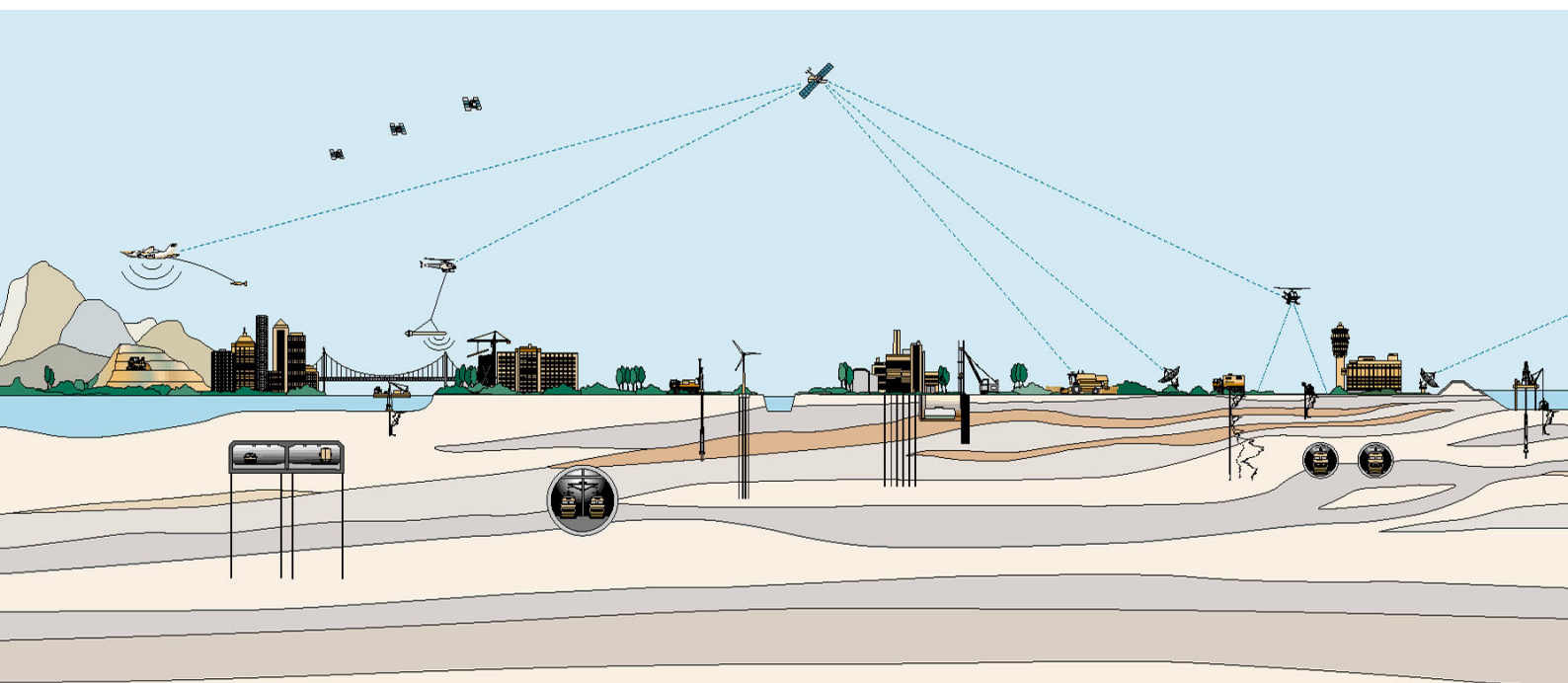


RAPPORT  
betreffende

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

**INVLOED BEPALING K-WAARDE OP  
PIPING-TOETS**



RAPPORT  
betreffende

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

**INVLOED BEPALING K-WAARDE OP  
PIPING-TOETS**

Opdrachtnummer: 1213-0101-000

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

Projectleider : drs. B.M. Berbee  
Senior Projectleider

Opgesteld door : ir. W.J. Leeuwdront  
Adviseur Waterbouw

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.R02v1

<u>INHOUDSOPGAVE</u>	<u>Blz.</u>
1. INLEIDING	1
1.1. Projectbeschrijving	1
1.2. Gehanteerde literatuur	1
1.3. Beschikbare informatie	1
2. UITGANGSPUNTEN	3
2.1. Onderzoeksmethode	3
2.2. Locatie uitgevoerd grondonderzoek	4
2.3. Geometrie	6
2.4. Aanwezige kwelweglengte	7
2.5. Hydraulische randvoorwaarden	7
2.6. Dikte van de deklaag	7
2.7. Dikte watervoerend pakket	8
2.8. Bepaling doorlatendheid (k-waarde)	9
2.9. Bepaling $d_{70}$	11
2.10. Peilbuismetingen	12
2.11. Normering en veiligheidsfactoren	13
2.11.1. Veiligheidsfactor huidige rekenregel Sellmeijer (huidige normering)	13
2.11.2. Veiligheidsfactor nieuwe rekenregel Sellmeijer (huidige normering)	13
2.11.3. Nieuwe normering	14
3. HYDROLOGISCH MODEL	15
3.1. Randvoorwaarden model	15
3.2. Grondeigenschappen	16
3.3. Resultaten Plaxflow	16
4. BEOORDELING PIPING	18
4.1. Stap 1: eenvoudige toets	18
4.2. Stap 2: gehanteerde ontwerpmethod	20
4.3. Stap 3: gedetailleerde toetsing Piping en Heave	20
5. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	23

## 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. De doorlatendheid van de ondergrond is namelijk een belangrijke parameter in de rekenregels waarmee de veiligheid van dijken ten aanzien van het mechanisme piping wordt beoordeeld. Naast de meer gevestigde methoden om de doorlatendheid te bepalen, zoals slugtesten en correlaties op basis van korrelverdelingen, is de innovatie HPT-sondeertechniek ingezet. De HPT-sonderingen zijn uitgevoerd in combinatie met mini-pompproeven (Mini Pumping Tests: MPT's) op basis waarvan de doorlatendheid van de ondergrond is bepaald.

De doorlatendheid die wordt gevonden verschilt per toegepaste techniek en uitwerkingsmethode. Een vergelijking tussen de resultaten van de verschillende methoden is binnen dit project opgenomen in een separate rapportage: "Analyse vergelijking doorlatendheidsmetingen en HPT sonderingen" [Fugro, 2015b].

In dit rapport is de invloed van de verschillende doorlatendheidsbepalingen op het veiligheidsoordeel ten aanzien van piping uitgewerkt.

Het onderzoek heeft zich gericht op een deel van de primaire waterkering ten zuiden van de Bergsche Maas, gelegen tussen Heesbeen en Doeveren tussen dijkpaal A970 en A976. De waterkering is in beheer bij Waterschap Aa en Maas en vormt onderdeel van dijkkring 36. In de voorgaande toetsrondes is de veiligheid ten aanzien van piping als voldoende/goed beoordeeld terwijl in de consequentie-analyse (o.a. nieuwe rekenregel Sellmeijer) het traject als pipinggevoelig is aangemerkt met benodigde berm lengtes van 50 - 100 m. Ook zijn er door omwonenden wellen waargenomen in het achterland. Reden om dit traject onder de loep te nemen.

### 1.1. Projectbeschrijving

In het najaar van 2014 heeft op de projectlocatie grondonderzoek plaatsgevonden. Dit onderzoek bestond uit waterspanningssonderingen, HPT-sonderingen, mechanische boringen inclusief monsternamen, het uitvoeren van handboringen en het plaatsen en monitoren van peilbuizen. Tevens zijn er een aantal laboratoriumproeven uitgevoerd. Voor een beschrijving van het uitgevoerde onderzoek en een meer uitgebreide beschrijving van de projectlocatie wordt verwezen naar [Fugro, 2015].

### 1.2. Gehanteerde literatuur

De volgende literatuur heeft als basis gediend voor de analyses beschreven in dit rapport:

[TRZW, 1999]	Technisch Rapport Zandmeevoerende wellen, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), maart 1999.
[ORZW, 2012]	Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen, Rijkswaterstaat Ministerie van Infrastructuur en Milieu, maart 2012.
[TRGS, 2012]	Technisch Rapport Grondmechanisch schematiseren bij dijken, Expertisenetwerk waterveiligheid (ENW), oktober 2012.

### 1.3. Beschikbare informatie

Van de volgende informatie is gebruik gemaakt:

[Fugro, 2015]	Resultaten dataverzameling, Kenmerk: 1213-0101-000.R01v2 d.d. 5 januari 2015.
---------------	---

- [Fugro, 2015b] Analyse vergelijking doorlatendheidsmetingen en HPT sonderingen. Kenmerk: 1213-0101-000.R04 d.d. 5 juni 2015
- [Maaskant, 1999] Fase 2 en fase 3 onderzoek Maasdijken, Deel I: toetsing bestaande toestand van de dijkvakken tussen dp 910,5 en 1004 Heusden-oost en west, uitgevoerd door Grondmechanica Delft, opdrachtgever waterschap de Maaskant, afdeling waterkeringen, januari 1999.
- [Aa en Maas, 2005] Toetsing Maasbandijken, dijkkring 36, uitgevoerd door Grontmij, opdrachtgever Aa en Maas, 16 september 2005.
- [Aa en Maas, 2010] Veiligheidstoetsing dijkkring 36 – land van Heusden / De Maaskant 3<sup>e</sup> toetsronde (2006-2011), conform VTV2006, uitgevoerd door DHV, opdrachtgever Aa en Maas, juni 2010.

In [Maaskant, 1999], [Aa en Maas, 2005] en [Aa en Maas, 2010] zijn respectievelijk de resultaten van de 1<sup>e</sup>, 2<sup>e</sup> en 3<sup>e</sup> toetsronde van het onderzoekstraject langs de Bergsche Maas opgenomen. Tijdens de 2<sup>e</sup> en de 3<sup>e</sup> toetsronde is alleen een eindoordeel gegeven, het traject kreeg het oordeel 'GOED' voor het faalmechanisme piping. Voor de gegevens en uitgevoerde analyses verwijst de 3<sup>e</sup> toetsronde naar de 2<sup>e</sup> toetsronde, de 2<sup>e</sup> toetsronde verwijst naar de berekeningen die tijdens de 1<sup>e</sup> toetsronde zijn uitgevoerd. In de 1<sup>e</sup> toetsronde is het traject voldoende beoordeeld met betrekking tot piping. Hierbij is de benodigde kwelweglengte berekend met de formule van Sellmeijer. In hoofdstuk 2 is aangegeven welke informatie is gebruikt in de 1<sup>e</sup> toetsronde.

In oktober 2014, tijdens het uitvoeren van het veldonderzoek voor dit project, kwam tijdens een gesprek met bewoners naar voren dat tijdens hoog water regelmatig wellen optreden in het achterland. Deze wellen ontstaan op de locatie van een voormalige boomgaard (ca. 500 m oostelijk van de projectlocatie, binnendijs van de teensloot).

