkste conclusies en aanbevelingen opgenomen naar aanleiding van de uitgevoerde analyses.

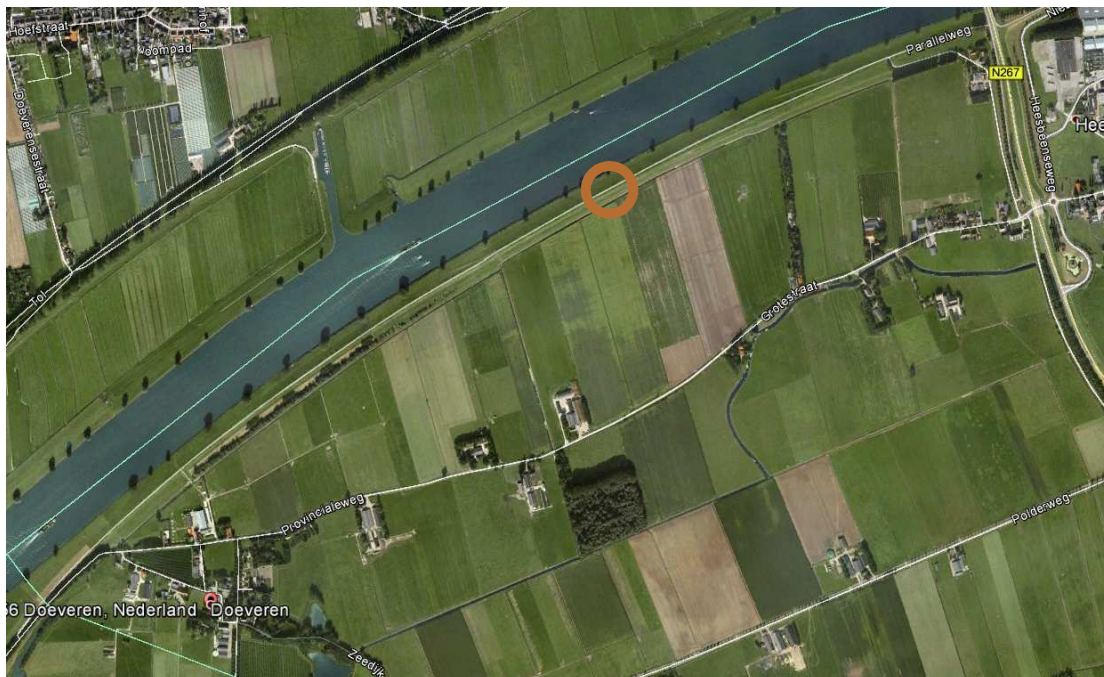


## 2. PROJECTLOCATIE EN GEO(HYDRO)LOGISCHE GESTELDHEID

### 2.1. Projectlocatie

De projectlocatie is gelegen bij Doeveren. Het betreft het traject bij dijkpaal 973 (+/- 100 m) tussen Heusden/Heesbeen) en Doeveren. De Maas is hier omstreeks 1904 gegraven en de kering aangelegd als onderdeel van de Maaskanalisisatie.

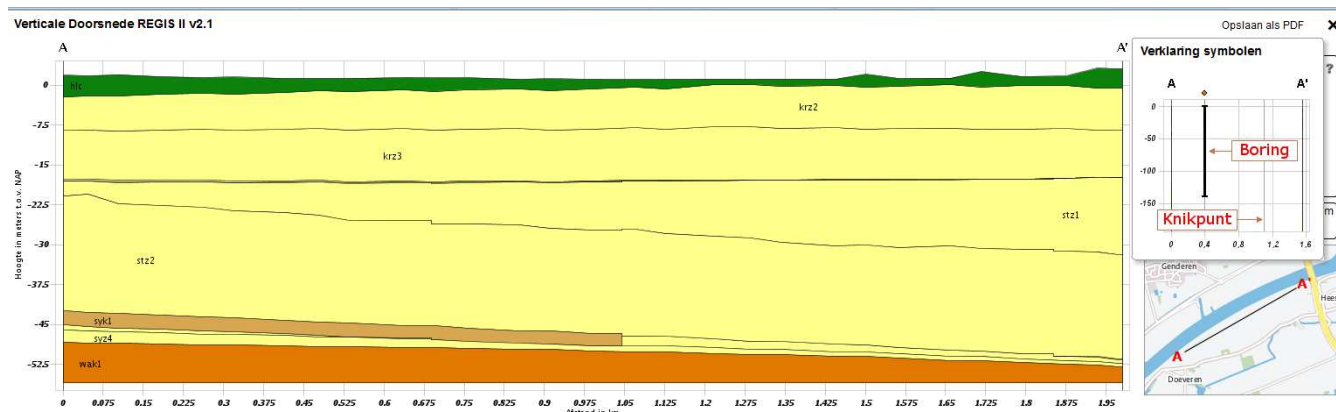
Het is een primaire waterkering langs de Bergsche Maas (in 1904 gegraven), maar deels gelegen in de bedding van een Oude Maasstream. Voor de kering ligt een voorland van ca. 10 m. De kering vormt daarmee min of meer een schaarlijk. Het gebied is overwegend in gebruik als grasland. Binnendijs ligt een teensloot. Langs de oever is een steenbestorting aanwezig met op de oeverlijn om de ca. 100 m solitaire bomen.



Figuur 2-1: Projectlocatie

### 2.2. Geo(hydro)logische gesteldheid

De globale geologische opbouw is hoofdzakelijk bepaald aan de hand van onder meer de ondergrondmodellen REGIS en GeoTop (zie figuur 2-2), aangevuld met informatie uit het uitgevoerde veldonderzoek. In het projectgebied is vanaf NAP +1 a NAP +2 m een deklaag aanwezig van enkele meters dik. Hieronder wordt tot ca. NAP -50 m het 1<sup>e</sup> watervoerend pakket aangetroffen. Deze kan worden onderverdeeld in 4 aparte formaties. Binnen het pakket zijn 2 formatiegrenzen goed te onderscheiden door de aanwezigheid van kleilagen of siltige fijne zandlagen, te weten op NAP -7,5 m en NAP -18 m a -20 m. In tabel 2-1 is de globale opbouw weergegeven.



Figuur 2-2: Ondergrondmodel REGIS-II

Tabel 2-1: Globale beschrijving bodemopbouw projectlocatie

Bovenzijde [NAP, ca.]	Onderzijde [NAP, ca.]	Formatie	Geohydrologische eenheid	Beschrijving
+1 a +2		Maaiveld		grasland
+1 a +2	-1	Echteld	Deklaag	klei
-1	-2	Boxtel	Deklaag	veen
-2	-3	Kreftenheye, REGIS KRZ2	1 <sup>e</sup> Watervoerend pakket REGIS: 10-30 m/d	zand: zeer fijn, sterk siltig
-3	-7	Kreftenheye, REGIS KRZ 2	1 <sup>e</sup> Watervoerend Pakket REGIS: 10-30 m/d	zand: matig fijn tot matig grof, zwak siltig
-7	-7,5	Kreftenheye, REGIS KRZ2	1 <sup>e</sup> Watervoerend Pakket REGIS: 10-30 m/d t	klei
-7,5	-9	Kreftenheye, REGIS KRZ3	1 <sup>e</sup> Watervoerend Pakket REGIS: 10-30 m/d	zand: zeer fijn, uiterst siltig en kleiig
-9	-18	Kreftenheye, REGIS KRZ3	1 <sup>e</sup> Watervoerend Pakket REGIS: 10-30 m/d	zand, matig grof, zwak siltig
-18	-20	Sterksel, REGIS STZ1	1 <sup>e</sup> Watervoerend Pakket REGIS: 40-60 m/d	zand: zeer fijn, matig siltig
-20	-25	Sterksel, REGIS STZ1	1 <sup>e</sup> Watervoerend Pakket REGIS: 40-60 m/d	zand: matig grof, zwak siltig
-25	-50	Sterksel, REGIS STZ2	1 <sup>e</sup> Watervoerend Pakket REGIS: 40-60 m/d	zand: matig tot zeer grof, zwak siltig
v.a. -50		Waalre, REGIS WAK1	1 <sup>e</sup> Scheidende Laag	klei

### 3. METHODEN DOORLATENDHEIDSBEPALING: ARCHIEFGEGEVENS

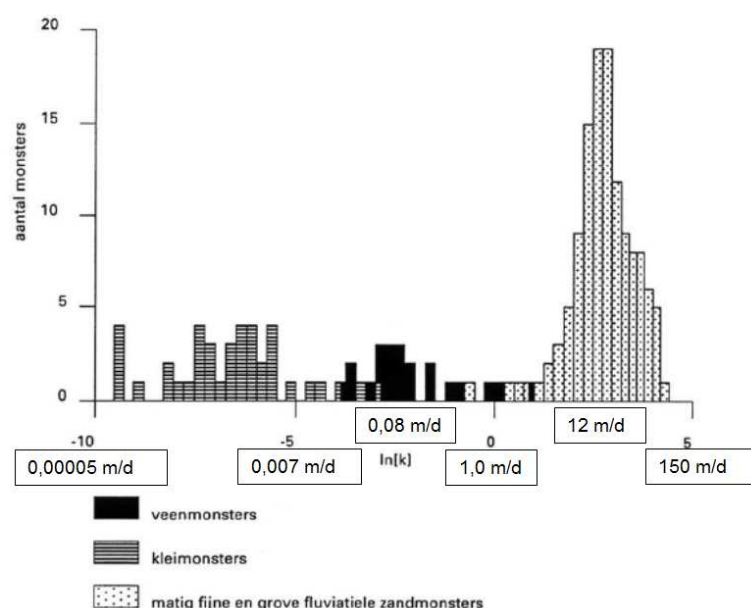
In dit hoofdstuk wordt beschreven welke archiefgegevens beschikbaar zijn ten aanzien van de doorlatendheid op de projectlocatie. In het volgende hoofdstuk wordt ingegaan op de specifiek voor dit project uitgevoerde veldmetingen.

#### 3.1. REGIS en DGM

In REGIS zijn doorlatendheden opgenomen voor de formaties zoals getoond in figuur 2-2. In (Vernes & van Doorn, 2005) zijn de doorlatendheden bepaald op basis van onderstaande database (figuur 3-1) waarin een relatie tussen de lithoklassen (type of combinatie van typen van afzettingen) en de doorlatendheid is gegeven. De doorlatendheden in deze database zijn bepaald op basis van (citaat (Vernes & van Doorn, 2005)):

- Doorlatendheidsmetingen (laboratorium) aan ongestoorde boorkernen (niet aangegeven is of dit de horizontale of verticale doorlatendheid betreft en welke methode gehanteerd is)
- Literatuurgegevens betreffende doorlatendheden (niet aangegeven om welke testen het hier gaat)
- Een beperkt aantal put- en pompproeven, voor eenheden waar geen literatuurgegevens voor bekend waren

Geconcludeerd wordt dat deze gegevens een samenvoeging zijn van data van verschillende bronnen en zowel kleinschalige proefmethoden als grootschalige testen betreft.



Figuur 3-1: Verdelingen van meetschaal-doorlatendheden van de lithoklassen veen, klei, matig fijn en grof fluviaal zand (Vernes & van Doorn, 2005)

REGIS levert een doorlatendheid tussen de 10 en 30 m/d voor de Kreftenheye zandlaag (boven NAP -20 m) en 40 tot 60 m/d voor de Sterksel zandlaag (beneden NAP -20 m).

REGIS biedt geen informatie over de bergingseigenschappen van deze pakketten.

### 3.2. Grondwaterkaart

Voor pomp- en putproeven uit de omgeving (o.a. Waalwijk, Vlijmen, beide 5-10 km afstand) wordt een doorlatendheid bepaald van ca. 50 m/d (Vlijmen) – 70 m/d (Waalwijk). De geïnterpoleerde doorlatendheid op de testlocatie bedraagt hiermee ca. 50 m/d. De Grondwaterkaart maakt geen onderscheid in formaties: deze waarde geldt voor het gehele 1<sup>e</sup> watervoerend pakket.

De Grondwaterkaart biedt geen informatie over de bergingseigenschappen van dit pakket.

### 3.3. Pompproeven

Naast de onder §3.2 beschreven pompproeven is de onttrekking bij Pompstation Genderen (1500 m noordelijk van de testlocatie) interessant. Hier is een globale uitwerking gedaan van tijdreeksen (Boukes, 2007), waarbij door de schrijver is aangegeven dat dit een vingeroefening betrof en er geen gedetailleerde uitwerking van de meetreeksen heeft plaatsgevonden. Aangegeven wordt dat de resulterende waarden ( $K_h = 11,8$  m/d,  $S_s = 6,4 \cdot 10^{-6}$ ,  $c = 65,5$  d) met een behoorlijke onzekerheid genomen moeten worden.

In de toelichtende rapportage op REGIS II.0 (Vernes & van Doorn, 2005) is een overzicht van (deels) gebruikte put- en pompproeven opgenomen. Hier is tevens een pompproef bij Genderen aangegeven. De resultaten van deze proef zijn opgevraagd bij TNO. Hieruit bleek dat deze proef volledig betrekking had op het 2<sup>e</sup> Watervoerend Pakket (beneden ca. NAP -80 m). Deze proef is daarom niet bruikbaar als vergelijkingsmateriaal. Vermoed wordt dat de in de vorige alinea beschreven proef op het zelfde pakket kan zijn gebaseerd.

### 3.4. Doorlatendheden gehanteerd bij toetsronden

In de 1e toetsronde is gerekend met een dikte van het watervoerend pakket van 50 m, bij een doorlatendheid van 21,6 m/d. Deze doorlatendheid is hierbij volgens de rapportage gebaseerd op een combinatie van zowel de grondwaterkaart als op basis van korrelverdelingsmethoden. De vorm van de gehanteerde correlatieformule wijst op de formule Den Rooijen in het TRZW (Calle, 1999). De voor de korrelverdelingen gehanteerde monsters zijn afkomstig uit handboringen die zijn doorgezet tot 0,5 a 1,0 m beneden de onderzijde van de deklaag (Uijtewaal, 1999).

Voor de gehanteerde aanpak wordt in het rapport verwezen naar de Handreiking Constructief Ontwerpen. Indien deze daadwerkelijk is toegepast zou dat betekenen dat de doorlatendheid een karakteristieke waarde betreft, die berekend is op basis van de karakteristieke  $D_{10}$  en een karakteristieke waarde voor het U-cijfer uit een proevenverzameling. Dit zou betekenen dat de berekende waarde van 21,6 m/d een bovengrens van de doorlatendheid aanduidt.

De waarde van 21,6 m/d is qua grootte de helft van de waarde van 50 m/d die uit de Grondwaterkaart naar voren komt. Op basis hiervan wordt verwacht dat deze waarde uitsluitend gebaseerd is op korrelverdelingen en niet zoals aangegeven op een afweging tussen korrelverdelingscorrelaties en de data vanuit de Grondwaterkaart.

## 4. DOORLATENDHEDEN UIT VELD- EN LABORATORIUMMETINGEN

In dit hoofdstuk wordt beschreven welke veldmetingen zijn uitgevoerd ten einde de doorlatendheid op de projectlocatie te bepalen. De bepalingen zijn gericht geweest op de zandige afzettingen die het 1<sup>e</sup> watervoerend pakket uitmaken: Kreftenheye zand 2 en 3, alsmede Sterksel zand 2 en 3. Voor de daadwerkelijke meetgegevens wordt verwezen naar rapportage (van Goor & Vossenaar, 2015). In dit hoofdstuk worden de methoden waarmee de verschillende metingen zijn uitgewerkt beschreven.

### 4.1. Overzicht gehanteerde methoden

Er wordt een onderverdeling gehanteerd in directe methoden in het veld en in het laboratorium, waarbij de uitwerking volgens een fysische model verloopt, en indirecte methoden, waarbij via een proxyparameter een correlatie wordt gelegd met de doorlatendheid. Vergelijk hiervoor de diverse methoden van bodemclassificatie op basis van sondeergrafieken: het wrijvingsgetal geeft een indicatie van de grondsoort, maar is geen directe classificatie. In onderstaande tabel is een overzicht gegeven van de toegepaste proef- en uitwerkingsmethoden als ook een aanduiding of op basis van deze methoden de doorlatendheid direct dan wel indirect wordt bepaald.

