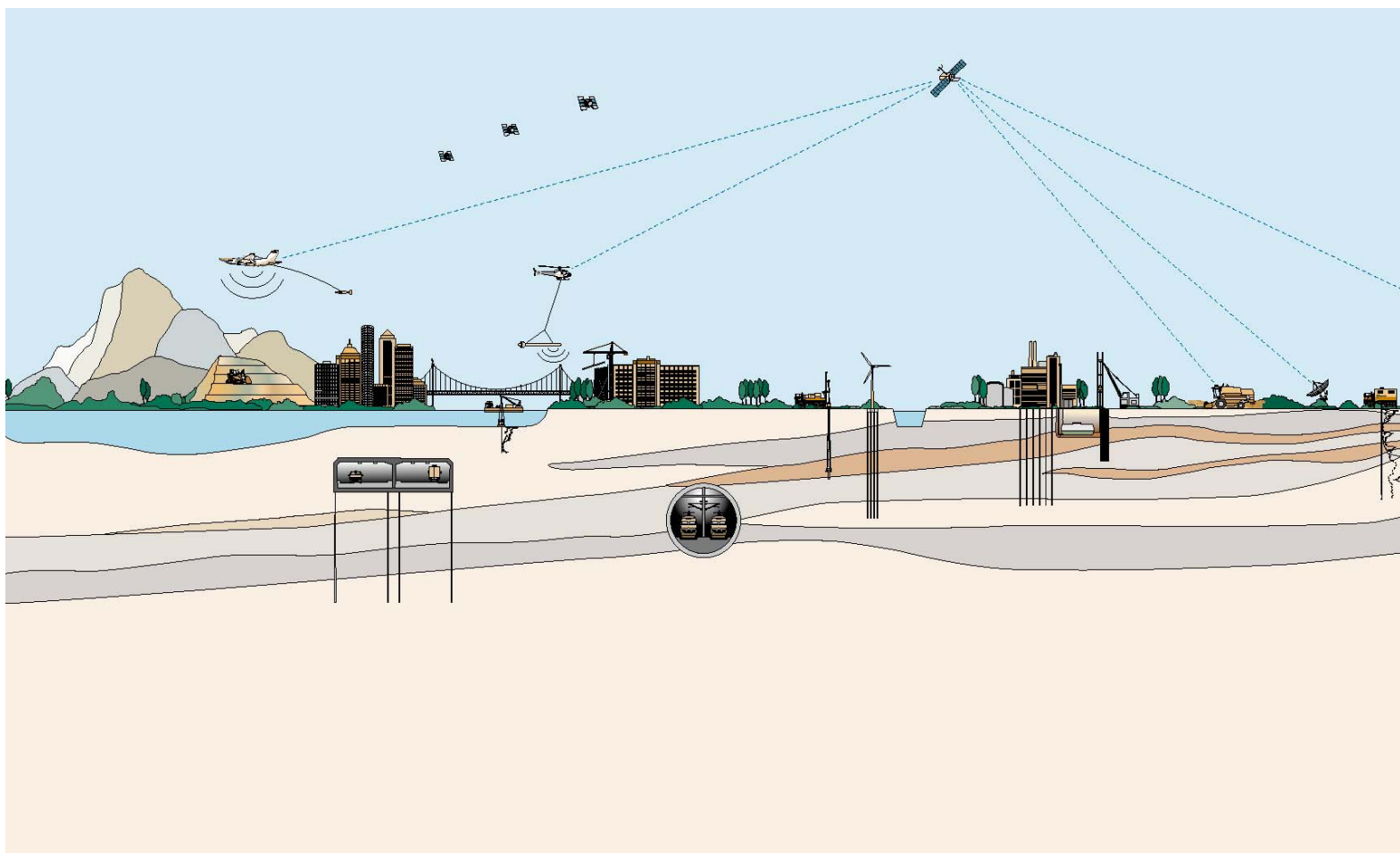


RAPPORT
betreffende

POV PIPING

**ISAC|PIPING:
VAN COMPLEXE ONDERGROND NAAR
PIPINGANALYSE**

Opdrachtnummer: 1213-0101-000



RAPPORT
betreffende

POV PIPING

ISAC|PIPING: VAN COMPLEXE ONDERGROND NAAR PIPINGANALYSE

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. G.R.P. van Goor
Adviseur Waterbouw

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

VERSIE	DATUM	OMSCHRIJVING WIJZIGING	PARAAF PROJECTLEIDER
1	22 november 2015	Versie 1.0	BMB
2	22 april 2016	Definitief n.a.v. review projectgroep	BMB

FILE: 1213-0101-000.R05 Ondergrondmodellering ISAC_Piping_definitief|SAC | Piping

<u>INHOUDSOPGAVE</u>	<u>Blz.</u>
1. INLEIDING	1
1.1. Probleemstelling	1
1.2. Doelstelling	2
1.3. Leeswijzer	2
2. METHODE	3
2.1. Algemene aanpak maatwerkanalyses	3
2.2. Uitwerking	3
3. UITGANGSPUNTEN	7
3.1. Geometrie en aanwezige kwelweglengte	7
3.2. Hydraulische randvoorwaarden	7
3.3. Dikte watervoerend pakket en aanwezigheid stoorlagen	7
3.4. Doorlatendheid watervoerend pakket	7
3.5. Hydrologisch model	8
3.6. Welbreedte	8
3.7. Toetsregel, parameterkeuze en veiligheidsfactoren	9
4. RESULTATEN	10
5. DISCUSSIE EN AANBEVELINGEN	12
5.1. Toepassing ISAC Piping en besparingen	12
5.2. Toepassing korrelverdelingen en regionale modellen	12
5.3. Veiligheidsfilosofie	13
5.4. Aanbevelingen	13
REFERENTIES	15
<u>Bijlage</u>	<u>NR</u>
Voorbeeld continu doorlatendheidsprofiel o.b.v. HPT en MPT	1