## 2. UITGANGSPUNTEN

De onderzoeksmethode en de uitgangspunten met betrekking tot de toets op piping zijn beschreven in navolgend hoofdstuk.

### 2.1. Onderzoeksmethode

Om een dijk gedetailleerd te kunnen toetsen op piping is de volgende informatie benodigd:

- geometrie (intredepunt en uittredepunt van kwelweg);
- bodemopbouw (dikte eventuele deklaag en dikte zandlaag);
- het verval over de waterkering;
- de doorlatendheid (k-waarde) van de pipinggevoelige zandlagen;
- de korreldiameter ( $d_{70}$ ).

De doorlatendheid van het zandpakket is vaak niet eenvoudig te bepalen. In de praktijk wordt de doorlatendheid veelal bepaald aan de hand van bestaande geohydrologische informatie (REGIS, Regionaal Geohydrologisch Informatiesysteem) of op basis van empirische relaties met korrelverdelingen. In-situ testen, zoals slugtesten en dissipatietesten, worden minder vaak toegepast maar zijn ook onderdeel van de methoden en technieken die de adviseur tot zijn beschikking heeft. Doorlatendheidsmetingen in het laboratorium op gestoken ongeroerde monsters komen sporadisch voor, dit mede vanwege de hoge kosten en risico's ten aanzien van eventuele monsterverstoring, representativiteit van het beperkte monstervolume en het feit dat enkel de doorlatendheid in verticale richting wordt bepaald.

Er zijn dus verschillende technieken voor het bepalen van de doorlatendheid en ook zijn er verschillende uitwerkingsmethoden (formules) om op basis van de verrichtte metingen de doorlatendheid te berekenen. In dit onderzoek zijn de volgende technieken en uitwerkingsmethoden meegenomen bij het bepalen van het effect op de piping-beoordeling:

Tabel 2-1: Technieken en methoden doorlatendheidsbepalingen

Techniek / test	In-situ	Uitwerkingsmethode
1. Mini Pumping Test (MPT) bij HPT-sonderingen	x	- Fugro
2. Correlaties o.b.v. korrelverdelingen		- Hazen - Den Rooijen (1992) - Carman (1956; Kozeny-Carman)
3. Dissipatietesten tijdens sonderen	x	- Van Baars en van de Graaf - Perez en Fauriel
4. Doorlatendheidsbepaling op ongeroerde monsters in laboratorium		- Falling Head
5. Slugtesten in boorgaten en op peilbuizen	x	- Hvorslev - Bouwer & Rice (3 <sup>e</sup> lijn) - Bouwer & Rice (1 <sup>e</sup> lijn)
6. Doorlatendheidsbepaling o.b.v. geohydrologische modellering		- Plaxflow modellering op basis van fit aan peilbuisdata
7. Op basis bestaande REGIS (bestaande database)		(-)

In dit onderzoek zijn de geometrie, de bodemopbouw, het verval over de waterkering en de korrelverdeling constant genomen. De doorlatendheid is als enige parameter gevarieerd om zo het effect op de piping-toets inzichtelijk te maken.

De toets op piping is uitgevoerd met de vigerende rekenregel van Sellmeijer [TRZW, 1999] en de nieuwe rekenregel van Sellmeijer [ORZW, 2012]. De benodigde parameters voor

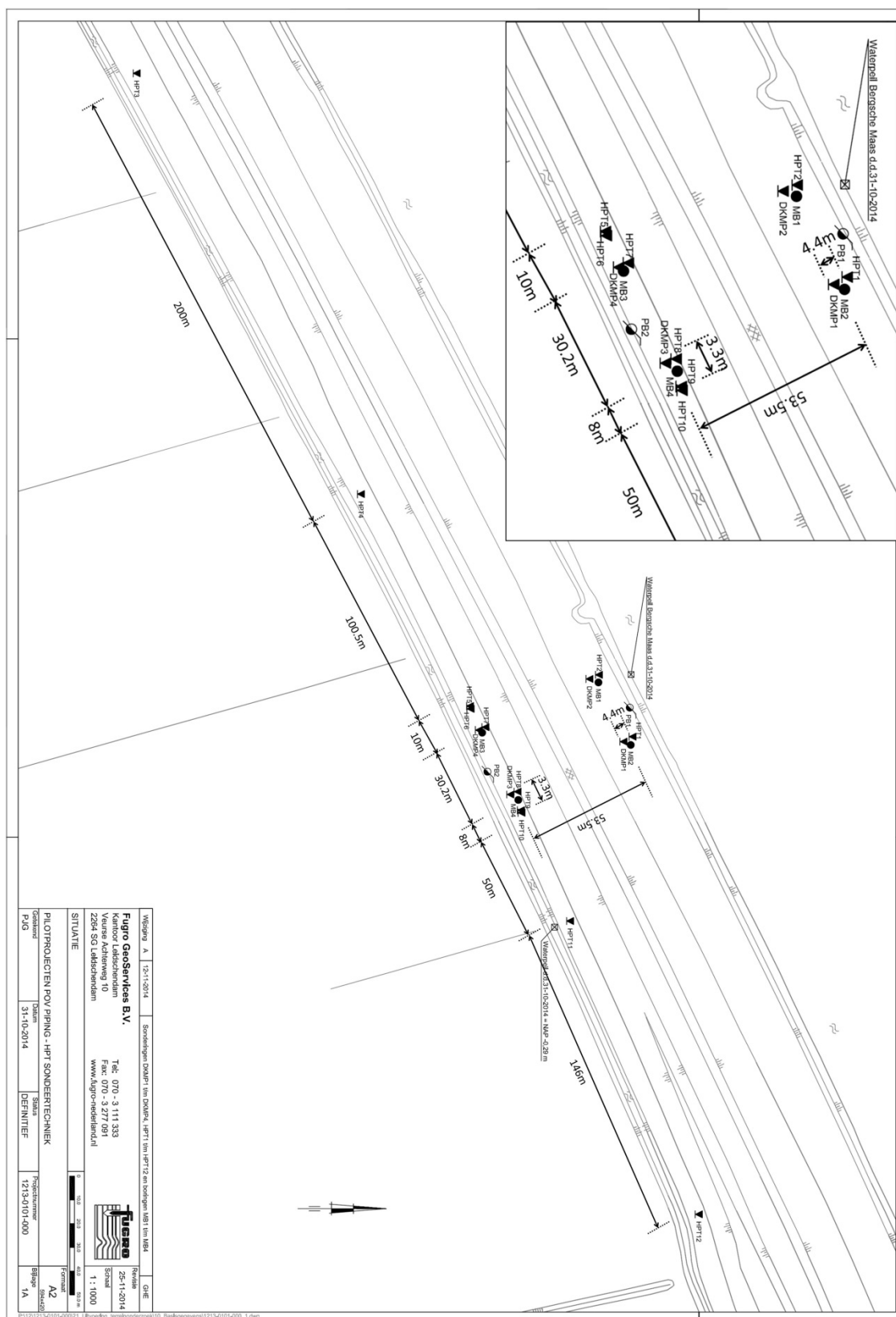
beide methoden van toetsen zijn hetzelfde, alleen de rekenregel is verschillend. De nieuwe rekenregel van Sellmeijer berekend over het algemeen grotere benodigde kwelweglengtes.

In de 1<sup>e</sup>, 2<sup>e</sup> en 3<sup>e</sup> toetsronde is de onderzoekslocatie ook beoordeeld op piping. De methoden en data die destijds zijn gebruikt zijn vergeleken met de resultaten die volgen uit het onderhavige onderzoek. Op deze wijze kunnen de resultaten vanuit de eerder uitgevoerde toetsingen worden geverifieerd aan de hand van het nieuwe onderzoek.

De resultaten van dit onderzoek geven daarmee zowel inzicht in de invloed van de bepaling van de k-waarde op de piping-toets, als inzicht in de invloed van huidige en nieuwe rekenregel van Sellmeijer, als inzicht in de verschillen ten opzichte van de eerder uitgevoerde toetsingen.

## **2.2. Locatie uitgevoerd grondonderzoek**

In figuur 2-1 is de locatie van het uitgevoerde grondonderzoek weergegeven.



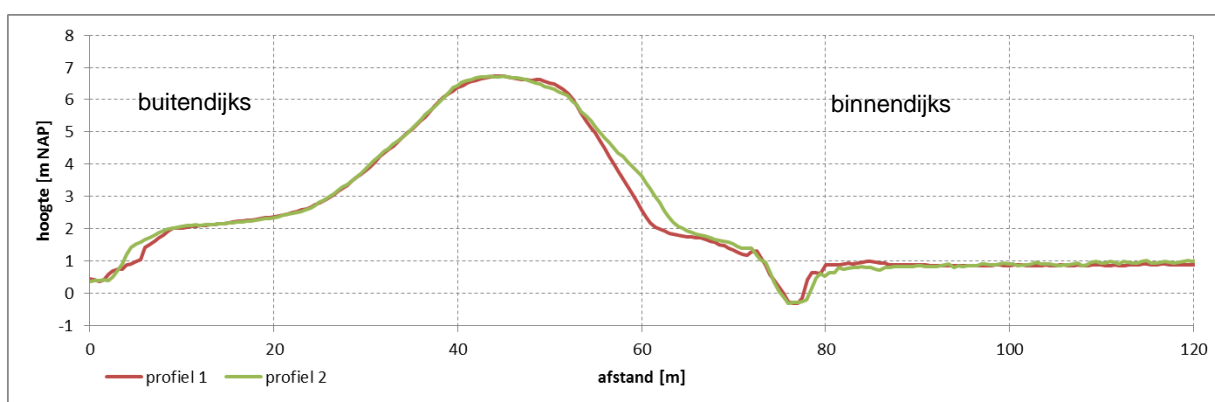
Figuur 2-1: Locatie uitgevoerd grondonderzoek



### 2.3. Geometrie

De geometrie van de waterkering is gebaseerd op het AHN2 (jaar opname: 2011). Het AHN2 geeft de bodemhoogte weer in een raster van 0,5x0,5 m.

In figuur 2-2 zijn twee dwarsprofielen van de dijk ter plaatse van de projectlocatie weergegeven. De locatie van de dwarsprofielen is weergegeven in figuur 2-3. De geometrie van het onderwatertalud ter plaatse van de Bergsche Maas is niet weergegeven, omdat hiervan geen betrouwbare informatie uit het AHN kan worden verkregen. De geometrie van de teensloot volgens het AHN komt nagenoeg overeen met die uit de legger van het waterschap, zie tabel 2-2. In de analyses wordt uitgegaan van de leggerdiepte omdat deze maatgevend is en het AHN beperkt nauwkeurig is ten aanzien van hoogtedata onder oppervlakte wateren.