Tabel 4-1: Overzicht proef- en uitwerkingsmethoden

Proefmethode	Uitwerking	Type	Proefmethode	Uitwerking	Type
Slugtest	(Hvorslev, 1951)	Direct	Korrelverdeling	Hazen modified (Rosas, et al., 2014)	Indirect
Slugtest	Bouwer & Rice (3e lijn; (Sun & Koch, 2014))	Direct	Korrelverdeling	Kozeny, 1953 (Rosas, et al., 2014)	Indirect
Slugtest	Bouwer & Rice (1e lijn, (Sun & Koch, 2014))	Direct	Korrelverdeling	Kozeny-Carman, 1953 (Rosas, et al., 2014)	Indirect
Labaratoriumtest	Falling head test	Direct	Korrelverdeling	Kozeny-Carman 2.0, (Carrier III, 2003)	Indirect
Minipompproef	(Snacken, 2014)	Direct	Korrelverdeling	Kruger (Rosas, et al., 2014)	Indirect
Dissipatietest	(van Baars & van de Graaf, 2007)	Direct	Korrelverdeling	Krumbein and Monk, 1943 (Rosas, et al., 2014)	Indirect
Dissipatietest	(Parez & Fauriel, 1988)	Indirect	Korrelverdeling	NAVFAC DM7, 1974 (Rosas, et al., 2014)	Indirect
Korrelverdeling	Alyamani & Şen, 1993 (Rosas, et al., 2014)	Indirect	Korrelverdeling	Pavchich (1966) [m/d] (Rosas, et al., 2014)	Indirect
Korrelverdeling	Barr, 2000 (Rosas, et al., 2014)	Indirect	Korrelverdeling	Pavchich (1966) 2.0 (Burger, Duizendstra, & Jolink, 2011)	Indirect
Korrelverdeling	Beyer, 1964 (Rosas, et al., 2014)	Indirect	Korrelverdeling	Sauerbrei (Rosas, et al., 2014)	Indirect
Korrelverdeling	Beyer aangepast (Burger, Duizendstra, & Jolink, 2011)	Indirect	Korrelverdeling	(Seelheim, 1880)	Indirect
Korrelverdeling	Chapuis et al., 2005 (Rosas, et al., 2014)	Indirect	Korrelverdeling	Slichter, 1899 (Rosas, et al., 2014)	Indirect
Korrelverdeling	Den Rooijen, 1992 (Calle, 1999)	Indirect	Korrelverdeling	Terzaghi, 1925 (Rosas, et al., 2014)	Indirect
Korrelverdeling	Fair and Hatch, 1933 (Rosas, et al., 2014)	Indirect	Korrelverdeling	U.S. Bureau of Recl. (Rosas, et al., 2014)	Indirect
Korrelverdeling	Harleman et al., 1963 (Rosas, et al., 2014)	Indirect	Korrelverdeling	Zamarin (Rosas, et al., 2014)	Indirect
Korrelverdeling	Hazen-original, 1892 (Rosas, et al., 2014)	Indirect	Korrelverdeling	Zunker, 1932 (Rosas, et al., 2014)	Indirect



In de volgende paragrafen worden de proefmethoden en bijbehorende uitwerkingen beschreven. Tevens zijn eventuele aandachtspunten genoemd.

Bij feitelijk alle methoden geldt een belangrijk aandachtspunt dat terugkerend is: geen van de methoden houdt (volledig) rekening met anisotropie. Anisotropie is het effect dat zandlagen in horizontale richting veelal meer doorlatend zijn dan in verticale richting. Dit effect is sterk afhankelijk van de genese van het pakket (afzettingsmilieu en/of latere deformatie). Verschillen van een factor 10 (kh/kv) zijn niet onmogelijk. De meeste methoden geven het gecombineerd effect van horizontale en verticale doorlatendheid. Uitzondering is de laboratoriumtest, die uitsluitend de verticale doorlatendheid bepaald.

#### **4.1.1. Slugtest (directe methode)**

Uitgevoerd bij MB1, MB2, MB3 en MB4, ca. iedere 5 m.

Bij een slugtest wordt in een boorgat (optioneel met filter) bij een grondwaterstand in stationaire toestand een instantane verlaging (optioneel verhoging) van de stijghoogte gerealiseerd. Vervolgens wordt de stijging van de grondwaterstand richting het oorspronkelijk niveau over de tijd gemeten. De doorlatendheid wordt berekend uit de stijgsnelheid. Voor dit project zijn slugtesten uitgevoerd in mechanische boorgaten. Hierbij is binnen het grote boorgat een tijdelijk filter met een kleine diameter geplaatst (filterelement 0,4 m lang) die enkele meters onder de bodem van het gat is uitgepulst. In dit filter is de proef uitgevoerd. De daling van de waterstand is gerealiseerd door korte tijd (ca. 10-30 s.) water uit de buis te pompen.

Op basis van de slugtestmetingen zijn de doorlatendheden (k-waarden) van de bodemlagen berekend. Hierbij is gebruik gemaakt van de methode van Hvorslev en de methode Bouwer-Rice.

In een later stadium zijn slugtesten uitgevoerd in peilbuizen in het voor- en achterland, waarvan het filter ca. 1 m onder de deklaag was afgesteld.

##### *Methode Hvorslev*

Met de methode van Hvorslev wordt de doorlatendheid berekend aan de hand van de tijd die nodig is om tot 63% herstel van de waterstand in de peilbuis te komen. Proeven waarbij het herstel onder deze waarde ligt kunnen dus niet worden beschouwd met deze methode.

##### *Methode Bouwer-Rice*

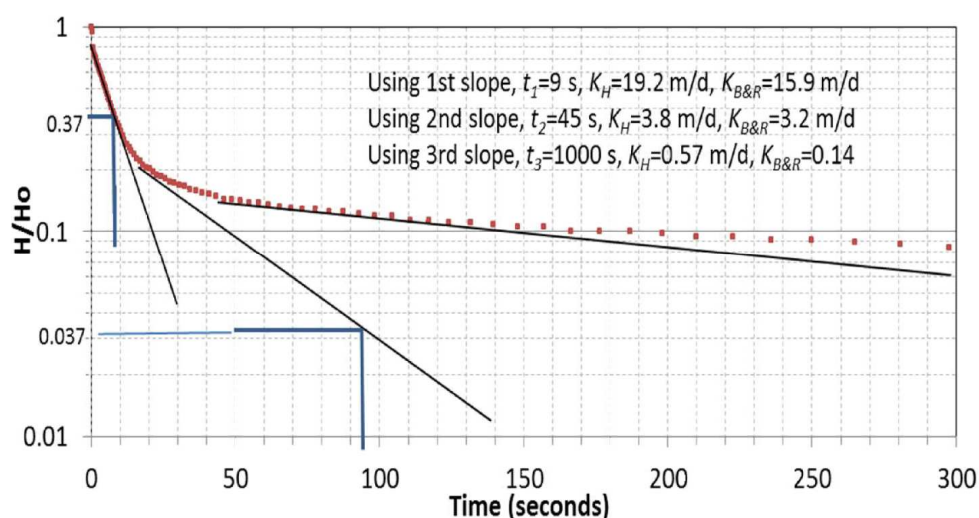
Bij de Bouwer-Rice methode wordt de doorlatendheid bepaald op basis van de hellingshoek van de meetreeks bij logaritmische weergave. Idealiter verloopt de meetcurve logaritmisch (op logaritmische schaal dus lineair). In de praktijk komt het vaak voor dat op logaritmische schaal in eerste instantie steil verloop zichtbaar is, en deze na verloop van tijd in steilheid afneemt. Het gevolg is dat bij een berekening met meetpunten in het begin van de meetreeks grotere doorlatendheden worden gevonden dan bij meetpunten verderop in de meetreeks.

##### *Aandachtspunten bij deze methode*

Volgens (Sun & Koch, 2014) zijn er in de slugtestgrafiek drie rechte lijnen te onderscheiden (zie figuur 4-1). Gebruikelijk is om uit te gaan van de laatste rechte lijn. Voor dit onderzoek is de doorlatendheid behorend bij zowel de eerste rechte lijn als bij de laatste rechte lijn berekend. In (Sun & Koch, 2014) wordt aanbevolen bij hogere doorlatendheden (> 5 m/d) de

eerste rechte lijn te hanteren. Volgens de auteurs sluit dit beter aan bij resultaten van pompproeven. Een fysieke onderbouwing hiervoor wordt echter niet gegeven.

Van slugtesten is bekend dat ze over het algemeen relatief lage doorlatendheden weergeven. De oorzaak hiervan is niet precies bepaald: verklaringen variëren van een schaafeffect (slugtest niet in best doorlatende zandlaag binnen het pakket) in combinatie met anisotropie tot een 'skin'-effect op de boorgatwand. Een overzicht is gegeven in (Butler & Healey, 1998).



Figuur 4-1: Voorbeeld van een slugtestgrafiek, met daarin de drie rechte lijnen getekend (bron: [3])

#### 4.1.2. Falling head test op ongeroerde monsters (directe methode)

Uitgevoerd bij MB1, MB2, MB3 en MB4, ca. iedere 5 m.

Een in het boorgat gestoken ongeroerd monster wordt in het laboratorium in een proefopstelling ingebouwd. Door een stijghoogteverschil over het monster te zetten ontstaat een grondwaterstroming. Bij een falling head test wordt de aanpassing van het stijghoogteverschil in de loop van de tijd gemeten.

##### *Aandachtspunt bij deze methode*

De monsters zijn rechtop in het apparaat ingebouwd. Dit betekent dat de gemeten doorlatendheid een indicatie geeft van de verticale doorlatendheid. Dit in tegenstelling tot de meeste overige methoden, die veelal het gecombineerd effect van horizontale en verticale doorlatendheid geven.

#### 4.1.3. Mini-pompproef MPT test (directe methode)

Uitgevoerd bij HPT1 en HPT7, ca. iedere 5 m, daarnaast bij HPT2 tot en met HPT6 op ca. NAP -5 m en NAP -30 m en bij HPT8 tot en met HPT12 alleen op ca. NAP -30 m.

Fugro heeft een test ontwikkeld waarmee pompproef parameters kunnen worden bepaald voor een fractie van de kosten die nodig zijn voor een grootschalige 'standaard' pompproef. Tijdens een mini-pompproef (MPT) wordt op basis van dezelfde principes als een 'standaard' pompproef de stijghoogterespons van de bodem op enige afstand van een injectiefilter

gemeten. Hieruit worden de doorlatendheid en de bergingscoëfficiënt berekend. Deze MPT test is een innovatie die nog in ontwikkeling is, en is daarom nog niet grootschalig toegepast.

Een uitgebreidere beschrijving van de toepassing van de mini-pompproeven voor dit project is gegeven in [3].

#### **4.1.4. Dissipatietest uitwerking methode Van Baars en van de Graaf (directe methode)** Uitgevoerd bij DKMP1, DKMP2, DKMP3 en DKMP4, ca. iedere 5 m.

Tijdens het sonderen ontstaat wateroverspanning rondom de conuspunt. Deze kan worden gemeten met een waterspanningssondering (piezocone). Indien de sondering wordt gestaakt, zal de overdruk wegstromen en de druk zich aanpassen aan het hydrostatische drukverloop in de bodem. De snelheid van deze aanpassing is afhankelijk van de doorlatendheid: in grind zal deze aanpassing nagenoeg instantaan (< 1 seconde) plaatsvinden, terwijl bij klei de wateroverspanning veel hoger kan oplopen en er verschillende uren over kan doen om te dissiperen.

Uit het drukverloop kan op veel verschillende methoden de doorlatendheid worden bepaald. In dit onderzoek zijn er twee gehanteerd.

- Directe fysische benadering (van Baars & van de Graaf, 2007)
- Indirecte correlatiemethode (Parez & Fauriel, 1988)

Door (van Baars & van de Graaf, 2007) is een methode ontwikkeld om de doorlatendheid te berekenen uit het drukverloop. Deze methode berekend de doorlatendheid als functie van de tijd die nodig is om tot 100% dissipatie te komen.

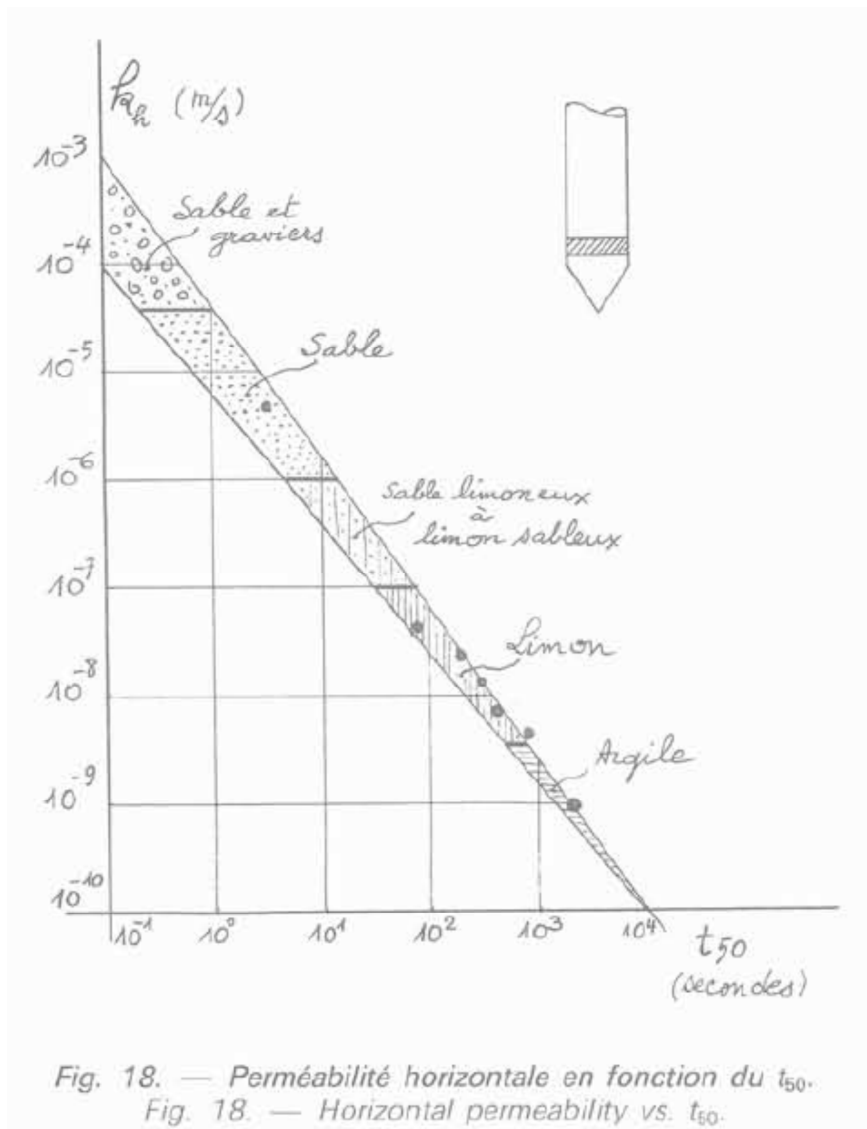
#### *Aandachtspunt bij deze methode*

Door de auteur wordt aangegeven dat deze methode specifiek voor organische kleien is ontwikkeld en dat voorzichtigheid betracht moet worden bij toepassing in niet-organische bodems zoals pure klei en zand. Er wordt niet toegelicht waarom de methode hier ongeschikt voor is.

#### **4.1.5. Dissipatietest uitwerking methode Parez en Fauriel (indirecte methode)** Uitgevoerd bij DKMP1, DKMP2, DKMP3 en DKMP4, ca. iedere 5 m.

Door (Parez & Fauriel, 1988) is een correlatiemethode opgesteld om doorlatendheid af te leiden uit de tijd tot 50% dissipatie. De correlatie loopt via laboratoriumtesten. De methode werkt op basis van dezelfde principes van dissipatie als hiervoor beschreven.





Figuur 4-2: Correlatiemethode (Parez & Fauriel, 1988)

#### 4.1.6. Korrelverdelingsmethoden (indirecte methoden)

Uitgevoerd bij MB1 t/m MB4, ca. iedere 5 m.

Korrelverdelingsmethoden zijn allen correlatiemethoden. De proxyparameter is veelal een kenmerkende korrelgrootte (meestal  $D_{10}$ , incidenteel  $D_{50}$ ) en/of informatie over de uniformiteit van de verdeling ( $C_u = D_{60} / D_{10}$ ) en U-cijfer (specifiek oppervlak zandfractie). In onderstaande tabel wordt per gehanteerde methode de relevante parameter aangegeven. Let op, per methode gelden er specifieke beperkingen ten aanzien van het toepassingsgebied.

Daarnaast dient voor het goed kunnen toepassen van deze methoden vaak naast een zeefanalyse tevens een areometertest uitgevoerd te worden om voldoende inzicht te krijgen in de verdeling van de fijnere korrelgrootte fracties.