1. INLEIDING

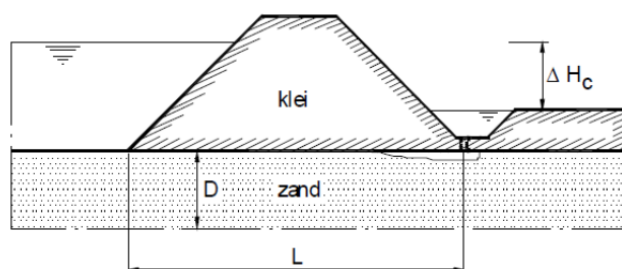
In het kader van de POV-piping is door Waterschap Aa en Maas, Deltares en Fugro GeoServices B.V. onderzoek gedaan naar diverse doorlatendheidsbepalingen voor de beoordeling van het faalmechanisme piping. Het onderzoek heeft zich gericht op een deel van de primaire waterkering ten zuiden van de Bergsche Maas, gelegen tussen Heesbeen en Doeveren. Naast de meer gevestigde methoden om de doorlatendheid te bepalen, zoals slugtesten en correlaties op basis van korrelverdelingen, is de innovatieve HPT-sondeertechniek ingezet.

De HPT-sonderingen zijn uitgevoerd in combinatie met mini-pompproeven (Mini Pumping Tests: MPT's) op basis waarvan continue doorlatendheidsprofielen van de ondergrond zijn opgesteld. In opdracht van Waterschap Aa en Maas is een numerieke pipinganalyse uitgevoerd op basis van een 3D ondergrondmodellering via ISAC|Piping.

De innovatie ISAC|piping staat voor 'In-Situ Aquifer Characterization', specifiek voor piping vraagstukken, en levert een 3D ondergrondmodel met een ruimtelijke verdeling van doorlatendheid en berging. Dit ondergrondmodel is gebaseerd op de doorlatendheidsprofielen die volgen uit de HPT-sonderingen en zijn geijkt met mini-pompproeven. Een voorbeeld van een dergelijk doorlatendheidsprofiel is opgenomen in bijlage 1.

1.1. Probleemstelling

De kwelweganalyse wordt uitgevoerd op basis van de aangepaste rekenregel van Sellmeijer ORZW [1]. In dit rapport is deze rekenregel aangeduid als "Sellmeijer 2011". Deze rekenregel is gebaseerd op een standaard dijkconfiguratie met een homogene zandlaag onder een ondoorlatende laag. In figuur 1 is de basisconfiguratie behorende bij het rekenmodel weergegeven.



Figuur 1: Basisconfiguratie rekenregel Sellmeijer (bron: ORZW [1])

Een beperking van deze rekenregel is dat gerekend dient te worden met één homogeen watervoerend pakket met één isotrope doorlatendheid. In werkelijkheid zijn meerdere lagen met verschillende doorlatendheden aanwezig.

Toepassing van de rekenregel van Sellmeijer vraagt daarom een sterke vereenvoudiging van de complexe werkelijkheid. Conservatieve keuzes ten aanzien van pakketdikte en doorlatendheid van het watervoerend (zand)pakket leiden daarmee tot onnodig afkeuren van dijken op piping en tot grote versterkingsontwerpen.

1.2. Doelstelling

Doel van het onderzoek is om op basis van de HPT en MPT metingen op de projectlocatie een piping analyse uit te voeren waarin gedetailleerde informatie over opbouw en doorlatendheid van de bodem wordt meegenomen.

Hiervoor is gebruik gemaakt van een ondergrondmodellering via ISAC|piping. Dit ondergrondmodel levert uitvoer die 1 op 1 kan worden ingevoerd in de huidige 2D én 3D rekensoftware voor dijken (MSeep, DGeostability, Plaxis, FeFlow etc.). Op basis van uitvoer uit dit model zijn numerieke grondwaterstromingsberekeningen en een pipinganalyse uitgevoerd om te bepalen wat voor kwelweglengte minimaal nodig is. De resultaten van deze maatwerkanalyse zijn vergeleken met berekende kwelwegen op basis van andere meer traditionele methoden om de doorlatendheid te bepalen. Het ondergrondmodel is ook geschikt om toe te passen in het ontwikkeling zijnde stromingsmodel DgFlow waarin grondwaterstroming en korreleevenwicht voor piping gecombineerd kan worden doorgerekend.

1.3. Leeswijzer

In het volgende hoofdstuk is nader ingegaan op de methode ISAC|Piping. Na een meer algemene beschrijving van de methode bij dergelijke maatwerkanalyses volgt een beschrijving van de specifieke uitwerking op basis van de innovatieve metingen (HPT's en MPT's) en de vertaling hiervan in een 3D ondergrondmodel en de beoordeling op piping. In hoofdstuk 3 zijn de uitgangspunten beschreven zoals toegepast in het onderzoek op de projectlocatie. De resultaten van de analyses zijn opgenomen in hoofdstuk 3. Hoofdstuk 4 sluit af met de belangrijkste conclusies en aanbevelingen.

2. METHODE

De toetsregel op basis van het rekenmodel van Sellmeijer 2011 is geldig voor een geïdealiseerde basisconfiguratie van de ondergrond en doorlatendheidseigenschappen van het watervoerend pakket, dat wil zeggen één watervoerend pakket met homogene doorlatendheidseigenschappen met een constante dikte en die zich uitstrekt tot ver voorbij het uittreepunt (zie ook figuur 1).

In de praktijk komt deze situatie zelden voor. Het watervoerend pakket zal vrijwel altijd opgebouwd zijn uit meerdere zand- en/of stoorlagen met verschillende doorlatendheidseigenschappen van deze lagen. Deze omstandigheden beïnvloeden het stromingspatroon onder de dijk en daarmee het risico op piping. Grondwaterstroming is immers de motor achter het proces dat kan leiden tot piping en daarmee het mogelijk falen van een waterkering op dit mechanisme.

Onderstaand is beschreven op welke wijze de resultaten op basis van ISAC|Piping (gedetailleerd ondergrondmodel met ruimtelijke verdeling van doorlatendheid van het watervoerend pakket) zijn toegepast in de beoordeling van het pipingrisico met de methode Sellmeijer 2011.