Figuur 2-2: Dwarsprofiel dijk (bron: AHN2)



Figuur 2-3: Locatie dwarsprofielen inclusief dijkpaalnummers

Tabel 2-2: Geometrie teensloot op basis van legger Waterschap Aa en Maas

ID	Bodembreedte [m]	Bodemhoogte [m NAP]	Insteekhoogte links (achterland) [m NAP]	Insteekhoogte rechts (berm) [m NAP]
1181880 / 1181890	0,7 – 0,8	-0,6 tot -0,9	0,6 tot 0,7	1,3 tot 1,5

## 2.4. Aanwezige kwelweglengte

De aanwezige kwelweglengte is gelijk verondersteld aan 77 m. De kwelweglengte is de afstand tussen het intredepunt en het uitredepunt van een eventuele pijp. Aangenomen is dat het uitredepunt in de sloot zal liggen. Door de geringe dikte van de deklaag zal de deklaag hier als eerste opbarsten.

Het intredepunt ligt waarschijnlijk ter plaatse van het onderwatertalud van de Bergsche Maas. Het is echter niet precies bekend hoe het onderwatertalud van de Bergsche Maas verloopt en tot waar de deklaag aanwezig is. Als intredepunt is het snijpunt van het gemiddelde waterpeil met het talud gehanteerd. Dit is het meest linkerpunt in figuur 2-2.

Tijdens de eerste toetsronde is een aanwezige kwelweglengte van 60 m gehanteerd. Hoogstwaarschijnlijk is hiervoor een ander (maatgevend) profiel gekozen die representatief is gesteld voor een groter dijktraject.

## 2.5. Hydraulische randvoorwaarden

Het Maatgevend Hoog Water (MHW) is bepaald op basis van de Hydraulische Randvoorwaarden 2006 (HR2006). Locatie Doeveren is gehanteerd. Het MHW op deze locatie bedraagt NAP +4,9 m.

Het polderpeil is bepaald op basis van het peilbesluit Koningsvliet. De peilen bedragen:

- zomerpeil: NAP -0,25 m;
- winterpeil: NAP -0,5 m.

Het slootpeil is gemeten tijdens het uitgevoerde grondonderzoek (zie figuur 2-1). Op 31 november 2014 bedroeg het slootpeil NAP -0,29 m, wat hoger is dan het winterpeil. Mede uit conservatief oogpunt is uitgegaan van het winterpeil van NAP -0,5 m.

Tijdens maatgevende omstandigheden is het verval ( $\Delta H$ ) over de kering daarmee gelijk aan  $4,9 - -0,5 = 5,4$  m.

Tijdens de eerste toetsronde [Maaskant, 1999] is een slootpeil van NAP +0,7 m gehanteerd, waarbij aangenomen is dat de deklaag opbarst, waardoor het slootpeil gelijk komt te staan aan het maaiveld. Het MHW tijdens de eerste toetsronde bedroeg NAP +5,0 m, waarmee het verval in de eerder uitgevoerde toetsing gelijk is genomen aan 4,3 m.

Bovenstaand gehanteerd slootpeil, zoals gehanteerd tijdens de eerste toetsronde, wordt gezien als een riskante aanname, omdat het slootpeil als gevolg van kwel ca. 1,2 m dient te stijgen en voor een langere tijd aanwezig zal moeten zijn. Mogelijk dat dit zonder aanvullende maatregelen door de beheerder niet reëel is.

## 2.6. Dikte van de deklaag

Uit boringen en sonderingen blijkt dat een deklaag van cohesief materiaal aanwezig is vanaf het maaiveld. Daaronder bevindt zich een zandpakket.

Uit de boringen en sonderingen blijkt dat de deklaag bestaat uit een toplaag van klei, met daaronder een veenlaagje. De onderzijde van de deklaag is bepaald op basis van het grondonderzoek dat ter plaatse van de binnenteen is uitgevoerd. De waarden zijn weergegeven in tabel 2-3.

Het maaiveld in het achterland bevindt zich op een niveau van ca. NAP +1,0 m, zie figuur 2-2. Volgens de AHN-data bevindt de slootbodembodem zich op een diepte van ca. NAP -0,3 m. Uit de legger blijkt dat de onderhoudsdiepte van de sloot NAP -0,9 m bedraagt. Van deze bodemhoogte wordt uitgegaan.

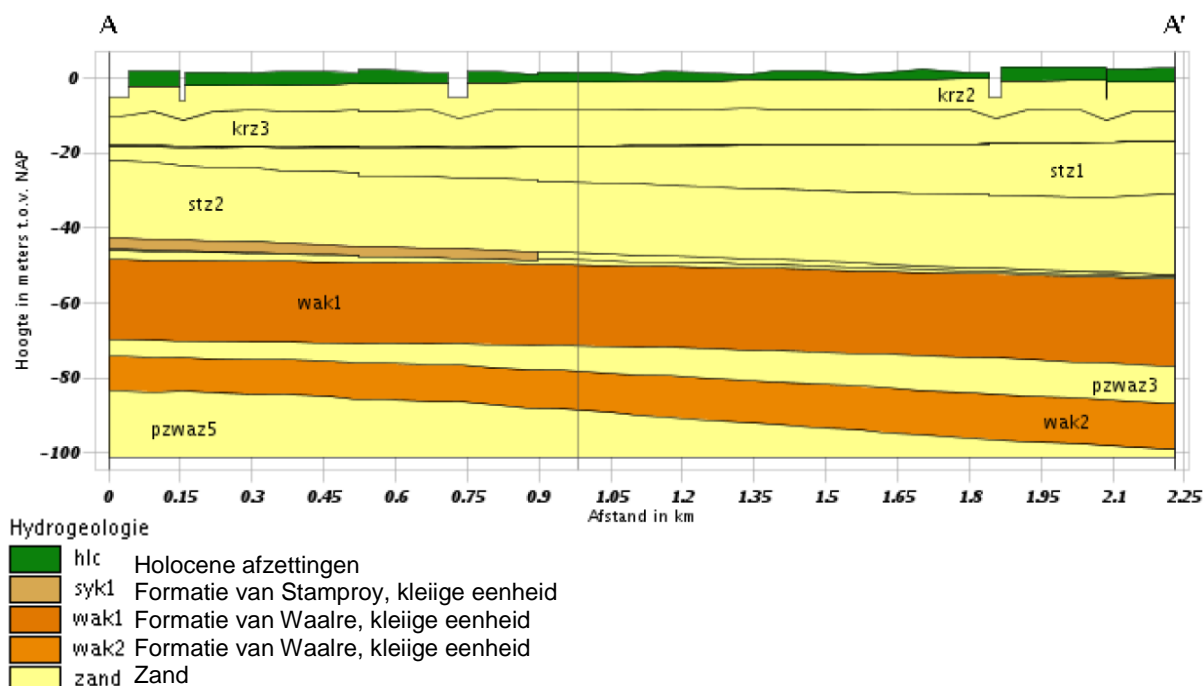
De dikte van de onderzijde van de deklaag tot het maaiveld in het achterland bedraagt hiermee minimaal ca. 2,75 m, zie tabel 2-3. De dikte van de deklaag onder de slootbodembodem bedraagt minimaal ca. 0,85 m (PB2, deze boring ligt ook dicht bij de sloot).

Tabel 2-3: Onderzijde van de deklaag op basis van boringen en sonderingen

Onderzoeks-locatie	Onderzijde kleilaag [m NAP]	Onderzijde veenlaag (onderzijde deklaag) [m NAP]	Dikte deklaag onder maaiveld (mv = NAP +1,0 m) [m]	Dikte deklaag onder sloot (slootbodembodem = NAP -0,9 m) [m]
HPT5	-1,3	-1,8	2,8	0,9
HPT6	-1,3	-1,8	2,8	0,9
HPT7	-1,3	-1,9	2,9	1,0
HPT8	-1,3	-1,9	2,9	1,0
HPT9	-1,0	-1,8	2,8	0,9
HPT10	-1,3	-1,8	2,8	0,9
DKMP3	-1,3	-1,8	2,8	0,9
DKMP4	-1,5	-2,0	3,0	1,1
MB3	-0,7	-2,0	3,0	1,1
MB4	-0,6	-2,0	3,0	1,1
PB2	-0,75	-1,75	<b>2,75</b>	<b>0,85</b>

## 2.7. Dikte watervoerend pakket

Onder de deklaag bevindt zich een watervoerende zandlaag. De dikte van het watervoerend pakket is gelijk genomen aan 50 m. Dit is bepaald op basis van het REGIS-II model, waarvan een doorsnede van de ondergrond is weergegeven in figuur 2-4. Uit de doorsnede is op te maken dat het zandpakket is opgebouwd uit verschillende formaties en op een diepte van ca. NAP -50 m overgaat in een dik kleilig pakket.



Figuur 2-4: Ondergrondmodel REGIS-II

Op basis van het grondonderzoek, en de REGIS-data, blijkt het 50 m dikke zandpakket op verschillende dieptes te worden doorsneden door kleilagen van wisselende diktes. Op basis van de resultaten van de HPT-sonderingen en de mechanische boringen volgt dat op ca. NAP -7,5 m een kleilaag van ongeveer 0,5 m dikte voorkomt. In ongeveer de helft van de boringen en sonderingen wordt ook op NAP -20 m een stoorlaag aangetroffen.

Inzicht in de relatieve doorlatendheid van het zandpakket is verkregen door het uitvoeren van de HPT-sonderingen, zie [Fugro, 2015a]. Op basis van de Q/P-relatie over de diepte van de sondering blijkt dat de bovenste zandlaag (tot ca. NAP -7,5 m) relatief goed doorlatend is. De zandlaag daaronder lijkt op basis van de Q/P-relaties minder goed doorlatend, hier zitten af en toe kleine stoorlaagjes tussen.

De aanwezigheid van stoorlagen op een mogelijke beperking van de effectieve dikte van het watervoerend pakket is niet verder onderzocht. Uit conservatief oogpunt is de dikte van het watervoerend pakket daarom gelijk gehouden aan 50 m. Deze aanname komt overeen met de waarden die zijn gebruikt in de eerder uitgevoerde toetsingen [Maaskant, 1999] en de consequentie-analyse uit 2012 naar de toepassing van de nieuwe rekenregel van Sellmeijer.

De verschillen in doorlatendheid over de dikte van de zandlaag wordt meegenomen doordat de doorlatendheidsbepalingen op verschillende dieptes, tot circa 30 m beneden maaiveld, zijn uitgevoerd.