Tabel 4-2: Doorlatendheidsbepaling op basis van correlatie aan de hand van korrelverdelingen

Proefmethode	Uitwerking	Proxyparameter	Beperkingen methode
Korrelverdeling	Alyamani And Sen, 1993 (Rosas, et al., 2014)	$D_{50} - D_{10}$	Middenklasse zand, $Cu < 5$
Korrelverdeling	Barr (2000)	U cijfer	
Korrelverdeling	Beyer, 1964 (Rosas, et al., 2014)	$D_{10}$ , Cu	$Cu < 20$ , $D_{10} < 600$ um Afgeleid voor kogelvormige & hoekige fluviaatiele zanden. Niet geldig voor plaatvormige korrels
Korrelverdeling	Chapuis et al., 2005 (Rosas, et al., 2014)	$D_{10}$	$D_{10} < 3000$ um
Korrelverdeling	Den Rooijen, 1992 **, *** (Calle, 1999)	$D_{10}$ , Cu, relatieve pakking	
Korrelverdeling	Fair and Hatch, 1933 (Rosas, et al., 2014)	Complete zeefverdeling	
Korrelverdeling	Harleman et al., 1963 (Rosas, et al., 2014)	$D_{10}$	
Korrelverdeling	Hazen-original, 1892 (Rosas, et al., 2014)	$D_{10}$	$D_{10} < 3000$ um, $Cu < 5$
Korrelverdeling	Hazen modified (Rosas, et al., 2014)	$D_{10}$	
Korrelverdeling	Kozeny-Carman, 1953* (Rosas, et al., 2014)	Complete zeefverdeling	Uitsluitend schoon niet te grof zand
Korrelverdeling	Kruger (Rosas, et al., 2014)	Complete zeefverdeling	$C > 5$
Korrelverdeling	Krumbein and Monk, 1943 (Rosas, et al., 2014)	Complete zeefverdeling	
Korrelverdeling	NAVFAC DM7, 1974 (Rosas, et al., 2014)	$D_{10}$	$D_{10} < 2000$ um $2 < Cu < 12$ $D_{10}/D_5 > 1.4$
Korrelverdeling	Pavchich, 1966 [m/d] (Rosas, et al., 2014)	$D_{17}$	$D_{17} < 1500$ um
Korrelverdeling	Sauerbrei (Rosas, et al., 2014)	$D_{17}$	$D_{17} < 500$ um
Korrelverdeling	Seelheim (Seelheim, 1880)	$D_{50}$	$C < 2.5$
Korrelverdeling	Slichter, 1899 (Rosas, et al., 2014)	$D_{10}$	$10 < D_{10} < 5000$
Korrelverdeling	Terzaghi, 1925 (Rosas, et al., 2014)	$D_{10}$	Grof zand
Korrelverdeling	U.S. Bureau of Recl. (Rosas, et al., 2014)	$D_{20}$	Middenklasse zand $C < 5$
Korrelverdeling	Zamarin (Rosas, et al., 2014)	Complete zeefverdeling	Grof zand
Korrelverdeling	Zunker, 1932 (Rosas, et al., 2014)	Complete zeefverdeling	Fijn en middenklasse zand
Korrelverdeling	SBR190 (Janssen, 2003)	Beschrijving NEN5140	SBR190 is de SBR publicatie over bemalingen van bouwputten, waarin per bodemclassificatie een range van doorlatendheden is beschreven. Van dit soort tabellen zijn er in de internationale literatuur verschillende beschikbaar.

\* van deze methode is er een groot aantal varianten in omloop met een vereenvoudiging waarbij bv één kenmerkende korrelgrootte (bv  $D_{10}$ ) wordt gehanteerd.  
 \*\* in deze methode wordt gebruik gemaakt van een U voor het U-cijfer. Hiermee wordt echter Cu ( $D_{60}/D_{10}$ ) aangeduid.  
 \*\*\* deze methode is een meer mathematische uitwerking van de methode Beyer (1964) en zou geen wezenlijk verschil met Beyer (1964) moeten geven.

## 5. VERGELIJKING DOORLATENDHEIDSMETINGEN

In dit hoofdstuk zijn de resultaten van de verschillende doorlatendheidsmetingen die op de projectlocatie zijn uitgevoerd met elkaar vergeleken.. De resultaten zijn telkens afgezet tegen referentie-doorlatendheden zoals die volgen uit REGIS en de Grondwaterkaart van Nederland. Hieronder is beschreven waarom deze waarde als referentie is aangehouden. In de volgende paragrafen zijn de indirecte methoden om de doorlatendheid te bepalen (korrelverdelingsmethoden) en de directe methoden separaat met elkaar vergeleken.

### 5.1. Het probleem van de ‘werkelijke’ doorlatendheid: schaalafhankelijkheid

Een groot probleem bij onderzoek naar doorlatendheden is het vaststellen van een referentie-doorlatendheid. Wat is de ‘werkelijke’ doorlatendheid? De doorlatendheid waarin men geïnteresseerd is hangt af van het doel. . De waarden die men aanhoudt voor een grootschalige onttrekking met een invloed van 1 km<sup>2</sup> die 1 of 2 watervoerende pakketten beïnvloed zijn immers anders dan een infiltratiekratje of drain op 1 m diepte in de fijn zandige top van een watervoerend pakket. Bij de eerste gaat het om de gemiddelde doorlatendheid van een groot grondvolume, bij de tweede draait het om een relatief klein grondvolume. Conclusie: er is geen ‘werkelijke’ doorlatendheid: deze is schaal-afhankelijk.

Indien we kijken naar de schaal van de grondwaterstroming rondom een wel en een pipe, kan ingeschat worden dat dit, afhankelijke van lokale omstandigheden, ca. 50 – 500 m dwarsprofiel over de kering betreft. In langs- en diepterichting zal de invloed afhankelijk zijn van de geografie en geologie, dit zal in lengterichting tussen de 10 en 100 m liggen en qua diepte tussen de 5 tot 50 m. Indien we vervolgens kijken naar het betrokken grondvolume in de stroming zal dit uitkomen tussen de 2.500 m<sup>3</sup> en 2.500.000 m<sup>3</sup> (lxbxh). Ter vergelijking: het betrokken grondvolume in een korrelverdeling is met een krappe liter enkele miljoenen tot miljarden kleiner.

Om dit soort grote invloedsgebieden te onderzoeken zijn met name onttrekkings- en pompproeven geschikt. Deze in-situ (directe) testen beproeven een grondvolume wat in een vergelijkbare orde van grote gelegen is als het vraagstuk en geven een gemiddelde waarde van de doorlatendheid. Redelijke kentallen ten aanzien van de doorlatendheid worden in dat geval gegeven door REGIS en de Grondwaterkaart (zie hoofdstuk 3: Archiefgegevens ). Ter vergelijking worden daarom voor de ‘werkelijke’ doorlatendheid de gegevens uit deze twee bronnen geraadpleegd.

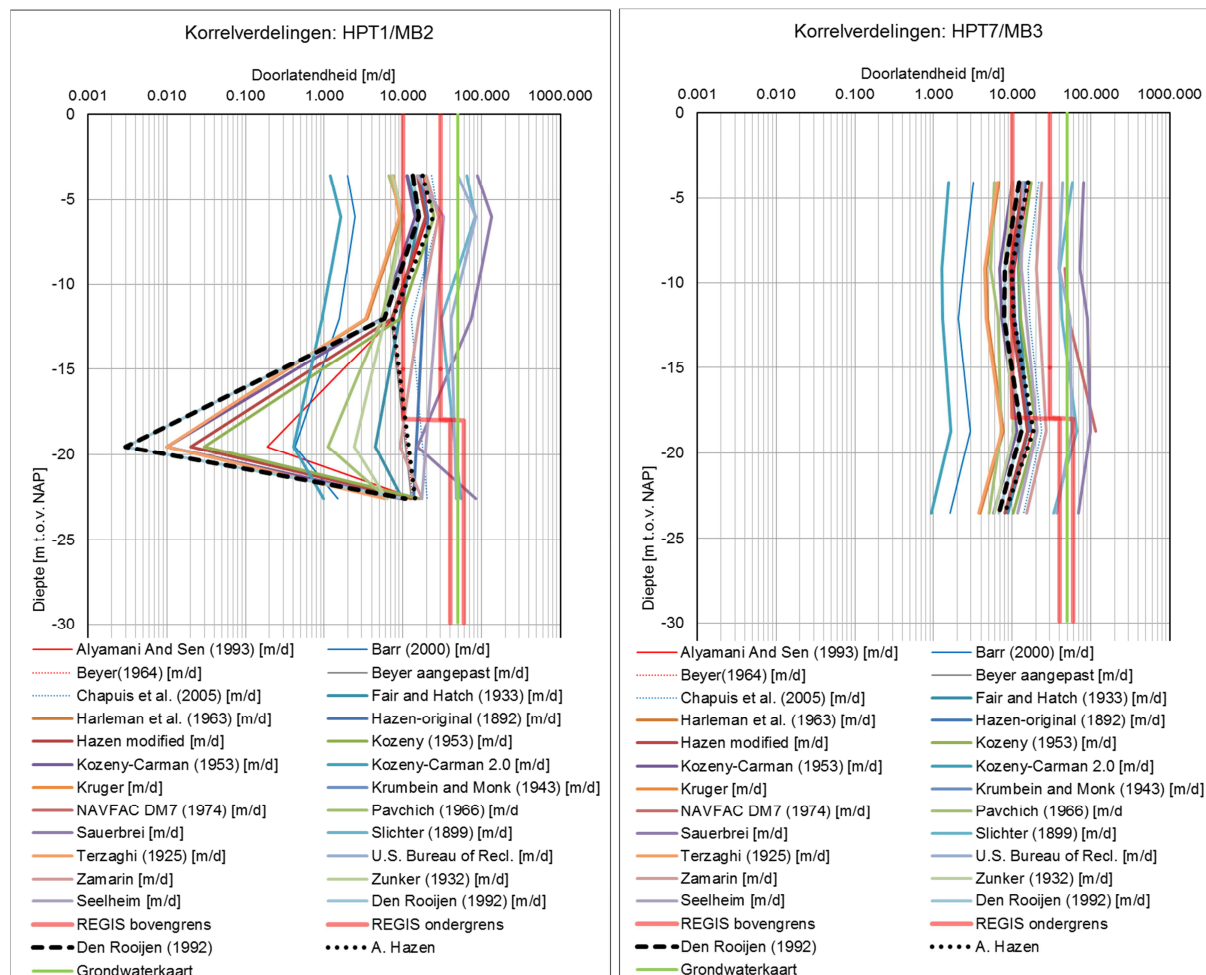
Op basis van REGIS en de Grondwaterkaart wordt verwacht dat sprake is van 2 lagen (F. Kreftenheye en F. Sterksel) met een verschillende doorlatendheid. Van onderzijde deklaag tot NAP -20 m gemiddeld 20 m/d, variërend tussen 10 en 30 m/d en beneden NAP -20 gemiddeld 50 m/d, variërend tussen 40 tot 60 m/d.

### 5.2. Vergelijking doorlatendheden korrelverdelingsmethoden

#### 5.2.1. Vergelijking

Gebruikelijk in onderzoek naar piping vraagstukken in Nederland is de indirecte methode van het nemen van zandmonsters en deze als proxy te gebruiken in een berekening van de doorlatendheid. In onderstaande grafieken is voor onderzoeklocaties MB2 en MB3 de berekende doorlatendheid volgens de genoemde korrelverdelingsmethoden weergegeven. De waarden variëren over de diepte omdat er op vijf verschillende dieptes korrelverdelingen zijn bepaald van de zandlagen. Ter referentie is de range van doorlatendheden uit REGIS en

de Grondwaterkaart weergegeven met respectievelijk rode en groene lijnen. De doorlatendheid is op logaritmische schaal weergegeven.



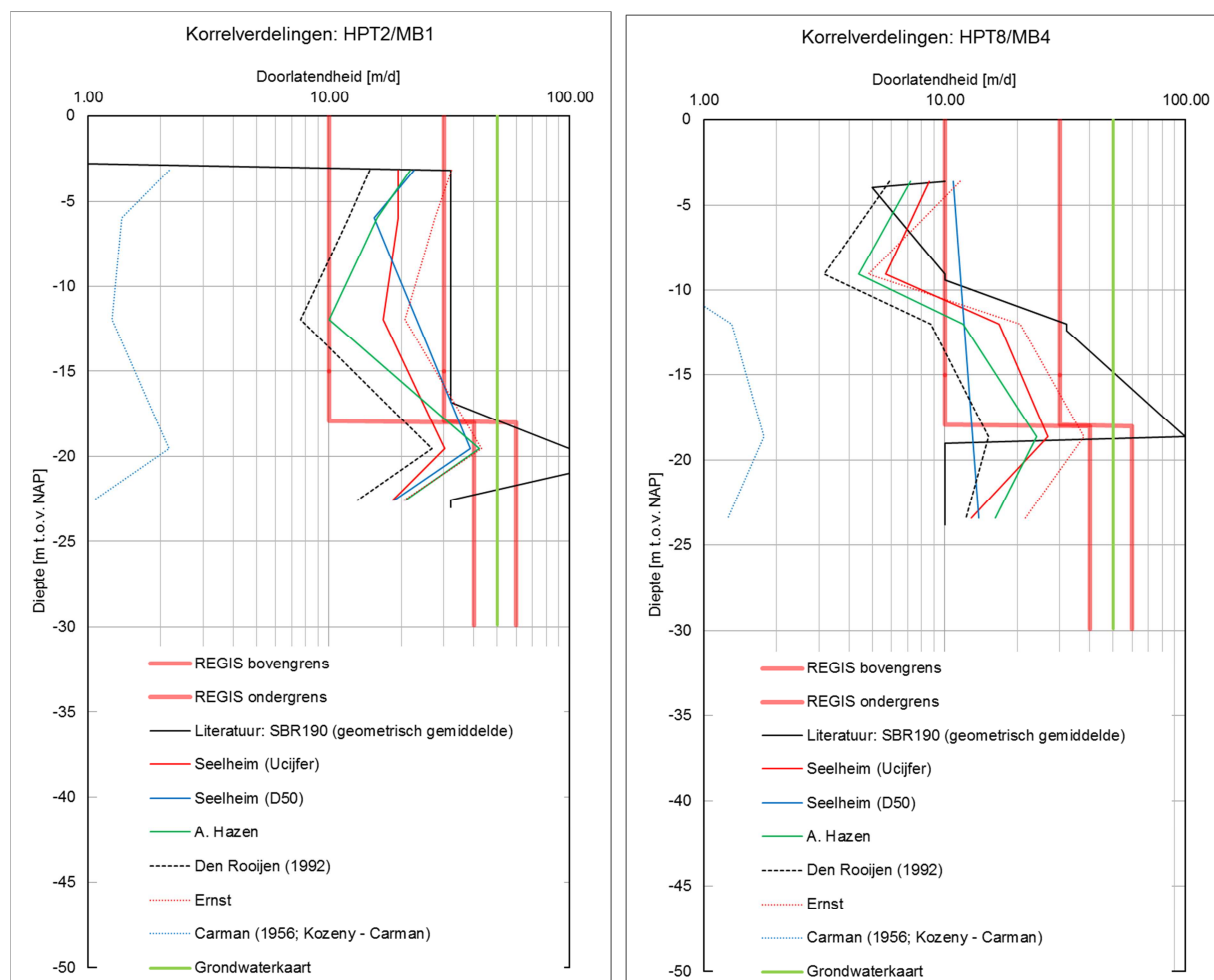
Figuur 5-1: Berekende doorlatendheden op onderzoeklocaties: indirecte methoden o.b.v. korrelverdelingen (MB2 & MB3)

Op basis van deze grafieken kan worden geconcludeerd dat de doorlatendheid volgens korrelverdelingsmethoden varieert tussen circa 1 en 100 m/d, afhankelijk van de methode die gekozen wordt. Het grootste deel valt tussen circa 5 en 20 m/d. Het verwachte onderscheid tussen de laag boven en beneden NAP -20 m volgt niet direct uit de resultaten van de korrelverdelingsmethoden. Er is een kleine kans dat dit samen hangt met onvoldoende diepe monsternamen (diepste monster ca. NAP-23 m en/of onvoldoende zeefanalyses (iedere 5 m)). De meeste doorlatendheden die bepaald zijn op basis van korrelverdelingen lijken een lagere doorlatendheid weer te geven dan de doorlatendheid die op basis van onder meer REGIS en de Grondwaterkaart zou worden verwacht.

Opvallend is dat het monster MB2 op ca. NAP -19 m een zeer lage doorlatendheid kent. Dit monster heeft een uitgesproken kleiige bijmenging, waardoor deze in methoden waarin de  $D_{10}$  als proxy wordt gehanteerd een zeer lage doorlatendheid oplevert.

Hieronder is de berekende doorlatendheid van de overige twee mechanische boringen, MB1 en MB4 weergegeven. Om de leesbaarheid van de grafiek te verhogen is uitsluitend een selectie van (inter)nationaal veel gebruikte methoden opgenomen, aangevuld met de in

piping-analyses gebruikte methode van Beijer / Den Rooijen. Hierbij wordt opgemerkt dat in het ORZW (Förster, Calle, van der Ham, & Kruse, 2012) naast de methode Den Rooijen, tevens de methode Kozeny-Carman wordt genoemd in relatie tot doorlatendheidsbepaling.



Figuur 5-2: Berekende doorlatendheden op onderzoeklocaties: indirecte methoden o.b.v. korrelverdelingen (MB1 & MB4)

Geconcludeerd wordt dat bij MB1 de doorlatendheid goed overeen komt met de verwachting op basis van REGIS. Bij MB4 geven de methoden over de hele lijn wederom beduidend lagere waarden aan dan verwacht wordt op basis van REGIS. Ook de verwachte overgang op circa NAP -20 m is niet eenduidig uit de metingen te herleiden. Bij MB4 valt daarnaast op dat sprake is van een uitgesproken lage doorlatendheid op circa NAP -8 m.