2.1. Algemene aanpak maatwerkanalyses

Ook bij een maatwerkanalyse blijft het uitgangspunt voor de beoordeling op het faalmechanisme piping de toetsregel op basis van het rekenmodel van Sellmeijer 2011, op basis van de geïdealiseerde situatie met een homogeen watervoerend pakket. De doorlatendheid die aan dit geïdealiseerde pakket wordt toegekend wordt in de maatwerkanalyse echter gekalibreerd op basis van grondwaterstromingsberekeningen voor de werkelijke situatie. De verhouding tussen beide situaties is de correctiefactor.

De filosofie achter deze aanpak is ontleend aan het Technisch Rapport voor controle op het mechanisme piping bij rivierdijken (1994) [2]. Hierin is gesteld dat de potentiaalgradiënten in de watervoerende zandlaag ter plaatse van het uittreepunt dominant belang zijn voor het erosiemechanisme.

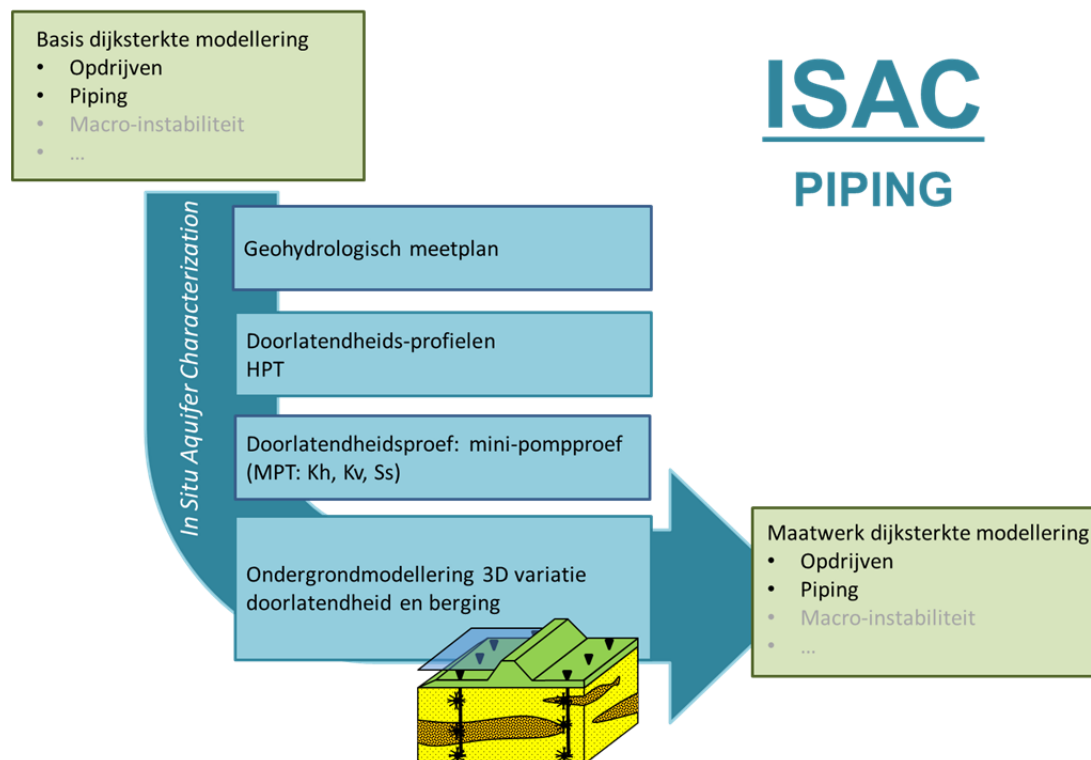
Deze gradiënten zijn evenredig met het uittreedebiet. Het uittreedebiet is geen op zich zelf staande parameter, maar is de resultante van de overall geometrie van dijk, voorland, waterbodembodem, deklaag en gelaagdheid en doorlatendheidskarakteristieken van het watervoerend pakket. Bij een, van de geïdealiseerde situatie (basisconfiguratie toetsregel), afwijkende bodemopbouw en doorlatendheidseigenschappen hoort dus een afwijkend uittreedebiet en dus evenredig afwijkende potentiaalgradiënten ter plaatse van het uittreepunt. Dit impliceert dat wanneer men in de geïdealiseerde situatie, dezelfde potentiaalgradiënten ter plaatse van het uittreepunt wil krijgen als in de werkelijke situatie, de uittredebieten in beide gevallen gelijk moeten zijn.

Op basis van de geïdealiseerde situatie, met een gecorrigeerde doorlatendheid voor de werkelijkheid, kan het risico vervolgens worden beoordeeld met de toetsregel.

2.2. Uitwerking

Binnen dit project is gebruik gemaakt van de HPT sonderingen en minipompproeven. Via de ISAC|piping werkmethode is op basis van de metingen een 3D ondergrondmodel van de

geohydrologische eigenschappen opgesteld van de POV-projectlocatie. Een overzicht van de werkmethode van ISAC|Piping is in figuur 2 weergegeven.