## 2.8. Bepaling doorlatendheid (k-waarde)

Voor de bepaling van de doorlatendheid zijn verschillende proeven uitgevoerd:

- Minipompproef (HPT), in totaal 51 stuks
- Bepaling korrelverdelingen, 20 stuks
- Dissipatietesten, 8 stuks
- Falling Head test in laboratorium, 20 stuks

- Slugtesten in boorgaten en op peilbuizen, 20 stuks

De locatie van de verschillende proeven is weergegeven in figuur 2-1. Alle proeven zijn uitgevoerd op verschillende dieptes tot ca. 30 m beneden maaiveld.

Op basis van deze proeven is de doorlatendheid op basis van verschillende uitwerkingsmethoden bepaald, zie tabel 2-4. Voor de toets op piping is een hoge karakteristieke waarde van het gemiddelde benodigd. Deze is conform [TRZW, 1999] bepaald en weergegeven in de tabel. Er is uitgegaan van een normale verdeling.

Tabel 2-4: Doorlatendheid op basis van verschillen proeven en uitwerkingsmethoden

Proefmethode	Methode bepaling k-waarde	$k_{gem}^*$ [m/dag]	$\sigma$ (stdev) [m/d]	Aantal proeven [n]	$K_{gem;kar;hoog}^{**}$ [m/dag]
Slugtests	Hvorslev	0,41	0,26	20	0,51
	Bouwer & Rice (3e lijn)	0,31	0,20	20	0,38
	Bouwer & Rice (1e lijn)	2,5	1,66	20	3,1
Labaratoriumtesten	Falling head test	0,023	0,023	20	0,032
Dissipatietesten	Van Baars en van de Graaf	0,00055	0,00059	8	0,00094
	Parez & Fauriel	0,11	0,12	8	0,19
Minipompproef	Fugro	30	19	51	34
korrelverdelingen	A. Hazen	16	8,7	19	19
	Carman (1956; Kozeny - Carman)	1,3	0,45	20	1,5
	Den Rooijen (1992)				7,3***

\* gemiddelde doorlatendheid van het totaal aantal uitgevoerde proeven

\*\* hoge karakteristieke waarde van de gemiddelde doorlatendheid (95% bovengrens, normale verdeling)

\*\*\* voor de formule van Den Rooijen is de karakteristieke waarde bepaald conform [TRZW, 1999] en [ORZW, 2012], zie onderstaand

In [TRZW, 1999] en [ORZW, 2012] wordt aanbevolen om de k-waarde te bepalen op basis van de formule van Den Rooijen. De k-waarde is bepaald op basis van de karakteristieke korreldiameter  $d_{10}$  en de uniformiteit van het zand ( $U = d_{60}/d_{10}$ ). Omdat de lage karakteristieke waarde van de  $d_{70}$  in de formule van Sellmeijer wordt gehanteerd, en de korreldiameters  $d_{10}$ ,  $d_{60}$  en  $d_{70}$  gecorreleerd zijn, hoeft conform [TRZ 1999] en [ORZW, 2012] niet tegelijkertijd met de lage karakteristieke waarde van  $d_{10}$  en een hoge karakteristieke k-waarde te worden gerekend. Het recept hiervoor is opgenomen in [TRZ 1999] en [ORZW, 2012] en in onderstaande formule weergegeven. De formule is uitgewerkt in tabel 2-5.

$$d_{10,kar} = \frac{d_{60,kar,laag}}{U_{kar,hoog}}$$

Tabel 2-5: Bepaling k-waarde volgens Den Rooijen

	Aantal proeven	$d_{60,gem}$ [ $\mu$ m]	$\sigma_{d60}$ (stdev) [ $\mu$ m]	$d_{60,gem;kar;laag}$ [ $\mu$ m]	$U_{gem}$ [-]	$\sigma_U$ (stdev) [-]	$U_{kar;hoog}$ [-]	$d_{10,kar}$ [ $\mu$ m]	$K_{kar}$ [m/d]
Den Rooijen (1992)	19	286	68	259	2,39	0,42	2,56	101	7,3

Daarnaast is de doorlatendheid bepaald op basis van REGIS (Regionaal Geohydrologisch Informatiesysteem), waarin gemiddelde doorlatendheden zijn opgenomen en de standaarddeviatie voor de verschillende zandlagen. Omdat in REGIS niet is aangegeven uit hoeveel waarnemingen de standaarddeviatie is bepaald, is het niet mogelijk om de karakteristieke waarde van het gemiddelde te bepalen. Daarom is uitgegaan van de gemiddelde waarde. Een gewogen gemiddelde is toegepast, wat representatief wordt geacht voor de gehele zandlaag. Dit is weergegeven in tabel 2-6.

Zoals te zien is in de tabel is de doorlatendheid van de bovenste ca. 20 m zand lager dan de doorlatendheid van de onderste ca. 20 m. De grondwaterstroming zal vooral door de bovenste pakketten plaatsvinden. Het hanteren van het gewogen gemiddelde kan daarom mogelijk conservatief zijn. Daarom is ook het gewogen gemiddelde van alleen het Kreyftenheye zandpakket beschouwd. Deze bedraagt 22 m/dag.

Overigens lijkt de doorlatendheid van de eerste zandlaag (tot NAP -8,0 m) op basis van de HPT-sonderingen groter te zijn dan het daaronder gelegen pakket (tot NAP -18,0 m). Dit is niet terug te zien in de doorlatendheden uit REGIS. Tevens is in de HPT-sonderingen niet terug te zien dat de doorlatendheid van het pakket vanaf NAP -18,0 m significant groter is dan de daarboven gelegen pakketten.

Tabel 2-6: K-waarde REGIS

	van [m NAP]	tot [m NAP]	k-gemiddeld [m/dag]	stdev [m/dag]
Kreyftenheye zand 2	0	-8,0	21	11
Kreyftenheye zand 3	-8,0	-17,8	23	13
Sterksel zand 1	-17,8	-29	50	24
Sterksel zand 2	-29	-48	65	23
Gewogen gemiddelde [m/dag]			46	

Ook is de doorlatendheid afgeleid door het opzetten van een geohydrologisch model (Plaxflow) en deze te fitten aan de peilbuismetingen. De resultaten hiervan zijn gepresenteerd in hoofdstuk 3.

Tijdens de eerste toetsronde [Maaskant, 1999] is een doorlatendheid van 21,6 m/dag toegepast. Deze doorlatendheid is hierbij volgens de rapportage gebaseerd op zowel de grondwaterkaart als op korrelverdelingen. In de 2<sup>e</sup> en 3<sup>e</sup> toetsronde zijn de resultaten uit de 1<sup>e</sup> toetsronde overgenomen.

## 2.9. Bepaling $d_{70}$

De parameter  $d_{70}$  bepaald de weerstand van de zandkorrels tegen het erosieproces. Omdat een mogelijke erosiepijp zich alleen langs de onderkant van de cohesieve deklaag kan instellen is deze parameter bepaald op basis van de korrelverdelingen van het zand direct onder de deklaag. De korrelverdelingen die zijn meegenomen in de analyse zijn weergegeven in tabel 2-7. De korrelverdelingsdiagrammen zijn opgenomen in [Fugro, 2015a].

Tabel 2-7: Korreldiameter van zand onder deklaag

boring	monster	Bovenzijde monster [m NAP]	d70 [µm]
MB2	St5	-5,83	400
MB1	St5	-5,8	300
MB3	St4	-3,89	250
MB4	St4	-3,45	210
MB2	St4	-3,43	300
MB1	St4	-3,05	350
<b>d70<sub>;gem</sub></b>			<b>302</b>
<b>d70<sub>;gem;kar</sub>*</b>			<b>246</b>

\* lage karakteristieke waarde van de gemiddelde korreldiameter (95% ondergrens, normale verdeling)

Een kleine korreldiameter is maatgevend voor de toets op piping. Daarom is de karakteristieke lage waarde van het gemiddelde (95% ondergrens, normale verdeling) van de verzameling bepaald conform [TRZW, 1999]. Deze bedraagt  $d_{70;gem;kar;laag} = 246 \mu\text{m}$ . Uitgegaan is van de normale verdeling, omdat de spreiding in de d70 relatief beperkt is, waardoor de resultaten goed overeenkomen met wat verwacht kan worden.

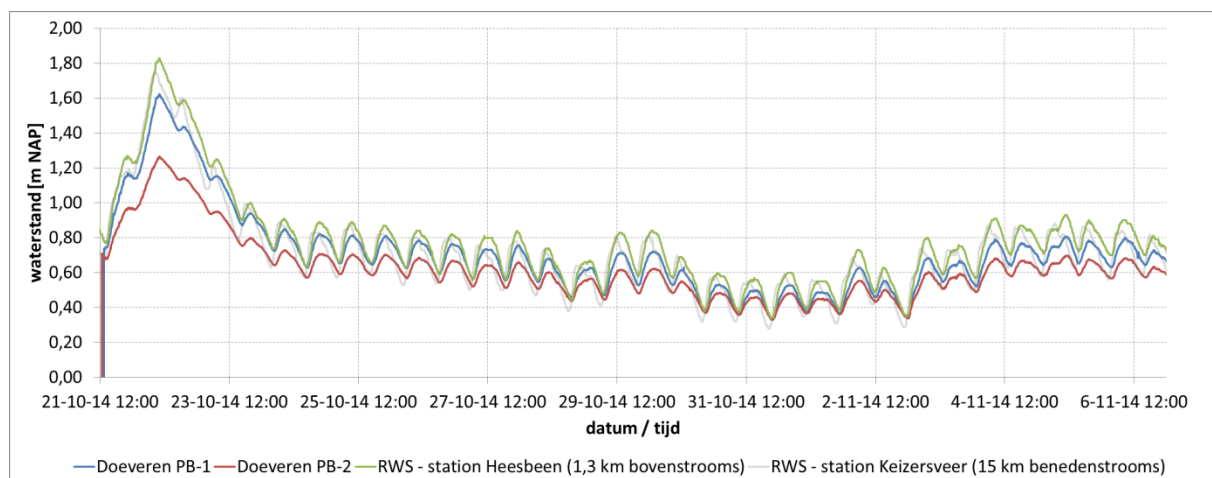
Tijdens de eerste toetsronde [Maaskant, 1999] is een representatieve korreldiameter van  $190 \mu\text{m}$  gehanteerd. Vermeld wordt dat de korrelgrootte is bepaald aan de hand van een zeving van 9 zandmonsters. Het is onbekend waar en op welke diepte deze monsters zijn genomen.

## 2.10. Peilbuismetingen

Op twee locaties zijn peilbuismetingen uitgevoerd, aan de buitenteen (PB1) en aan de binnenteen (PB2) van de dijk, zie voor de exacte locatie van deze peilbuizen figuur 2-1. De peilbuizen zijn in het zandpakket direct onder de deklaag geplaatst en geven dus de stijghoogte aan de bovenzijde van het watervoerende zandpakket weer. De resultaten van de peilbuismetingen zijn weergegeven in figuur 2-5. Tevens is in de figuur de buitenwaterstand gepresenteerd. De data hiervan is afkomstig van Waterbase, waarin de metingen van Rijkswaterstaat zijn opgenomen. Er zijn twee meetstations weergegeven, Heesbeen (1,3 km bovenstreams) en Keizersveer (15 km benedenstreams).