Dit is de diepte waarop op basis van REGIS een laagscheiding wordt verwacht tussen Formatie van Kreftenheye laag 2 en Formatie van Kreftenheye laag 3. Uit onder meer de boringen en de HPT sonderingen (hierover meer in hoofdstuk 6) blijkt dat deze laaggrens gekenmerkt wordt door de aanwezigheid van een slechter doorlatende laag bestaande uit klei en/of kleiige, sterk siltig fijn zand, wat de verklaring kan zijn voor de berekende lage doorlatendheid.

Verder blijkt dat de methode Den Rooijen over het algemeen een relatief lage doorlatendheid oplevert. De methode Kozeny-Carman geeft eveneens een lage doorlatendheid. Naast zevingen zijn tevens valproeven uitgevoerd. De Kozeny-Carman methode, in de hier gebruikte oorspronkelijke vorm, betreft de volledige meting inclusief fijne fractie uit de

valproef in de analyse. Een vereenvoudigde vorm met bijvoorbeeld de  $D_{10}$  als proxy, had wellicht een hogere doorlatendheid gegeven.

### **5.2.2. Conclusies korrelverdelingen**

De korrelverdelingen geven:

- Een relatief uniform beeld van de doorlatendheid over de diepte. De op basis van REGIS verwachte overgang op NAP -20 m wordt niet gevonden.
- Geven in doorsnee een lagere doorlatendheid (5-20 m/d) dan op basis van REGIS (10-30m/d) of de Grondwaterkaart (50 m/d verwachte doorlatendheid).
- Er zitten grote verschillen tussen de resultaten van de individuele methoden.

Voor dit onderzoek zijn iedere 5 m monsters geanalyseerd, teneinde de kosten laag te houden. Het is mogelijk het onderzoek uit te breiden door de nu nog in opslag zijnde monsters van de tussengelegen lagen (iedere meter) ook te analyseren. Dit kan mogelijk de conclusies ten aanzien van onder meer de herkenbaarheid van laagovergangen enigszins wijzigen.

### 5.3. Vergelijking doorlatendheden directe methoden

#### 5.3.1. Vergelijking

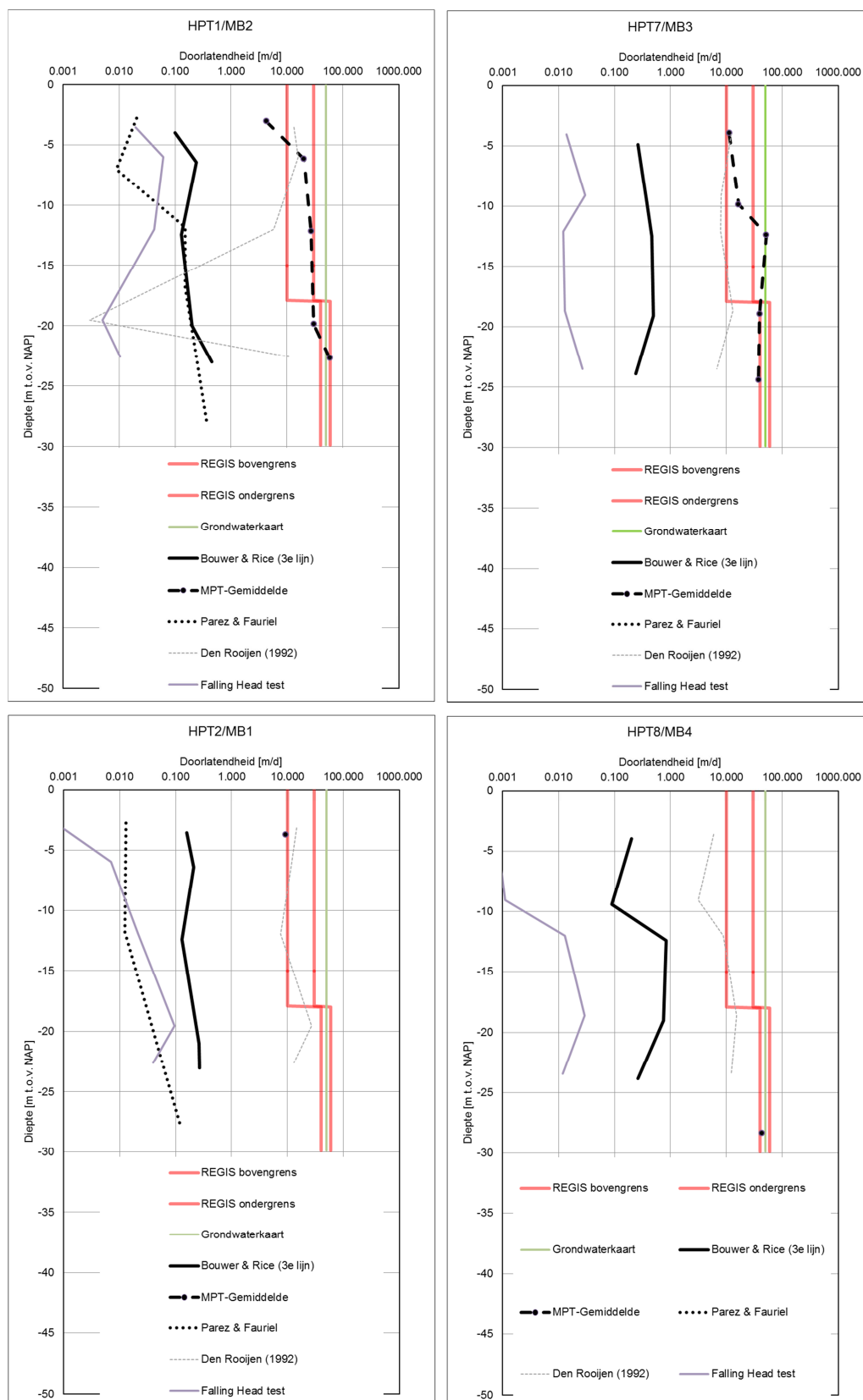
Hieronder is voor alle vier de onderzoeklocaties de berekende doorlatendheid op basis van de directe testen weergegeven (zie figuur 5-3). Om de grafiek beter inzichtelijk te maken zijn de meetpunten middels lijnen met elkaar verbonden. Naast de directe meetmethoden zijn tevens de dissipatietest uitwerking Parez & Fauriel weergegeven. De dissipatietest uitwerking Van Baars & Van de Graaf is niet weergegeven, deze waarden waren dusdanig laag ( $< 0,0001$  m/d) dat deze de leesbaarheid van de grafieken niet ten goede kwamen. Ter referentie is de range van doorlatendheden uit REGIS en de Grondwaterkaart weergegeven met respectievelijk rode en groene lijnen en zijn tevens de resultaten van de indirecte korrelverdelingsmethode uitwerking Den Rooijen weergegeven. De doorlatendheid is hierbij op logaritmische schaal weergegeven.

Tevens is in figuur 5-4 een grafiek opgenomen waarin alle uitgevoerde directe metingen zijn weergegeven. Hierbij zijn tevens resultaten van MPT testen opgenomen die tussen de 50 en 200 m van de primaire onderzoeklocatie zijn uitgevoerd op een diepte van ca. NAP -30 m.

Uit de metingen blijkt dat vrijwel alle indirecte methoden lage tot zeer lage doorlatendheden weergeven, wanneer de doorlatendheden op basis van REGIS en de Grondwaterkaart als referentie worden genomen. Een uitzondering hierop is de MPT test. Deze geeft doorlatendheden die goede overeenkomst vertonen met de referentie-doorlatendheden.

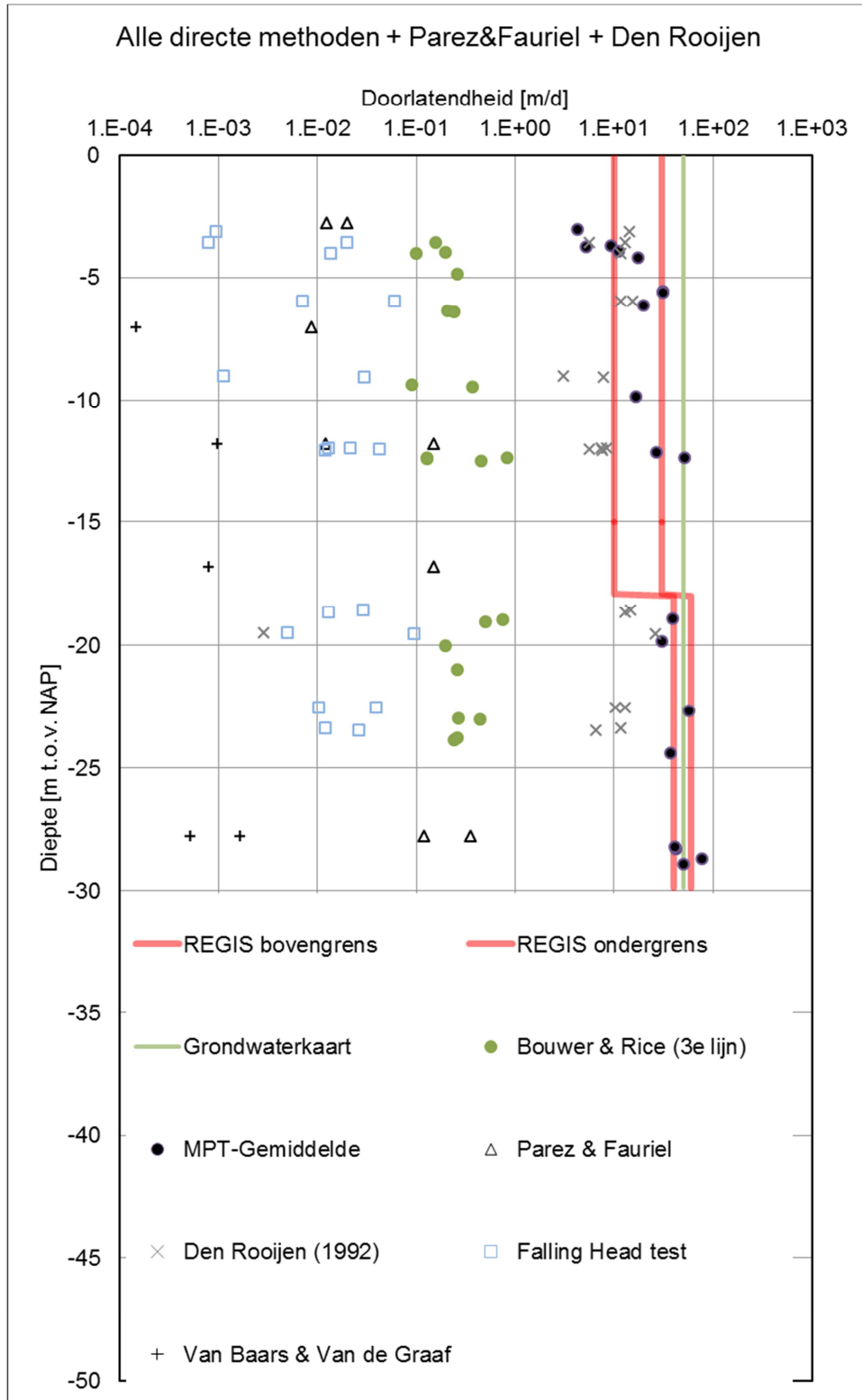
De overgang van een gemiddelde doorlatendheid naar een hogere doorlatendheid, die op basis van REGIS wordt verwacht, is in de dissipatietest uitwerking volgens Parez & Fauriel en de MPT test goed zichtbaar. In de slugtesten (Bouwer & Rice) en de falling head test (laboratorium) is deze test slechts beperkt zichtbaar. In de dissipatietest uitwerking volgens Van Baars en Van de Graaf lijkt deze trend zichtbaar, maar is het vaststellen hiervan lastig door het beperkte aantal metingen. Wat opvalt is dat nagenoeg alle methoden de indruk wekken dat de overgang naar beter doorlatend zand zich op ca. NAP -10 m bevindt, dit in tegenstelling tot de verwachte diepte van ca. NAP -18 a -20 m uit REGIS.





Figuur 5-3: Berekende doorlatendheden op onderzoekpunten: directe methoden





Figuur 5-4: Berekende doorlatendheden op onderzoekpunten: directe methoden (alle resultaten)

### 5.3.2. Analyse doorlatendheden directe testen

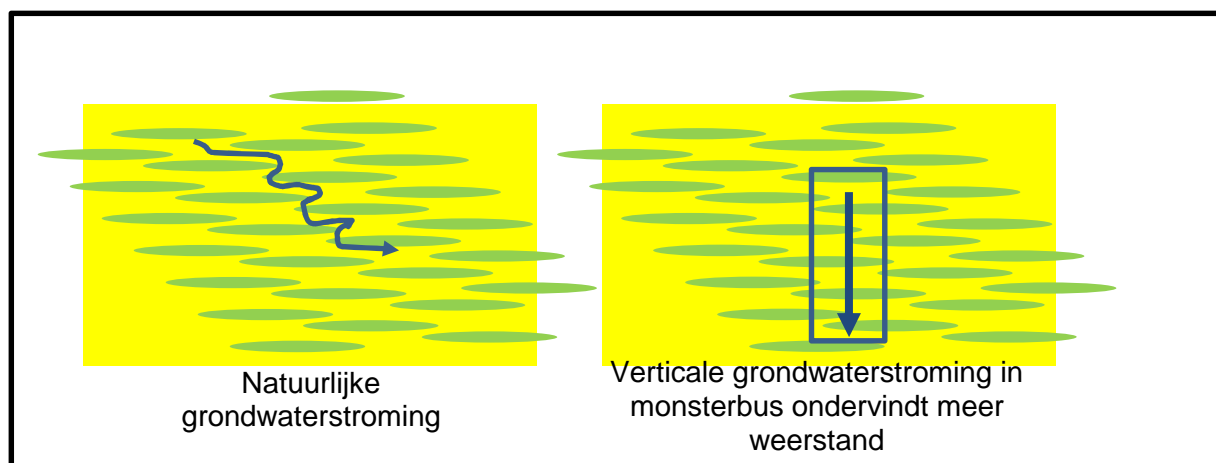
De resultaten van de directe doorlatendheidstesten zijn zeer variabel. De variatie is dusdanig dat het aannemelijk is dat op basis van dissipatietesten, laboratoriumtesten of slugtesten het grootste deel van de primaire keringen in het HWBP programma van de versterkingslijst afgehaald kunnen worden, althans ten aanzien van piping.

Dit lijkt uiterst onwaarschijnlijk. Veel van de keringen hebben immers wel een geschiedenis van geobserveerde zandmeevoerende wellen. De vraag is dus wat de oorzaak kan zijn van deze variatie. Er zijn twee voor de hand liggende oorzaken:

- Test-gerelateerde aandachtspunten
- Schaafeffect

#### *Test-gerelateerde aandachtspunten*

Ten aanzien van test-gerelateerde aandachtspunten geldt dat deze per test optreden. Voor de laboratoriumtesten kan dit bijvoorbeeld samenhangen de aanwezigheid van dunne gelaagdheid in een zandlaag, zoals in figuur 5-5 weergegeven. Dit speelt vooral indien de monsters verticaal beproefd zijn, zoals in dit onderzoek gebeurd is. Horizontale beproeving zou dit effect enigszins kunnen verminderen, vooropgesteld dat geen siltlens beproefd wordt, maar brengt als risico met zich mee dat er een grotere kans op monsterverstoring bestaat.



Figuur 5-5: Schematische weergave van het effect van dunne gelaagdheid op doorlatendheidsbepaling van ongeroerde monsters.

Bij dissipatietesten is een test-gerelateerde oorzaak niet eenduidig. Het is uiteraard mogelijk dat compactie rondom de conuspunt een teruggang in doorlatendheid, en daarmee een verminderde afstroming van water bij de conuspunt bewerkstelligd.