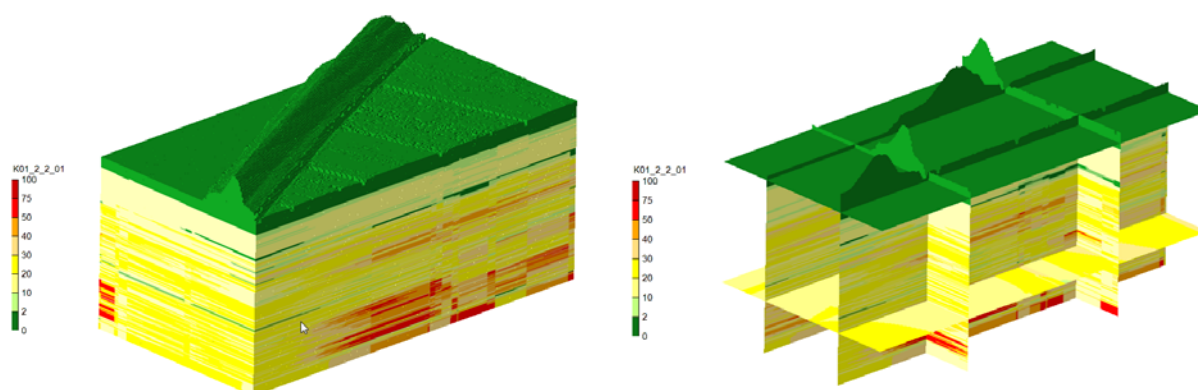
Figuur 2: ISAC|Piping

Het ondergrondmodel is uitgevoerd met voxels van 2 x 2 x 0,1 m (lxbxh) voor dunne stoorlagen, en 2 x 2 x 0,5 m voor dikkere zandlagen. De keuze voor deze voxel-groottes is iteratief bepaald waarbij dunne stoorlagen met een relatief lage doorlatendheid ($k < 5$ m/dag) zijn opgespoord en mee zijn genomen in de modellering. Voor dikkere, goed doorlatende zandlagen is een grotere voxel-hoogte aangehouden daar de lagen, waarbinnen de doorlatendheidsvariatie gering is, van nature dikker zijn. Daarnaast zijn er praktische overwegingen ten aanzien van het aantal lagen dat in het stromingsmodel kan worden opgenomen.

Aangenomen is dat HPT resultaten direct representatief zijn voor een gebied van 2 x 2 m rondom de sondeerlocatie (primair invloedsgebied HPT sondering). De waarde van iedere tussenliggende voxel is bepaald op basis van de zogenaamde 'inverse distance anisotropic modelling'-methode¹.

Er is een lithologisch (grondsoorten) model gegenereerd en een geohydrologisch doorlatendheidsmodel. In figuur 3 is het 3D ondergrondmodel van ISAC|piping weergegeven.

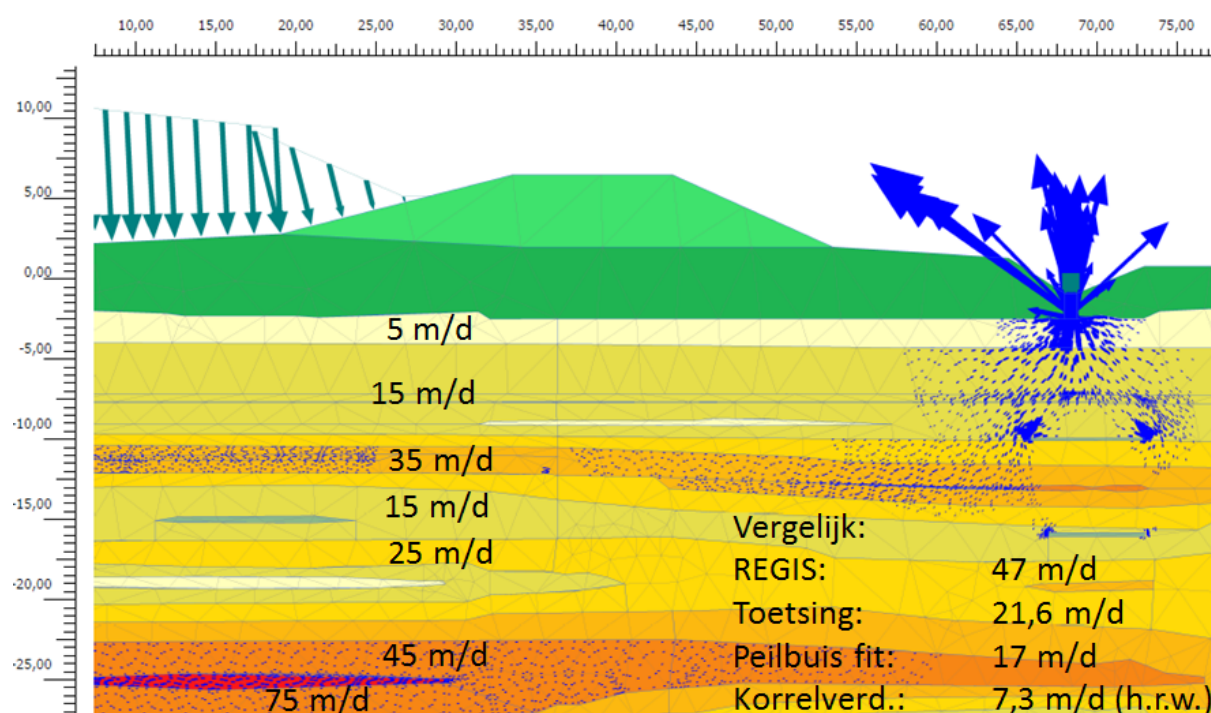
¹ Meer informatie over deze techniek, zie o.a.: http://help.rockware.com/rockworks17/WebHelp/solid_model_inverse_aniso.htm



Figuur 3: 3D ondergrondmodel met ruimtelijke spreiding van de doorlatendheid

Vanuit het 3D ondergrondmodel is een 2D doorsnede loodrecht op de primaire waterkering gegenereerd en is de grondwaterstroming geanalyseerd in Plaxflow (versie 2015.02). Deze uitvoer geeft een gedetailleerd beeld van de bodemopbouw en doorlatendheidseigenschappen van de ondergrond en wordt daarom als de werkelijke situatie genomen. Door veilige keuzes in de schematisering en door bepaling van de bijbehorende schematiseringsfactor zijn (rest)onzekerheden ten opzichte van de werkelijke situatie ondervangen.

In figuur 4 is de gehanteerde 2D doorsnede uit ISAC|piping weergegeven.



Figuur 4: 2D doorsnede dijkprofiel inclusief stromingspatroon bij welvorming

Naast de HPT sonderingen en minipompproeven zijn op de projectlocatie diverse andere methoden uitgevoerd om de doorlatendheid van het zandpakket te bepalen. Een complete beschrijving van het uitgevoerde onderzoek en de resultaten hiervan is opgenomen in het

factual report [3], dat als achtergrondrapportage is opgeleverd binnen het POV-onderzoek. Binnen het voorliggend onderzoek zijn de resultaten van de volgende methoden meegenomen ter vergelijking:

- Doorlatendheid uit het REGIS-model
Hierbij is het gewogen gemiddelde van het gehele watervoerend pakket genomen. De doorlatendheid is daarbij bepaald op 46 m/d.