Te zien is dat er een vrij grote respons aanwezig is van de stijghoogte in de zandlaag onder de dijk op de buitenwaterstand in de Bergsche Maas.





Figuur 2-5: Resultaten peilbuismetingen PB1 (buitenteen) en PB2 (binnenteen) en buitenwaterstand (bron: RWS)

## 2.11. Normering en veiligheidsfactoren

De veiligheidsfactoren die toegepast dienen te worden voor de vigerende rekenregel van Sellmeijer en de nieuwe rekenregel van Sellmeijer zijn verschillend. Deze worden in deze paragraaf beschreven.

### 2.11.1. Veiligheidsfactor huidige rekenregel Sellmeijer (huidige normering)

De veiligheidsfactor die conform [TRZW, 1999] gehanteerd dient te worden in de piping-berekening is onafhankelijk van de normfrequentie en bedraagt  $\gamma = 1,2$  (-).

### 2.11.2. Veiligheidsfactor nieuwe rekenregel Sellmeijer (huidige normering)

Bij de nieuwe rekenregel van Sellmeijer bestaat de totale veiligheid uit een schadefactor  $\gamma_n$  en een schematiseringsfactor  $\gamma_b$ . De schadefactor is afhankelijk van de normfrequentie van de dijkkring. De schematiseringsfactor brengt de onzekerheid in de schematisatie in rekening.

Conform [ORZW, 2012] dient de schadefactor  $\gamma_n$  bepaald te worden op basis van de normfrequentie van de dijkkring en de lengte van de dijkkring dat piping-gevoelig is. In de huidige normering bedraagt de normfrequentie 1/1.250 (dijkkring 36). In tabel 7.3 van [ORZW, 2012] zijn de partiële factoren per dijkkring weergegeven, waarbij tevens rekening is gehouden met het gedeelte dat gevoelig is voor piping. Voor dijkkring 36 geldt een partiële factor van  $\gamma_n = 1,36$  (-).

De schematiseringsfactor ( $\gamma_b$ ) is bepaald conform de methode in [TRGS, 2012]. De k-waarde is niet meegenomen in de bepaling van de schematiseringsfactor, omdat de gevoeligheid van de k-waarde voor de piping-berekening de kern vormt van de analyses.

De schematiseringsfactor is bepaald door te onderzoeken wat de invloed van ongunstige (schematisering)scenario's is op de berekende veiligheidsfactoren. De parameters voor de basisschematisatie zijn eerder in dit hoofdstuk beschreven. In de basisschematisatie is voor de doorlatendheid een k-waarde van 25 m/dag toegepast.

De bepaling van de schematiseringsfactor is weergegeven in tabel 2-8. Hieruit volgt dat de schematiseringsfactor  $\gamma_b = 1,01$  (-) dient te bedragen. Dit is de laagst mogelijke schematiseringsfactor, wat komt doordat de onzekerheid in parameters voor de onderzoekslocatie laag is door de relatief grote hoeveelheid onderzoek dat beschikbaar is.



De schematiseringsfactor heeft betrekking op de doorsnede van de dijk ter plaatse van waar het grondonderzoek heeft plaatsgevonden, zie figuur 2-1.

Tabel 2-8: Bepaling schematiseringsfactor voor piping

scenario	F <sub>pip</sub> [-]	ΔF <sub>pip</sub> [-]	P [-]	γ <sub>b</sub> [-]
Basis schematisatie	0,70		n.v.t.	
D <sub>70</sub> is 10% lager	0,66	-0,04	1%	<b>1,01</b>
slootbodem ligt 0,5 m lager	0,67	-0,03	1%	
Zandlaag is 20 m dikker	0,65	-0,05	0,1%	

### 2.11.3. Nieuwe normering

In de nieuwe normering bestaat de totale veiligheid uit een sterktefactor  $\gamma_{mp}$  en een schematiseringsfactor  $\gamma_b$  [ORZW, 2012]. De sterktefactor dekt zowel de modelonzekerheid als de parameteronzekerheid af en is afhankelijk van de faalkanseis (overstromingskansnorm) van het dijktraject. Bij het WTI2017 worden de veiligheidsfactoren gebaseerd op de overstromingskansnorm van de dijkkring.

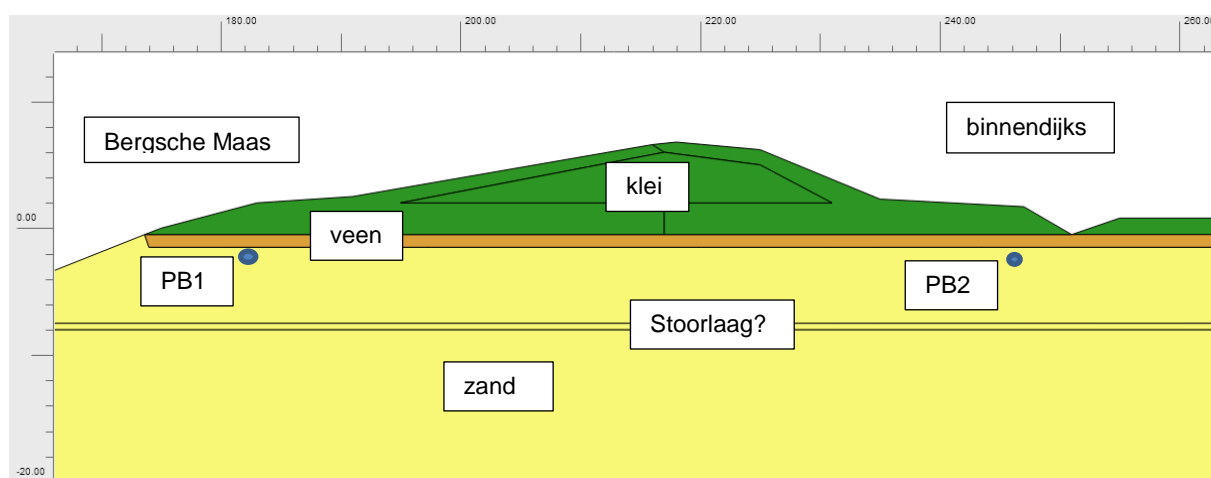
In de nieuwe normering ligt de beschouwde doorsnede binnen dijkvak 36-5, waarvoor de (voorlopige) overstromingskansnorm van 1/10.000 jaar bedraagt. Dit betekent dat de overstromingskans van de dijk ten minste 1/10.000 per jaar moet bedragen.

Omdat de uitwerking van de nieuwe normering relatief veel tijd vergt, het WTI2017 nog in ontwikkeling is en dit rapport met name ingaat op de onzekerheid van de doorlatendheidseigenschappen, wordt er in dit rapport geen berekening van de kwelweglengte gemaakt op basis van de nieuwe normering. Wel kan gesteld worden dat de nieuwe normering een significante invloed kan hebben op de benodigde kwelweglengte.

### 3. HYDROLOGISCH MODEL

Op basis van de uitgangspunten met betrekking tot de geometrie en de bodemopbouw is een hydrologische analyse uitgevoerd in het programma Plaxflow. Het model is weergegeven in figuur 3-1. Het doel van het model is om de doorlatendheid (k-waarde) van het zandpakket af te leiden door de resultaten van de buitenwaterstand en de peilbuismetingen te fitten door in het model de doorlatendheid te variëren.

Een nevendoeel zou kunnen zijn om de stijghoogte ter plaatse van de kwelsloot tijdens MHW-omstandigheden af te leiden, om zo de opbarstveiligheid van de deklaag te bepalen. Dit is echter minder relevant, omdat uit berekeningsresultaten in hoofdstuk 4 volgt dat al sprake zou moeten zijn geweest van opbarsten tijdens de meetperiode van de peilbuismetingen. Deze analyse is daarom niet uitgevoerd.



Figuur 3-1: Plaxflow model

De diepte tot waar het Plaxflow model is doorgezet bedraagt NAP -50 m, de dikte van het zandpakket zoals is bepaald op basis van REGIS. Aan de zijde van de Bergsche Maas is het model doorgezet tot ca. 80 m vanaf de dijk, wat overeenkomt met de helft van de breedte van de Bergsche Maas. Aangenomen is dat het water gelijk verdeeld wordt tussen de polders die aan beide zijden van de Bergsche Maas liggen. Aan de binnendijkse zijde is het model zover doorgezet dat de randvoorwaarde die hier is opgegeven, geen significante invloed heeft op de stijghoogte ter plaatse van de dijk. Het model is doorgezet tot 750 m vanaf de dijk, gezien de spreidingslengte

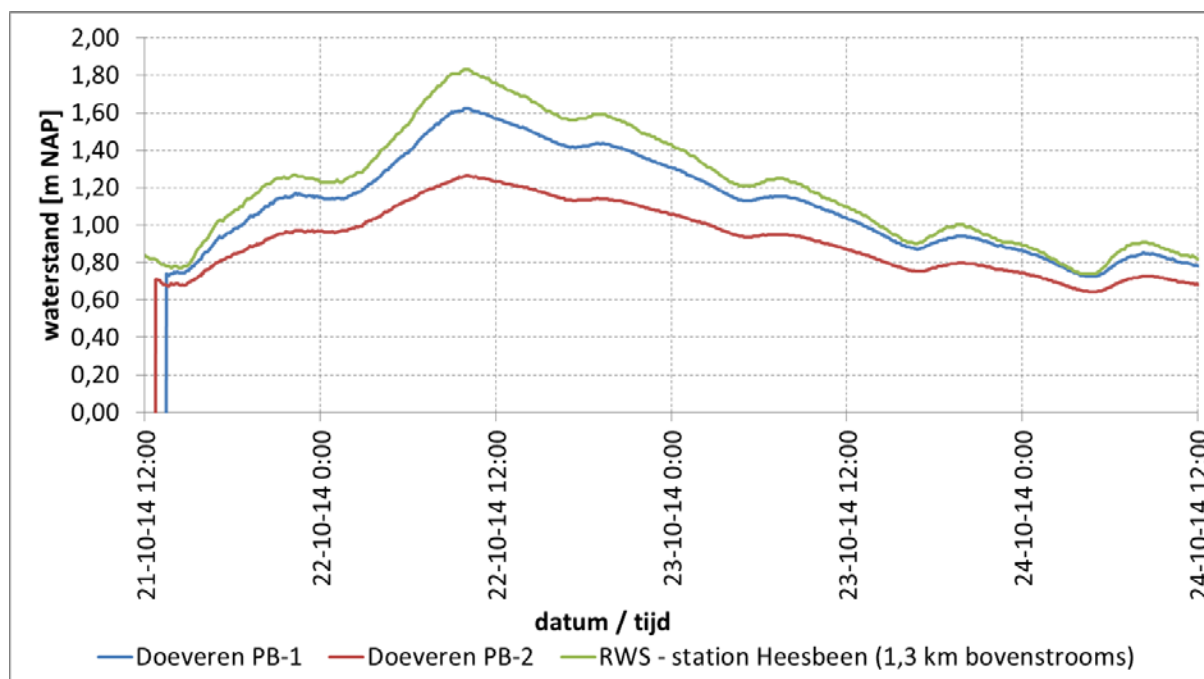
In het model is zowel uitgegaan van een variant waarbij geen stoorlaag aanwezig is, als een variant waarbij een stoorlaag aanwezig is op een diepte van NAP -7,5 m, met een dikte van 0,5 m. De invloed hiervan op de stijghoogte in de zandlaag is onderzocht.