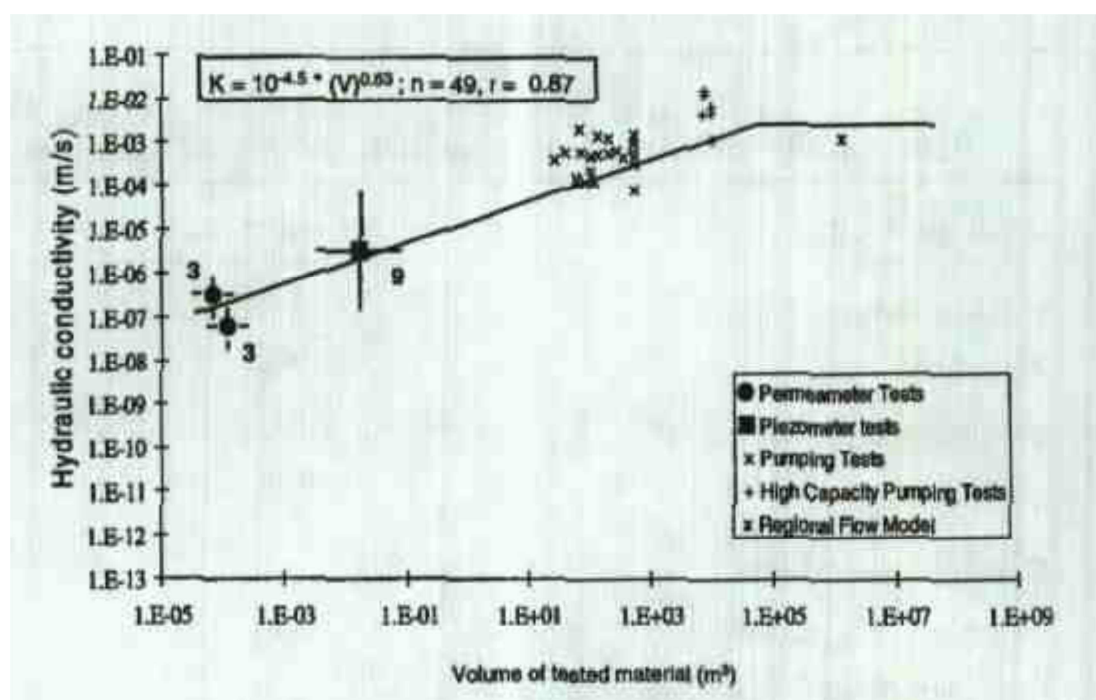
Bij slugtesten is reeds veelvuldig door onderzoekers opgemerkt dat deze relatief lage doorlatendheden weergeven in vergelijking tot bijvoorbeeld pompproeven. Hierbij wordt altijd het schaafeffect genoemd, waar in de volgende alinea op in wordt gegaan. Andere bronnen van dit verschil kunnen de aanwezigheid van een slecht doorlatende laag op de boorgatwand van een slugtest / peilbuistest zijn, het niet in rekening brengen van anisotropie in de analyse van een slugtest en een onjuist aangehouden filterlengte in de slugtest. Dit laatste speelt met name bij testen in peilbuizen. Een overzicht van onzekerheden bij de uitvoering en uitwerking van slugtesten is gegeven in (Butler & Healey, 1998). Hierbij wordt opgemerkt dat de onderschatting van de (horizontale) doorlatendheid als gevolg van het negeren van anisotropie voor de meeste kleinschalige proeven een rol speelt.

Ten aanzien van de MPT wordt op dit moment gewerkt aan een verbetering van deze methode om ook dat aspect beter te ondervangen.

### Schaaleffect

Een andere hypothese, die zowel voor- als tegenstanders kent, is de schaaleffect theorie. Deze baseert zich er hoofdzakelijk op dat in geval van een test met een grotere omvang, een groter deel van een aquifer betrokken wordt in de test. Indien de aquifer preferente stroombanen kent, bijvoorbeeld veroorzaakt door verschillen in sedimentaire faciës, is het uiterst onwaarschijnlijk dat deze precies wordt bemonsterd door een monsterbus van enkele decimeter die ergens in de aquifer wordt gestoken, terwijl de kans dat deze wordt 'bemonsterd' door een pompproef die nagenoeg het hele pakket beïnvloed, hoogst waarschijnlijk is.

Dit schaal effect is in detail onderzocht door (Schulze-Makuch, Carlson, Cherkauer, & Malik, 1999). Zij vonden een duidelijk relatie tussen meetschaal en doorlatendheid. De resultaten van deze studie geven aan dat er met toenemende schaalgrootte van de proef een stijging van de doorlatendheid wordt gevonden, tot een bepaalde bovengrens, waarna de toename tot nul reduceerde. Uit de studie blijkt dat dit verband steiler verloopt bij toename van de heterogeniteit. Bij (nagenoeg) homogene afzettingen is dit verband niet aanwezig. Dergelijke afzettingen komen in de natuur echter zeer weinig voor. In figuur 5-6 is een voorbeeld van de relatie die zij voor één van de onderzochte formaties aantreffen weergegeven.



Figuur 5-6: Relatie schaalgrootte proef (monster grootte) versus doorlatendheid van een spoelzandvlakte (Schulze-Makuch, Carlson, Cherkauer, & Malik, 1999)

De onderzochte formaties van Kreftenheye en Sterksel zijn heterogeen te noemen, gezien hun fluviaatiele afzettingmilieu. Het is daarom mogelijk dat het genoemde schaaleffect ook in dit onderzoek een rol speelt. Om deze reden is voor dit onderzoek het schaaleffect onderzocht. Voor het bepalen van het monstervolume is daarbij uitgegaan van dezelfde definitie als in (Schulze-Makuch, Carlson, Cherkauer, & Malik, 1999) gebruikt is: Volume betrokken grond, gedefinieerd als:

$$V_s = \frac{V_w}{n}$$

Met:

$V_s$  = betrokken grondvolume

$V_w$  = Watervolume gebruikt in de test

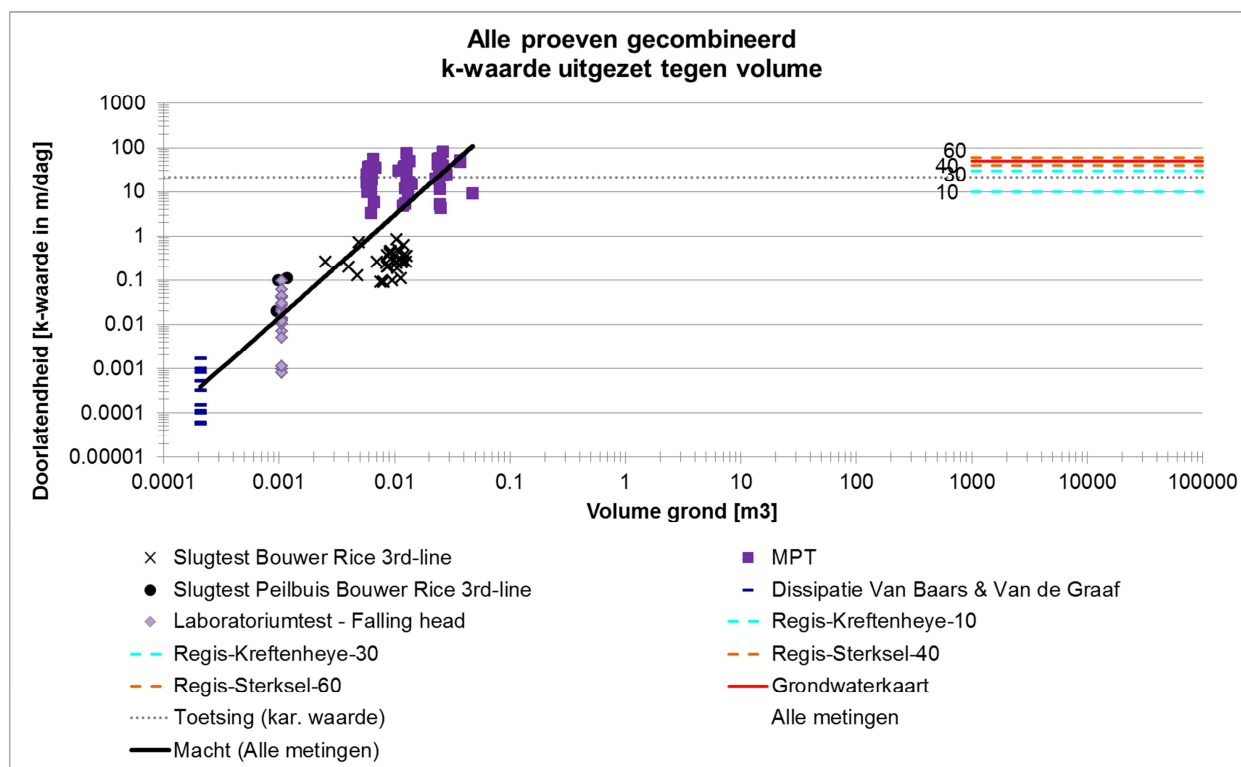
$n$  = poriëngetal (aangehouden op 0,4)

Hierbij wordt als kanttekening gemaakt dat dit volume niet direct representatief is voor het invloedsgebied van een test: het werkelijk invloedsgebied is onder meer afhankelijk van de bergingseigenschappen van een aquifer. Dit komt er feitelijk op neer dat het werkelijk invloedsgebied vele malen groter is dan hier aangeduid.

Voor de proeven waarvan het volume niet exact bekend was, zoals de dissipatietesten, is een gefundeerde schatting gedaan op basis van proefkenmerken. Voor de REGIS/Grondwaterkaart gegevens is een inschatting gedaan van het volume dat bij een pompproef ongeveer verpompt wordt.

In figuur 5-7 is het resultaat weergegeven. Ter indicatie is tevens de karacteristieke waarde van de doorlatendheid weergegeven die in de toetsing van dit dijkvak is aangehouden. De resultaten laten een duidelijke relatie zien tussen de schaalgrootte van de proef en de berekende doorlatendheid. De resultaten sluiten aan bij de bevindingen van (Schulze-Makuch, Carlson, Cherkauer, & Malik, 1999), waar bij een toenemende schaalgrootte (monstergrootte) van de proef een hogere doorlatendheid wordt gevonden. Dit schaaffect is het gevolg van de heterogeniteit van de beproefde formaties op de onderzoekslocatie. Wat wel opvalt is dat de bovengrens van het meetschaal effect in dit onderzoek relatief laag gelegen is in vergelijking met de onderzoeksresultaten zoals gepresenteerd in figuur 5-6. Dit indiceert een (relatief) lage maat van heterogeniteit, vergelijkbaar met de fijner gegraadeerde formaties uit het onderzoek van (Schulze-Makuch, Carlson, Cherkauer, & Malik, 1999). Bij eventuele nadere analyse van dit effect verdient het aanbeveling onderscheid te maken in de nu samengenomen formaties Kreftenheye en Sterksel.

Opgemerkt wordt dat er op de projectlocatie tevens een modellering van getijvoortplanting heeft plaatsgevonden zie (Leeuwrent, 2015). Deze is niet in de onderstaande grafiek opgenomen, maar leverde een doorlatendheid van ca. 10 tot 25 m/d op voor de bovenzijde van het watervoerend pakket. Dit sluit goed aan op de verwachtingswaarden uit REGIS.



Figuur 5-7: Schaafeffect in proeven, combinatie Kreftenheye & Sterksel formatie

Het is verleidelijk om op basis van deze relatie de parameters van de kleinschalige proeven op te schalen naar grootschalige testen. Gezien de spreiding in de metingen en het, mede door het logaritmsch gedrag veroorzaakte, grote verschil dat een kleine verschuiving in de relatie veroorzaakt, is besloten deze opschaling niet uit te voeren. Voor het geven van een goede beoordeling ten aanzien van piping is het daarom wellicht verstandig van deze proeven uitsluitend 'grootschalige' testen (pompproeven, putproeven, MPT mini-pompproeven) uit te voeren, aangezien het risico op een onrealistisch lage doorlatendheid anders zeer groot wordt.

### 5.3.3. Conclusies doorlatendheden overige methoden

De overige methoden geven:

- Een variabel beeld van de doorlatendheid met de diepte. De op basis van REGIS verwachte overgang op NAP -20 m wordt aangetroffen. Deze ligt echter beduidend hoger (ca. NAP -10 m) dan op basis van REGIS wordt verwacht.
- Geven uitzonderlijk grote verschillen tussen de meetmethoden. Verwacht wordt dat dit (mede) samen hangt met het schaafeffect. De verschillen zijn dusdanig dat het de overweging verdient uitsluitend grootschalige testen te gebruiken voor het beoordelen van de doorlatendheid. Het opschalen van kleinere testen is zeer foutgevoelig.

### 5.4. Algemene conclusies ten aanzien van doorlatendheidsmetingen

Alles overziende valt het volgende op:

- Indirecte testen zijn niet in staat de op basis van REGIS verwachte variatie in doorlatendheid te reproduceren. Directe testen voldoen hierbij over de hele linie gezien beter.
- Directe testen zijn echter erg gevoelig voor schaalafhankelijkheid: met name relatief grootschalige testen geven een beeld overeenkomstig met de op basis van de

---

Grondwaterkaart en REGIS verwachte doorlatendheid. Voor dit onderzoek betreft dit de (nieuwe) MPT test en getij-respons analyses. Verdere testen die in aanmerkingen komen, maar hier niet zijn uitgevoerd, zijn putproeven, pompproeven en tracertesten.

- Indirecte testen (m.n. korrelverdelingsmethoden) liggen qua berekende doorlatendheid beter in de buurt van de verwachte doorlatendheden dan de kleinschalige directe testen, maar minder dan de MPT-test.

## 6. HPT SONDEERTECHNIEK: RELATIE MET DOORLATENDHEID

In het voorgaande hoofdstuk is ingegaan op de resultaten van verschillende methoden van doorlatendheidsbepaling. Op basis van deze resultaten zijn de resultaten van de HPT sondering geanalyseerd.

### 6.1. HPT sondering

Met de HPT sondeertechniek kan tijdens het sonderen, via een speciaal hiervoor ontwikkeld systeem, water in de bodem worden geïnjecteerd. Vervolgens wordt de drukrespons in de bodem op de injectie gemeten. Van het ratio debiet/druk (Q/P) wordt verondersteld dat deze een relatieve maat van de doorlatendheid geeft. De HPT techniek is ontwikkeld door een Amerikaans bedrijf, en door Fugro in Europa geïntroduceerd.

In figuur 6-1 is de conus van de HPT weergegeven.



Figuur 6-1: Impressie injectie HPT-sondering.

### 6.2. Uitgevoerde metingen

Alle HPT-sonderingen zijn uitgevoerd tot een diepte van 30 meter. Bij het uitvoeren van de HPT-sondering wordt, vanuit de sondeerconus, water in de bodem geïnfiltrerd. Het debiet waarmee wordt geïnfiltrerd kan worden geregeld met een pomp in de sondeerwagen. Op basis van de resultaten van de eerder uitgevoerde waterspanningssonderingen is het injectiedebiet vastgesteld op 500 mL/min. Deze keuze is gebaseerd op ervaringen in Nederland en in het buitenland (m.n. Duitsland). Bij te hoge debieten bestaat een risico op bodemverstoring, bij te lage debieten bestaat het risico dat geen drukopbouw in de bodem plaats vindt.

Bij HPT 1 en HPT 7 zijn tijdens sonderen ca. iedere 5 m mini-pompproeven van ca. 1 uur uitgevoerd.

De conus wordt met een constante snelheid van 2 cm/s de bodem ingebracht. Tijdens het sonderen wordt het injectiedebiet (Q) continu geregistreerd als ook de druk ter plaatse van injectiepunt ( $P_t$ ). De druk die wordt gemeten is de totale druk ( $P_t$ ), waarbij

$$P_t = P_l + P_w + P_{HPT}$$

met:

$$P_l = \text{luchtdruk [kPa]}$$



$P_w$  = hydrostatische waterdruk [kPa]

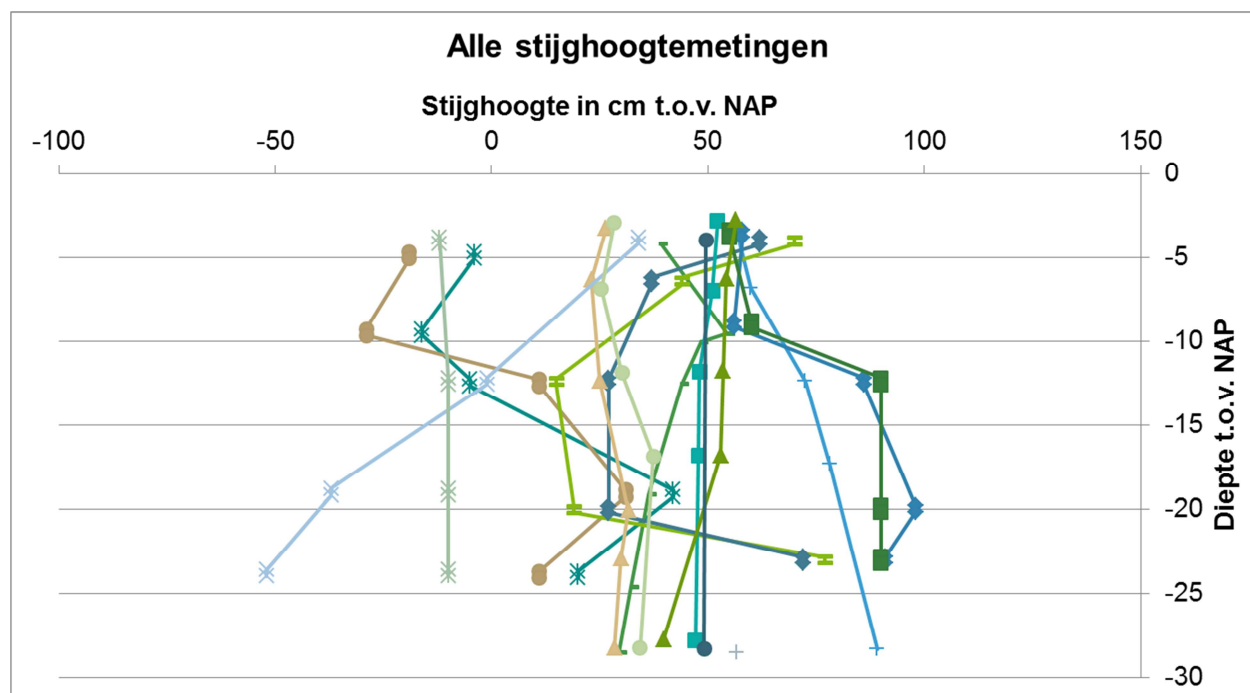
$P_{HPT}$  = waterdruk veroorzaakt door het injecteren van water [kPa]

Het resultaat van een HPT sondering wordt weergegeven in de vorm van de verhouding  $Q/P_{HPT}$  zodat kleine variaties in bijvoorbeeld injectiedebiet minimale invloed hebben op het meetresultaat. Gebruikelijk is een weergave in de vorm [ml/min] / [kPa]. Verondersteld wordt dat de verhouding  $Q/P_{HPT}$  een beeld geeft van de relatieve doorlatendheden in de bodem. Een hoge  $Q/P$  waarde geeft hierbij een hoge doorlatend weer en vice versa.