- Numerieke modelfit op peilbuiswaarnemingen tijdens een klein hoogwater
Op basis van het gemeten hoogwater rond 22 oktober 2015 en een fit aan peilbuiswaarnemingen is, in een hydrologisch model, de doorlatendheid van het watervoerend pakket bepaald op ca. 17 m/d.

- Correlatie op basis van korrelverdelingen
In totaal zijn 20 korrelverdelingen bepaald op verschillende diepten van het watervoerend pakket tot ca. 25 m -MV. Op basis van de methode Den Rooijen, zoals opgenomen in het ORZW 2012 [1] is de karakteristieke hoge doorlatendheid van het zandpakket bepaald op 7,3 m/d. Dit is een zeer lage waarde. In een eerdere toetsing van de dijk is de doorlatendheid op basis van korrelverdelingen op 21 m/d bepaald en op basis van de methode Hazen, eveneens gebaseerd op korrelverdelingen, volgt een gemiddelde doorlatendheid van 16 m/d.

Ook deze situaties zijn geschematiseerd in Plaxflow. In deze geïdealiseerde situaties is het watervoerend pakket als één homogene laag geschematiseerd met één doorlatendheid op basis van bovengenoemde methodes.

Binnen de eerste toetsronde is een doorlatendheid van 21,6 m/dag aangehouden. Deze doorlatendheid is volgens de informatie van het waterschap gebaseerd op zowel de grondwaterkaart van TNO als op korrelverdelingen. Destijds is het oordeel 'GOED' gegeven op het beoordelingsspoor piping. De resultaten van ISAC|Piping en bovenstaande methoden zullen ook worden afgezet tegen uitkomsten van de in de toetsing gebruikte doorlatendheid.

3. UITGANGSPUNTEN

In dit hoofdstuk volgt een korte beschrijving van de gehanteerde uitgangspunten. Een gedetailleerde beschrijving van de uitgangspunten en geohydrologische gesteldheid van de projectlocatie is opgenomen in de achtergrondrapportages “Analyse vergelijking doorlatendheidsmetingen en HPT sonderingen” [4] en “Invloed bepaling k-waarde op pipingtoets” [5].

3.1. Geometrie en aanwezige kwelweglengte

De geometrie van het dijklichaam is overgenomen uit het AHN2. De geometrie van de teensloot is overgenomen vanuit de legger van waterschap Aa en Maas omdat het AHN hier minder betrouwbaar is. Vanwege het ontbreken van lodingsgegevens is de bodem van de Bergsche Maas is aangenomen op NAP -4 m (doorsnijdt de deklaag).

De aanwezige kwelweglengte is bepaald op 77 m. Het uittreepunt is daarbij gekozen op de locatie van de teensloot. Het intreepunt is aangenomen op de locatie waar de rivier de deklaag doorsnijdt.

3.2. Hydraulische randvoorwaarden

Maatgevend hoogwaterpeil: NAP +4,9 m (HR2006)
Winterpeil polder: NAP -0,5 m (peilbesluit Koningsvliet, Aa en Maas)

Tijdens maatgevende omstandigheden is het verval (ΔH) over de kering daarmee gelijk aan 5,4 m.

3.3. Dikte watervoerend pakket en aanwezigheid stoorlagen

Vanaf een diepte van ca. NAP -7 m is op de meeste onderzoekslocaties een kleilaag van ongeveer 0,5 m dik aangetroffen. Een dergelijke kleilaag is van grote invloed op het stromingspatroon onder de dijk en daarmee op de beoordeling van het faalmechanisme. Omdat niet is aangetoond dat deze kleilaag overal aanwezig is, is het scenario waarbij deze stoorlaag niet aanwezig is, als referentie (werkelijke situatie) genomen. De dikte van het watervoerend pakket is overgenomen uit REGIS en bedraagt 50 m, vanaf onderzijde deklaag tot de eerste scheidende laag (Formatie van Waalre).

Overigens worden overige stoorlagen en minder goed doorlatende zandlagen vanzelf meegenomen in de ISAC|piping modellering op basis van de HPT sonderingen en minipompproeven. Deze metingen geven immers over de diepte variaties in de doorlatendheid van de ondergrond, in dit geval tot 30 m -MV. Beneden deze diepte is de doorlatendheid voor de formatie van Sterksel (zand 2) uit REGIS overgenomen (65 m/d). De genoemde stoorlaag is in de ISAC|piping modellering, vanuit het oogpunt van veilig schematiseren, doelbewust uit het model gehaald.

3.4. Doorlatendheid watervoerend pakket

In onderstaande tabel een resumé van de methoden op basis waarvan de doorlatendheid van het watervoerend pakket is bepaald, de bepaalde doorlatendheid en beschrijving van de schematisatie van het watervoerend pakket.

Tabel 1: Ondergrondschematisatie WVP

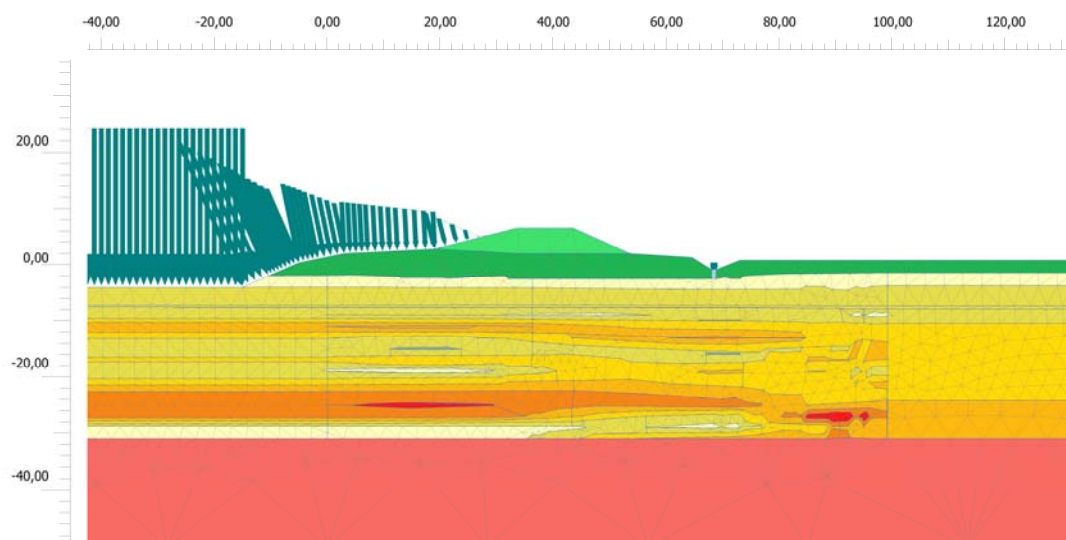
Nr.	Methode k-bepaling	k-waarde WVP [m/dag]	Ondergrondschematisatie WVP
1	HPTs - ISAC Piping	Variabel	Meerlaags (50 m), met stoorlaag op NAP -7 m
2	HPTs - ISAC Piping	Variabel	Meerlaags (50 m), zonder stoorlaag
3	Korrelverdelingen (Den Rooijen)	7,3	1 homogeen WVP (50 m), zonder stoorlaag
4	Fit op peilbuisdata	17	1 homogeen WVP (50 m), zonder stoorlaag
5	REGIS (gewogen gemiddelde)	46	1 homogeen WVP (50 m), zonder stoorlaag