#### 3.1. Randvoorwaarden model

De volgende hydraulische randvoorwaarden zijn opgelegd aan het model:

- aan de binnendijkse zijde is een vaste waterstand aangenomen van NAP -0,5 m (winterpeil);
- het peil in de kwelsloot is aangehouden op NAP -0,25 m, wat overeenkomt met de gemeten waarde tijdens het uitvoeren van het grondonderzoek;
- een variabele buitenwaterstand volgens de gegevens van RWS is toegepast. De stijghoogte in het zandpakket direct onder de deklaag is gemeten door middel van

peilbuismetingen. Deze metingen zijn gebruikt om het model op te fitten. De gemeten buitenwaterstand en de peilbuismetingen zijn, voor een relatief korte periode met een verhoogde buitenwaterstand, weergegeven in figuur 3-2.



Figuur 3-2: Randvoorwaarde buitenwaterstand en peilbuismetingen waarop gefit is

### 3.2. Grondeigenschappen

Voor het geohydrologische model zijn de volgende twee grondparameters van belang:

- doorlatendheid van de grond;
- bergingscapaciteit van de grond.

Voor de doorlatendheid van de zandlaag zijn drie verschillende doorlatendheden toegepast:

- $k = 10$  m/dag
- $k = 25$  m/dag
- $k = 40$  m/dag

Met deze waarde is gevarieerd, om te bepalen met welke doorlatendheid de beste fit kan worden bereikt op de peilbuismetingen.

Voor de doorlatendheid van de klei- en veenlagen is een waarde van  $0,1$  m/dag toegepast. Voor het stoorlaagje is een doorlatendheid van  $0,02$  m/dag toegepast.

Plaxflow berekent de bergingscapaciteit van de grond op basis van de rekstijfheid van de grond. In Plaxflow is het Hardening Soil Small Strain (HSss) toegepast, omdat dit model relatief goed omgaat met kleine rekken, wat het geval zal zijn als er sprake is van grondwaterstroming. De gehanteerde grondparameters die in het Plaxflow model zijn toegepast zijn opgenomen in bijlage 1.

### 3.3. Resultaten Plaxflow

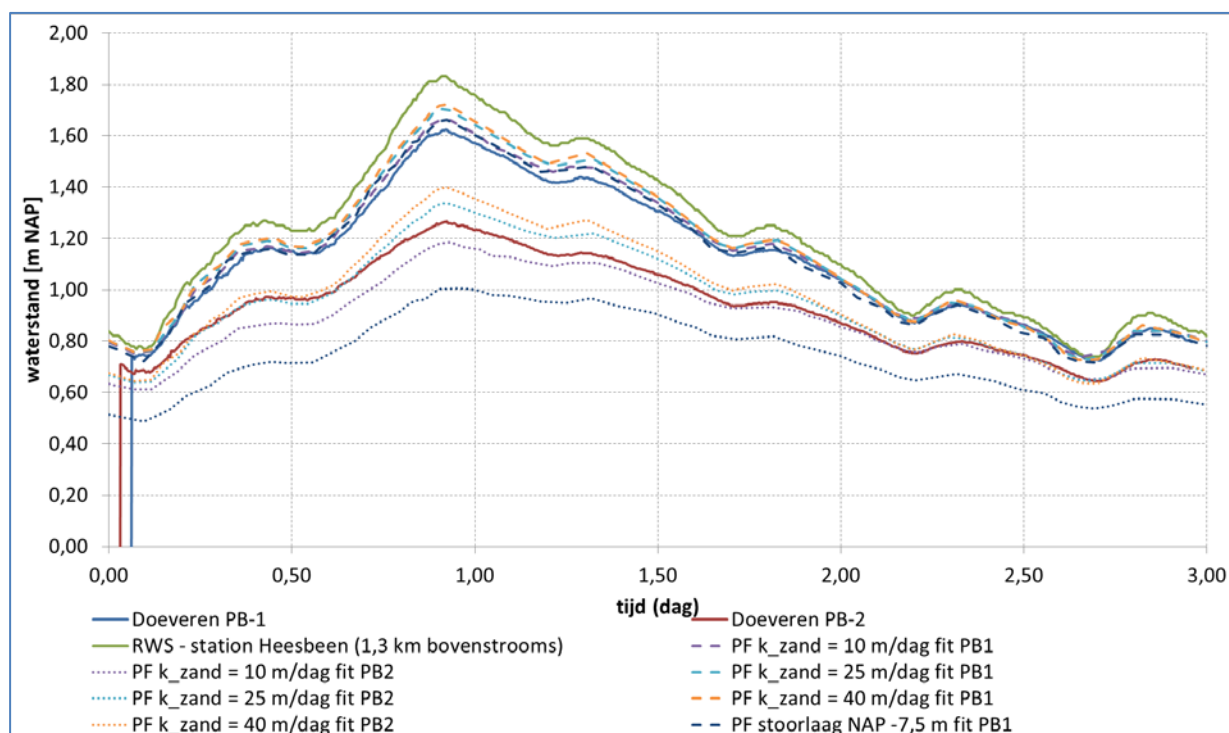
De varianten die zijn berekend met Plaxflow zijn weergegeven in tabel 3-1.

Tabel 3-1: Varianten Plaxflow berekening

variant	k-waarde zand [m/dag]	Stoorlaag op NAP -7,5 m?
1	10	Nee
2	25	Nee
3	40	Nee
4	25	Ja

In figuur 3-3 zijn de berekeningsresultaten weergegeven. Te zien is dat indien een stoorlaag wordt geschematiseerd de berekeningsresultaten het minst goed overeenkomen met de peilbuismetingen. Op basis hiervan lijkt het niet aannemelijk dat de stoorlaag overal het onderliggende zandpakket volledig afsluit en/of overal aanwezig is.

Uit de Plaxflow-berekeningen blijkt dat bij een k-waarde van het zand tussen de 10 m/dag en 25 m/dag de beste fit te verkrijgen is op de meetresultaten.



Figuur 3-3: Resultaten Plaxflow berekeningen

## 4. BEOORDELING PIPING

De beoordeling van het faalmechanisme piping is uitgevoerd conform het stappenplan uit het VTV2006. Voor de gedetailleerde berekening van de kwelweglengte is zowel gebruik gemaakt van de huidige rekenregel van Sellmeijer [TRZW, 1999], als de nieuwe rekenregel van Sellmeijer [ORZW, 2012].

De beoordeling is onderstaand stapsgewijs beschreven.

### 4.1. Stap 1: eenvoudige toets

De eenvoudige toets bestaat uit een controle van de opdrukveiligheid en toetsing met de methode Bligh.

#### Opdrukveiligheid

De opdrukveiligheid wordt getoetst conform:

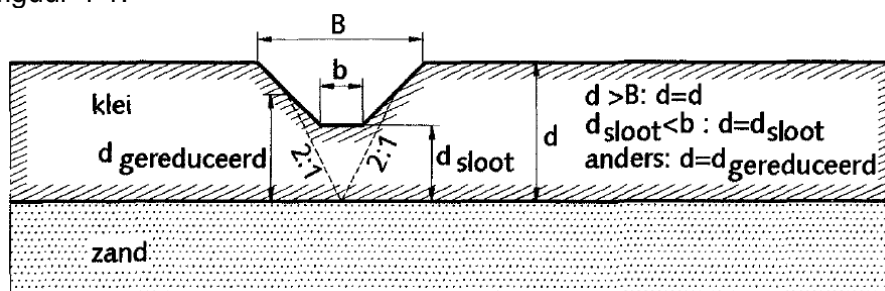
$$\frac{\sigma_g}{\sigma_w} \geq \gamma$$

Waarin:

- $\sigma_g$  = gronddruk aan onderzijde kleideklaag [kPa]
- $\sigma_w$  = waterdruk aan onderzijde kleideklaag [kPa]
- $\gamma$  = veiligheidsfactor

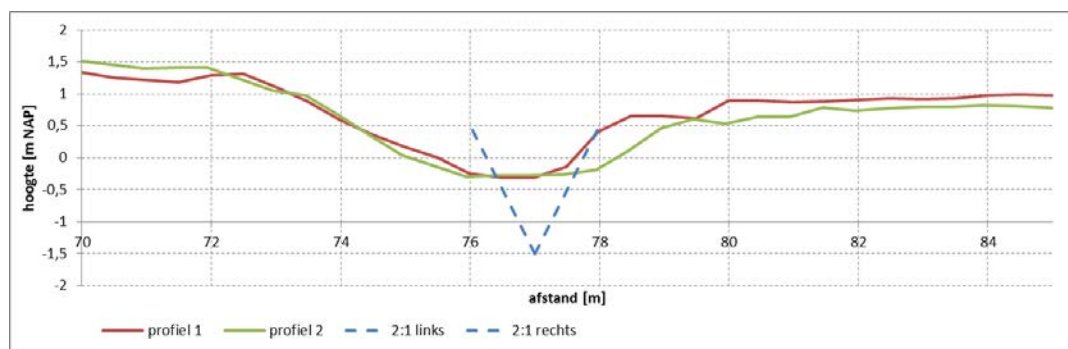
Voor de huidige rekenregel van Sellmeijer geldt dat de veiligheidsfactor in het geval van betrouwbare peilbuismetingen 1,1 (-) bedraagt [TRZW, 1999]. Voor de nieuwe rekenregel dient de veiligheidsfactor bepaald te worden door te bepalen wat de invloed is van de schematisatie die is toegepast (schematiseringsfactor). Deze is niet nader bepaald, omdat later zal blijken dat dit het oordeel voor opbarsten niet beïnvloed.