In de bepaling van  $P_{HPT}$  is geen rekening gehouden met een stromingsweerstand tussen het filter en de druksensor. De afstand is kort, maar er zit op dit traject wel een bocht in het systeem en dit kan dus enige extra druk opleveren. Voor toekomstige onderzoeken wordt aanbevolen deze weerstand te bepalen bij verschillende drukken, en op basis hiervan een correctie op te nemen.

### 6.3. Correctie hydrostatische druk

Voor het bepalen van  $P_{HPT}$  dient de hydrostatische druk bekend te zijn. Tijdens de uitwerking van de stijghoogtemetingen (peilbuizen, dissipatietesten, metingen tijdens slugtesten) bleek dat deze varieerde in de tijd als gevolg van getijvoortplanting. Zeker bij de sonderingen waarbij langdurige dissipatietesten zijn uitgevoerd was dit een aandachtspunt. De sondering duurt, als gevolg van de mini-popmpproeven, testen bij benadering even lang als de duur van een getijbeweging. Hierdoor is het niet mogelijk gebleken per sondeerdiepte een goede correctie te maken. Er is in verband met de voortgang van het onderzoek voor gekozen een stijghoogte aan te houden van NAP +0.5 m voor alle sonderingen. Verwacht wordt dat de hiermee geïntroduceerde fout in doorsnee ca. +/- 0,2 m waterdruk bedraagt, overeenkomstig met een afwijking in de  $Q/P$  van ca. 15%. Een overzicht van alle stijghoogtemetingen is in figuur 6-2 weergegeven.



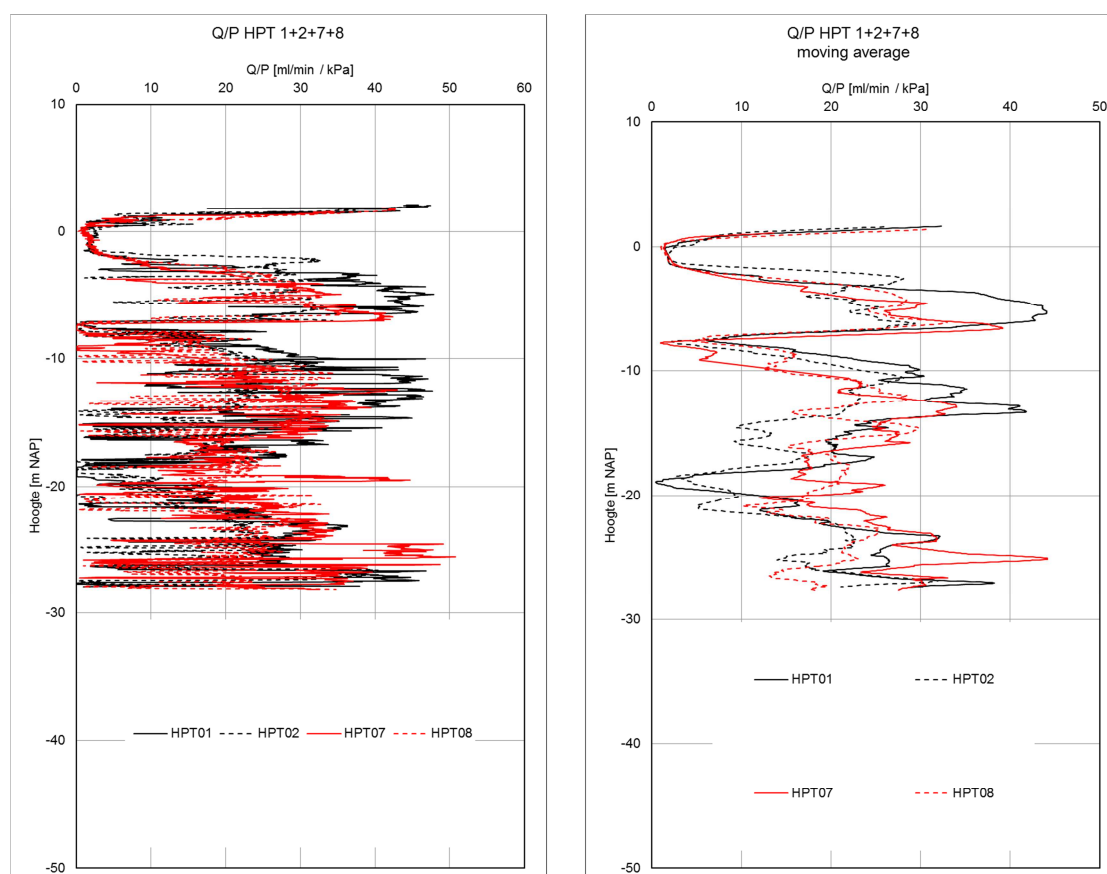
Figuur 6-2: Alle stijghoogtemetingen in de boorgaten en tijdens sonderingen



### 6.3.1. Resultaten HPT sonderingen

Een overzicht van de 4 HPT metingen op de vergelijkingslocatie bij de boorgaten is opgenomen in figuur 6-3. De grafieken betreffen respectievelijk de ruwe data en lopende gemiddelden over 1 m (0,5 +/- observatiepunt). Dit laatste is gedaan om de invloed van spikes op de meting te verminderen. Ter vergelijking zijn alle resultaten in 1 grafiek weergegeven. Er vallen een aantal punten op:

1. Er zijn duidelijk grenzen aan te wijzen tussen eenheden. Er valt een grens op rond NAP -3 m (onderkant deklaag), op NAP -8 m (overgang Kreftenheye Zand-laag KRZ2 naar KRZ-laag 3) en op NAP -18 a -20 m (overgang Kreftenheye Zand-laag KRZ3 naar Sterksel Zand laag STZ1). Ook onderaan de sondering lijkt bij de ruwe data een teruggang aanwezig. Het lijkt het meest aannemelijk dat deze samenhangt met het beëindigen van de sondering op deze diepte.
2. De Q/P waarde varieert tussen 0 en ca. 50 [(ml/min) / kPa].
3. Er is een maximale Q/P identificeerbaar van ca. 50 direct aan maaiveld. Dit deel is voorgeboord en geeft dus het meetbereik van het systeem bij geen weerstand van zandlagen aan, en hiermee de maximale bereikbare Q/P. In de kleideklaag nadert de Q/P naar 0. Geconcludeerd wordt derhalve dat in slecht doorlatende lagen (ca. < 0,01 m/d) de Q/P nagenoeg 0 is. In goed doorlatende lagen (>100 m/d) bedraagt de Q/P waarde maximaal 50.
4. In de grofzandige eenheden varieert de Q/P waarde tussen 20 en 50.



Figuur 6-3: Resultaten HPT sonderingen

## 6.4. Relatie relatieve doorlatendheid Q/P met absolute doorlatendheid K

### 6.4.1. Internationaal gehanteerde methode

De HPT is een systeem van GeoProbe. Zij hebben onderzocht hoe de doorlatendheid kan worden bepaald op basis van een gemeten Q/P waarde (McCall & Christy, 2010). Deze relatie is gebaseerd op een aantal correlaties en is hieronder weergegeven.

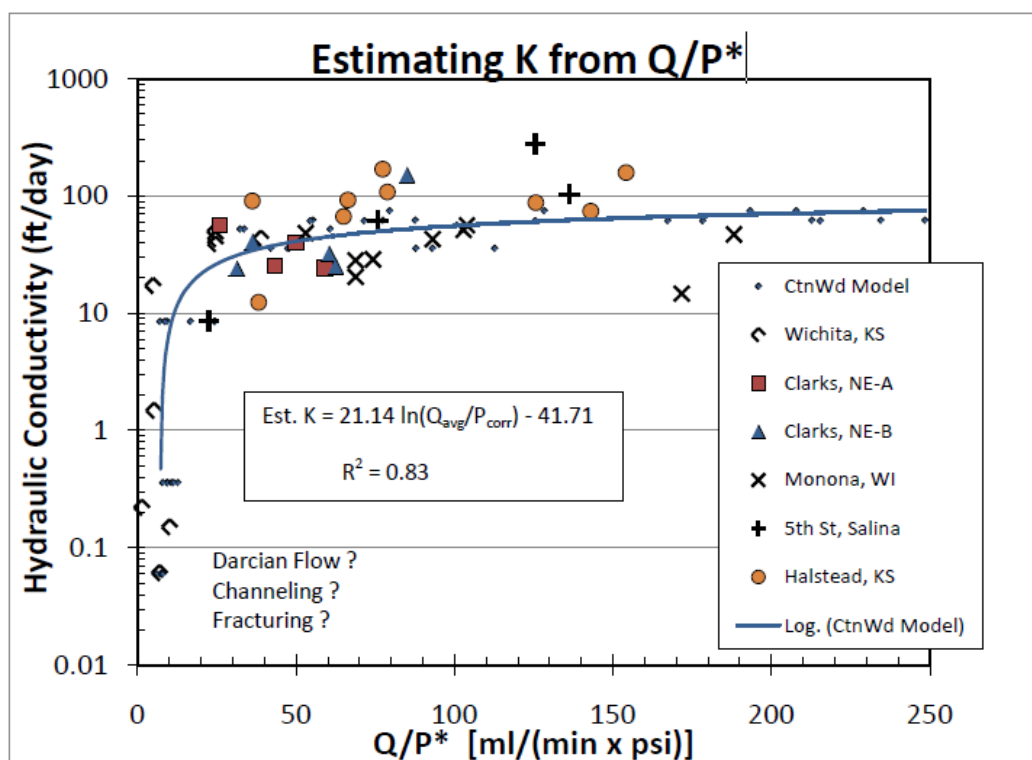


Figure 8: A model relating HPT average flow and corrected pressure ( $Q/P^*$ ) to hydraulic conductivity ( $K$ ) is used in the DI Viewer software to calculate an estimated value of the formation hydraulic conductivity for the saturated formation. This general model provides a good approximation of  $K$  based on data from multiple field sites in the central U.S. (After McCall and Christy, 2010). Hydraulic conductivity was measured by slug testing wells or piezometers installed near the HPT log locations. Screen intervals ranged from 1 to 5ft in length for the wells and piezometers.

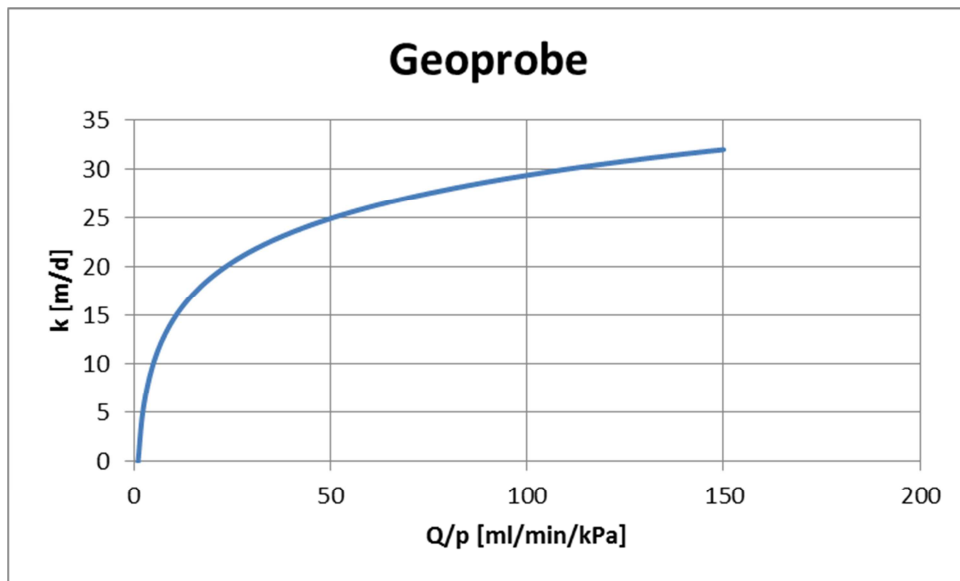
Figuur 6-4: Methode Geoprobe

In SI eenheden is de formule als volgt:

$$k = \left[ 21.14 \cdot \ln\left(\frac{Q}{p} 6.894\right) - 41.71 \right] \cdot 0.3048$$

met  $k$  in m/dag,  $Q$  in [ml/min] and  $P$  in [kPa]

In grafiekvorm hieronder weergegeven



Figuur 6-5: Relatie GeoProbe

Fugro Duitsland past de HPT reeds langer toe, en beveelt aan deze methode alleen te gebruiken indien geen aparte slugtesten beschikbaar zijn om een locatie-specifieke correlatie op te stellen.

Wat opvalt aan deze relatie (Hoefsloot, 2014) dat er volgens de auteurs sprake is van een logaritmisch verband, terwijl zij het niet als zodanig weergeven. Daarnaast neemt door dit logaritmisch verband de doorlatendheid bij de praktijkwaarde van Q/P (max. ca. 50) niet verder toe dan ca. 25-30 m/d. Dit lijkt vreemd gezien het contrast dat in het watervoerend pakket bij Doeveren zichtbaar is. Dit pakket, met een verwachte doorlatendheid van ca. 20 m/d tot 50 m/d, vertoont veel waarden met een Q/P <50, wat niet het geval zou zijn indien de genoemde relatie van GeoProbe van toepassing zou zijn.

#### 6.4.2. Theoretische afleiding alternatieve methode

Op basis van de bevindingen hierboven wordt geconcludeerd dat er:

- Een positief verband bestaat tussen Q/P en K
- De relatie naar 0 nader in slecht doorlatende ( $K < 0,01$  m/d) lagen
- Het niet aannemelijk is dat deze de vorm heeft die door GeoProbe is aangedragen.

Indien het injectiepunt als puntbron wordt gezien geldt de volgende formule voor een bolvormig isohypsenverloop rond de bron:

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi rk} * \text{instationaire component}$$

Met

$\varphi$  = stijghoogte (waterkolom)

Q = injectiedebiet

r = straal t.o.v. bron

k = (isotrope) doorlatendheid

Numerieke oplossingen (Hoefsloot, 2014) en analytische berekeningen wijzen uit dat op korte afstand (<5 cm) van het injectiepunt de druk binnen enkele seconden stationair wordt. In geval van een bewegende conus is de druk direct naast het injectiepunt dus constant semi-stationair. Op grotere afstand gedraagt deze zich nog instationair. In het semi stationair bereik nadert de in stationaire component naar 1,0 en wordt de formule

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi rk}$$

In geval van bewegende conus is de situatie permanent instationair. Op korte afstand van de conus is het verloop naar (semi) stationairiteit, zeker bij enigszins gespannen pakketten, binnen enkele seconden geschied. Voor deze situatie geldt derhalve de stationaire variant zoals hierboven beschreven.

Dit kan worden herschreven tot:

$$\frac{Q}{\varphi} = 4\pi rk$$

Waarbij de stijghoogte feitelijk de druk (P) voorstelt, alleen dan in de vorm  $P/\gamma_w$ . Probleem is dat r niet te definiëren is, doordat deze zich achter het injectiepunt bevindt. Voor de Q/P – K relatie komen we dus tot de volgende theoretische formule:

$$\frac{Q}{P} = \text{Constante ivm straal } k$$

$$\frac{Q}{P} = C * k \quad (\text{eenvoudiger vorm})$$

Dus voor de Q/P – K relatie geldt in dat geval:

$$k = \left[ \frac{1}{C} \right] * \frac{Q}{P}$$

Deze relatie bevat een positief verband tussen Q/P en K en nadert naar de oorsprong indien K naar 0 nadert.