3.5. Hydrologisch model

In figuur 5 is een uitsnede van het hydrologische model weergegeven zoal geschematiseerd in Plaxflow. De verschillende kleuren van de grondlagen geven de mate van doorlatendheid aan: des te roder de kleur des te hoger de doorlatendheid.

De grondlagen zijn, buiten het gebied waar veldonderzoek heeft plaatsgevonden, recht doorgezet tot aan de modelranden.

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. Aan de binnendijkse zijde is het model tot ca. 850 m vanaf de dijk doorgezet aan de hand van een analyse van het invloedsgebied van het proces.



Figuur 5: Hydrologisch Plaxflow-model op basis van 3D ondergrondmodel en HPT-data

3.6. Welbreedte

In het model is een wel geschematiseerd met een breedte gelijk aan de slootbodem, hetgeen in dit geval overeenkomt met 0,75 m. De keuze voor de welbreedte is van invloed op het stromingspatroon onder de dijk. Onder welbreedte wordt in dit geval de breedte van het voedingskanaal verstaan, niet de breedte van het zandlichaam of de kraterdiameter bij droogvallen.

Op basis van een gevoeligheidsanalyse waarbij de welbreedte is gevarieerd volgt dat de correctiefactor lager wordt wanneer een relatief kleine welbreedte wordt aangehouden. Het is dan ook zaak een conservatieve bovengrens voor de welbreedte aan te houden. Een welbreedte gelijk aan de slootbodem van 0,75 m wordt geacht een conservatieve keus te zijn, aangezien het minder waarschijnlijk is dat de slootaluds opbarsten en omdat het schadebeeld bij welvorming wijst op een relatief geringe breedte van het opbarstkanaal. In onderstaand figuur zijn een aantal foto's van wellen opgenomen uit het ORZW [1]. De welbreedte lijkt in alle gevallen beperkt te zijn tot maximaal ca. 30 cm. Internationale literatuur wijst uit dat de breedte eigenlijk altijd beperkt is tot ca. 0,5 m.



Figuur 6: Zandmeevoerende wellen, overgenomen uit het ORZW [2]

3.7. Toetsregel, parameterkeuze en veiligheidsfactoren

De beoordeling is uitgevoerd aan de hand van de aangepaste toetsregel van Sellmeijer. In tabel 2 is een overzicht opgenomen van de gehanteerde parameters.

Tabel 2: Parameters en veiligheidsfactoren

Parameter	Eenheid	Waarde	Toelichting
ΔH	[m]	5,4	zie §3.2 en [5]; maatgevend verval over waterkering
$Y_{b,pip}$	[-]	1,01	zie [5] o.b.v. uitwerking schematiseringsfactor
Y_n	[-]	1,36	zie [5] en tabel 7.3 uit [1]; veiligheidsfactor
d	[m]	0,85	zie [5]; lage karakteristieke waarde deklaagdikte onder slootbodem
L	[m]	77	Zie §3.1 en [5]; lage karakteristieke waarde aanwezige kwelweglengte
d_{70}	[μm]	246	zie [5], lage karakteristieke waarde gebaseerd op korrelverdelingen van top watervoerend pakket

4. RESULTATEN

In tabel 3 zijn de resultaten van de analyses opgenomen. Het kritieke verval zoals uitgerekend op basis van de aangepaste rekenregel van Sellmeijer is daarbij vertaald naar berm lengtes. De berm lengte is het verschil tussen de benodigde kwelweg lengte en de aanwezige kwelweg lengte in de huidige situatie.

Tabel 3: Resultaten kwelweganalyse met Sellmeijer 2011 o.b.v. ISAC|Piping

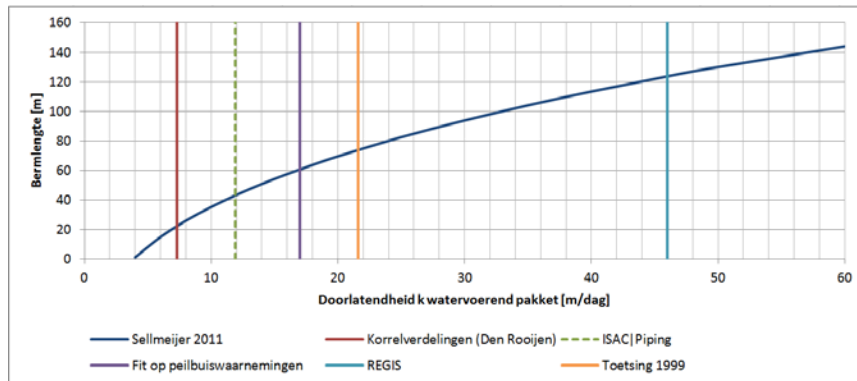
Nr.	Methode k-bepaling	k-waarde WVP [m/dag]	Berm-lengte [m]	Correctie-factor t.o.v. geïdealiseerde REGIS situatie [-]	Δ Berm lengte t.o.v. REGIS [m]	Δ Berm lengte t.o.v. REGIS [%]
1	ISAC Piping (zonder stoorlaag) = referentie	Variabel (geïdealiseerde k = 11,9 m/d)	43	0,26	-81	65%
2	Korrelverdelingen (Den Rooijen)	7,3 ¹⁾	22	-	-102	80%
3	Fit op peilbuisdata	17	61	-	-63	50%
4	REGIS (gewogen gemiddelde)	46	124	-	0	0%
5	Toetsing (1999)	21,6	73	-	-51	40%

¹⁾ karakteristieke hoge waarde wijkt sterk af van de andere methoden

Op basis van de klassieke methoden om de doorlatendheid te bepalen zijn berm lengtes van 22 tot 124 m bepaald. Op basis van een numerieke grondwaterstromingsberekening blijkt dat een doorlatendheid van het watervoerend pakket van 11,9 m/d, in de geïdealiseerde 1-laags situatie, het beste aansluit op de werkelijke situatie zoals deze wordt benaderd met ISAC|Piping. Op basis van de nieuwe rekenregel van Sellmeijer (2011) vertaalt dit zich in een additioneel benodigde kwelweg lengte (hier vertaalt naar berm lengte) van 43 m.

Overigens wordt opgemerkt dat de voldoende beoordeling op piping uit de eerste toetsronde, geen stand meer houdt. Op basis van de in deze toetsing aangehouden doorlatendheid en de aangepaste toetsregel op basis van Sellmeijer volgt een berm lengte van 73 m.

In figuur 7 is de berm lengte uitgezet als functie van de doorlatendheid van het watervoerend pakket.



Figuur 7: Bermengte als functie van doorlatendheid en methoden

5. DISCUSSIE EN AANBEVELINGEN

5.1. Toepassing ISAC|Piping en besparingen

Grondwaterstroming onder een dijk en daarmee piping is een complex proces dat sterk afhankelijk is van bodemopbouw en doorlatendheidscontrasten tussen de grondlagen. Toepassing van ISAC|Piping maakt het mogelijk om deze complexe situatie te vertalen naar een beoordeling op basis van de rekenregel van Sellmeijer. De innovatie ISAC|piping staat voor 'In-Situ Aquifer Characterization', specifiek voor piping vraagstukken, en levert een 3D ondergrondmodel met een ruimtelijke verdeling van doorlatendheid en berging. Dit maakt het mogelijk om de doorlatend van de ondergrond en de doorlatendheidscontrasten tussen verschillende bodemlagen beter in beeld te brengen.

Er is veel onzekerheid over de bodemopbouw/doorlatendheid en heterogeniteit, waardoor pipingtoetsen conservatief gedaan worden. Met ISAC|Piping is aangetoond dat, met een relatief kleine inspanning (in vergelijking met versterkingskosten), een beter inzicht in de heterogeniteit en verkleining van de onzekerheden behaald kan worden. Dit leidt tot een kleiner areaal waterkeringen dat ten onrechte wordt afgekeurd op piping en tot optimalisatie in het versterkingsontwerp.

In het uitgewerkte voorbeeld levert de toepassing van ISAC|Piping een besparing op van 81 m berm lengte ten opzichte van de bepaling op basis van REGIS. Hiermee kan een besparing worden gerealiseerd van enkele miljoenen euro's per kilometer waterkering. Ook ten opzichte van de fit op de peilbuiswaarnemingen kan scherper worden geschematiseerd door een meer nauwkeurige bepaling van de doorlatendheidscontrasten van het watervoerend pakket.

5.2. Toepassing korrelverdelingen en regionale modellen

Het toepassen van de methode Den Rooijen, om op basis van korrelverdeling de doorlatendheid te bepalen en de rekenmethode om daar te komen (zie ORZW [1]), leiden in het voorbeeld tot een zeer lage doorlatendheid. Deze lage doorlatendheid resulteert in een berm lengte die de helft korter is in vergelijking met de berm lengte zoals berekend op basis van ISAC|Piping. Hier wordt opgemerkt dat de korrelverdelingen niet alleen van de bovenste, fijnere zandlaag zijn genomen, maar zijn verdeeld over het watervoerend pakket tot een diepte van ca. 25 m -MV.

De relatie met korrelverdeling geeft in vergelijking met de andere in dit project gehanteerde methoden een zeer lage doorlatendheid en kan leiden tot een onterecht optimisme in toetsing en ontwerp. Dat korrelverdelingen een lagere doorlatendheid opleveren is eveneens in lijn met de bevindingen zoals gepresenteerd in [4].

Schattingen op basis van regionale modellen kunnen, zoals hier aangetoond, zeer conservatief zijn omdat hier vaak de diepere grovere en dus meer doorlatende zandlagen dominant zijn. Dit komt hoofdzakelijk doordat bij piping met name ondiepe en gebogen grondwaterstroming een rol speelt, waarbij verschillen tussen lagen dominant zijn. Bij regionale grondwaterstroming gaat het om uitsluitend horizontale stroombanen en spelen laagwisselingen daarom weinig tot geen rol. Dit zelfde effect speelt bij pompproeven waarbij een waarde voor het gehele watervoerend pakket wordt afgeleid.

Bovenstaande is in lijn met de waarschuwingen die worden gegeven in het ORZW [1] ten aanzien van het gebruik van regionale grondwatermodellen en relaties met korrelverdelingen om de doorlatendheid te bepalen.

5.3. Veiligheidsfilosofie

De rekenregel van Sellmeijer schrijft voor dat er gerekend dient te worden met een hoge karakteristieke doorlatendheid. Wanneer de doorlatendheden worden bepaald op basis van een regionaal grondwatermodel of een fit op peilbuiswaarnemingen is de bepaling van deze karakteristieke waarde niet altijd eenduidig te maken doordat men vaak niet de beschikking heeft over meerdere meetwaarden of de onderliggende statistiek niet bekend is. In het geval van korrelverdeling heeft men veelal wel voldoende data om deze statistiek te bedrijven. Op basis van expert judgement kan via de schematiseringsfactor de onzekerheden in de doorlatendheid worden verdisconteerd in de analyse.

Binnen ISAC|Piping is het mogelijk om een stochastisch ondergrondmodel van de doorlatendheid op te stellen van waaruit een karakteristieke doorlatendheid van de verschillende grondlagen kan worden bepaald. In dit onderzoek zijn de doorlatendheidsprofielen gebruikt zoals die volgen uit de HPT sonderingen gecombineerd met de HPT testen en is geen karakteristiek doorlatendheidsprofiel of stochastisch ondergrondmodel toegepast. Dit is gedaan om een zuivere vergelijking met REGIS en de fit op de peilbuiswaarnemingen mogelijk te maken daar in deze gevallen ook niet is gerekend met een karakteristieke waarde. In een separaat onderdeel van deze POV Piping Verkenning worden enkele methoden gepresenteerd om vanuit HPT sonderingen karakteristieke waarden voor de doorlatendheid te bepalen. In het uitgewerkte voorbeeld in dit rapport is echter wel een conservatieve keuze gemaakt om de ca. 0,5 m dikke stoorlaag op NAP -7 m niet mee te nemen in de schematisering. Het meenemen van deze stoorlaag in de schematisering resulteert in een benodigde kwelweglengte van 71 m, waarmee de dijk zou voldoen op piping. Het voorkomen van deze stoorlaag op de gehele projectlocatie zou met aanvullend onderzoek kunnen worden bepaald.

5.4. Aanbevelingen

Gebruik regionale modellen en effect schaalgrootte bij doorlatendheidsbepaling

Aanbevolen wordt om regionale modellen zoals REGIS, de TNO-grondwaterkaart en korrelverdelingen, voor het bepalen van de doorlatendheid in de beoordeling op piping, met terughoudendheid te gebruiken. Ook bij andersoortige methoden om de doorlatendheid te bepalen, zoals slugtesten en laboratoriumproeven, moet men bedacht zijn op het effect van de proefschaal op de berekende doorlatendheden. Des te kleiner het betrokken volume bij de proef, des te lager de berekende doorlatendheid. Dit effect en een handreiking hoe hier mee om te gaan is beschreven in [4], waarin ook is aangetoond dat het schaalniveau van de MPT-test goed aansluit bij het schaalniveau waarop het pipingproces zich afspeelt. In de praktijk zal men veelal van grof naar fijn werken, waarbij het combineren en stapelen van onder andere doorlatendheidsdata tot een aanscherping van de beoordeling zal leiden.

ISAC | Piping gecombineerd met DGFlow

Binnen het WBI 2017 (voorheen WTI 2017) wordt DgFlow ontwikkeld. DgFlow is een numeriek grondwaterstromingsmodel gecombineerd met een pipingmodule waar het criterium van Sellmeijer, ten aanzien van evenwicht van de zandkorrels, is ingebouwd. DgFlow biedt daarmee de mogelijkheid om de heterogeniteit (lees: doorlatendheidscontrasten) direct mee te nemen in de pipinganalyse zonder dat er een vertaling nodig is naar een geïdealiseerde situatie met één homogeen watervoerend pakket. Grondwaterstroming en pipinganalyse worden binnen DgFlow gecombineerd uitgevoerd. DgFlow is naar alle verwachting in de zomer van 2016 beschikbaar. Aanbevolen wordt om voor de projectlocatie Doeveren de analyses ook met DgFlow uit te voeren ten einde de

resultaten zoals opgenomen in deze rapportage te verifiëren. Tevens biedt dit de mogelijkheid tot een praktijktest voor de implementatie van DgFlow binnen een maatwerkanalyse.

Nut en noodzaak aanvullend onderzoek naar d_{70}

Daarnaast kunnen de resultaten van ISAC|Piping worden gebruikt om de nut en noodzaak voor (aanvullend) onderzoek voor bepaling van de d_{70} -parameter te beoordelen. Het is de verwachting dat deze parameter bij toekomstige toetsingen voornamelijk zal worden bepaald op basis van geologische informatie uit de DINO-database. De resultaten van ISAC-Piping geven inzicht in de heterogeniteit binnen de verschillende geologische eenheden en kunnen zodoende worden gebruikt om lokaal de nut en noodzaak voor het bepalen van de d_{70} op basis van korrelverdelingen te bepalen.

Bepaling anisotrope doorlatendheid

Op basis van de meettechnieken zoals gebruikt binnen ISAC|Piping is het ook mogelijk om de anisotropie van de watervoerende zandlaag te bepalen. Door het plaatsen van extra druksensoren in horizontale richting van het injectiepunt tijdens een MPT-test kan zowel de horizontale als verticale doorlatendheid worden bepaald, waarbij de verticale doorlatendheid doorgaans kleiner is dan de horizontale. Elke afzetting binnen het piping gevoelige areaal in Nederland is in meer of mindere mate anisotroop. Deze anisotropie is van invloed op het stromingspatroon onder de dijk en daarmee op de kans op falen door piping. Aanbevolen wordt om deze A(nisotrope)MPT-testen uit te voeren en uit te werken binnen ISAC|Piping. Een voorstel hiervoor is inmiddels ingediend bij de werkgroep van de POV-Piping.

REFERENTIES

- [1] Rijkswaterstaat. (2012). Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen. Versie maart 2012.
 - [2] Ministerie van Verkeer en Waterstaat, RWS. (1994). Technisch Rapport voor controle op het mechanisme piping bij rivierdijken. Januari 1994.
 - [3] Fugro GeoServices B.V. (2015). POV Piping - Continue doorlatendheidsprofielen: verdiepend inzicht in de bodem. Resultaten dataverzameling (factual report). 5 januari 2015. Kenmerk: 1213-0101-000.R01.
 - [4] Fugro GeoServices B.V. (2015). POV Piping - Continue doorlatendheidsprofielen: verdiepend inzicht in de bodem. Analyse vergelijking doorlatendheidsmetingen en HPT sonderingen. 13 april 2015. Kenmerk: 1213-0101-000.R04.
 - [5] Fugro GeoServices B.V. (2015). POV Piping - Continue doorlatendheidsprofielen: verdiepend inzicht in de bodem. Invloed bepaling k-waarde op piping-toets. 5 juni 2015. Kenmerk: 1213-0101-000.R02.
-

Bijlage 1 – Voorbeeld continu doorlatendheidsprofiel op basis van HPT sondering en mini pompproeven (MPT)