De dikte van de kleideklaag onder de sloot is het dunst, deze is dus maatgevend. Onder een sloot dient conform [TRZW, 1999] gerekend te worden met de gereduceerde dikte. Hierbij is de gereduceerde dikte bepaald door het snijpunt te bepalen tussen het talud van de sloot en de lijn vanaf de onderzijde van de deklaag met een spreiding van 2:1, zie voor het principe figuur 4-1.



Figuur 4-1: Principe bepaling gereduceerde deklaagdikte

Dit principe is toegepast, en weergegeven in figuur 4-2. Hieruit blijkt dat de dikte gereduceerd dient te worden tot de onderzijde van de slootbodem, waarvoor een niveau van NAP -0,5 m is gehanteerd.



Figuur 4-2: Bepaling gereduceerde deklaagdikte

Onder de slootbodembodem is voornamelijk veen aanwezig. Van de deklaag zijn op 12 monsters de volumegewichten bepaald. Deze monsters zijn alleen bepaald op de kleilagen. De gewichten zijn weergegeven in tabel 4-1.

Tabel 4-1: Volumegewichten deklaag

boring	monster	Nat volumegewicht $\gamma_{nat}$ [kNm <sup>3</sup> ]
MB1	St1	17,9
	St2	15,2
MB1	St3	16,6
MB2	St1	18,5
	St2	18,3
MB2	St3	18,4
MB3	St1	18,5
	St2	18,4
MB3	St3	15,8
MB4	St1	17,7
	St2	18,6
MB4	St3	13,5
<b><math>\gamma_{nat;gem}</math></b>		<b>17,3</b>
<b><math>\gamma_{nat;gem;kar}^*</math></b>		<b>16,4</b>

\* lage karakteristieke waarde van het gemiddelde gewicht (95% ondergrens)

De dikte van de deklaag onder de slootbodembodem bedraagt 0,85 m. Omdat geen gegevens aanwezig zijn van de veenlaag is uitgegaan van het volumiek gewicht van klei (optimistische aanname). Uitgegaan is van het karakteristiek gemiddelde gewicht (95% ondergrens). Dit bedraagt 16,4 kN/m<sup>3</sup>. Het gewicht van de deklaag bedraagt, tijdens het winterpeil,  $(16,4 \times 0,85) + (10 \times 0,4) = 23,4$  kPa.

De opwaartse druk van het water tijdens MHW-omstandigheden is niet precies bekend. De maximaal gemeten stijghoogte bij peilbuis 2 (net naast de sloot) bedraagt NAP +1,25 m, en is gemeten op 22-10-2014, tijdens een relatief hoge buitenwaterstand. De buitenwaterstand bedroeg toen ca. NAP +1,83 m. Bij deze gemeten stijghoogte bedraagt de opwaartse druk  $(1,25 - -1,5) \times 10 = 27,5$  kPa.

De opdrukveiligheid bedroeg tijdens deze hoogwatersituatie  $23,4 / 27,5 = 0,85$ . Hieruit wordt geconcludeerd dat bij de destijds aanwezige stijghoogte de opdrukveiligheid al onvoldoende was, zelfs in het optimistische scenario dat alleen klei aanwezig zou zijn onder de slootbodem. De buitenwaterstand was toen nog ver onder het MHW, waardoor geconcludeerd kan worden dat de opdrukveiligheid te laag is om piping uit te kunnen sluiten. De waargenomen wellen in het achterland sluiten aan bij dit resultaat.

#### *Toetsing volgens Bligh*

De tweede stap in de eenvoudige toets conform VTV betreft de toetsing conform de methode van Bligh. De rekenregel luidt als volgt:

$$\frac{L}{C_{creep}} \geq \Delta H - 0,3 \cdot d$$

Waarin:

L = aanwezige kwelweglengte [m]

$C_{creep}$  = constante, afhankelijk van fijnheid zand, bedraagt 18 (-) voor eenvoudige toets

$\Delta H$  = hoogteverschil tussen toetspeil en het polderpeil [m]

D = dikte van de kleideklaag [m]

De aanwezige kwelweglengte bedraagt  $L = 77$  m (paragraaf 2.4). De kwelweglengte dient minimaal  $L \geq 18 \times (5,4 - 0,3 \times 0,85) = 78$  m te bedragen. Hier voldoet het profiel net niet aan.

De toetsing wordt daarom vervolgd met stap 2.

#### **4.2. Stap 2: gehanteerde ontwerpmethod**

De dijk is aangelegd rond 1890-1900 [Maaskant, 1999] waardoor de dijk niet is ontworpen conform vigerende rekenregels.

De dijk is wel eerder getoetst. Van de 1<sup>e</sup>, 2<sup>e</sup> en 3<sup>e</sup> toetsronde is het toetsoordeel van het traject beschikbaar [Maaskant, 1999] en [Aa en Maas, 2005 en 2010]. Het toetsoordeel bedraagt in alle toetsingen 'voldoende'. De 3<sup>e</sup> toetsronde verwijst naar de 2<sup>e</sup> toetsronde en de 2<sup>e</sup> toetsronde verwijst naar de eerdere berekeningen in de 1<sup>e</sup> toetsronde.

Omdat het doel van deze toetsing is om de invloed van de doorlatendheid op de piping-toets te onderzoeken wordt de toetsing vervolgd met stap 3.

#### **4.3. Stap 3: gedetailleerde toetsing Piping en Heave**

De gedetailleerde toets bestaat uit de controle met de meer gedetailleerde methode Sellmeijer. Zowel de huidige rekenregel van Sellmeijer is toegepast [TRZW, 1999] als de nieuwe rekenregel van Sellmeijer [ORZW, 2012].

Voor de gedetailleerde methode is naast het aanwezige verval en de dikte van de deklaag, de dikte van de zandlaag, de korrel diameter  $d_{70}$  en de doorlatendheid benodigd. De waarden die hiervoor gehanteerd worden zijn beschreven in hoofdstuk 2. De invoerparameters zijn weergegeven in tabel 4-2, waarbij de gehanteerde doorlatendheid voor elke proef verschillend is.

Tabel 4-2: Invoerparameters bepaling kwelweglengte

	$d$ [m]	$\Delta H$ [m]	$D$ [m]	$d_{70}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$k$ [m/d]
Hvorslev	0,85	5,4	50	246	0,51
Bouwer & Rice (3e lijn)	0,85	5,4	50	246	0,38
Bouwer & Rice (1e lijn)	0,85	5,4	50	246	3,1
Falling head test	0,85	5,4	50	246	0,032
Van Baars en van de Graaf	0,85	5,4	50	246	0,00094
Parez & Fauriel	0,85	5,4	50	246	0,19
Minipompproef	0,85	5,4	50	246	34
A. Hazen	0,85	5,4	50	246	19
Carman (1956; Kozeny - Carman)	0,85	5,4	50	246	1,5
Den Rooijen (1992)	0,85	5,4	50	246	7,3
REGIS gewogen gemiddelde hele zandpakket	0,85	5,4	50	246	46
REGIS gewogen gemiddelde Kreyftenheye	0,85	5,4	50	246	22
Hydrologisch model (Plaxis) beste fit	0,85	5,4	50	246	17*

\* deze waarde is bepaald door het gemiddelde te nemen tussen de resultaten van Plaxflow bij een k-waarde van 10 m/dag en 25 m/dag. Bij deze doorlatendheid wordt de beste fit op de meetresultaten bereikt.

De resultaten van de toetsing zijn weergegeven in tabel 4-3. In figuur 4-3 is dit grafisch weergegeven. Zoals is te zien voldoet bij de huidige rekenregel van Sellmeijer het profiel niet als uit zou worden gegaan van de waarde van de minipompproef en de REGIS-waarden.

Verder is te zien dat bij de nieuwe rekenregel van Sellmeijer de benodigde kwelweglengtes behoorlijk toenemen.

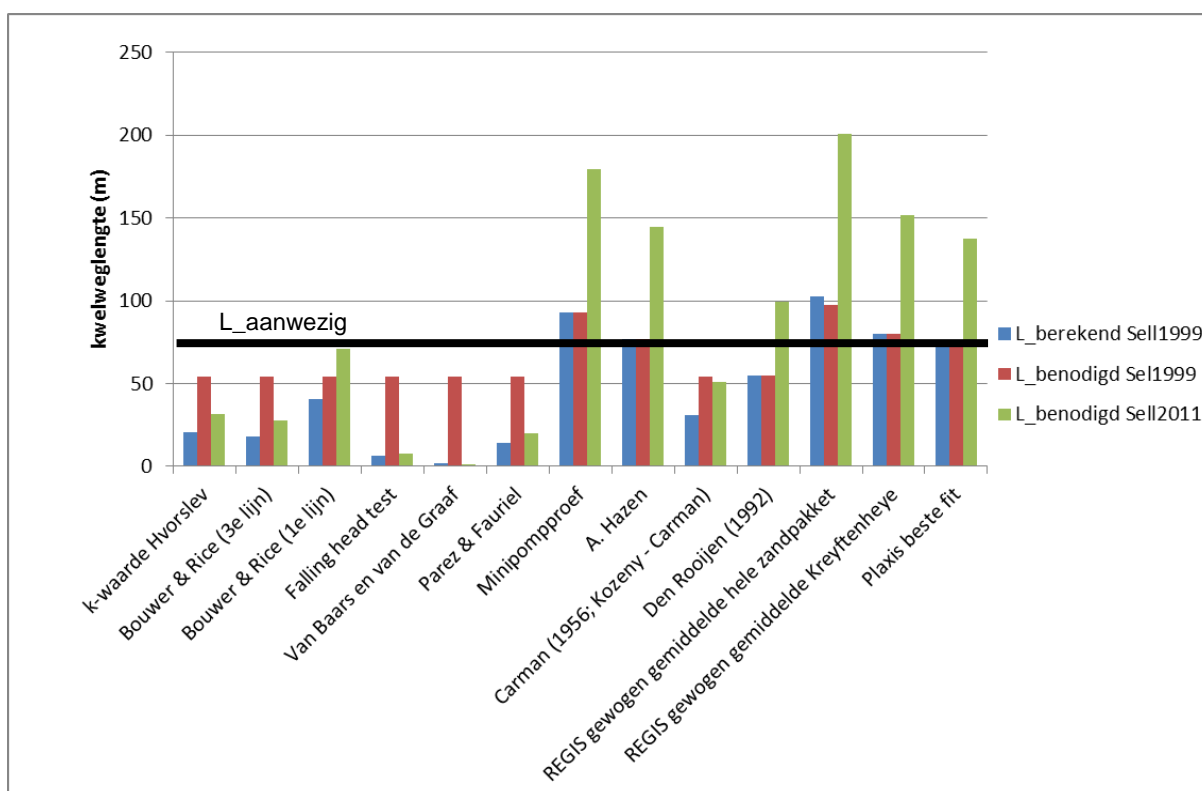
Tabel 4-3: Resultaten toets piping

Techniek / test	Uitwerkingsmethode	$L_{aanwezig}$ [m]	$L_{berekend}$ Sell1999 [m]	$L_{benodigd}^*$ Sell1999 [m]	$L_{benodigd}$ Sell2011 [m]	voldoet? Sell1999	voldoet? Sell2011
Slugtesten	Hvorslev	77	21	54	32	ja	ja
Slugtesten	Bouwer & Rice (3e lijn)	77	18	54	28	ja	ja
Slugtesten	Bouwer & Rice (1e lijn)	77	41	54	71	ja	ja
Doorlatendheid-bepaling in lab	Falling head test	77	7	54	8	ja	ja
Dissipatietesten	Van Baars en van de Graaf	77	2	54	1	ja	ja
Dissipatietesten	Parez & Fauriel	77	14	54	20	ja	ja
Minipompproef	Fugro	77	93	93	179	nee	nee
korrelverdeling	A. Hazen	77	77	77	144	ja	nee
korrelverdeling	Carman (1956; Kozeny - Carman)	77	31	54	51	ja	ja



Techniek / test	Uitwerkingsmethode	$L_{aanwezig}$ [m]	$L_{berekend}$ Sell1999 [m]	$L_{benodigd}^*$ Sell1999 [m]	$L_{benodigd}$ Sell2011 [m]	voldoet? Sell1999	voldoet? Sell2011
korrelverdeling	Den Rooijen (1992)	77	55	55	99	ja	nee
REGIS gewogen gemiddelde hele zandpakket	-	77	102	97	201	nee	nee
REGIS gewogen gemiddelde Kreyftenheye	-	77	80	80	152	nee	nee
Hydrologisch model (Plaxis) beste fit	-	77	74	74	138	ja	nee

\* Conform TR zandmeevoerende wellen (1999) is een minimale kwelweglengte van  $L_{min} = 10 \cdot \Delta H$  en een maximale kwelweglengte van  $L_{max} = 18 \cdot \Delta H$  toegepast



Figuur 4-3: Benodigde kwelweglengtes bij verschillende k-waarden

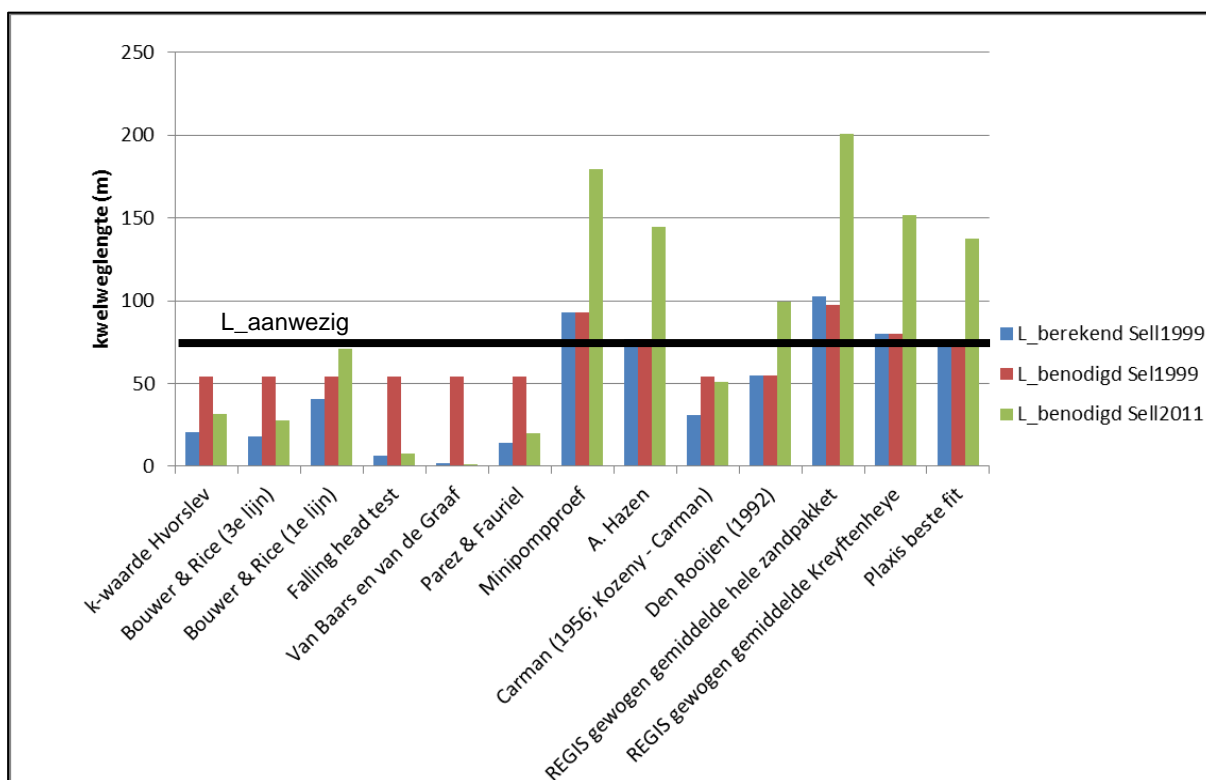
## 5. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

In het kader van de POV Piping is onderzoek gedaan naar een groot aantal technieken en methoden om de doorlatendheid van de ondergrond te bepalen. Naast de meer conventionele technieken is de HPT-sondering en minipompproeven ingezet om de doorlatendheid van de ondergrond te bepalen. Uit de verschillende methoden volgen verschillende doorlatendheden. Hoe deze doorlatendheden doorwerken op het (technisch) veiligheidsoordeel ten aanzien van piping is uitgewerkt in voorliggend rapport.

Het onderzoek heeft zich gericht op een deel van de primaire waterkering ten zuiden van de Bergsche Maas, gelegen tussen Heesbeen en Doeveren tussen dijkpaal A970 en A976. De waterkering is in beheer bij Waterschap Aa en Maas en vormt onderdeel van dijkkring 36.

Uit het onderzoek worden de volgende conclusies getrokken:

- De doorlatendheid die men toekent aan de pipinggevoelige zandlagen is van grote invloed op het toetsresultaat. In dit onderzoek is een groot aantal bekende en minder bekende methoden toegepast om de doorlatendheid van de ondergrond te bepalen. De spreiding in de resulterende k-waarden is groot en varieert tussen de  $9,4 \cdot 10^{-4}$  m/dag tot 34 m/dag.
- De k-waarde heeft relatief veel invloed op de benodigde kwelweglengte en dus op het resultaat van de piping-toets. In figuur 5-1 zijn de benodigde kwelweglengtes weergegeven voor verschillende methode om de k-waarde te bepalen. Te zien is dat een grote spreiding in de berekende k-waarden zich direct doorvertaalt naar een grote spreiding in de benodigde kwelweglengtes.



Figuur 5-1: Benodigde kwelweglengtes bij verschillende k-waarden. De benodigde kwelweglengte bij Sell1999 kan verschillen van de berekende kwelweglengte, vanwege de geldigheidseisen van de rekenregel

- Welke doorlatendheidsbepaling wordt toegepast heeft grote invloed op het resultaat van de toets op piping. Verschillende technieken en methoden resulteren in een verschillend (technisch) toetsoordeel.
- Als de nieuwe rekenregel van Sellmeijer wordt toegepast nemen de benodigde kwelweglengtes significant toe. Enerzijds wordt dit veroorzaakt doordat de rekenregel is gewijzigd. Daarnaast zijn de benodigde veiligheidsfactoren over het algemeen strenger geworden ten opzichte van de huidige rekenregel.

Naar aanleiding van dit onderzoek worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- De resultaten van dit onderzoek benadrukken dat men kritisch zal moeten zijn op welke doorlatendheid men toekent aan de pipinggevoelige zandlagen. De uitkomsten van de toetsing zijn hier namelijk sterk afhankelijk van.

Op basis van de resultaten lijkt een beoordeling op basis van de minipompproeven en de doorlatendheden op basis van de REGIS-database een veilige keuze.

In Fugro (2015b) zijn de resultaten van de verschillende technieken nader met elkaar vergeleken en is een verband gelegd op basis van de betrokken volumes grond bij een bepaalde techniek. Mogelijk dat op basis van deze resultaten een voorstel kan worden uitgewerkt waarmee de resultaten van een bepaalde test kunnen worden geschaald om zodoende beter inzicht te krijgen in de bulkdoorlatendheid van de zandpakketten die een rol spelen bij het proces van piping.

- De beoordeling van het mechanisme piping kan worden aangescherpt door rekening te houden met de anisotropie in doorlatendheid van de ondergrond. Door verschillen in de horizontale en verticale doorlatendheid zal de effectief meewerkende dikte van het zandpakket dat bijdraagt aan de voeding van een mogelijke pijp kleiner zijn dan nu wordt aangenomen. Het is onwaarschijnlijk dat de grondwaterstromingen binnen het volledige zandpakket (50 m) bijdraagt aan de voeding van een mogelijk pijp. Dit effect zou in een geohydrologisch model kunnen worden onderzocht, waarbij ook de invloed van de aangetroffen stoorlagen kan worden onderzocht.
- Aanbevolen wordt om een analyse te doen naar de invloed van de nieuwe normering op de benodigde kwelweglengte. Verwacht wordt dat dit een significante (negatieve) invloed kan hebben op de benodigde kwelweglengte.

BIJLAGE 1

**PARAMETERS PLAXFLOW BEREKENING**

Fugro project Nr.: 1213-0101-000

---

**Parameters PLAXFLOW berekening**

Opdr. : 1213-0101-000

POV piping: invloed bepaling k-waarde op pipingtoets

Bijl. : 1-1

---

De grondparameters die zijn toegepast in de Plaxflow berekening zijn weergegeven in tabel 1. Voor de betekenis van de parameters wordt verwezen naar de User Manual van Plaxis. De rekstijfheid van de grond is niet gevarieerd, omdat dit minder relevant is voor de berekende stijghoogtes dan de doorlatendheid van de grond.

Tabel 1: Toegepaste rekstijfheid parameters in Plaxflow (voor uitleg parameters zie User Manual Plaxis)

	$E_{50}^{ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$E_{oed}^{ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$E_{ur}^{ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Power (m) [-]	$\gamma_{0,7}$ [-]	$G_0^{ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]
Klei	4.000	2.000	17.000	1,0	0,09 e-3	100.000
Veen	4.000	2.000	17.000	1,0	0,5e-3	22.000
zand	50.000	50.000	200.000	0,5	0,05e-3	300.000
Stoorlaag klei	4.000	2.000	15.000	1,0	1,0 e-3	25.000

---

#### Parameters PLAXFLOW berekening

Opdr. : 1213-0101-000

POV piping: invloed bepaling k-waarde op pipingtoets

Bijl. : 1-2

---