#### 6.4.3. Praktisch uitwerking: bepaling factor 1/C

Nagegaan is of deze relatie bruikbaar is. Hiervoor is gebruik gemaakt van de MPT metingen, aangezien deze goed overeen lijken te komen met de verwachte doorlatendheid van de lokaal aanwezige lagen. Daarnaast is de indirecte korrelverdelingsmethode Den Rooijen gebruikt. Deze laatste methode is niet gekozen vanwege een goede relatie met de verwachte doorlatendheid, maar omdat deze nu eenmaal veelvuldig gebruikt wordt voor doorlatendheidsbepalingen in relatie tot piping vraagstukken.

Aangezien de HPT grafieken spikes vertonen is gebruik gemaakt van het eerder gepresenteerde lopende gemiddelde. Hiermee wordt de invloed van deze uitschieters verminderd. Hierbij geldt als kanttekening dat het voorkomen van deze spikes wel een indruk kan geven van de heterogeniteit van de afzetting, die door het werken met een lopend gemiddelde verloren gaat. Uit eerdere ervaringen met de HPT (F. Kreftenheije in het IJsseldal) is bekend dat niet altijd dusdanig veel spikes zichtbaar zijn, dit lijkt formatie-

afhankelijk. Aangezien ook in Doeveren de Formatie van Kreftenheye wordt beschouwd lijkt dit zelfs faciës-afhankelijk.

In figuur 6-6 is het verband tussen de berekende doorlatendheden en de bijbehorende Q/P-waarden weergegeven. Door de data is een trendlijn geplot die (geforceerd) door de oorsprong loopt. De richtingscoëfficiënt van deze trendlijn duidt derhalve de constante 1/C aan. Deze vergelijking is voor alle 4 de vergelijkingssonderingen uitgevoerd. Van HPT2 en HPT8 zijn de vergelijkingssgrafieken echter niet weergegeven, aangezien hier per HPT sondering slechts 1 MPT meting beschikbaar was. Daarnaast zijn alle metingen gezamenlijk weergegeven, waarbij onderscheid is gemaakt in de per HPT onderscheiden stratigrafische eenheden van de Formatie van Kreftenheije en Sterksel (KRZ2, KRZ3 en STZ1).

In onderstaande tabel zijn de resultaten van deze vergelijking weergegeven:

Tabel 6-1: Correlatiefactoren [1/C] per HPT sondering en per formatie

Uitsnede dataset	MPT richtingscoëfficiënt (1/C)	MPT aantal punten (n)	Den Rooijen richtingscoëfficiënt (1/C)	Den Rooijen aantal punten (n)
HPT1	0,93	5	0,34	5
HPT7	1,37	5	0,37	5
HPT2	0,46	1	0,59	5
HPT8	1,95	1	0,39	5
Alles	1,15	12	0,41	19
KRZ2	0,46	4	0,42	6
KRZ3	1,30	3	0,72	6
STZ1	1,84	5	0,54	8

Indien de resultaten bekeken worden valt op dat de spreiding in de data groot is. In dit geval is gekozen voor een geforceerde trendlijn door de oorsprong. Was deze keuze niet gemaakt, dan had dit bij alle uitsneden uit de dataset op basis van de methode Den Rooijen geleid tot een negatief verband tussen Q/P en K. Bij de MPT methode zou er overal een positief verband zijn gevonden, met uitzondering van HPT1.

De grote spreiding kan verschillende oorzaken hebben:

- Er is aangenomen dat de MPT metingen stationair zijn. In werkelijkheid is dit afhankelijk van de doorlatendheid en bergingseigenschappen.
- De HPT sondering meet de doorlatendheid in de directe omtrek (naar verwachting ordegrootte centimeters) van het injectiepunt. De MPT test en een korrelverdeling bepalen de doorlatendheid over een schaal van decimeters tot meters.
- Uit de metingen bestaat de indruk dat de parameter 1/C varieert tussen de verschillende stratigrafische eenheden. Wellicht kunnen de verschillen verklaart worden door verschillen in afzettingsmilieu binnen een eenheid.

De resultaten volgens de indirecte korrelverdelingsmethode Den Rooijen geven een relatief lage doorlatendheid. Dit komt overeen met de eerdere bevinding dat deze methode mogelijk een onderschatting van de doorlatendheid introduceert, en daarmee een onveilige beoordeling van een kering(sontwerp) kan opleveren.

Op basis van deze resultaten kan als algemene richtlijn de relatie Q/P – K voor het onderzocht gebied de volgende formulering worden aangehouden:

Algemene relatie 
$$k = \frac{1}{c} * \frac{Q}{P} = 1,15 * \frac{Q}{P}$$

Met

P= waterdruk in kPa

Q = injectiedebiet in ml/min

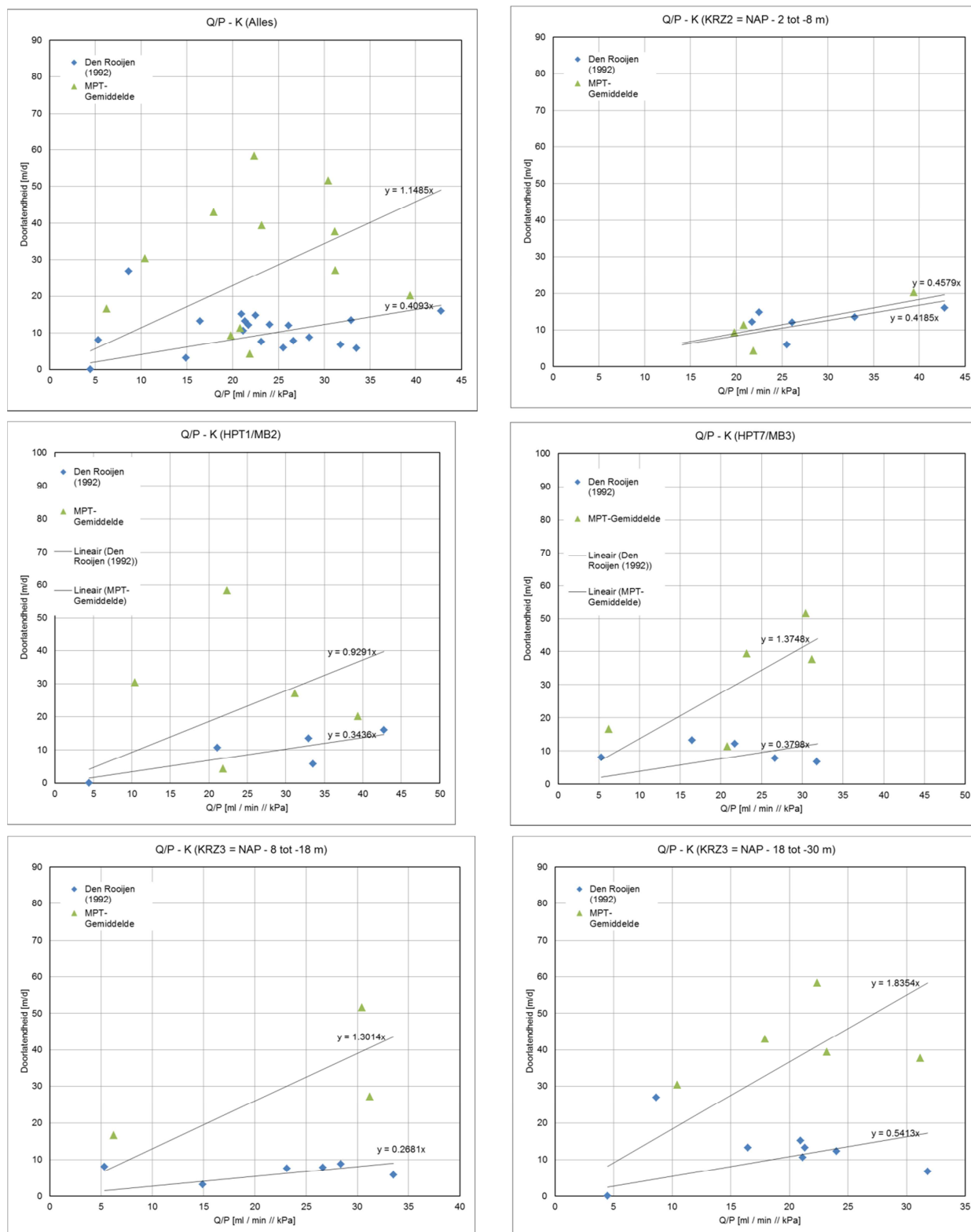
k = doorlatendheid in m/d

Aanbevolen wordt echter om onderscheid te maken in formaties.

Voor deze relatie is uitgegaan van de gemiddelde doorlatendheid uit de 3 MPT testen die per testdiepte zijn uitgevoerd. In figuur 6-7 tot en met figuur 6-10 is op basis van bovenstaande relatie het verloop van de doorlatendheid met de diepte weergegeven voor de HPT sonderingen 1, 2, 7 en 8. Tevens is de relatie uitgewerkt per formatie, op basis van de correlatiefactor per formatie, zoals weergegeven in tabel 6-1. Hierbij wordt opgemerkt dat de Formatie van Sterksel (STZ1 en bovenste deel STZ2) is samengenomen.

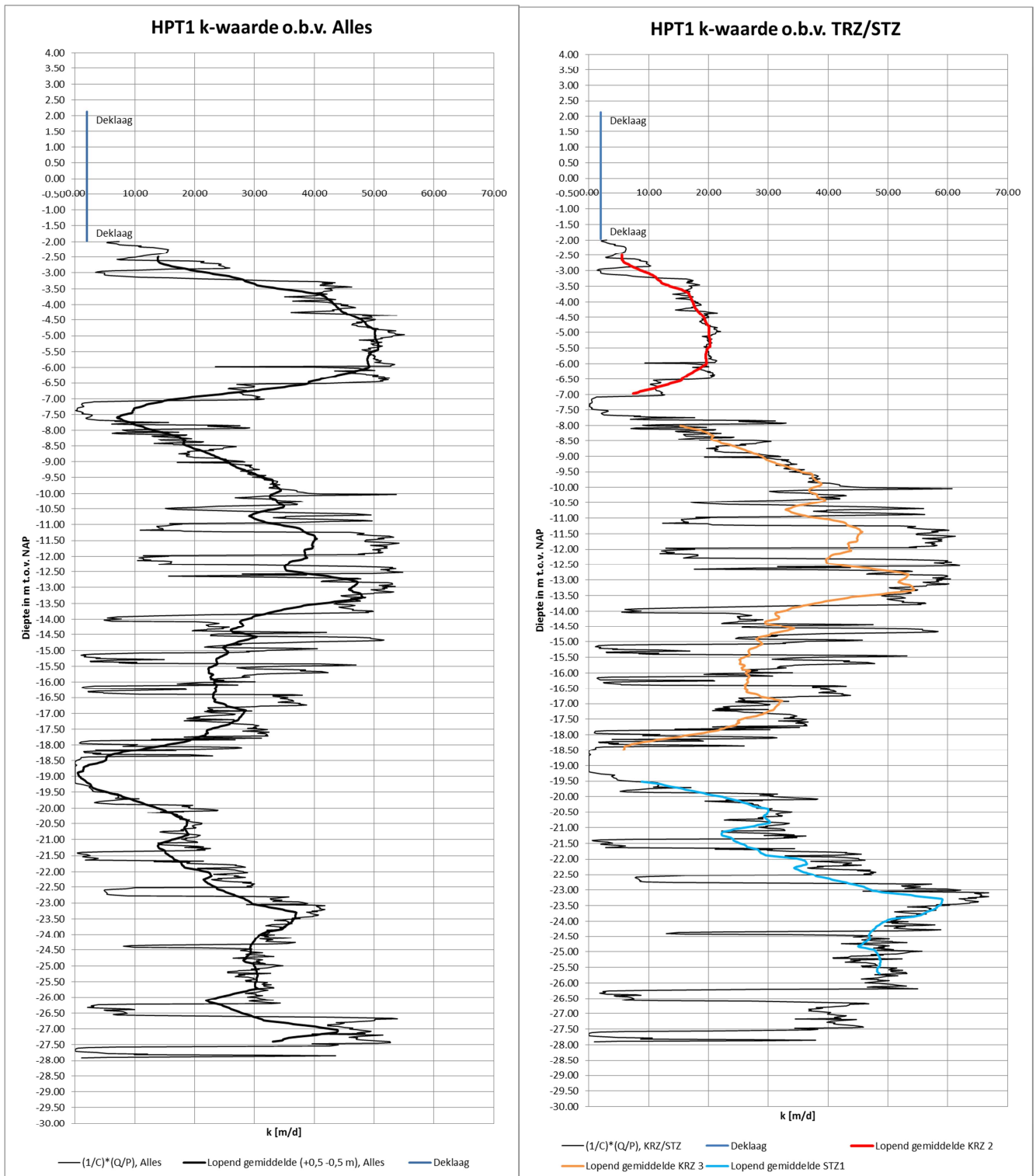
Ten aanzien van nader onderzoek naar de HPT verdient het aanbeveling te kijken naar:

- Vergelijkingsdata van de Q/P – K relatie per afzettingsmilieu. Data in de range van Q/P 10 – 20 ontbreken nog veelal. Deze gegevens kunnen mogelijk worden verkregen door meer onderzoek te verrichten in gebieden met slechter doorlatende zandlagen. Hierbij dient gedacht te worden aan bijvoorbeeld wadzanden en zandbanen, met name in het westen van Nederland. Ook het uitvoeren van pompproeven in deze lagen (mits hydrologisch gescheiden van het pleistoceen pakket) kunnen dit inzicht geven.
- Onderzoek naar eventuele drukverliezen tussen de druksensor en de spuitmond van de HPT.
- Bij toekomstig onderzoek dient gedegen rekening gehouden te worden met stijghoogtevariaties ten aanzien van de correctie voor hydrostatische druk.

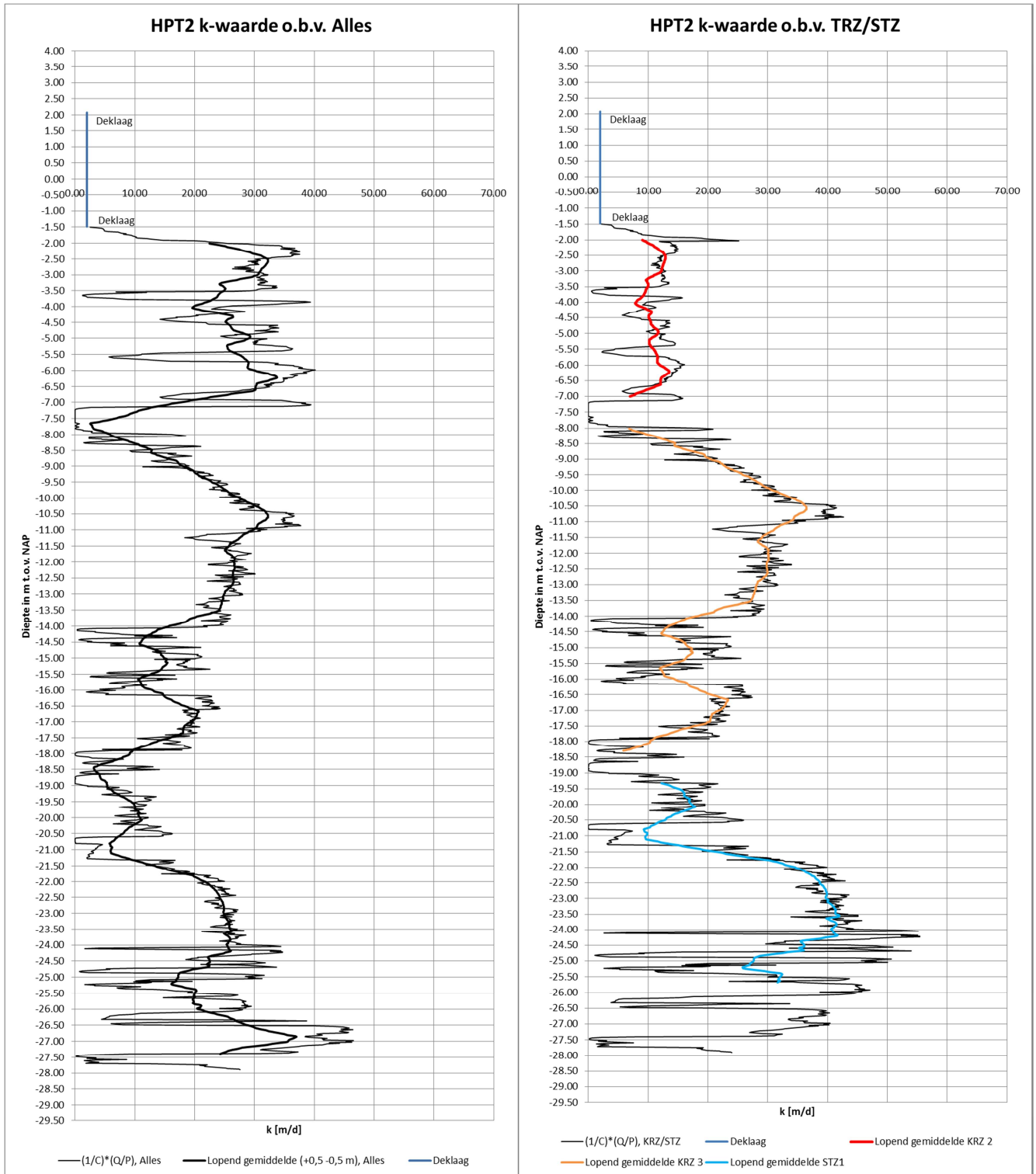


Figuur 6-6: Relatie tussen berekende doortatendheden (MPT-testen en korrelverdelingen (Den Rooijen) en Q/P-relatie op bijbehorende testdieptes.

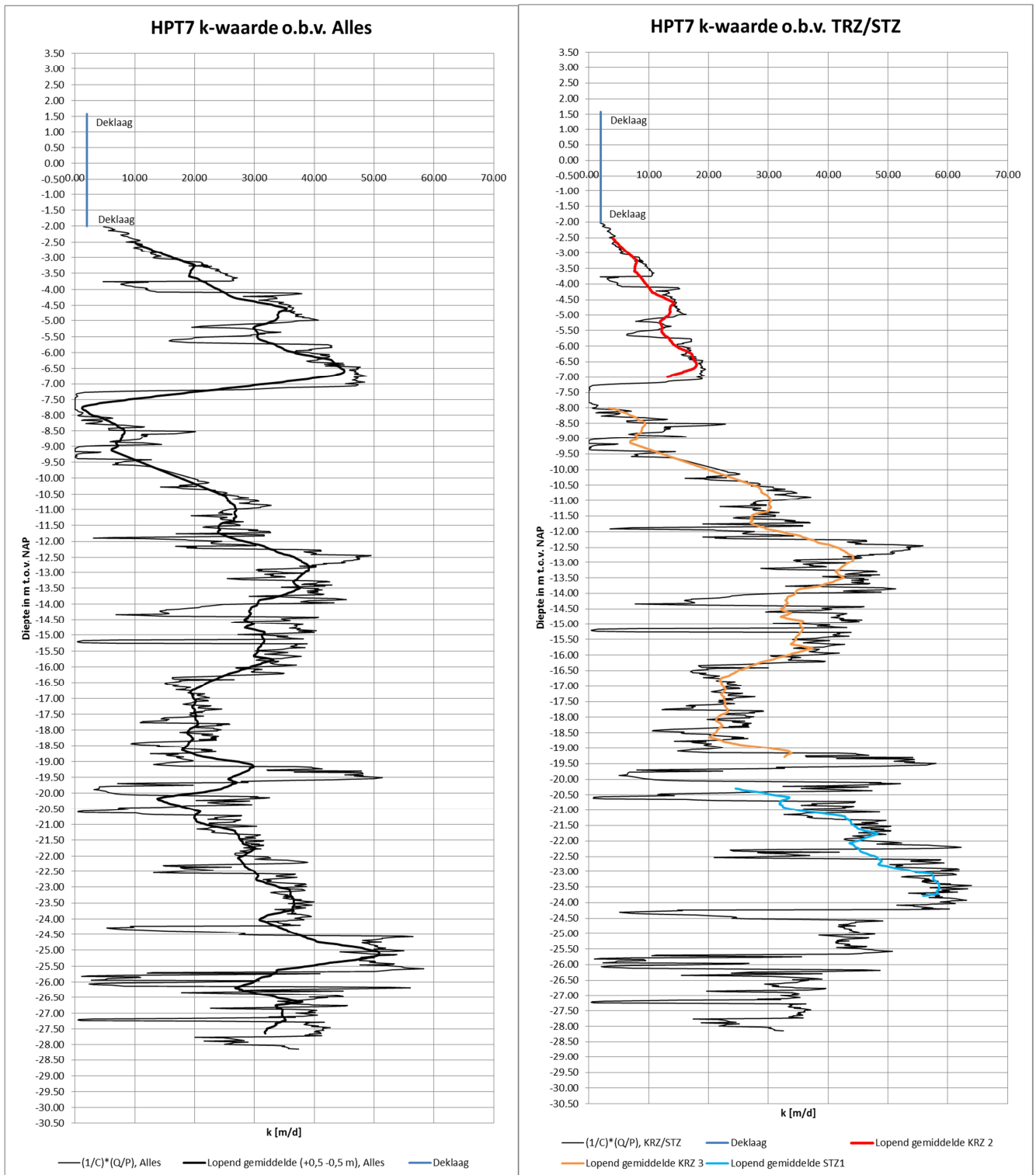




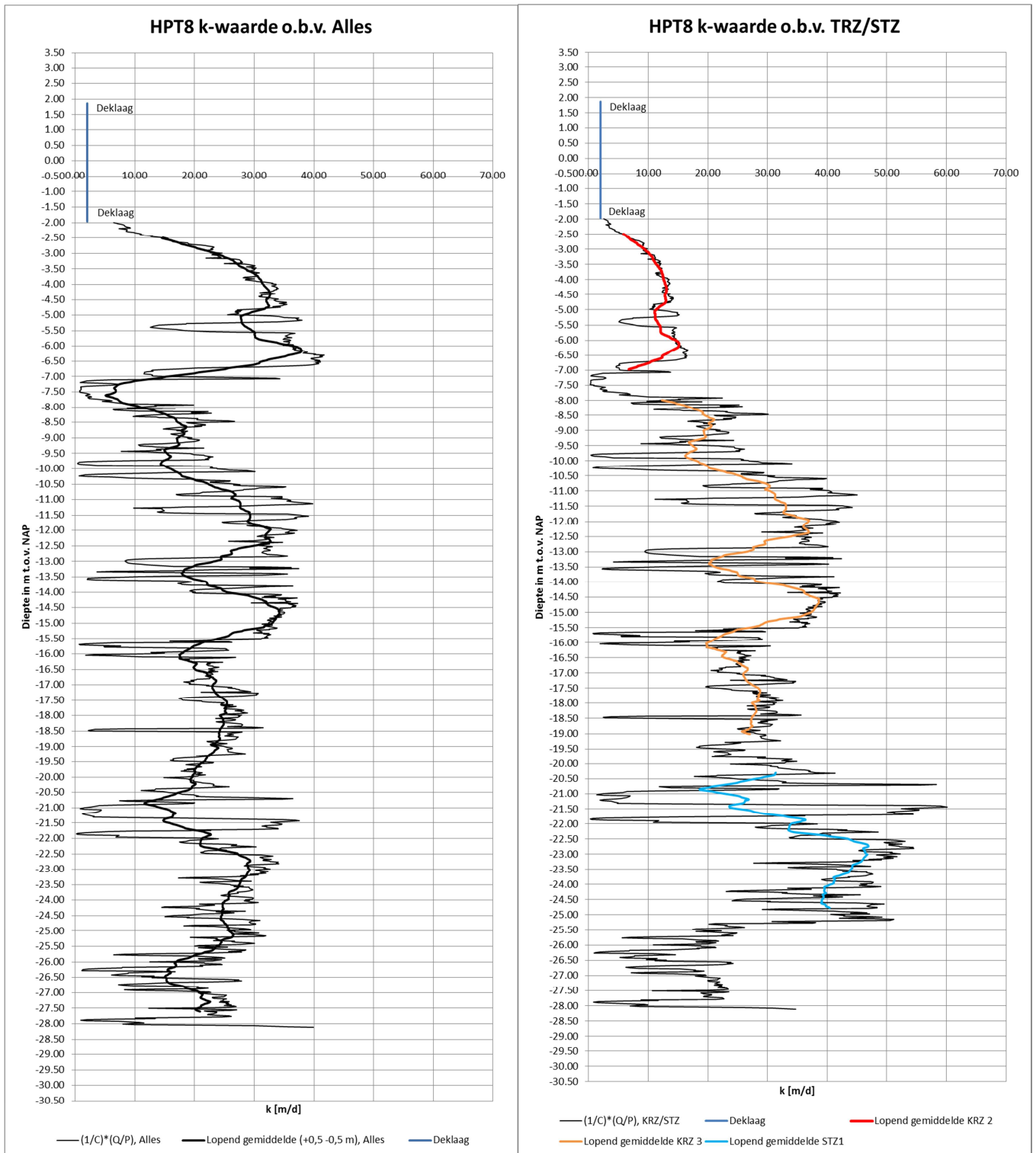
Figuur 6-7 HPT1 k-waarde o.b.v. Alles en TRZ/STZ



Figuur 6-8 HPT2 k-waarde o.b.v. Alles en TRZ/STZ



Figuur 6-9 HPT7 k-waarde o.b.v. Alles en TRZ/STZ



Figuur 6-10 HPT8 k-waarde o.b.v. Alles en TRZ/STZ

## 7. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Hieronder zijn de belangrijkste bevindingen van dit onderzoek puntsgewijs weergegeven. Hierbij wordt onderscheid gemaakt in de bevindingen ten aanzien van de verschillende toegepaste methoden van doorlatendheidsbepaling, en de bevindingen ten aanzien van gebruik van de HPT sondeertechniek. Tevens worden aanbevelingen gedaan voor nader onderzoek en toepassing van de techniek bij dijkonderzoek.

### 7.1. Bevindingen directe en indirecte doorlatendheidsmetingen

Er is onderscheid gemaakt tussen directe doorlatendheidsmetingen (labtest, dissipatietesten, slugtesten, innovatieve MPT testen, putproeven) en indirecte methoden (hoofdzakelijk korrelverdelingsmethoden). In de vergelijking van de data zijn de verwachte doorlatendheden uit REGIS als vergelijkingswaarde aangehouden. In het algemeen valt het volgende op:

- Indirecte testen zijn niet in staat de op basis van REGIS verwachte variatie in doorlatendheid te reproduceren. Directe testen voldoen hierbij over de hele linie gezien beter.
- Directe testen zijn echter erg gevoelig voor schaalafhankelijkheid: met name relatief grootschalige testen geven een beeld overeenkomstig met de op basis van de Grondwaterkaart en REGIS verwachte doorlatendheid. Voor dit onderzoek betreft dit de (nieuwe) MPT test en getij respons analyses. Verdere testen die in aanmerkingen komen, maar hier niet zijn uitgevoerd, zijn putproeven, pompproeven en tracertesten.
- Indirecte testen (m.n. korrelverdelingsmethoden) liggen qua berekende doorlatendheid beter in de buurt van de verwachte doorlatendheden dan de kleinschalige directe testen, maar minder dan de MPT test.

Op basis van deze bevindingen wordt aanbevolen doorlatendheden die bepaald zijn op basis van korrelverdelingen en veldproeven beide met de nodige zorgvuldigheid te gebruiken. Bij veldproeven dient men erop bedacht te zijn dat de doorlatendheid sterk afhankelijk is van de testschaal. Grootschaliger proeven (innovatieve MPT test, put & pompproeven) verdienen de voorkeur.

Ten aanzien van gebruik van korrelverdelingsmethoden wordt aanbevolen deze te vergelijken met informatie van nabijgelegen pompproeven (bv Grondwaterkaart) en eventueel gegevens uit REGIS. Indien een van deze hoger uitvalt verdient die waarde wellicht de voorkeur boven de resultaten uit de korrelverdelingsmethode.

Nader onderzoek zou zich met name kunnen richten op de schaalverschillen tussen verschillende testen. Indien hier een betrouwbaar verband tussen gevonden kan worden kunnen goedkoper, kleinschalige, testen wellicht worden gebruikt om een betrouwbare inschatting van de (bulk)doorlatendheid te verkrijgen.

### 7.2. Bevindingen HPT sondeertechniek

De HPT sondeertechniek geeft een relatieve meting van de doorlatendheid. Het omzetten van deze meting naar een absolute doorlatendheid biedt inzicht in de bodemopbouw van een gebied. In dit onderzoek is voorgesteld een lineaire relatie aan te houden voor de Q/P – K relatie, in de vorm van.

$$k = \frac{1}{C} * \frac{Q}{P}$$

Voor specifiek deze projectlocatie is nagegaan welke waarde de constant  $1/C$  heeft. Voor deze locatie wordt aanbevolen uit te gaan van

$$k = \frac{1}{C} * \frac{Q}{P} = 1,15 * \frac{Q}{P}$$

Met

P= waterdruk in kPa

Q = injectiedebiet in ml/min

k = doorlatendheid in m/d

Voor deze relaties is uitgegaan van de gemiddelde doorlatendheid uit de 3 MPT testen die per testdiepte zijn uitgevoerd.

Opgemerkt wordt dat de waarde  $1/C$  per formatie en per locatie kan variëren, en aanbevolen wordt daarom een HPT sondering altijd te verifiëren met MPT testen of pompproeven.

Ten aanzien van nader onderzoek naar de HPT verdient het aanbeveling te kijken naar:

- Vergelijkingsdata van de Q/P – K relatie per afzettingsmilieu. Data in de range van Q/P 10 – 20 ontbreken nog veelal. Deze gegevens kunnen mogelijk worden verkregen door meer onderzoek te verrichten in gebieden met slechter doorlatende zandlagen. Hierbij dient gedacht te worden aan bijvoorbeeld wadzanden en zandbanen, met name in het westen van Nederland. Ook het uitvoeren van pompproeven in deze lagen (mits hydrologisch gescheiden van het pleistoceen pakket) kunnen dit inzicht geven.
- Onderzoek naar eventuele drukverliezen tussen de druksensor en de spuitmond van de HPT.
- Bij toekomstig onderzoek dient gedegen rekening gehouden te worden met stijghoogtevariaties ten aanzien van de correctie voor hydrostatische druk.

## LITERATUUR

- Boukes, H. (2007). *Het uitwerken van een pompproef die nooit is uitgevoerd*. Stromingen, 3 (13).
- Burger, S., Duizendstra, O., & Jolink, H. (2011). *Doorlatendheidsonderzoek voor infiltratie en drainage C2510*. Stichting Rioned, Leidraad Riolerings.
- Butler, J. J., & Healey, J. M. (1998). *Relationship Between Pumping-Test and Slug-Test Parameters: Scale Effect or Artifact?* Groundwater, 36.
- Calle, E. (1999). *Technisch rapport zandmeevoerende wellen*. Delft: Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen.
- Carrier III, W. D. (2003). *Goodbye, Hazen; Hello, Kozeny-Carman*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 129: 1054–1056.
- Förster, U., Calle, E. O., van der Ham, G. A., & Kruse, G. A. (2012). *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen*.
- Hoefsloot, F. (2014). *HPT-Cone*. Interne memo: Fugro.
- Hvorslev, M. J. (1951). *Time Lag and Soil Permeability in Ground-Water Observations*. Vicksburg, Mississippi: Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, U.S. Army.
- Janssen, G. J. (2003). *Bemaling van bouwputten*. Stichting bouwresearch 190.
- Leeuwdront, W. J. (2015). *Invloed bepaling k-waarde op piping-toets (In preperation)*. Nieuwegein: Fugro (intern).
- McCall, W., & Christy, T. (2010). *Development of hydraulic conductivity estimate for the hydraulic profiling tool*.
- Parez, L., & Fauriel, R. (1988). *Le piézocône. Améliorations apportées à la reconnaissance des sols*. Revue Française Géotechnique 44: 13-27.
- Rosas, J., Lopez, O., Missimer, T. M., Coulibaly, K. M., Dehwah, A. H., Sesler, K., . . . Mantilla, D. (2014). *Determination of Hydraulic Conductivity from Grain-Size Distribution for Different Despositional Environments*. Groundwater 52: 399-413.
- Schulze-Makuch, D., Carlson, D. A., Cherkauer, D. S., & Malik, P. (1999). *Scale Dependency of Hydraulic Conductivity in Heterogeneous Media*. Groundwater, 37: 904–919.
- Seelheim, F. (1880). *Methoden zur Bestimmung der Durchlässigkeit des Bodens*. Zeitschrift für Analytische Chemie 19: 387-418.
- Snacken, B. I. (2014). *Results - HPT Training Febraury 18th - 20th 2014, J0500-613*. Fugro (intern).
- Sun, H., & Koch, M. (2014). *Under- versus Overestimation of Aquifer Hydraulic Conductivity from Slug Tests*. Bundesanstalt für Wasserbau.
- Uijtewaal, F. (1999). *Fase 2 en 3 onderzoek Maasdijken Deel I: Toetsing bestaande toestand van de dijkvakken tussen dp 910,5 en 1004 Heusden-oost en west*. Delft: Grondmechanica Delft.
- van Baars, S., & van de Graaf, H. (2007). *Determination of Organic Soil Permeability Using The Piezocone Dissipation Test*. Environmental & Engineering GeoSciences.
- van Goor, G. R., & Vossenaar, E. H. (2015). *Resultaten dataverzameling*. Nieuwegein: Fugro.
- Vernes, R. W., & van Doorn, H. M. (2005). *Van Gidslaag naar Hydrogeologische Eenheid Toelichting op de totstandkoming van de dataset REGIS II*. Utrecht: Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO.