



HWBP Projectgebonden Innovatie 'Naar een geohydrologische aanpak voor piping'



Deelproduct 4: Uitvoerbaarheidstoets II Definitief

Waterschap Aa en Maas

31 maart 2020

COLOFON

Aangeboden door Projectteam Projectgebonden Innovatie Meanderende Maas
Project HWBP Projectgebonden Innovatie "Naar een geohydrologische aanpak voor piping"
Opdrachtgever Waterschap Aa en Maas

Document Deelproduct 4. Uitvoerbaarheidstoets II
Datum 20 maart 2020
Referentie -

Auteur(s) Guido van Rinsum (Witteveen en Bos)
Martine Brinkhuis (Tauw)

Checklist	Door wie	Vink of paraaf
Interne review	Henk van Hemert, Suan Pwa, Lisa de Gee	✓
Eindcontrole	CvE + TMC	✓
Goedgekeurd door	TM Jacco Hoogewoud (Advies in Water)	✓
Vrijgegeven door	PM Martine Brinkhuis (Tauw)	✓

Commissie van betrokken experts (CvE)	Aandachtspunt
Ruben Jongejan	Veiligheidsbenadering en probabilistiek
Henk van Hemert	Geotechniek en dijkontwerp
Ane Wiersma	Geologie en (gebrek aan) data.
Henk Weijers	Communicatie en draagvlak

INHOUDSOPGAVE

1	INLEIDING	9
1.1	Aanleiding	9
1.2	Plaats in innovatietraject	10
1.3	Uitvoerbaarheidstoets II	10
1.4	Leeswijzer	11
2	AANPAK OP HOOFDLIJNEN	12
2.1	Aanpak uitvoerbaarheidstoets II	12
2.1.1	Input uitvoerbaarheidstoets (belasting)	12
2.1.2	Uitvoerbaarheidstoets (sterkte)	13
2.1.3	Resultaat uitvoerbaarheidstoets	13
2.2	Vergelijking tussen uitvoerbaarheidstoets II en eerder fases	13
3	TECHNISCHE AANPAK	15
1.1	Relatie met Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium	15
1.2	Opbarstbeschouwing	15
1.2.1	Sterktevergelijking	15
1.2.2	Omgang met watergangen in opbarstbeschouwing	16
1.3	Heavebeschouwing	16
1.4	Terugschrijdende erosie (Sellmeijer)	17
1.4.1	Model	17
1.5	Vlakdekkende analyse	19
1.6	Stijghoogtebepaling conform TRWD	19
1.6.1	Beschrijving analytisch model	19
1.6.2	Analytische formulering	20
1.7	Rekenlocaties	20
1.8	Veiligheidsfilosofie	21
1.8.1	Veiligheidsfactoren	21
1.9	Parameters bepaling stijghoogte conform TRWD	22
1.10	Parameters (vlakdekkende) pipingbeschouwing	22

4	RESULTATEN	24
4.1	Vlakdekkende analyse	24
4.1.1	Opbarsten	24
4.1.2	Heave	24
4.1.3	Terugschrijdende erosie	25
4.2	Doorsnedes	25
4.2.1	Vergelijking stijghoogtes model en TRWD	25
4.2.2	Sterktebeschouwing doorsnedes	28
5	GEVOELIGHEIDSANALYSES	30
5.1	Wijze van meenemen voorland	30
5.1.1	Aanpak	30
5.1.2	Methodiek in gevoeligheidsanalyse	31
5.1.3	Resultaat gevoeligheidsanalyse	31
5.2	Opbarsten ter plaatse van watergangen	33
5.2.1	Achtergrond	33
5.2.2	Resultaat gevoeligheidsanalyse	33
5.3	Stroming onder hoek met dijk	34
5.3.1	Methode	34
5.3.2	Resultaat gevoeligheidsanalyse	35
5.4	Omgevingsinvloeden	36
5.5	Probabilistische analyse	37
5.5.1	Methode	37
5.5.2	Resultaat gevoeligheidsanalyse	37
6	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	38
6.1	Conclusies	38
6.2	Aanbevelingen	38
6.3	Beschouwing	39
7	REFERENTIES	41
	Laatste pagina	39
	Bijlage(n)	Aantal pagina's
I	Verdelingsparameters WBI	1
II	Parameters vlakdekkend sterktemodel	6
III	Parameters stijghoogteberekening TRWD	5

IV	Parameters stijghoogteberekening TRWD	1
V	Memo probabilistische pipingbeschouwing	

SAMENVATTING

In het kader van de Innovatie Meanderende Maas wordt onderzocht hoe geohydrologische informatie en modellen gebruikt kunnen worden om stijghoogtes beter in te schatten om zo de pipingopgave nauwkeuriger vast te stellen. De hoofdvraag van dit deelproduct is: is de aanpak zoals we die voorstellen uitvoerbaar?

In deze aanpak is de stijghoogte uit het regionale grondwaterstromingsmodel geïmplementeerd in de reguliere sterktemodellen het Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium.

Bij het beoordelen en ontwerp op piping van primaire waterkeringen wordt in het Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium (BOI) gekeken naar drie deelmechanismen. De deelmechanismen opbarsten, heave en piping moeten alle drie optreden om het faalmechanisme piping te laten optreden. Deze drie deelfaalmechanismen zijn in de uitvoerbaarheidstoets ook beschouwd met als input de stijghoogte uit het regionale grondwaterstromingsmodel.

In de uitvoerbaarheidstoets is vlakdekkend in kaart gebracht waar:

- het opbarstisico groter is dan de norm vereist;
- het heaverisico te groot is;
- wat het kwelweglengtetekort is.

Met de uitvoerbaarheidstoets is aangetoond dat de koppeling tussen het regionale grondwaterstromingsmodel en de sterktemodellen mogelijk is. Bovendien past de werkwijze binnen de huidige systematiek van het BOI.

Om de resultaten te kunnen gebruiken in het dijkontwerp en daarmee aan te sluiten bij het lopende dijkversterkingsproject zullen nog een aantal stappen gezet moeten worden.

1

INLEIDING

1.1 Aanleiding

De nieuwe norm voor waterveiligheid per 1 januari 2017 stelt het waterschap Aa en Maas voor de opgave om circa 100 km primaire dijk te versterken. Een deel van deze versterkingsopgave is toe te schrijven aan het faalmechanisme piping. Bij piping wordt door waterstroming onder de dijk zand meegevoerd waarbij de dijk ondermijnd wordt. De berekende pipingopgave is erg groot en voelt, op basis van ervaringen tijdens hoogwaters in het verleden, als onrealistisch groot. De bij deze opgave behorende versterkingsmaatregelen kosten veel geld en ruimte.

Eén van de lopende dijkversterkingsprojecten van waterschap Aa en Maas is de versterking van dijktraject 36-3 van Ravenstein tot Lith, zie Afbeelding 1.1. Dit dijkversterkingsproject draagt de naam Meanderende Maas en de verkenning van dit project is inmiddels afgerond. Voor dit dijkversterkingsproject is een projectgebonden subsidie verleend door het Hoogwater Beschermingsprogramma (HWBP) om te onderzoeken of door het gebruik van de geohydrologische informatie de pipingopgave verkleind kan worden.

Afbeelding 1.1 Projectgebied Meanderende Maas



In het kader van de projectgebonden innovatie Meanderende Maas wordt onderzocht hoe geohydrologische informatie en modellen gebruikt kunnen worden om stijghoogtes beter in te schatten om zo de pipingopgave nauwkeuriger vast te stellen. De geohydrologische modellen worden hierbij gekoppeld aan de reguliere sterktemodellen voor opbarsten, piping en heave. De verwachting is dat deze aanpak, met name in gebieden met veel voorland, lagere stijghoogtes oplevert.

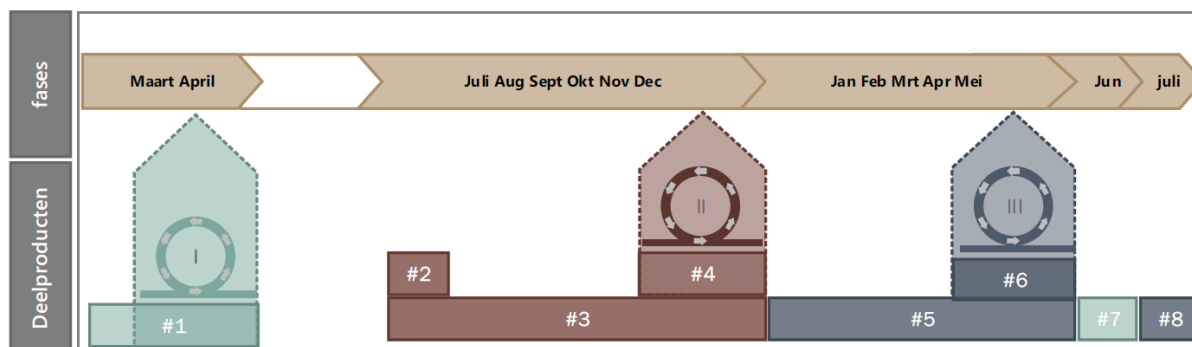
In het innovatietraject en deze uitvoerbaarheidstoets is uitgegaan van de huidige situatie met betrekking tot de rivier en de omgeving. Rivierverruimende maatregelen zijn niet beschouwd.

1.2 Plaats in innovatietraject

Het innovatietraject bestaat uit verschillende fases waarbij gebouwd wordt aan het regionale grondwaterstromingsmodel en waarbij de daarmee verkregen informatie/kennis wordt gebruikt om de sterktemodellen te actualiseren. De verschillende deelproducten/fases van het innovatietraject zijn weergegeven in Afbeelding 1.2:

- deelproduct 1 (#1) is afgerond, in dit deelproduct is aangetoond dat het meenemen van de geohydrologische aanpak potentie heeft en een grote invloed kan hebben op de versterkingsopgave. De fase die tot dit product heeft geleid wordt ook wel uitvoerbaarheidstoets I genoemd;
- deelproduct 2 (#2) is afgerond, in dit deelproduct is beschreven hoe de geohydrologische informatie gebruikt wordt in de (reguliere) sterktemodellen van het Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium (BOI);
- in deelproduct 3 (#3) zijn de geohydrologische modellen geüpdatet en is een 95 %-waarde van de stijghoogte afgeleid;
- de voorliggende rapportage betreft deelproduct 4. Deze rapportage beschrijft de werkwijze en het resultaat van uitvoerbaarheidstoets II, waarin het effect van de afgeleide stijghoogte uit deelproduct 3 (95%-waarde) op de pipingopgave wordt bepaald.

Afbeelding 1.2 Fases innovatietraject



De onderzoeksactiviteiten borduren op elkaar voort. Gedurende het innovatietraject wordt op drie momenten de beschikbare kennis afgetapt en toegepast in een ontwerp-aanpak ('uitvoerbaarheidstoets'). Dit helpt te bewaken dat de focus blijft liggen op de onderdelen van het onderzoek die in de praktijk het meest nodig zijn. Ook helpt het een zekere vaart in het onderzoekstraject te houden: een uitvoerbaarheidstoets werkt als een katalysator.

1.3 Uitvoerbaarheidstoets II

In het Plan van Aanpak [ref. 12] vormt de voorliggende rapportage Uitvoerbaarheidstoets II. In totaal zijn er drie uitvoerbaarheidstoetsen in het project. De hoofdvraag bij de uitvoerbaarheidstoetsen is steeds: **"Is de aanpak zoals we die voorstellen uitvoerbaar?"** Voor uitvoerbaarheidstoets II staat de inpassing in de beschikbare basisinstrumenten (BOI) centraal. Hierover staat in het Plan van Aanpak het volgende beschreven:

- a) Formuleren concreet voorstel voor de omgang met de onzekerheden ten aanzien van stijghoogtevoorspellingen met regionale modellen bij beoordelingen voor opbarsten, piping en heave. Dit kan door probabilistische verificaties. Verkend zal worden of de gebruikelijke veiligheidsfactoren ook aangepast zouden moeten worden bij semi-probabilistische verificaties vanwege de andere (doorwerking van) onzekerheden;
- b) toepassen op praktijkcasus bij Meanderende Maas. Dit heeft de functie van 'proof of concept': hoe pakt de aanpak en de doorwerking van de onzekerheden uit voor een concrete praktijk casus bij

Meanderende Maas. Kunnen we uit de voeten met het basis instrumentarium of zijn nog extra tools nodig.

Het gaat bij de uitvoerbaarheid in deze fase niet om de exacte uitkomsten maar om de vraag of de berekeningen praktisch en binnen redelijke tijd uitvoerbaar zijn en of het robuuste reproduceerbare uitkomsten oplevert. Daarnaast is belangrijk of een eenvoudige interpretatie van de rekenresultaten mogelijk is.

De genoemde onderdelen komen terug in de vragen die op 3 december zijn geformuleerd door de Commissie van Experts (CvE):

1. functioneert het rekeninstrumentarium (geohydrologie + BOI) en levert het logische, bruikbare en begrijpelijke resultaten op?
2. lijkt het nog steeds een besparing op te leveren binnen dijkversterking Meanderende Maas?
3. zijn er onvoorziene zaken naar voren gekomen?
4. is de wijze van presenteren aan de beoogde gebruikers handig?

Voorliggend deelrapport beschrijft de aanpak en resultaten van Uitvoerbaarheidstoets II en eindigt met de beantwoording van deze vier deelvragen.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 is de aanpak van de uitvoerbaarheidstoets op hoofdlijnen beschreven. In hoofdstuk 3 is de aanpak verder uitgewerkt, hierbij zijn de rekenmethodieken beschreven. De parameters die in deze analyse zijn gebruikt worden in dit hoofdstuk samengevat, waarbij voor verdere toelichting wordt verwezen naar de bijlages. In hoofdstuk 4 volgen de resultaten van de analyse. In hoofdstuk 5 zijn de gevoeligheidsanalyses en de resultaten beschreven. In hoofdstuk 6 volgen de conclusies en aanbevelingen. Voor de gebruikte bronnen wordt verwezen naar hoofdstuk 7.

Een belangrijk verschil tussen de twee methodes is dat het TRWD uitgaat van stationaire grondwaterstroming, het regionale grondwaterstromingsmodel houdt rekening met de hoogwatergolf en de daarbij behorende tijdsafhankelijkheid in de stijghoogte. Daarnaast is de TRWD-methode geschikt voor 2-dimensionale configuraties, met instroming vanuit verschillende richtingen is geen rekening gehouden.

2.1.2 Uitvoerbaarheidstoets (sterkte)

De met het regionale grondwaterstromingsmodel berekende belasting (stijghoogtes) is gebruikt om de piping-opgave te bepalen. Voor deze sterkteberekeningen is gewerkt met het standaard beoordelings- en ontwerpinstrumentarium (BOI). Hiertoe zijn de uitkomsten van het regionale grondwaterstromingsmodel gekoppeld aan de WBI2017/BOI-grenstoestandfuncties voor opbarsten, heave en piping. De wijze waarop dit is gebeurd staat uitgelegd en onderbouwd in deelproduct 2 [ref. 8].

De belastingen (stijghoogtes) zijn gebruikt om conform het beoordelings- en ontwerpinstrumentarium (BOI) het pipingrisico of de pipingopgave te bepalen. In deze methode is aangesloten bij de huidige geaccepteerde methodieken (sterktevergelijkingen of grenstoestandfuncties). Per deelfaalmechanisme (opbarsten, piping en heave) is in deelproduct 2 beschreven hoe hiermee is omgegaan [ref. 8].

De sterkte is vlakdekkend en voor een drietal doorsneden bepaald. Hierbij wordt benadrukt dat de vlakdekkende (sterkte)modellering in feite een serie van een groot aantal doorsneden haaks op de dijk betreft. Voor iedere gridcel (5 bij 5 meter) achter de dijk zijn de sterktevergelijkingen geëvalueerd. In hoofdstuk 3, technische aanpak, is deze methode verder uitgewerkt. De uitkomst van de berekeningen voor de drie doorsneden zal een gelijk resultaat opleveren als de vlakdekkende analyse. Deze doorsneden zijn berekend om de (2D) stijghoogte conform het TRWD te vertalen naar de weerstand tegen piping en om meer gevoel bij de uitkomsten te krijgen (aansluiten bij de gangbare ingenieurspraktijk).

2.1.3 Resultaat uitvoerbaarheidstoets

Het resultaat van de uitvoerbaarheidstoets is:

1. een vergelijking van de stijghoogtes bepaald met het TRWD en het regionale grondwaterstromingsmodel voor drie doorsneden;
2. vlakdekkende kaarten met ruimtelijke opbarst- en heaverisico's en kwelweglengtetekorten;
3. het kwelweglengtetekort voor de drie doorsneden.

2.2 Vergelijking tussen uitvoerbaarheidstoets II en eerder fases

Voor het projectgebied tussen Ravenstein en Lith zijn recent verschillende analyses van het waterveiligheidsopgave uitgevoerd. Om een overzicht te geven tussen de verschillende ontwerp- of beoordelingskeuzes en aannames is in tabel 2.1 een overzicht gegeven van de belangrijkste parameters en de keuzes in de verschillende fases. Hierbij is deze verschilanalyse beperkt tot (1) de verkenningsfase van het dijkversterkingsontwerp, (2) uitvoerbaarheidstoets I binnen de opstartfase van het innovatietraject en de keuzes die in (3) uitvoerbaarheidstoets II zijn gemaakt. De keuzes voor uitvoerbaarheidstoets II zijn verder uitgewerkt in het hoofdstuk 3.

Tabel 2.1 Verschilanalyse uitgangspunten

	Schematiseringskeuze	Omgang/herkomst per fase		
		Verkenningfase	UVT I (Demen-Dieden)	UVT II
Algemeen	Geometrie	40 doorsneden	2 doorsneden	Vlakdekkend en 3 doorsneden
	Dikte deklaag	Boringen en sonderingen verkenning	Boringen en sonderingen verkenning	Extra grondonderzoek.
	Hydraulische randvoorwaarden	Conform OI2014v4, met en zonder rivierverruimende maatregelen.	Conform OI2014v4 met waterstandsaling.	Hoogwatergolf 5.000 m ³ /s
	Schematiserings-factor	1,1 voor alle deelfaalmechanismen	1,1 voor alle deelfaalmechanismen	1,1 voor alle deelfaalmechanismen
	Norm-afhankelijke veiligheidsfactor	Standaard conform OI2014v4	Standaard conform OI2014v4	Standaard conform OI2014v4
Piping	Weerstand voorland	Eén keer dijkbasis in het voorland als kwelweglengte	Weerstand voorland op basis van gereduceerde stijghoogte aan buitenteen.	Weerstand voorland op basis van gereduceerde stijghoogte aan buitenteen.
	Keuze in- en uittredepunt (kwelweglengte)	Intredepunt: afhankelijk van deklaagdikte, maximaal één keer dijkbasis van buitenteen Uittredepunt: binnenteen, sloot of lokale laagte.	Intredepunt: buitenteen met gereduceerde stijghoogte. Uittredepunt: binnenteen, sloot of lokale laagte.	Intredepunt: buitenteen met gereduceerde stijghoogte. Uittredepunt: vlakdekkend.
	Doorlatendheid watervoerend pakket.	Veilige schatting (95 %-waarde) op basis van Regis II.	Veilige schatting (95 %-waarde) op basis van Regis II.	Aanscherping veilige schatting op basis van Regis II.
	d70 pipingevoelige laag	Karakteristieke waarde op basis van 40 labproeven.	Karakteristieke waarde op basis van 40 labproeven.	Karakteristieke waarde op basis van 40 labproeven.
	Waterstand / bovenstroomse randvoorwaarde Sellmeijer	Waterstand bij norm	95 %-waarde stijghoogte buitenteen (geohydrologisch model april 2019)	95 %-waarde stijghoogte buitenteen (geohydrologisch model februari 2020).
Opbarsten en heave	Herkomst stijghoogte	Stijghoogte binnendijs gelijk aan waterstand bij norm (WBN)	Stijghoogte binnenteen volgt uit geohydrologisch model. Weerstand voorland wordt zo meegenomen als reductie op verval	Stijghoogte binnenteen volgt uit geohydrologisch model. Weerstand voorland wordt zo meegenomen als reductie op verval
	Watergangen	Opbarsten en heave beschouwd ter plaatse van watergang. Deklaagdikte ten opzichte van slootbodem.	Opbarsten en heave beschouwd ter plaatse van watergang. Deklaagdikte ten opzichte van slootbodem.	Opbarsten en heave vlakdekkend beschouwd dus ook ter plaatse van watergang. Daar deklaagdikte ten opzichte van slootbodem.

TECHNISCHE AANPAK

Bij het beoordelen en ontwerp op piping van primaire waterkeringen wordt in het Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium (BOI) gekeken naar drie deelmechanismen. De deelmechanismen opbarsten, heave en piping moeten alle drie optreden om het faalmechanisme piping te laten optreden. In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe we met de grenstoestandsfuncties voor deze drie deelmechanismen hebben gerekend, en hoe de stijghoogte hieraan is gekoppeld.

3.1 Relatie met Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium

In de technische aanpak is aangesloten bij het beoordelings- en ontwerpinstrumentarium (OI2014v4). Met semi-probabilistische rekenregels is de pipingbeschouwing uitgevoerd. In deze semi-probabilistische beschouwing is de stijghoogte de belastingparameter. In de uitvoerbaarheidstoets is deze parameter bepaald met behulp van het geohydrologische model, zie hiervoor ook deelproduct 3 [ref. 7].

3.2 Opbarstbeschouwing

3.2.1 Sterktevergelijking

In de opbarstbeschouwing is het optredende stijghoogteverschil ($\Delta\Phi$) over de deklaag vergeleken met het kritieke stijghoogteverschil ($\Delta\Phi_{c,u}$). Als het kritieke stijghoogteverschil (inclusief veiligheidsfactoren) kleiner is dan het optredende stijghoogteverschil treedt opbarsten op.

Het optredende stijghoogteverschil is weergegeven in de onderstaande vergelijking [ref. 9]:

$$\Delta\Phi = \Phi_{exit} - h_{exit} = (h - h_{exit}) \cdot r_{exit}$$

Zoals in de vergelijking is weergegeven kan het optredende stijghoogteverschil direct bepaald worden op basis van de direct bepaalde stijghoogte onder de deklaag of als een demping ten opzichte van het polderpeil en de waterstand bij norm. In de gangbare ingenieurspraktijk is de responsfactor in veel gevallen de parameter waarmee wordt gewerkt. In uitvoerbaarheidstoets II is de stijghoogte (95 %-waarde) direct onder de deklaag bekend. Het werken met een responsfactor zou betekenen dat deze berekende stijghoogte eerst teruggerekend zou worden naar een responsfactor (foutgevoelig voor het juiste referentievlak). Daarna zou met behulp van de bepaalde responsfactor het stijghoogteverschil teruggerekend worden. Deze methodiek is onnodig en foutgevoelig. Om deze reden is voor de uitvoerbaarheidstoets gekozen voor het eerste deel van de vergelijking:

$$\Delta\Phi = \Phi_{exit} - h_{exit}$$

De waardes die zijn gehanteerd voor de individuele parameters zijn verder uitgewerkt in paragraaf 3.10.

Het kritieke stijghoogteverschil is gelijk aan [ref. 9]:

$$\Delta\Phi_{c,u} = \frac{D_{deklaag} \cdot (\gamma_{sat} - \gamma_{water})}{\gamma_{water}}$$

In het ontwerp of beoordeling is de volgende verificatie uitgevoerd [ref. 9]:

$$\Delta\Phi \leq \frac{\Delta\Phi_{c,u}}{\gamma_{up} \cdot \gamma_{b,u}}$$

Hier zijn:

$\Delta\Phi$	Het optredende stijghoogteverschil	m
Φ_{exit}	Stijghoogte in de watervoerende laag bij uittredepunt	m+NAP
h_{exit}	Freatisch niveau, of hoogte van maaiveld, bij uittredepunt	m+NAP
h	Waterstand bij norm	m+NAP
r_{exit}	Demping- of responsfactor bij uittredepunt	-
$D_{deklaag}$	Deklaagdikte in opbarstpunt	m
γ_{sat}	Verzadigd volumiek gewicht van de cohesieve laag	kN/m ³
γ_{water}	Volumiek gewicht van water	kN/m ³
γ_{up}	Normafhankelijke veiligheidsfactor opbarsten	-
$\gamma_{b,u}$	Schematiseringsfactor opbarsten	-

Voor de bepaling van de normafhankelijke veiligheidsfactor voor opbarsten wordt verwezen naar vergelijking 4.9 uit [ref. 9].

3.2.2 Omgang met watergangen in opbarstbeschuwing

Ter plaatse van een watergang is de deklaag lokaal dunner of niet aanwezig. Afhankelijk van de verhouding tussen slootbreedte, slootdiepte en deklaagdikte kan worden bepaald welke deklaagdikte in de analyse kan worden meegenomen. De methode om dit te bepalen is beschreven in (onder andere) de schematiseringshandleiding piping [ref. 1].

De methode vraagt om gedetailleerde informatie van de slootafmetingen. In de huidige rekenmethodiek van de uitvoerbaarheidstoets II is deze beschouwing niet (gemakkelijk) uit te voeren omdat de slootafmetingen vastgelegd zijn door de afmetingen van het rekengrid (5 bij 5 meter). De mogelijke optimalisatie is daarom niet meegenomen in uitvoerbaarheidstoets II. In een gevoeligheidsanalyse (hoofdstuk 4) is onderzocht of deze optimalisatie kan leiden tot een gewijzigd oordeel.

3.3 Heavebeschuwing

De heavebeschuwing gaat uit van een kritieke heavegradiënt die kan worden overschreden door een optredend stijghoogteverschil over de deklaag. De beschouwing vertoont overeenkomsten met opbarsten. Voor de voorkomende deklaagdiktes en volumieke gewichten in het projectgebied zal heave een ongunstiger resultaat geven dan opbarsten. Echter, de normafhankelijke veiligheidsfactor voor heave is soepeler. Daarom kan niet op voorhand worden bepaald welk van de twee deelfaalmechanismen maatgevend is.

De optredende heavegradiënt is conform ref. 9 gelijk aan:

$$i = \frac{(h - h_{exit}) \cdot r_{exit}}{D_{deklaag}}$$

In overeenstemming met de opbarstbeschouwing kan het optredende stijghoogteverschil over de deklaag ook worden geschreven als functie van de direct onder de deklaag bepaalde stijghoogte (in plaats van de responsfactor):

$$i = \frac{\Phi_{exit} - h_{exit}}{D_{Deklaag}}$$

Deze vergelijking is, om dezelfde reden als voor opbarsten, gehanteerd in de uitvoerbaarheidstoets II.

In het ontwerp of de beoordeling is de volgende verificatie uitgevoerd:

$$\frac{\Phi_{exit} - h_{exit}}{D_{Deklaag}} \leq \frac{i_{c,h}}{\gamma_{he} \cdot \gamma_{b,h}}$$

Hier zijn:

i	De optredende heavegradiënt	-
$i_{c,h}$	De kritieke heavegradiënt	-
γ_{up}	Normafhankelijke veiligheidsfactor heave	-
$\gamma_{b,u}$	Schematiseringsfactor heave	-

Voor de bepaling van de normafhankelijke veiligheidsfactor voor opbarsten wordt verwezen naar vergelijking 4.12 uit ref. 9.

3.4 Terugschrijdende erosie (Sellmeijer)

3.4.1 Model

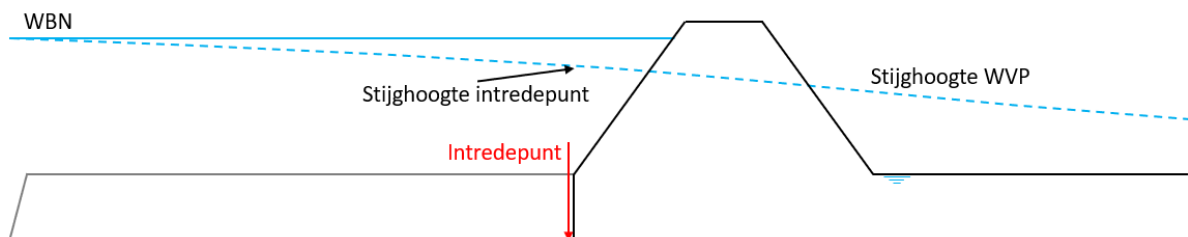
In de pipingbeschouwing is het optredende stijghoogteverschil vergeleken met het kritieke stijghoogteverschil. Het optredende stijghoogteverschil is gelijk aan [ref. 9]:

$$\Delta H = h - h_{exit} - r_c \cdot D_{Deklaag}$$

In de bepaling van het optredende stijghoogteverschil is afgeweken van de gangbare ontwerppraktijk, zoals beschreven in [ref. 9].

Voor “h” wordt bij semi-probabilistische verificaties gewerkt met een zogenaamde waterstand bij norm (WBN). In de pipingbeschouwing kan dan voor de kwelweglengte (een deel van) het voorland worden meegenomen. In het innovatietraject is gekozen om voor de kwelweglengte het voorland niet mee te nemen via een fictieve kwelweglengte en voor ‘h’ de stijghoogte bij het intredepunt mee te nemen als bovenstroomse randvoorwaarde in de Sellmeijer-vergelijking. Deze methodiek is uitgewerkt in deelproduct 2 [ref. 8]. De methode is gevisualiseerd in Afbeelding 3.1.

Afbeelding 3.1. Sellmeijer met bovenstroomse randvoorwaarde



Het kritieke stijghoogteverschil volgt uit:

$$\Delta H_{c,p} = L \cdot F_{resistance} \cdot F_{scale} \cdot F_{geometry}$$

In het ontwerp of de beoordeling is de volgende verificatie uitgevoerd:

$$\Delta H - 0,3 \cdot d \leq \frac{\Delta H_{c,p}}{\gamma_{pip} \cdot \gamma_{b,p}}$$

Waarin:

$$F_1 = F_{resistance} = \frac{\gamma'_p}{\gamma_w} \cdot \eta \cdot \tan(\theta)$$

$$F_2 = F_{scale} = \frac{d_{70m}}{\sqrt[3]{\kappa \cdot L}} \cdot \left(\frac{d_{70}}{d_{70m}} \right)^{0,4}$$

$$F_3 = F_{geometry} = 0,91 \cdot \left(\frac{D}{L} \right)^{\frac{0,28}{2,8} + 0,04}$$

$$\kappa = \frac{v_{water}}{g} \cdot k$$

Hier zijn:

h	De stijghoogte bij het intredepunt	m+NAP
ΔH	Het optredende stijghoogteverschil	m
r_c	Reductiefactor voor weerstand bij het uittredepunt	-
L	Kwelweglengte	m
$F_{resistance}, F_{scale}, F_{geometry}$	Factoren aangepaste Sellmeijer model	-
γ_{pip}	Normafhankelijke veiligheidsfactor piping	-
$\gamma_{b,p}$	Schematiseringsfactor piping	-
k	Darcy doorlatendheid	m/s
D	Dikte van de zandlaag	m
d_{70}	70-percentiel waarde van de korrelverdeling van de pipinggevoelige laag	μm

Voor de bepaling van de normafhankelijke veiligheidsfactor voor terugschrijdende erosie wordt verwezen naar vergelijking 4.4 uit [ref. 9].

In de Sellmeijer formule worden een aantal standaard waardes voor parameters gehanteerd. Deze zijn in tabel 3.1 weergegeven.

Tabel 3.1 Standaardwaarden Sellmeijer vergelijking [ref. 9]

Parameter	Beschrijving	Waarde	Dimensie
γ'_p	volumegegewicht zandkorrels onder water	16,2	kN/m ³
γ_w	volumiek gewicht water	9,81	kN/m ³
η	coëfficiënt van White	0,25	-
θ	rolweerstandshoek	37	[graden]
d_{70m}	referentie d70-waarde	208	μm
v_{water}	kinematische viscositeit van water	1,33 E-6	m ² /s

3.5 Vlakdekkende analyse

De pipinganalyse is vlakdekkend uitgevoerd. Dit betekent dat per gridcel (5 bij 5 meter) invoerparameters zijn bepaald (deklaagdikte, volumiek gewicht etc.) en dat de analyse van de sterktevergelijkingen is uitgevoerd. Het resultaat is een bovenaanzicht van het projectgebied waarin per gridcel weergegeven is of opbarsten of heave optreedt en wat het kwelweglengtetekort is. Als voldaan wordt aan het criterium opbarsten is een voldoende resultaat voor het gehele faalmechanisme piping gevonden (voldoende oordeel op één van de drie deelfaalmechanismen is voldoende).

3.6 Stijghoogtebepaling conform TRWD

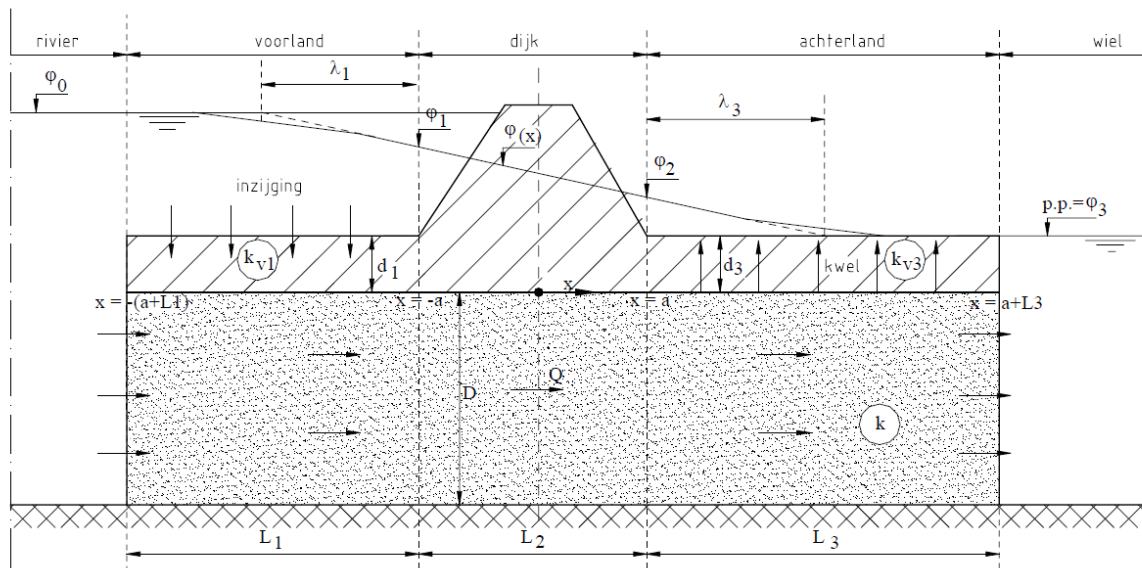
3.6.1 Beschrijving analytisch model

Voor de analytische bepaling van de stijghoogte (intredepunt en binnenteen, Φ_1 en Φ_2 , uit Afbeelding 3.2) is gebruik gemaakt van de methode uit het Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken (TRWD) [ref. 6]. Uit het TRWD is model 4A gehanteerd: *stroming in een zandondergrond onder een ondoorlatende dijk, met slecht doorlatende, afdekkende lagen in het voor- en achterland, zonder radiale intree of uittree van water*. De parameters uit het model zijn weergegeven in Afbeelding 3.2.

Het model geeft een stijghoogteverloop onder stationaire condities als functie van:

- de buiten- en binnendijkse stijghoogtes (Φ_0 = rivierwaterstand en Φ_3 = polderpeil);
- de lengtes van het voor- en achterland en de dijkbasis (L_1 , L_2 en L_3);
- de stromingsweerstand van het watervoerend pakket, bepaald door de dikte (D) en de horizontale doorlatendheid (k);
- de in- en uittredeweerstand door de binnen- en buitendijkse slecht doorlatende deklagen, bepaald door de verticale stromingsweerstand (k_{v1} en k_{v3}) en de dikte van de deklagen (d_1 en d_3).

Afbeelding 3.2 Stijghoogtebepaling TRWD (model 4A)



De belangrijkste karakteristieken van het model zijn:

- stationaire grondwaterstroming op de piek van de hoogwatergolf;
- geen radiale instroming van water, met andere woorden: de stroomlijnen zijn bij de randen van het model horizontaal;

- twee-dimensionale grondwaterstroming, er wordt geen rekening gehouden met stroming van meerdere kanten (bijvoorbeeld in een bocht van de rivier).

3.6.2 Analytische formulering

De analytische formulering van de stijghoogte ter plaatse van de buitenteen is weergegeven in de onderstaande vergelijking [ref. 6]:

$$\Phi_2 = \Phi_3 + (\Phi_0 - \Phi_3) \cdot \frac{W_3}{\sum W}$$

Ter plaatse van de binnenteen geldt de onderstaande formulering:

$$\Phi_3 = \Phi_3 + (\Phi_0 - \Phi_3) \cdot \frac{W_2 + W_3}{\sum W}$$

Waarin:

$$W_{1,3} = \frac{\lambda_{1,3}}{k \cdot D} \cdot \tanh\left(\frac{L_{1,3}}{\lambda_{1,3}}\right)$$

$$W_2 = \frac{L_2}{kD}$$

$$\lambda_{1,3} = \sqrt{\frac{k \cdot D \cdot d_{1,3}}{k_{v1,3}}}$$

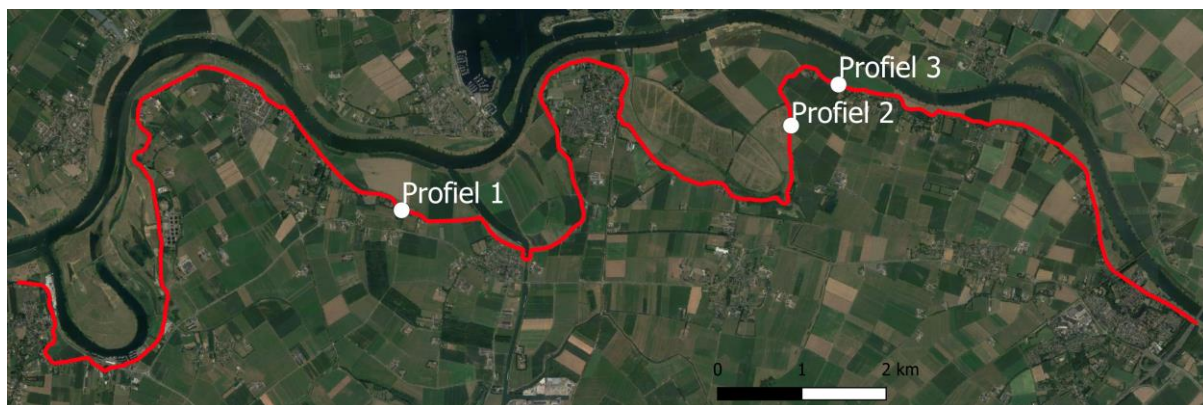
Hier zijn:

Φ_0	Buitenwaterstand	m+NAP
Φ_1	Stijghoogte buitenteen	m+NAP
Φ_2	Stijghoogte binnenteen	m+NAP
Φ_3	Polderpeil	m+NAP
W_1, W_2, W_3	Stromingsweerstand voorland, onder dijk en achterland	-
$\lambda_{1,3}$	Spreidingslengte of lekfactor voor- en achterland	m
k	Horizontale doorlatendheid watervoerend pakket	m/dag
D	Dikte watervoerend pakket	m
$d_{1,3}$	Dikte deklaag voor- en achterland	m
$k_{v1,3}$	Verticale doorlatendheid deklaag voor- en achterland	m/dag
$L_{1,3}$	Lengte voor- en achterland	m
L_2	Lengte dijkbasis	m

3.7 Rekenlocaties

De pipingbeschouwing is vlakdekkend uitgevoerd voor het gehele projectgebied Meanderende Maas. Dit betekent dat per gridcel binnendijs (5 bij 5 meter) de sterktevergelijkingen zijn geëvalueerd. Daarnaast zijn drie rekenlocaties geselecteerd waar in een doorsnede is gerekend (zie [Afbeelding 3.3](#)):

- profiel 1 (Evenwijdig aan rivier): hier is geen dorp aanwezig, relatief grote ontwerprijheid. Daarnaast is de situatie naar verwachting goed overeenkomstig het TRWD (minimale radiale stroming) vanwege de evenwijdige ligging aan de rivier;
- profiel 2 (buitenbocht): groot voorland aanwezig en op deze locatie is mogelijk een optimalisatie mogelijk door rekening te houden met de richting van de stroombanen onder de dijk (grote hoek en daardoor een langere kwelweglengte);
- profiel 3 (buitenbocht): onderdeel van Demen-Dieden. Dit traject is eerder onderzocht en daardoor goed vergelijkbaar met eerdere fases (verkenningfase en uitvoerbaarheidstoets I). Daarnaast is er veel ruimte in het achterland voor een bermoplossing.



3.8 Veiligheidsfilosofie

Om tot een bepaalde (wettelijk voorgeschreven) doelbetrouwbaarheid op doorsnedeniveau te komen zijn grofweg twee onderdelen te onderscheiden in de semi-probabilistische aanpak:

- 1 voor de parameters (zoals deklaagdikte, stijghoogte etc.) dient een veilige waarde gehanteerd te worden. Voor de belastingsparameters is dit een hoge waarde (waarde met 95 % kans van overschrijden) en voor sterkteparameters een lage waarde (waarde met 5 % kans van overschrijden). Het percentiel (5 % of 95 %) is voorgeschreven in het beoordelings- en ontwerpinstrumentarium (BOI), zie bijlage I;
- 2 in de sterktevergelijkingen wordt gebruikgemaakt van normafhankelijke veiligheidsfactoren en schematiseringsfactoren. Deze normafhankelijke veiligheidsfactoren zijn zodanig gekalibreerd dat in combinatie met de veilige waarden van de parameters (punt 1) een veiligheid bereikt wordt die (juist) voldoet aan de voorgeschreven betrouwbaarheid. Deze veiligheid geldt voor de geschematiseerde configuratie van onder andere de bodemopbouw. Er is echter een kans op andere (nadeligere) configuraties van de bodem (bijvoorbeeld de aanwezigheid van zandbanen), geometrie en waterspanningen. Deze onzekerheid, die groter is naar mate minder kennis van de ondergrond beschikbaar is, wordt afgedekt met de schematiseringsfactor. Voor de afleiding van de schematiseringsfactor wordt verwezen naar [ref. 11]

3.8.1 Veiligheidsfactoren

Een overzicht van de gehanteerde veiligheidsfactoren is weergegeven in tabel 3.2. De normafhankelijke veiligheidsfactoren zijn afgeleid conform het ontwerpinstrumentarium [ref. 9]. Hierin zijn de standaard waarden voor het lengte-effect gehanteerd. Voor de schematiseringsfactor is een waarde van 1,1 gehanteerd, hierin is aangesloten bij de verkenningsfase.

Tabel 3.2 Veiligheidsfactoren piping (STPH)

	Opbarsten	Heave	Piping
normafhankelijke veiligheidsfactor	1,75	1,33	1,33
schematiseringsfactor	1,1	1,1	1,1

3.9 Parameters bepaling stijghoogte conform TRWD

Een samenvatting van de parameters die gehanteerd zijn in de stijghoogteberekening conform het Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken is weergegeven in tabel 3.3. De parameterkeuzes zijn toegelicht in Bijlage III. Het doel van deze exercitie is het bepalen van de gemiddelde waarde van de stijghoogte (50%-waarde).

Tabel 3.3 Inputparameters TRWD-berekening

Parameter	Symbool	Profiel 1	Profiel 2	Profiel 3
doorlatendheid zandpakket	k	55 m/dag	55 m/dag	55 m/dag
dikte watervoerend pakket	D	50 m	12 m	11 m
doorlatendheid deklaag voorland	k_{v1}	0,05 m/dag	0,05 m/dag	0,05 m/dag
doorlatendheid deklaag achterland	k_{v3}	0,05 m/dag	0,05 m/dag	0,05 m/dag
dikte deklaag voorland	d_1	2,9 m	3,8 m	2,4 m
dikte deklaag achterland	d_3	2,8 m	0,9 m	3,0 m
lengte voorland	L_1	575 m	1.330 m	327 m
dijkbasis	L_2	50 m	29 m	31 m
lengte achterland	L_3	1.000 m	1.000 m	1.000 m

3.10 Parameters (vlakdekkende) pipingbeschouwing

De parameters die zijn gehanteerd in de vlakdekkende pipingbeschouwing zijn beschreven in bijlage II. Een samenvatting is weergegeven in tabel 3.4.

Tabel 3.4 Samenvatting parameters vlakdekkende pipingberekening

	Parameter	Herkomst parameter	Naam grid
Opbarsten	Deklaagdikte	Vlakdekkende interpolatie op basis van boringen. Reductie op deklaagdikte om te komen tot 5 % ondergrens per gridcel*.	D_deklaag_karakteristiek.IDF
	Stijghoogte opbarstlocatie	Uitkomst geohydrologisch model. 95 %-waarde stijghoogte per gridcel binnendijs.	outfile_p95_extra.IDF
	Verzadigd volumiek gewicht deklaag	5 %-waarde op basis van lokaal onderzoek: 17,3 kN/m ³ .	N.v.t.
	Polderpeil	Gemiddelde waarde op maaiveld min onzekerheidsmarge. Reductie toegepast om te komen tot 5% waarde.	polderpeil_karakteristiek.IDF
Heave	Deklaagdikte	Gelijk aan deklaagdikte opbarsten.	
	Stijghoogte heave locatie		
	Kritieke heavegradiënt	0,30 (standaard waarde)	n.v.t.
Terugschrij	Deklaagdikte	Gelijk aan deklaagdikte opbarsten.	
	Stijghoogte intredepunt	Uitkomst geohydrologisch model. 95 %-waarde stijghoogte per gridcel buitendijs.	p95_extrapolated_nearest_neighbour.IDF**

	d70	Constante 5 %-waarde: 182 μm .	n.v.t.
	Kwelweglengte	Per gridcel afstand van intredepunt (buitenteen) tot betreffende gridcel.	KWELLENLNGTE_5M.IDF
	Dikte zandlaag	Dikte zandlaag op basis van gemiddelde waarde Regis.	D_WVP1_max50meter.IDF
	Doorlatendheid zandlaag	Constante (veilige) waarde op basis van Regis: 55 m/dag.	n.v.t.
* Voor de spreiding van de deklaagdikte is, conform het BOI, een standaardafwijking van 0,50 m toegepast. Deze spreiding kan passend zijn in de sterktevergelijking (dunste deklaag maatgevend), maar lijkt bovenmatig conservatief voor de geohydrologische modelering. Lokale dunne deklagen hebben weinig effect op het totale stromingsbeeld, het lijkt conservatief om te veronderstellen dat de gemiddelde waarde van de deklaagdikte een grote onzekerheid heeft. ** In de uitvoerbaarheidstoets II is deze stijghoogte op een relatief grove manier bepaald (onderschatting van circa 10 cm in stijghoogte).			

Voor de doorsnedes geldt dezelfde aanpak als voor de vlakdekkende aanpak. Het enige verschil is dat één gridcel berekend is.

4

RESULTATEN

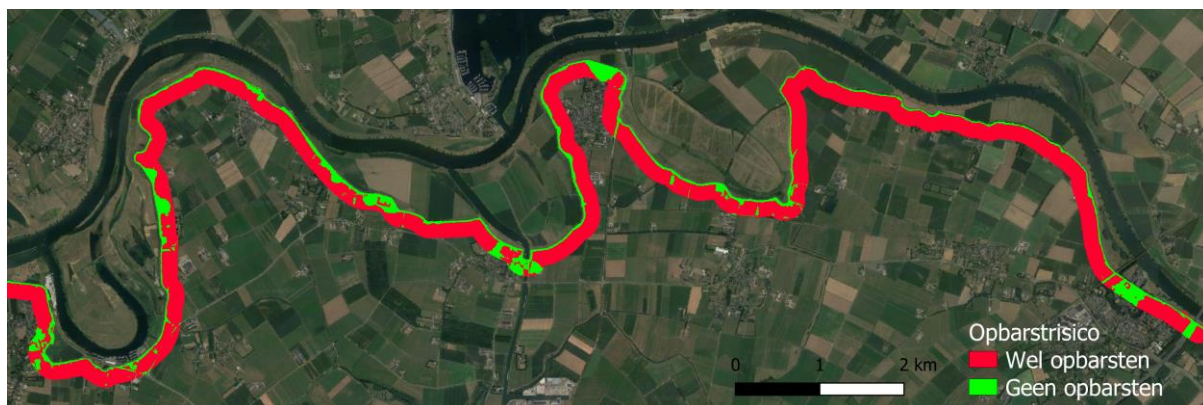
4.1 Vlakdekkende analyse

In de onderstaande paragrafen zijn de resultaten van de vlakdekkende pipingbeschouwing weergegeven op basis van het regionale grondwaterstromingsmodel. De drie deelfaalmechanismen: opbarsten, piping en heave zijn separaat beschouwd.

4.1.1 Opbarsten

In Afbeelding 4.1 is voor het projectgebied het opbarstrisico weergegeven voor een band van 200 m aan de binnenzijde van de dijk. De rode locaties voldoen niet aan het criterium voor het deelfaalmechanisme opbarsten, de groene delen voldoen wel. Op de kaart is te zien dat enkele hoger gelegen gebieden voldoen maar dat verder vrijwel het gehele gebied opbarst.

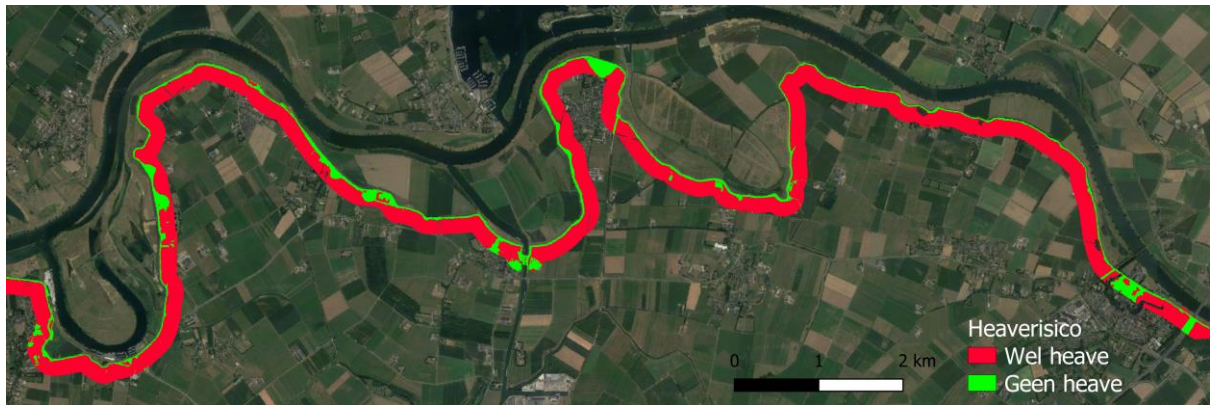
Afbeelding 4.1 Opbarstkaart uitvoerbaarheidstoets II



4.1.2 Heave

In Afbeelding 4.2 is het heaverisico weergegeven voor het gehele projectgebied. De kaart is vrijwel gelijk aan die van opbarsten.

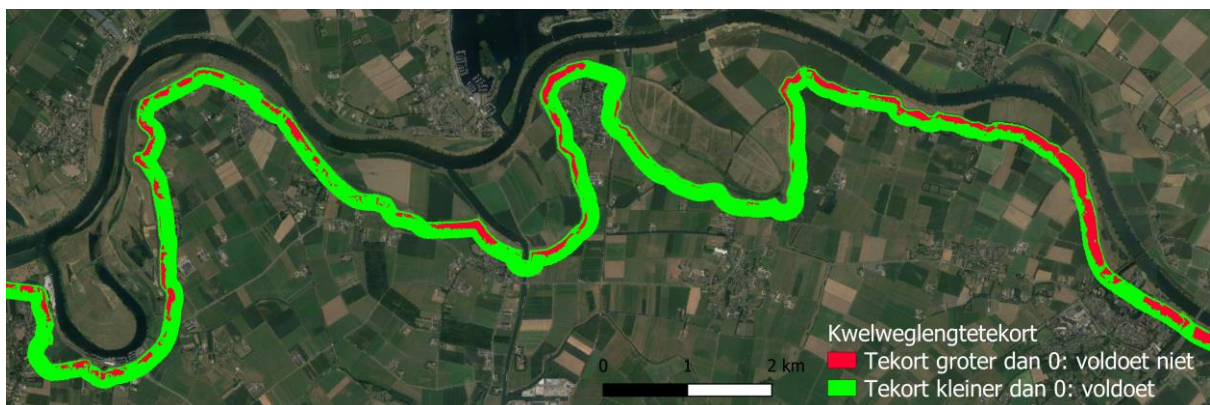
Afbeelding 4.2. Heavekaart uitvoerbaarheidstoets II



4.1.3 Terugschrijdende erosie

In Afbeelding 4.3 is het kwelweglengtetekort weergegeven voor het gehele projectgebied. Voor de rode delen is een kwelwegtekort gevonden en de groene delen voldoen aan het criterium voor het deelfaalmecanisme terugschrijdende erosie (Sellmeijer).

Afbeelding 4.3. Kaart kwelweglengtetekort uitvoerbaarheidstoets II



4.2 Doorsneden

4.2.1 Vergelijking stijghoogtes model en TRWD

Voor de drie doorsneden (zie Afbeelding 4.4) is de stijghoogte conform het Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken (TRWD) vergeleken met de stijghoogtes berekend met het regionale grondwaterstromingsmodel. Zoals beschreven in deelproduct 3 [ref. 7] zijn de verschillende modeluitkomsten gebruikt om te komen tot een veilige waarde van de stijghoogte. Hierin is de onzekerheid van de volgende parameters in rekening gebracht:

- de onzekerheid in de doorlatendheid van het watervoerend pakket (kD);
- de onzekerheid in de doorlatendheid van het voor- en achterland (c).

Afbeelding 4.4 Locatie doorsnedes



In de uitvoerbaarheidstoets is een vergelijking gemaakt tussen de stijghoogtes zoals berekend met de TRWD en met het regionale grondwaterstromingsmodel. Verschillende modelruns zouden vergeleken kunnen worden zolang dezelfde keuzes (veilige waarden of gemiddelde waarden) in de modellen gebruikt worden.

In uitvoerbaarheidstoets II is de volgende vergelijking tussen de verschillende stijghoogtes gemaakt:

- de uitkomsten van het referentie regionale grondwaterstromingsmodel (HEAD_MAX_FACT1_1.00000000_FACT2_1.00000000.IDF);
- de uitkomsten van de analytische TRWD-berekening met invoer conform paragraaf 0.

De invoer levert voor zowel de TRWD als het regionale grondwaterstromingsmodel de gemiddelde waarde op.

Vergelijking profiel 1 (Evenwijdig aan rivier)

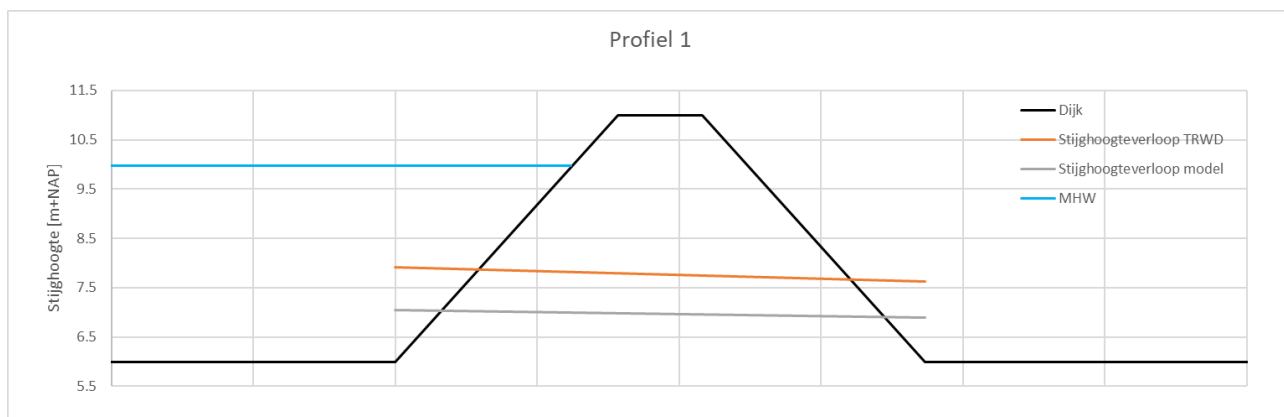
De lokale situatie voor profiel 1 is het meest in overeenstemming met de configuratie waarvoor de werkwijze uit het TRWD is opgesteld:

- rivier evenwijdig aan dijk;
- relatief grote strekking zonder bochten (geen toestroming van water vanuit verschillende richtingen).

De stijghoogtes voor profiel 1 zijn weergegeven in Afbeelding 4.5. De stijghoogtes conform het TRWD zijn hoger dan die berekend zijn met het geohydrologische model. Verder valt op dat de daling van de stijghoogtes over de afstand van de dijkbasis conform het TRWD groter is dan berekend in het regionale grondwatermodel.

Een mogelijke verklaring van het verschil kan deels gevonden worden in het feit dat het regionale grondwaterstromingsmodel instationair is ten opzichte van het stationaire karakter van het TRWD. Het verschil tussen stationair en instationair in het regionale grondwaterstromingsmodel is 10 tot 40 cm in de stijghoogte (afhankelijk van de locatie). De verschillen in stijghoogte ter plaatse van profiel 1 (Afbeelding 4.5) worden dus niet enkel bepaald door stationair versus niet-stationair.

Afbeelding 4.5. Stijghoogtevergelijking profiel 1 (evenwijdig aan rivier)

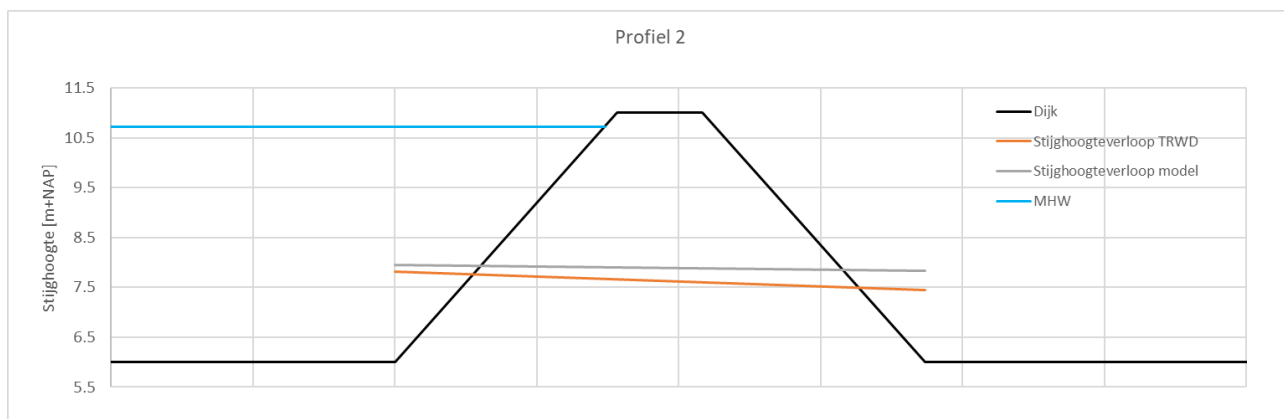


Vergelijking profiel 2 en 3 (buitenbocht van de dijk)

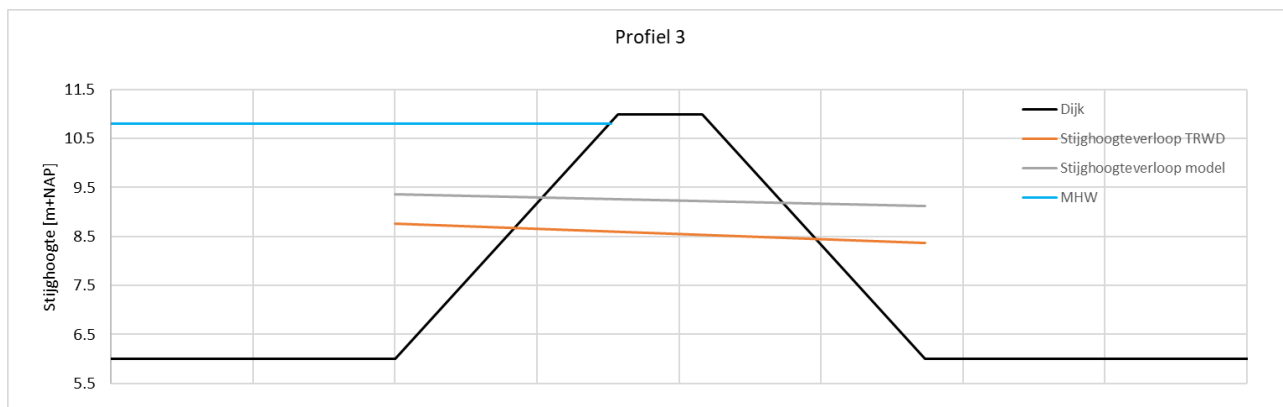
De profielen 2 en 3 bevinden zich op korte afstand tot een bocht in de dijk (zie Afbeelding 4.4). Dit betekent dat het water vanuit twee kanten voeding levert voor de stijghoogte binnendijks. Deze configuratie wijkt daarom af van de situatie waarvoor de 2-dimensionale schematisatie uit het TRWD passend is. De stijghoogtes die voor deze twee profielen zijn berekend met het TRWD zijn (fors) lager dan is berekend met het regionale grondwaterstromingsmodel. De stijghoogtes zijn weergegeven in Afbeelding 4.6 en Afbeelding 4.7.

Als tweede valt op dat het verschil tussen de stijghoogte bij binnen- en buitenteen (helling) groter is voor de stijghoogtes berekend conform het TRWD in vergelijking met het regionale grondwaterstromingsmodel.

Afbeelding 4.6 Stijghoogtevergelijking profiel 2 (buitenbocht)



Afbeelding 4.7 Stijghoogtevergelijking profiel 3 (buitenbocht)



De hypothese is dat het TRWD de stijghoogte bij profiel 2 en 3 onderschat door de toestroom van water vanuit twee richtingen.

4.2.2 Sterktebeschouwing doorsnedes (Sellmeijer)

Voor drie doorsnedes is bepaald wat het kwelweglengtetekort zou zijn als gerekend wordt met de standaard methode waarbij:

- De waterstand bij norm (WBN) als bovenstroomse randvoorwaarde wordt gehanteerd;
- Eén keer de dijkbasis in het voorland als kwelweglengte wordt meegenomen.

Net als in de verkenning is in de sterktebeschouwing bij de doorsnede de nadruk gelegd op Sellmeijer omdat hier de meeste winst verwacht wordt.

Terugschrijdende erosie

De vlakdekkende pipingberekeningen op basis van het regionale grondwaterstromingsmodel is voor de drie profielen weergegeven in Afbeelding 4.8.

Afbeelding 4.8 Piping ter plekke van de drie doorsnedes



De veiligheid tegen terugschrijdende erosie is voor de drie profielen gekwantificeerd voor het gridcel ter plaatse van de binnenteen van de dijk. De resultaten zijn weergegeven in tabel 4.3.

Tabel 4.3 Piping ter plekke van de drie doorsnedes

	Profiel 1		Profiel 2		Profiel 3	
	Evenwijdig aan rivier		Buitenbocht		Buitenbocht	
	Model	Standaard Sellmeijer (2x dijkbasis)	Model	Standaard Sellmeijer (2x dijkbasis)	Model	Standaard Sellmeijer (2x dijkbasis)
optredend stijghoogteverschil [m]	1,94	4,48	2,32	4,74	3,47	4,65
kritieke stijghoogteverschil [-]	1,82	3,17	2,20	4,09	2,35	4,39
Unity Check piping (incl. veiligheidsfactoren) [-]	0,64	0,48	0,65	0,59	0,46	0,64
kwelweglengte 0-situatie [m]	47,4	94,8	44,7	89,4	47,2	94,4
kwelwegtekort [m]	35,6	123,2	28,3	70,6	63,8	58,6

Voor twee van de drie doorsnedes is het kwelweglengte tekort op basis van het regionale grondwaterstromingsmodel kleiner dan op basis van de reguliere methode.

Merk op dat in de analyse met het geohydrologische grondwaterstromingsmodel een kleinere kwelweglengte wordt gehanteerd (één keer de dijkbasis). Daartegenover staat een lagere bovenstroomse randvoorwaarde ten gevolge van de weerstand van het voorland. Het effect van het meenemen van meer voorland (maar met een hogere bovenstroomse randvoorwaarde) is in de gevoeligheidsanalyse onderzocht.

5

GEVOELIGHEIDSANALYSES

5.1 Wijze van meenemen voorland

5.1.1 Aanpak

In de uitvoerbaarheidstoets is de positieve werking van het voorland meegenomen in een gereduceerde stijghoogte ter plaatse van het intredepunt: in de meeste gevallen de buitenteen van de dijk. Deze methode is weergegeven als methode 1 in tabel 5.1. Conform de schematiseringshandleiding piping [ref. 1] mag (een gedeelte van) het voorland ook meegenomen worden als kwelweglengte. De maximale voorlandlengte die in de analyse mag worden meegenomen is gelijk aan de dijkbasis¹. Dit betekent dat de totale kwelweglengte dan gelijk is aan twee maal de kwelweglengte (methode 2 uit tabel 5.1). Bij het hanteren van twee maal de dijkbasis als kwelweglengte verschuift het intredepunt richting de rivier. Dit betekent dat de stijghoogte bij het intredepunt ook toeneemt.

Samenvattend, in de methode van de gevoeligheidsanalyse wordt het positieve effect van de gehele voorlandlengte in rekening gebracht door:

- sterkte: het voorland met een lengte van één maal de dijkbasis voor de dijk wordt meegenomen als kwelweglengte (weerstand in de Sellmeijer vergelijking);
- belastingreductie: het overige voorland dat buiten deze begrenzing valt draagt wel bij aan een gereduceerde stijghoogte ter plaatse van het intredepunt.

Tabel 5.1 Methode uitvoerbaarheidstoets en gevoeligheidsanalyse

Methode	Visualisatie
1. Methode uitvoerbaarheidstoets	
2. Methode gevoeligheidsanalyse	

¹ De gedachte hierachter is dat uitgaande van een maximale evenwichtssituatie bij een pipegroei tot de halve kwelweglengte het kanaal nooit onder het voorland zal komen.

De dijkbasis is gelijk aan het de afstand tussen de buitenteen en het uittredepunt (dus niet noodzakelijkerwijs de binnenteen).

De bovenstaande werkwijze heeft geen effect op de beschouwing voor opbarsten en heave. De gevoeligheidsanalyse gaat over de vraag hoe de intredeweerstand in het voorland wordt meegenomen bij het gebruik van de rekenregel van Sellmeijer.

5.1.2 Methodiek in gevoeligheidsanalyse

Het meenemen van één maal de dijkbasis als voorlandlengte vereist dat bekend is wat per locatie de lengte van de dijkbasis is. Het doel van deze gevoeligheidsanalyse is te bepalen wat het orde grootte effect is van de aanpak. Daarom is de dijkbasis op een vereenvoudigde manier bepaald.

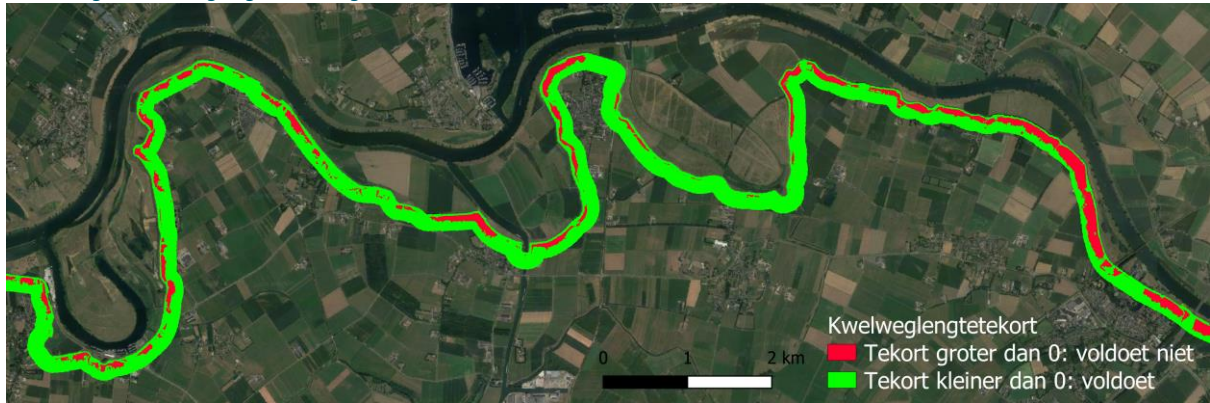
De verkenningsfase leert dat de afstand tussen de binnen- en buitenteen van de dijk gelijk is aan 30 - 50 meter. De afstand tot uittredepunten verder in het achterland zorgt voor een grotere dijkbasis. In de gevoeligheidsanalyse is voor elke situatie 40 meter bij de meegenomen kwelweglengte opgeteld. Dit is een realistische schatting voor de uittredepunten ter plaatse van de binnenteen. Voor uittredepunten verder van de dijk is dit een onderschatting.

De stijghoogte ter plaatse van het nieuwe intredepunt is 15 cm verhoogd ten opzichte van de buitenteen. De 15 cm is een veilige schatting op basis van een steekproef uit het geohydrologische model.

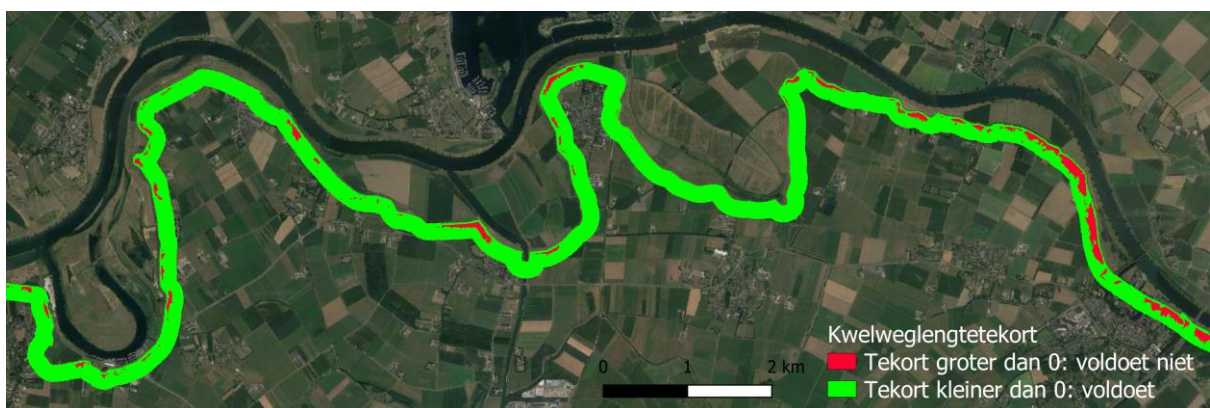
5.1.3 Resultaat gevoeligheidsanalyse

Het resultaat van de gevoeligheidsanalyse is weergegeven in de onderstaande afbeeldingen. In Afbeelding 5.1 is de uitkomst van de reguliere som (intredepunt gekozen ter plaatse van buitenteen) weergegeven. De resultaten van de aanpassingen binnen deze gevoeligheidsanalyse (intredepunt 40m buitenwaarts van buitenteen + verhoogde stijghoogte) zijn weergegeven in Afbeelding 5.2. Uit het verschil tussen de twee figuren is te zien dat de aanpak een positief effect heeft op de benodigde kwelweglengte.

Afbeelding 5.1 Kwelweglengtetekort reguliere som



Afbeelding 5.2 Kwelweglengtetekort gevoeligheidsanalyse



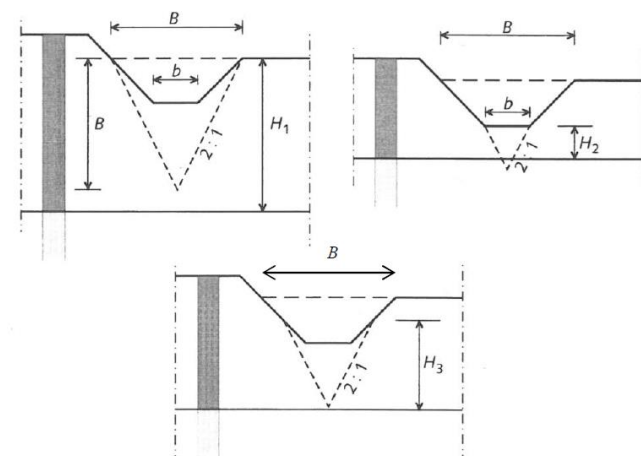
Een opvallend resultaat is dat de wijze waarop de effecten van intredeweerstand wordt meegenomen bij toepassing van de Sellmeijer-rekenregel, die niet voor deze configuratie is ontwikkeld, een wezenlijke invloed lijkt te hebben op de beoordelingsresultaten.

5.2 Opbarsten ter plaatse van watergangen

5.2.1 Achtergrond

Ter plaatse van watergangen is in de opbarstbeschuwing van de uitvoerbaarheidstoets de minimale deklaag ter plaatse van de slootbodem gehanteerd. Conform de schematiseringshandleiding piping [ref. 1] kan, afhankelijk van de afmetingen en verhoudingen van de sloot en deklaagdikte, een dikkere deklaag in de opbarst-beschouwing worden gehanteerd (zie afbeelding 5.3). In de basis beschouwing is dit echter niet meegenomen. Het effect wordt met deze gevoeligheidsanalyse in beeld gebracht.

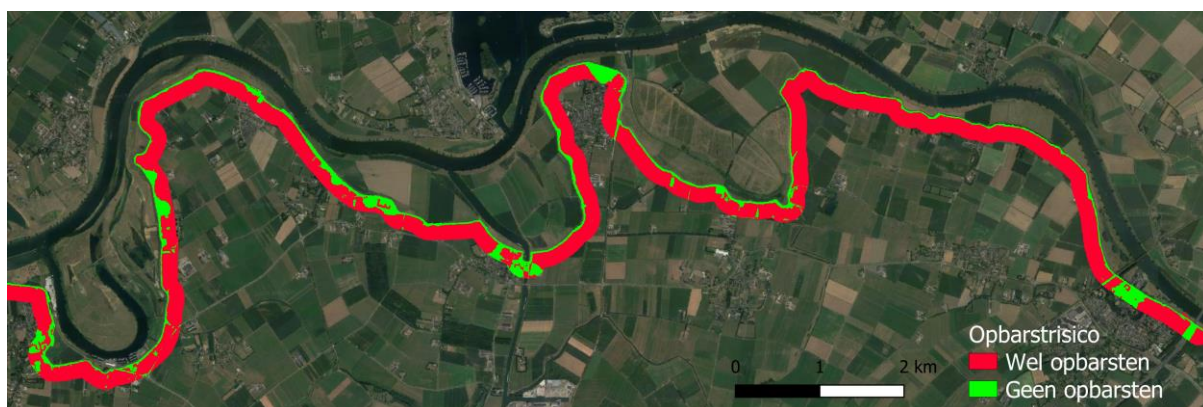
Afbeelding 5.3 Visualisatie verhouding dikte deklaag [ref. 1]



5.2.2 Resultaat gevoeligheidsanalyse

In Afbeelding 5.4 is te zien dat opbarsten optreedt op alle locaties behalve de hoger gelegen delen. Er is geen onderscheid op te maken tussen opbarsten ter plaatse van de watergangen en naast de watergangen. Dit betekent dat gedetailleerder kijken naar opbarsten ter plaatse van sloten geen aanscherping van het oordeel zal opleveren in deze casus.

Afbeelding 5.4 Opbarstkaart

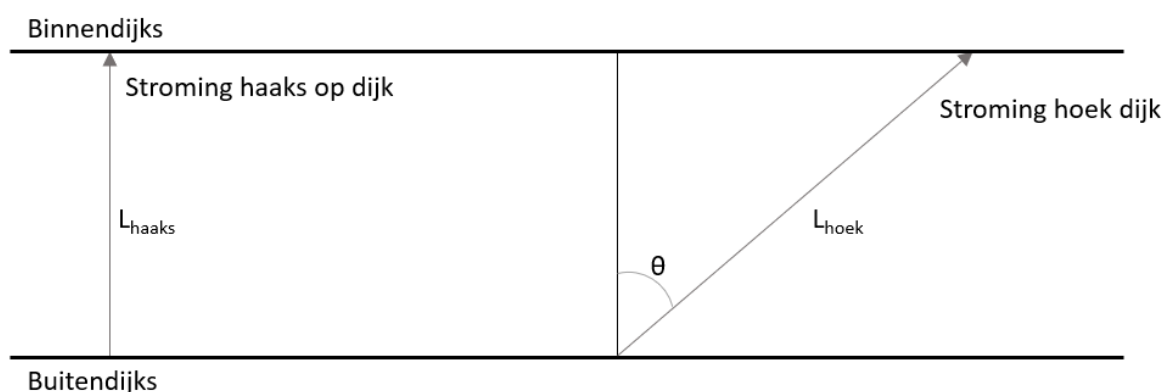


5.3 Stroming onder hoek met dijk

5.3.1 Methode

Op basis van het regionale grondwaterstromingsmodel kan een stromingsrichting onder de dijk worden afgeleid. In de uitvoerbaarheidstoets is stroming haaks op het dijklichaam aangenomen. Dit betekent dat de aanwezige kwelweglengte minimaal is. Er zijn locaties in het gebied waarbij de stromingsrichting niet haaks staat op de dijk. De aanwezige kwelweglengte is in dit geval dus groter. Dit principe is weergegeven in Afbeelding 5.5.

Afbeelding 5.5 Stroming onder een hoek met de waterkering (bovenaanzicht dijklichaam)



Hoe groter de hoek die de stroming maakt met de dijk hoe groter de kwelweglengte. De relatie tussen de hoek en de kwelweglengte is weergegeven in de onderstaande formules:

$$\cos(\theta_{stroming}) = \frac{L_{Haaks}}{L_{Hoek}}$$
$$L_{Hoek} = \frac{1}{\cos(\theta_{stroming})} \cdot L_{Haaks}$$

Hierin zijn:

$\theta_{stroming}$	Hoek tussen dijknormaal en stroomrichting	graden
L_{Haaks}	De afstand tussen het in- en uittredepunt bij loodrechte stroming.	meter
L_{Hoek}	De afstand tussen het in- en uittredepunt bij stroming onder een hoek.	meter

De potentiële winst op basis van de hoek die de stroming maakt is weergegeven in tabel 5.2. Een hoek van 45 graden met de dijknormaal betekent een toename van de kwelweglengte met 41 %.

Tabel 5.2 Factor op basis van hoek

Hoek θ (graden)	0	10	20	30	40	45	50	60	70	80
Factor maal L_{haaks}	1,00	1,02	1,06	1,15	1,31	1,41	1,56	2,00	2,92	5,76

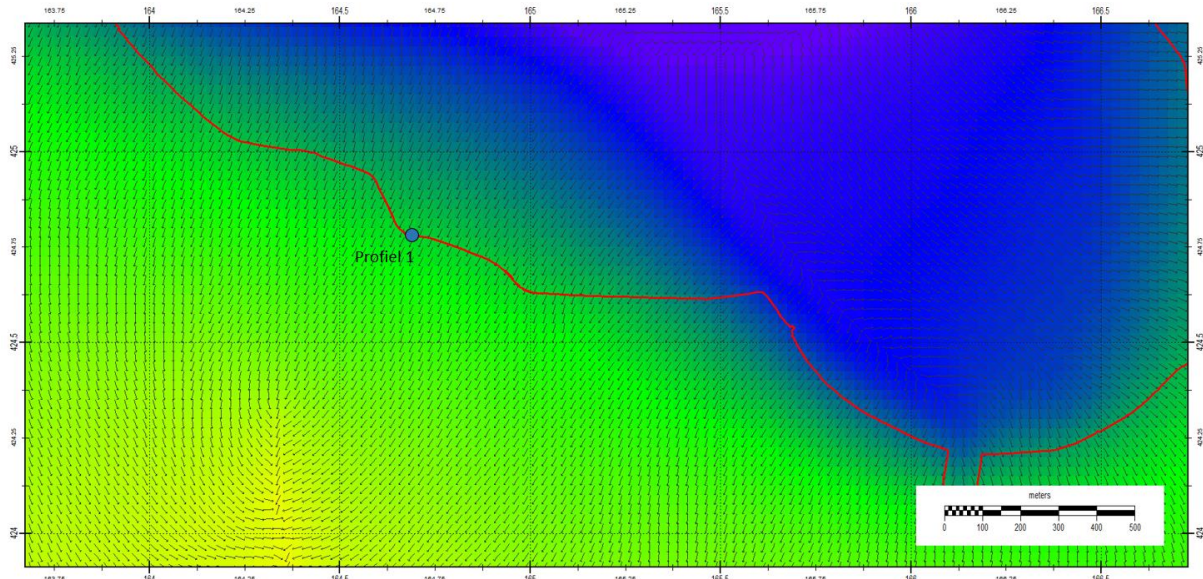
Binnen deze gevoeligheidsanalyse wordt in beeld gebracht wat het effect is van het meenemen van de stroomrichting.

5.3.2 Resultaat gevoeligheidsanalyse

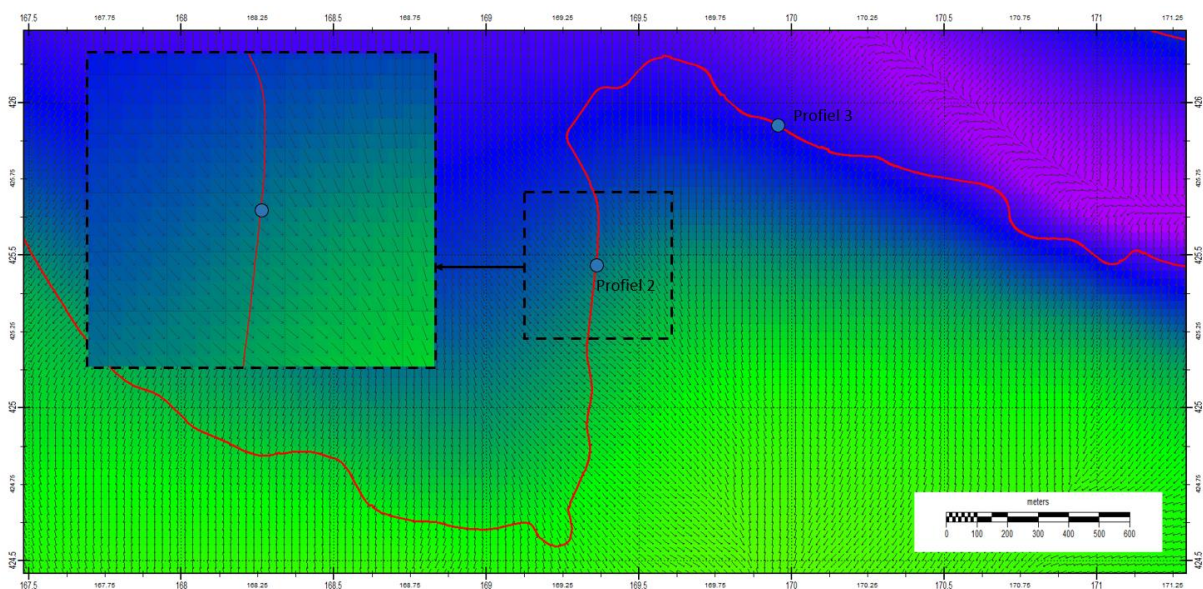
Voor de drie onderzochte profielen is de stroomrichting gevisualiseerd in Afbeelding 5.6 en Afbeelding 5.7.

De stroomrichting is gebaseerd op de referentierealisatie [ref. 7] op de piek van de hoogwatergolf van het regionale grondwaterstromingsmodel.

Afbeelding 5.6 Visualisatie stroomrichting profiel 1 op piek waterstand in referentiemodel (head_20150107_I4.idf_I4)



Afbeelding 5.7 Visualisatie stroomrichting profiel 2 en 3 op piek waterstand in referentiemodel (head_20150107_I4.idf_I4)



Voor de profielen 1 en 3 is de stroomrichting nagenoeg haaks op de dijk. Voor profiel 2 is de hoek die de stroombanen met de dijk maken ongeveer 45 graden. Daarom voeren we een gevoeligheidsanalyse uit voor profiel 2.

Het effect op het deelfaalmecanisme terugschrijdende erosie is weergegeven in tabel 5.3. De kwelweglengte in de nul-situatie neemt toe met 41 %. De benodigde kwelweglengte is gelijk, maar door de toename van de meegenomen aanwezige kwelweglengte neemt het tekort af.

Tabel 5.3 Piping ter plekke van doorsnede 2 (buitenbocht)

	Profiel 2	
	Haaks	45 graden
stroomrichting		
kwelweglengte [m]	44,7	63,0
optredend stijghoogteverschil [m]	2,32*	2,32*
kritieke stijghoogteverschil [m]	2,20	2,99
Unity Check piping (incl. veiligheidsfactoren) [-]	0,65	0,88
kwelwegtekort [m]	28,3	9,4

* De stijghoogte ter plaatse van de buitenteen is gelijk gehouden aan de som met een kwelweglengte haaks op de dijk. Strikt genomen dient een (iets) hogere stijghoogte gehanteerd te worden in de aanpak met stroombanen onder een hoek met de dijk omdat het intredepunt meer bovenstrooms gelegen is. Dit verschil wordt ingeschat als zeer beperkt.

De volgende aspecten dienen goed in kaart te worden gebracht om het effect van de stroomrichting in rekening te kunnen brengen in het ontwerp:

- is de stroomrichting constant voor verschillende parameterkeuzes van het model (doorlatendheid, deklaagdikten etc.)?
- in het regionale grondwaterstromingsmodel zijn parameters als doorlatendheid (k) vlakdekkend gevarieerd, wat is het effect van ruimtelijke variatie in de parameters op de stroomrichting?
- is de stroomrichting constant over de lengte van de hoogwatergolf?
- hoe beïnvloedt opbarsten de stroomrichting?

Uit een visuele beschouwing komt naar voren dat in ongeveer 15% van de te beschouwen dijk lengte de stroming de stromingshoek groter is dan 30°.

5.4 Omgevingsinvloeden

Het regionale grondwaterstromingsmodel gaat uit van de omgeving zoals het nu aanwezig is. Bepalende factoren daarin zijn:

- de aanwezigheid van voorland met een afdekkende kleilaag;
- het wel of niet insnijden van watergangen in het achterland.

Door de stijghoogte in de sterktebeschouwing te baseren op het model is het dijkontwerp (of de dijkbeoordeling) afhankelijk van de situatie in een groot gebied voor- en achter de dijk.

Belangrijke vraag is in welke mate een beheerder alle regionale geohydrologische uitgangspunten gedurende de ontwerplevensduur kan borgen.

In de volgende fase van het innovatieproject wordt geanalyseerd in welke mate het ontwerp kwetsbaar is voor veranderingen in de omgeving die via de geohydrologie invloed hebben op de veiligheid van de dijk. Zo speelt voor waterschap Aa en Maas in het voorland de afweging (optimalisatie) tussen het belang van een kleidek tegen piping en ontgraving voor rivierverruiming.

Eerste vingeroefeningen wijzen er overigens op dat lokale vergravingen binnen- en buitendijks niet veel effect hebben. Effect van grotere vergraving zal binnendijks eerder nadelige gevolgen hebben dan buitendijks.

Stuurvragen voor deze gevoeligheidsanalyses zijn geformuleerd in deelproduct 3 [ref.7].

5.5 Probabilistische analyse

5.5.1 Methode

In de uitvoerbaarheidstoets is met semi-probabilistische rekenregels geverifieerd of wordt voldaan aan de ontwerp- of toetsingscriteria. De semi-probabilistische rekenregels zijn toepasbaar voor uiteenlopende locaties en omstandigheden. De verwachting is daarom dat deze aanpak een veilig ontwerp oplevert.

In de gevoeligheidsanalyse is onderzocht of met een probabilistische aanpak een scherper ontwerp bereikt kan worden.

Voor een volledige beschrijving van de uitgevoerde analyse wordt verwezen naar Bijlage 5. Dit betreft een zelfstandig leesbare notitie.

5.5.2 Resultaat gevoeligheidsanalyse

De probabilistische aanpak is toegepast op een tweetal doorsnedes:

- de probabilistische aanpak levert voor de beschouwde doorsnedes lagere (gunstigere) faalkansen voor alle drie de deelfaalmechanismen. Dit betekent dat de semi-probabilistische aanpak (met de norm-afhankelijke veiligheidsfactoren) een conservatieve aanpak is. Met de probabilistische beschouwing kan een scherper ontwerp/beoordeling bereikt worden;
- een voordeel van de probabilistische aanpak is dat de systeembetrouwbaarheid bepaald kan worden. Piping treedt op als alle drie de deelfaalmechanismen (opbarsten, heave en piping) optreden. De systeemfaalkans (opbarsten, piping én heave) is lager dan de faalkans voor de individuele deelfaalmechanismen;
- de probabilistische aanpak levert inzicht in de belangrijkste bijdrage aan de totale onzekerheid;
- de in het regionale grondwaterstromingsmodel afgeleide verdeling van de stijghoogte kan direct gebruikt worden in de probabilistische beschouwing. Hiermee is de koppeling tussen het grondwatermodel en de sterkte-analyse beter.

CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

6.1 Conclusies

Bij het samenvatten van de conclusies op basis van de uitvoerbaarheidstoets II grijpen we terug op de in paragraaf 1.3 geformuleerde deelvragen:

1. functioneert het rekeninstrumentarium (geohydrologie + BOI)?
 - de resultaten uit het regionaal grondwaterstromingsmodel zijn goed toepasbaar als input. Het belangrijkste doel van de uitvoerbaarheidstoets is het aantonen dat de koppeling tussen het regionale grondwaterstromingsmodel en de sterktemodellen van het Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium (BOI) mogelijk is. De uitvoerbaarheidstoets toont aan dat deze koppeling mogelijk is. De werkwijze past binnen het toepassingsbereik van het BOI, zie hiervoor ook deelproduct II [ref. 8]. Bovendien is inzichtelijk hoe de 95%-waarde van de stijghoogte is afgeleid;
2. lijkt het nog steeds een besparing op de leveren binnen dijkversterking Meanderende Maas?
 - meeste winst in terugschrijdende erosie;
 - de uitvoerbaarheidstoets toont aan dat de meeste (potentiële) winst behaald kan worden in het deelfaalmecanisme terugschrijdende erosie (Sellmeijer). Opbarsten en heave geeft falen over vrijwel het gehele interessegebied, terwijl de kwelweglengtetekorten in de range komen waarbij een grondoplossing mogelijk is;
3. zijn er onvoorziene zaken naar voren gekomen?
 - De stijghoogtes berekend met het één dimensionale (1D) analytische grondwatermodel (conform het TRWD) en het meerdimensionale (3D) numerieke regionale grondwatermodel zijn vergeleken. Hieruit komt naar voren dat het gebruik van een 3D grondwatermodel niet per definitie leidt tot een lagere stijghoogte en response. Toestroming vanuit verschillende richtingen, daar waar de dijk een bocht maakt, levert een hogere stijghoogte. Dit wijst erop dat een werkwijze conform het TRWD in dit soort situaties mogelijk een onveilige uitkomst oplevert;
 - Naast de 3D aspecten is sowieso een uitdaging om het voorkomen heterogeniteiten in de ondergrond op een goede wijze mee te nemen in een (1D) analytisch grondwatermodel.
 - De kwelweglengte kan groter zijn als de stroming niet haaks op de dijk staat. Dit heeft een relevant effect op de berekende pipingopgave. In ongeveer 15% van het dijktraject is de stromingsrichting duidelijk niet haaks op dijk.
4. is de wijze van presenteren aan de beoogde gebruikers handig?
 - met deze nieuwe aanpak is het eenvoudig om vlakdekkende beelden te maken. Deze kaarten helpen om snel en in groepsverband zicht te krijgen in het systeem. Het roept ook allerlei vervolgvragen op en maakt nieuwe ontwikkelingen mogelijk: zoals het maken van kaarten voor een historisch hoogwater en het vergelijken daarvan met waarnemingen. Daarnaast geeft dit de mogelijkheid om nauwkeuriger vervolgonderzoeksinspanning (onder andere grondonderzoek) te bepalen.

6.2 Aanbevelingen

Voor de volgende fase zijn de volgende aanbevelingen geformuleerd:

1. focus op terugschrijdende erosie:

- de uitvoerbaarheidstoets toont aan dat de meeste winst behaald kan worden in het deelfaalmechanisme terugschrijdende erosie. Op dit deelfaalmechanisme moet de focus liggen in de volgende fase;
- 2. verbeter de hoogwatergolf in het geohydrologische model:
 - om de koppeling tussen de ontwerppraktijk en het regionale grondwaterstromingsmodel te leggen dient de hoogwatergolf aan te sluiten bij de vigerende hydraulische randvoorwaarden bij het BOI. In de huidige analyse is een onderzoeksgolf gebruikt die orde grootte klopt maar die niet nog vergeleken is met de waterstanden die gehanteerd worden in de verkenning of planuitwerking. In de uitvoerbaarheidstoets gaat het vooral om inzicht, relatieve verschillen en orde groottes. Het uiteindelijke ontwerp zal wel gebaseerd moeten zijn op exacte uitgangspunten. Een belangrijk aandachtspunt hierbij is het verloop van de hoogwatergolf omdat de niet-stationaire karakter van de grondwaterstroming belangrijk is;
- 3. reken met voorland als kwelweglengte (intrede punt verder in het voorland) in de sterktevergelijking:
 - De gevoeligheidsanalyse toont aan dat de wijze van het meenemen van het voorland grote invloed kan hebben op de uitkomst van terugschrijdende erosie. Het meenemen van het voorland in zowel de sterktevergelijking (kwelweglengte) als de belasting (gereduceerde stijghoogte) kan leiden tot een kleiner tekort. Het is aanbevolen om deze methodiek verder uit te werken;
- 4. onderzoek waarom de wijze waarop het intredepunt (en de bijbehorende stijghoogte) wordt meegenomen in de Sellmeijer vergelijking een groot effect heeft:
 - een opvallend resultaat is dat de wijze waarop de effecten van intredeweerstand wordt meegenomen bij toepassing van de Sellmeijer-rekenregel, die niet voor deze configuratie is ontwikkeld, een wezenlijke invloed lijkt te hebben op de beoordelingsresultaten. Het wordt aanbevolen om te onderzoeken waar dit effect door wordt veroorzaakt. Dit kan mogelijk onderzocht worden door middel van verificatieberekeningen met D-Geo Flow;
- 5. onderzoek de mogelijkheid om stroming in een hoek onder de dijk mee te nemen in de analyse:
 - de gevoeligheidsanalyse toont aan dat het stroming onder een hoek met de dijk een grote invloed kan hebben op de uitkomst van terugschrijdende erosie. Het is aanbevolen om deze methodiek verder uit te werken en dit toe te passen in de rekenmethodiek;
- 6. verbeter de nauwkeurigheid van de resultaten:
 - in uitvoerbaarheidstoets II is gewerkt met een onnauwkeurige intredelijijn. Hierdoor kunnen de gebruikte kwelweglengtes in de Sellmeijer beschouwing 5 tot 10 m te groot zijn. De berekende kwelwegtekorten zullen iets onderschat zijn. Voor de volgende fase wordt aanbevolen de intredelijijn (en de daaruit afgeleide parameters) met meer detail vast te stellen.;
- 7. metingen:
 - nu duidelijk is welke parameters voor het geohydrologische model van belang zijn en wat de onzekerheidsmarges zijn is de volgende stap om aan te geven typen gegevensverzameling geschikt zijn om in de loop van jaren de onzekerheidsmarges te verkleinen.

6.3 Beschouwing

Hoewel we pas halverwege het innovatieproject zijn en de focus nu nog puur op inhoudelijke juistheid en robuustheid van de aanpak ligt permitteren we ons in deze paragraaf een blik door de oogharen.

De fundamentele vraag is beantwoord: ja, de **aanpak zoals we die voorstellen is goed uitvoerbaar**. De methode past in de veiligheidsfilosofie, past binnen het toepassingsbereik van het BOI en er is nu een praktisch toepasbare aanpak ontwikkeld die bruikbare resultaten oplevert.

Volgende vraag is dan logischerwijs: wil je als waterkering beheerder met deze nieuwe aanpak werken. Om bijvoorbeeld de aanpak toe te kunnen passen bij de lopende dijkversterking Meanderende Maas is eerst ook inzicht nodig in wat het kwantitatief oplevert, wat organisatorisch nodig is, wat de kans is dat dit een algemeen geaccepteerde aanpak wordt en hoe de aanpak geschikt is om de sterkte te monitoren gedurende de levensduur van de kering (zorgplicht en periodieke beoordeling veiligheid). Een deel van deze vragen – de kwantificeringsvraag – zijn het resultaat van de volgende fase van het innovatietraject. Maar een deel van deze vragen zijn ook aan waterschap Aa en Maas zelf om te beantwoorden.

Enkele noties daarbij:

- Het zo goed mogelijk meerekenen van de in het voorland aanwezige intreeweestand in de Innovatie Meanderende Maas past bij de aanbevelingen uit de POV Voorlanden [ref. 12]. Zij beveelt aan om afspraken te maken met externe belanghebbenden en collega-beheerders en ook goed te regelen welke juridische zeggenschap je als waterkeringbeheerder hebt over het voorland. Om deze afspraken concreet te maken is inzicht nodig in de kwetsbaarheid van de dijk voor maatregelen in de binnen- en buitendijkse omgeving van de dijk. Zo speelt voor waterschap Aa en Maas dat er in het voorland goed moet worden afgewogen tussen het belang van een kleidek tegen piping en ontgraving voor rivierverruiming. Voorkomen moet worden dat voorland wordt ontgraven terwijl dan een pipingberm moet worden aangelegd met dezelfde (of grotere) beheerinspanning. Bij deze afweging is het geohydrologische model goed bruikbaar.
- De inhoudelijke reviews en gesprekken met collega's in de HWBP-community wijzen er op dat deze geohydrologische aanpak past bij de behoeften. Er lopen verschillende initiatieven om grondwaterstromingsmodellen te benutten bij de beoordeling en het ontwerp van waterkeringen. De omgang met onzekerheden, cruciaal voor de inpassing in de overstromingskansbenadering, is daarbij vaak een onderbelicht aspect. In dit innovatietraject wordt juist dit aspect goed onderzocht. Ook andere beheerder kunnen straks profiteren van de ontwikkelde aanpak en resultaten.
- In de koppeling naar het reguliere Meanderende Maas project zou een beslisboom opgesteld kunnen worden: waar is het relatief zeker dat tot versterking moet worden overgegaan, waar is zeker goedkeuring, en waar is aanvullend onderzoek kansrijk om maatregelen te voorkomen/verkleinen.

REFERENTIES

1. Ministerie van Infrastructuur en Milieu (2017). Schematiseringshandleiding piping.
2. Arcadis (2018). Geotechnisch onderzoek Ravenstein-Lith. Proevenverzamelung met d70m, S, m en POP almede phi.
3. Deltares (2017). WBI Onzekerheden. Overzicht van belasting- en sterkteonzekerheden in het wettelijk beoordelingsinstrumentarium.
4. Projectteam Innovatiespoor Piping (2019). Innovatiespoor Piping MeMa_Stappenplan nav overleg 26-2-2019.
5. Deltares (2016). WBI Onzekerheden. Overzicht van belasting- en sterkteonzekerheden in het wettelijk beoordelingsinstrumentarium.
6. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (2004). Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken. DWW-2004-057.
7. Projectteam innovatietraject Meanderende Maas (2020). Deelproduct 3: onzekerheden.
8. Projectteam innovatietraject Meanderende Maas (2019). Deelproduct 2: faalpad en grenstoestandsfuncties.
9. Ministerie van Infrastructuur en Milieu (2017). Handreiking ontwerpen met overstromingskansen. Veiligheidsfactoren en belastingen bij nieuwe overstromingskansnormen.
10. Deltares (2016). WBI Onzekerheden. Overzicht van belasting- en sterkteonzekerheden in het wettelijk beoordelingsinstrumentarium.
11. TAW (2001). Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies. Geotechnische aspecten van dijken, dammen en boezemkaden.
12. Hoogwaterbeschermingsprogramma (2019). Projectoverstijgende Verkenning Voorlanden.
13. Projectteam Innovatiespoor Piping (2019). Naar een geohydrologische benadering voor het berekenen van de pipingopgave. Plan van aanpak.

Bijlage(n)



BIJLAGE: VERDELINGSPARAMETERS WBI

B.3 Piping (STPH)*Onzekerheden van sterkte-parameters.*

Sym.	Unit	Description		Q	Dist.	μ	σ , CoV	Autocorrelation	
		EN	NL					ρ [m]	dh,dv [m]
$\gamma_{sat,cover}$	kN/m ³	saturated volumetric weight of the cover layer	verzadigd volumiekgewicht van sublaag	5%	Shifted logn. shift=10	Nom.	cov ⁶ = 0.05	0	300
r_{exit}	-	damping factor at exit	dempingsfactor bij uitredepunt	95%	logn.	Nom.	cov = 0.1	0	∞
D_{cover}	m	total thickness of the cover	deklaagdikte	5%	logn.	Nom.	cov ⁵ = 0.3	0	200,-
L	m	seepage length	Kwelweglengte	5%	logn.	Nom.	cov ⁵ = 0.1	0	3000,-
D	m	thickness of the aquifer	dikte watervoerend pakket	95%	logn.	Nom.	cov ⁵ = 0.1 – 0.6	0	1500,-
h_{exit}	m [NAP]	phreatic level at the exit point	freatische waterstand bij uitredepunt	5%	norm.	Nom.	σ = 0.1	1	Section length,-
$m_{...}$	-	model uncertainty	modelfactor	Zie onderstaande tabel				1	-
$i_{c,h}$	-	critical heave gradient	kritiek verhang m.b.t heave	0.3 ⁷	logn.	0.5	σ = 0.1	0	300,-
d_{70}	m	70%-quantile of the grain size of the aquifer	70%-fraktiel van de korreldiameter in de aquifer	5%	logn.	Nom.	cov = 0.12	0	180,-
k	m/s	permeability of the aquifer	doorlatendheid aquifer	95%	logn.	Nom.	cov = 0.50	0	600,-

Modelonzekerheden

Sym.	Model	Dist.	μ	σ or CoV
m_p	piping	logn.	1.0	σ = 0.12
m_u	uplift	logn.	1.0	σ = 0.10

⁶ Onzekerheid in deze parameter is vaak ondergebracht in het stochastische ondergrondmodel. Het stochastische ondergrondmodel levert de variatiecoëfficiënt. Als gevolg daarvan kunnen de waarden voor deze parameter variëren.

⁷ Indien de getoonde waarde voor een kwantiel niet staat aangeduid als percentage, dan duidt dat er op dat de karakteristieke waarde zelf staat weergegeven en niet de kwantielwaarde.



BIJLAGE: PARAMETERS VLAKEDEKKEND STERKTEMODEL

In deze bijlage is per inputparameter uit de uitvoerbaarheidstoets toegelicht hoe deze zijn vastgesteld.

Hoogte maaiveld

De maaiveldhoogte in combinatie met het niveau van de onderzijde van de deklaag bepaalt de deklaagdikte. Verder is het polderpeil gerelateerd aan de hoogte van het maaiveld. Het maaiveld is (vlakdekkend) als volgt bepaald:

1. het startpunt is het AHN-3 maaiveldraster (0,50 x 0,50 m DTM), deze wordt omgezet naar een 5,0 x 5,0 grid op basis van de minimale maaiveldhoogte per rastervak.

Het AHN-3 geeft de (natte) watergangen niet weer, het AHN-3 is als volgt aangevuld:

2. daar waar leggersloten aanwezig zijn (m.a.w. de bodemdiepte van de watergang is ingemeten) is dit opgenomen in het maaiveldbestand: de maaiveldhoogte ter plaatse van de leggersloot is in AHN-3 basisraster aangepast of aangevuld;
3. van niet-legger-watergangen (detailwatergangen) is niet altijd een bodemhoogte bekend maar wel een peil. Op deze locaties is aangenomen dat de bodemhoogte 0,50 meter onder het waterpeil is. Het maaiveldraster is op de locaties van deze watergangen aangepast aan:
 - de bodemhoogte uit het basisbestand, indien beschikbaar;
 - het niveau van het waterpeil minus de door het waterschap Aa en Maas ingeschatte diepte (dit zal ongeveer 50 cm zijn).

Op de hoogte van het maaiveld zijn geen onzekerheidsreducties toegepast. Het maaiveld is geen sterkteparameter in de analyse, maar wordt gebruikt om twee andere parameters af te leiden: het polderpeil en de deklaagdikte.

Polderpeil

Bepaling gemiddelde waarde polderpeil

De gemiddelde waarde van het polderpeil is gelijkgesteld aan het maaiveldniveau. In het projectgebied Meanderende Maas is de verwachting dat het achterland verzadigd is door:

1. neerslag, de Maas is een regenrivier en de verwachting is dat bij een hoge Maasafvoer ook veel neerslag zal vallen in het benedenstroomse deel van de rivier (het projectgebied);
2. kwelwater zal zorgen voor een toename van het freatisch niveau aan de binnenzijde van de dijk.

De gemiddelde waarde van het polderpeil wordt bepaald aan de hand van het maaiveldraster zonder watergangen (zie vorige paragraaf). Als basis hiervoor wordt het AHN-3 maaiveldraster gebruikt (5 bij 5 meter uit paragraaf 2.1). De open vlakken (watergangen) worden lineair geïnterpoleerd.

Per gridcel (5,0 x 5,0 meter) wordt de gemiddelde waarde van het polderpeil gelijkgesteld aan de gemiddelde waarde van het maaiveld.

Bepaling karakteristieke waarde polderpeil

Het polderpeil is een onzekere sterkteparameter, de karakteristieke waarde wordt bepaald aan de hand van de parameters beschreven in het achtergrondrapport onzekerheden [ref. 3]. De parameters zijn weergegeven in tabel II.1.

Tabel II.1 Onzekerheidsparameters polderpeil

Parameter	Verdeling	Spreiding	Percentiel karakteristieke waarde
Polderpeil	Normaal	$\sigma = 0,10 \text{ m}$	5%

De karakteristieke waarde van het polderpeil wordt bepaald volgens de onderstaande vergelijking:

$$h_{p,kar} = h_{p,gem} - 1,645 \cdot \sigma = h_{p,gem} - 0,165$$

Waarin:

$h_{p,kar}$	De karakteristieke waarde (5%) van het polderpeil	[m+NAP]
h_{gem}	De gemiddelde waarde van het polderpeil	[m+NAP]
σ	De standaardafwijking van het polderpeil	[m]

Deklaagdikte

Bepaling gemiddelde waarde deklaagdikte

De deklaagdikte is bepaald per boring of sondering aan de hand van het niveau van de onderzijde van de deklaag en het maaiveldniveau. Bij een dunne tussenliggende zandlaag is deze meegenomen in de totale deklaagdikte, zie afbeelding II.1.

Afbeelding II.1 Definitie deklaagdikte per boring/sondering



De gemiddelde waarde van de deklaagdikte is bepaald volgens de onderstaande vergelijking:

$$d_{deklaag} = h_{maaiveld} - h_{deklaag}$$

Waarin:

$d_{deklaag}$	Deklaagdikte (gemiddeld)	[m]
$h_{maaiveld}$	Maaiveldniveau	[m+NAP]
$h_{deklaag}$	Niveau onderzijde deklaag	[m+NAP]

De deklaagdiktes zoals bepaald per boring of sondering liggen verspreid over het projectgebied. Deze puntmetingen zijn lineair geïnterpoleerd. Dit levert vlakdekkend een gemiddelde waarde van de deklaagdikte op, zie afbeelding II.2. Alle boringen zijn gebruikt voor de deklaagdikte, dit betekent dat ook de boringen meegenomen zijn waarbij op een beperkte diepte de boring is gestopt en er onzekerheid is of de zandlaag een (lokale) tussenzandlaag of het eerste watervoerend pakket betreft.

Afbeelding II.2 Gemiddelde vlakdekkende deklaagdikte



De deklaagdikte zal bepaald worden op een 5,0 bij 5,0 meter grid, hiervoor wordt de:

- minimale waarde van het maaiveldniveau gehanteerd;
- de gemiddelde waarde van het niveau van de onderzijde deklaag.

Het maaiveldniveau zal over een 5,0 bij 5,0 grid relatief grote variaties kunnen laten zien. De onderzijde van de deklaag zal niet veel variëren, gezien de dichtheid van het grondonderzoek.

Bepaling karakteristieke waarde deklaagdikte

Voor de spreiding van de deklaagdikte worden in de WBI achtergronddocumentatie twee waarden gegeven:

1. het achtergrondrapport onzekerheden [ref. 3] schrijft een variatiecoëfficiënt (CoV) van 0,30 voor. Voor deklaagdiktes van circa 3 à 4 meter (veel voorkomend in het projectgebied) levert dit een zeer grote spreiding op.
2. in de schematiseringshandleiding piping [ref. 1] wordt van de in (1) genoemde waarde, op basis van expert judgement, afgeweken. De schematiseringshandleiding schrijft een standaardafwijking van 0,50 m voor.

In de uitvoerbaarheidstoets II wordt aangesloten bij de schematiseringshandleiding. In een gevoeligheidsanalyse wordt onderzocht wat het effect is van een nog lagere of hogere waarde voor de spreiding. In een later stadium kan de spreiding lokaal worden bepaald, dit is geen onderdeel van uitvoerbaarheidstoets II.

De parameters die de onzekerheid van de deklaagdikte beschrijven zijn weergegeven in tabel II.2.

Tabel II.2 Onzekerheidsparameters deklaagdikte [ref. 1]

Parameter	Verdeling	Spreiding	Percentiel karakteristieke waarde
Deklaagdikte	Lognormaal	$\sigma = 0,50$ m	5 %

Om de karakteristieke waarde van de deklaagdikte te bepalen worden de parameters van de onderliggende normale verdeling omgerekend naar de parameters van de lognormale verdeling.

$$\lambda = \ln(d_{deklaag}) - \frac{\zeta^2}{2}$$

$$\zeta = \sqrt{\ln\left(1 + \left(\frac{\sigma_{deklaag}}{d_{deklaag}}\right)^2\right)}$$

De karakteristieke ondergrens (5%) wordt bepaald aan de hand van de onderstaande vergelijking:

$$d_{kar} = \exp(\lambda - 1,645 \cdot \zeta)$$

Waarin:

λ	Distributieparameter lognormale verdeling	[-]
ζ	Distributieparameter lognormale verdeling	[-]
d_{deklaag}	Gemiddelde waarde deklaagdikte	[m]
σ_{deklaag}	Standaardafwijking deklaagdikte	[m]
d_{kar}	Karakteristieke waarde deklaagdikte	[m]

Dikte watervoerend pakket

Bepaling gemiddelde waarde dikte watervoerend pakket

De dikte van het watervoerend pakket varieert van 10 tot 200 meter over het projectgebied. Om onrealistische uitkomsten met een dikte van het watervoerend pakket van 200 meter te krijgen is in de verkenningfase besloten de dikte te begrenzen op 50 meter.

Met deze 50 meter dikte zullen maximaal cirkelvormige stroomlijnen in de ondergrond kunnen ontstaan (bij een kwelweglengte van 100 meter).

In uitvoerbaarheidstoets II wordt aangesloten bij deze aanname. De dikte van het watervoerend pakket wordt begrensd op 50 meter. Als het watervoerend pakket lokaal dunner is wordt de dunnere waarde gehanteerd.

Bepaling karakteristieke waarde watervoerend pakket

Voor de spreiding van de dikte van het watervoerend pakket worden in de WBI achtergronddocumentatie twee waardes gegeven:

1. het achtergrondrapport onzekerheden [ref. 3] schrijft een variatiecoëfficiënt (CoV) van 0,1 tot 0,60 voor;
2. in de schematiseringshandleiding piping [ref. 1] wordt van de in (1) genoemde waarde, op basis van expert judgement, afgeweken. De schematiseringshandleiding schrijft een standaardafwijking van 0,50 m voor.

In de uitvoerbaarheidstoets wordt de gemiddelde waarde van de dikte van het watervoerend pakket gelijkgesteld aan de karakteristieke waarde van de dikte. Een spreiding met een standaardafwijking van 0,50 meter zal een minimaal effect hebben op de benodigde kwelweglengte. Voor de uitvoerbaarheidstoets II is dit detailniveau als voldoende beschouwd.

Kwelweglengte

Per gridcel wordt de aanwezige kwelweglengte bepaald door de afstand van de beschouwde gridcel haaks op de buitenteen van de dijk. De voorlandlengte wordt niet in rekening gebracht in de kwelweglengte, maar komt in uitdrukking in een gereduceerde stijghoogte aan de bovenstroomse randvoorwaarde (in Sellmeijer).

Door deze werkwijze is de kwelweglengte geen onzekere parameter:

1. het intredepunt, vaak de buitenteen van de dijk, ligt vast zonder noemenswaardige spreiding (hoogtebestand);
2. het uittredepunt wordt opgelegd, per gridcel wordt sterktebeschouwing uitgevoerd.

De kwelweglengte wordt als determinist in de berekening meegenomen.

d70

In de verkenning Meanderende Maas is de karakteristieke waarde van d70 bepaald aan de hand van circa 40 zeefkrommes. De karakteristieke waarde is gelijk aan 181,5 μm .

Voor uitvoerbaarheidstoets II wordt aangesloten bij deze waarde.

Volumiek gewicht deklaag

Gemiddelde waarde volumiek gewicht deklaag

Voor de gemiddelde waarde van het volumiek gewicht van de deklaag wordt aangesloten bij de proevenverzameling [ref. 2]. De gemiddelde waarde van klei contractant (laagste waarde volumiek gewicht) is aangehouden. Dit correspondeert met een verzadigd volumiek gewicht van 18,8 kN/m³

Karakteristieke waarde volumiek gewicht deklaag

De karakteristieke waarde van het volumiek gewicht van de deklaag wordt bepaald op basis van de verdelingsparameters conform het onzekerheidsrapport WBI [ref. 3], zie ook tabel II.3.

Tabel II.3 Parameters onzekerheid

Parameter	Verdeling	Spreiding	Percentiel karakteristieke waarde
volumiek gewicht	Shifted lognormaal	CoV = 0,05, shift =10 $\sigma = 18,8 \cdot 0,05 = 0.94$	5 %

Om de karakteristieke waarde van het volumieke gewicht te bepalen worden de parameters van de onderliggende normale verdeling omgerekend naar de parameters van de lognormale verdeling.

$$\lambda = \ln(\gamma_{sat} - shift) - \frac{\zeta^2}{2}$$
$$\zeta = \sqrt{\ln \left(1 + \left(\frac{\sigma}{\gamma_{sat} - shift} \right)^2 \right)}$$

De karakteristieke ondergrens (5 %) wordt bepaald aan de hand van de onderstaande vergelijking:

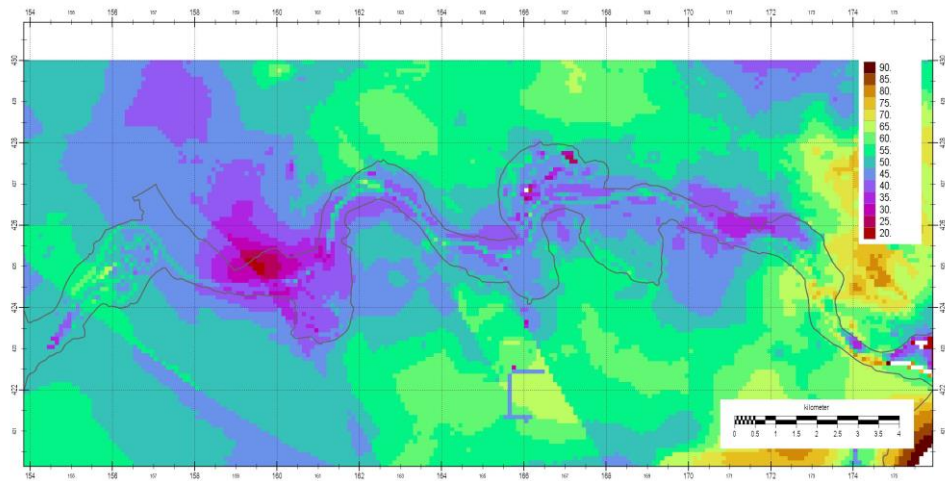
$$\gamma_{sat,kar} = \exp (\lambda - 1.645 \cdot \zeta) + \text{shift}$$

Voor de gemiddelde waarde van 18,8 kN/m³ en de variatiecoëfficiënt van 0,05 is de karakteristieke waarde gelijk aan 17,3 kN/m³.

Doorlatendheid zandpakket

Voor de bulkdoorlatendheid van het zandpakket is een veilige waarde gekozen op basis van de doorlatendheid van het eerste watervoerend pakket uit Regis, zie afbeelding II.3. Voor de doorlatendheid is een constante waarde van 55 m/dag (0,00064 m/s) gehanteerd.

Afbeelding II.1 Regis (bulk)doorlatendheid eerste watervoerend pakket



Stijghoogte/responsfactor

Voor de stijghoogte, of responsfactor, wordt de 95 %-waarde uit het geohydrologische model gehanteerd:

- 1 de stijghoogte bij het intredepunt (in eerste instantie de buitenteen van de dijk) wordt gebruikt als bovenstroomse randvoorwaarde in het Sellmeijer model;
- 2 de stijghoogte voor opbarsten en heave wordt in elk gridcel binnendijs bepaald. Voor elk gridcel wordt de opbarst- en heave beschouwing uitgevoerd.



BIJLAGE: PARAMETERS STIJGHOOGTEBEREKENING TRWD

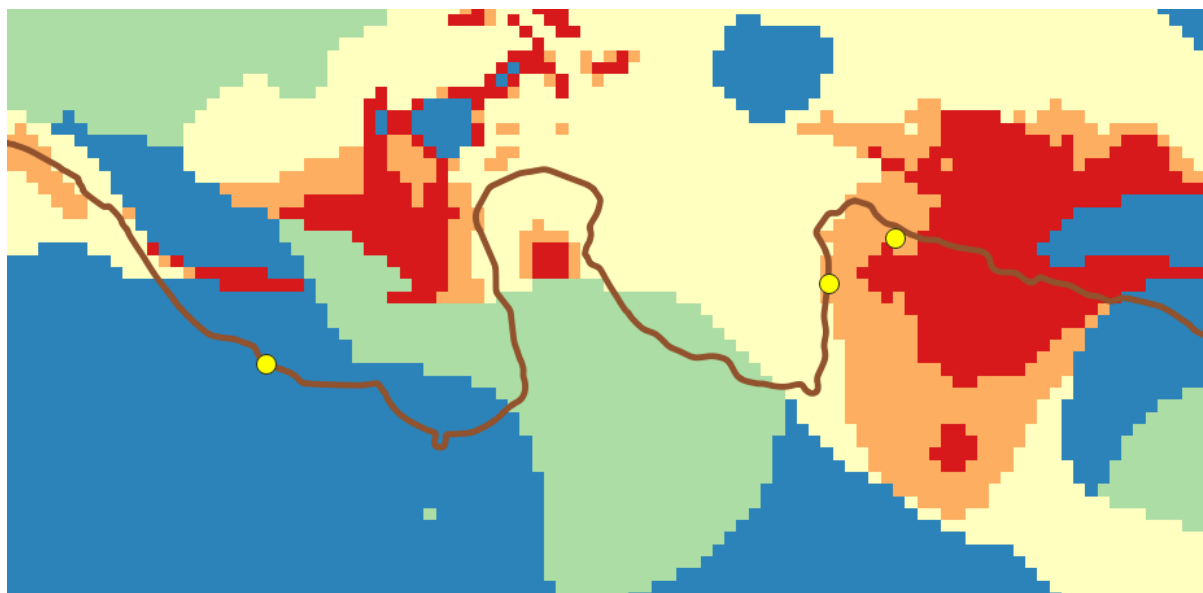
Doorlatendheid zandlaag

Voor de doorlatendheid is een constante waarde van 55 m/dag (0,00064 m/s) gehanteerd in overeenstemming met de vlakdekkende piping berekeningen (zie bijlage II).

Dikte zandpakket

Voor de dikte van het zandpakket is aangesloten bij Regis II. Voor de drie profielen is de dikte weergegeven in afbeelding III.1 en tabel III.1.

Afbeelding III.1 Dikte watervoerend pakket



Tabel III.1 Dikte zandpakket per doorsnede

Doorsnede	Dikte [m]
1	50
2	12
3	11

Dikte deklaag voor- en achterland

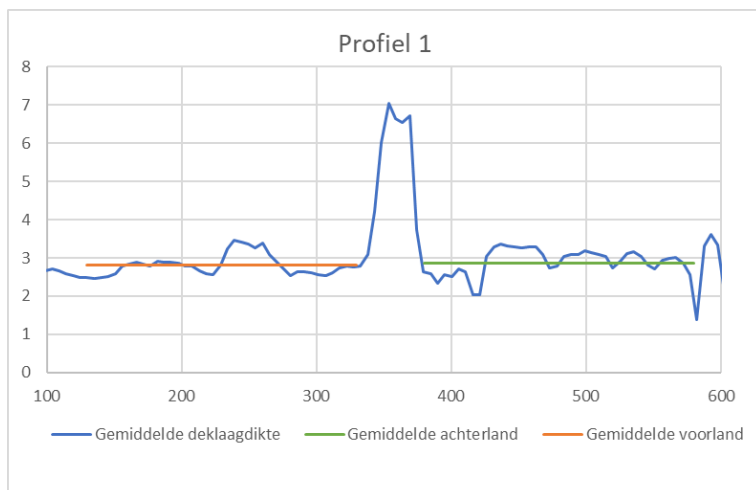
Voor de dikte van de deklaag in het voorland is een gemiddelde waarde gehanteerd. De stijghoogte is afhankelijk van een gemiddelde deklaagdikte en wordt niet of nauwelijks beïnvloed door lokale dunne plekken in de kleilaag. Dit is tegengesteld aan bijvoorbeeld het pipingmechanisme waarbij een lokaal dunne plek maatgevend kan zijn.

Voor de gemiddelde dikte is 200 meter voor en 200 meter achter dijk als uitgangspunt gehanteerd.

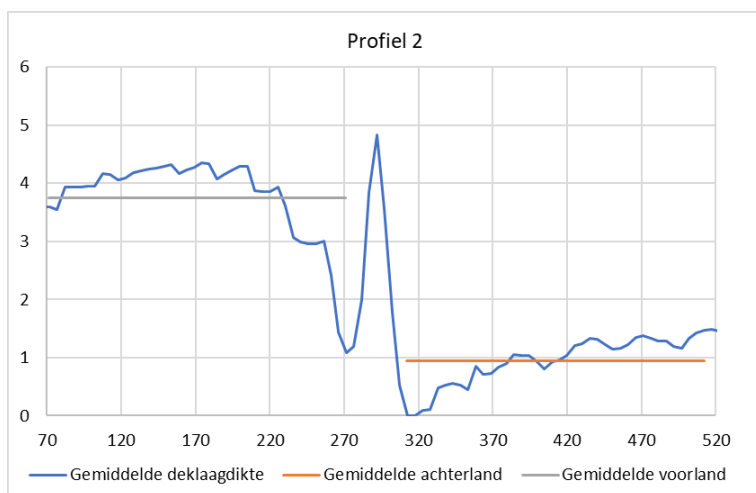
Tabel III.2 Deklaagdikte voorland

Profiel	Gemiddelde dikte voorland	Gemiddelde dikte achterland	Zie afbeelding
profiel 1	2,9 m	2,8 m	afbeelding III.2
profiel 2	3,8 m	0,9 m	afbeelding III.3
profiel 3	2,4 m	3,0 m	afbeelding III.4

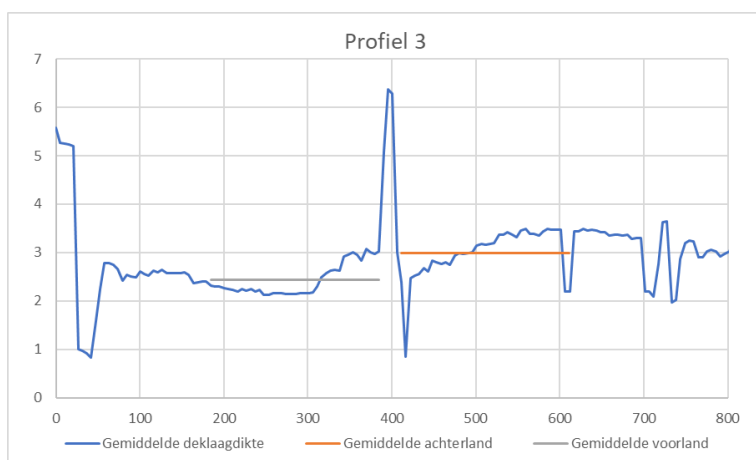
Afbeelding III.2 Deklaagdikte voor- en achterland profiel 1



Afbeelding III.3 Deklaagdikte voor- en achterland profiel 2



Afbeelding III.4 Deklaagdikte voor- en achterland profiel 3



Doorlatendheid deklaag voor- en achterland

Voor de doorlatendheid van de deklaag in het voor- en achterland is 0,05 m/dag gehanteerd. Er is geen onderscheid gemaakt tussen de doorlatendheid in het voor- en achterland. Een doorlatend voorland en ondoorlatend achterland is het meest conservatief voor de drukopbouw.

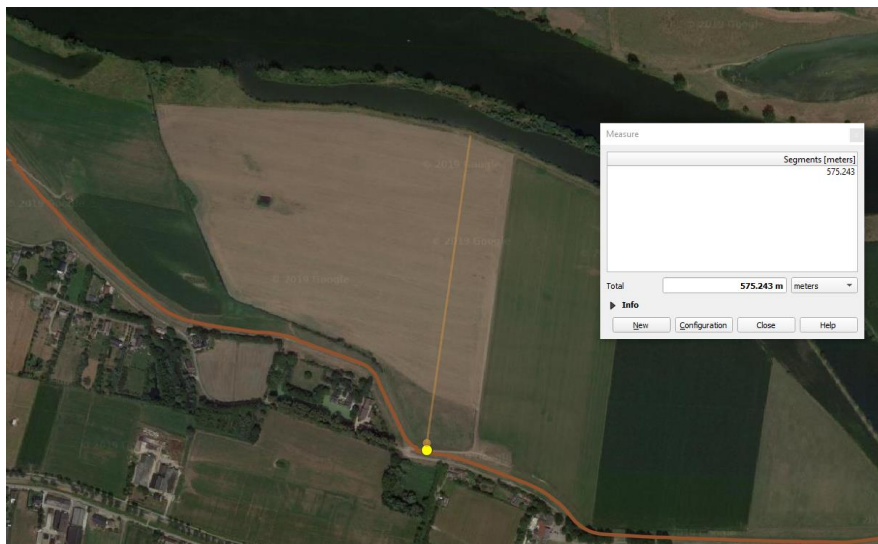
Lengte voorland

Voor de lengte van het voorland zijn de waarden conform Tabel gehanteerd.

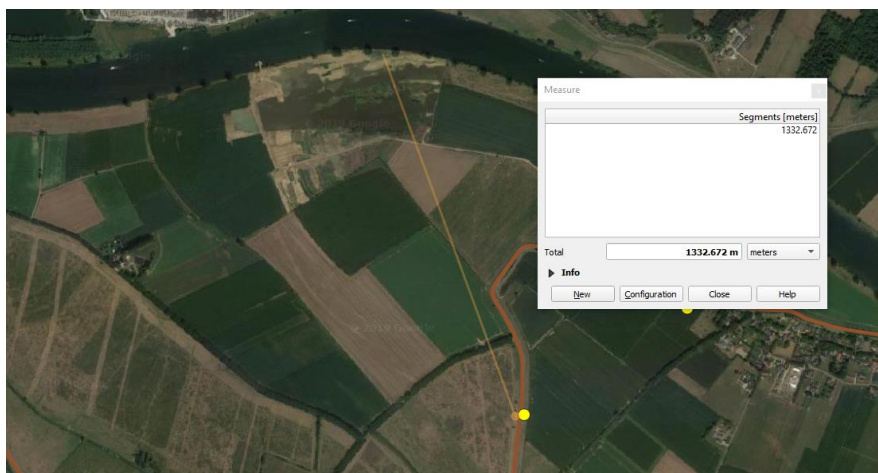
Tabel III.3 Voorlandlengte

Profiel	Lengte voorland	Zie afbeelding
Profiel 1	575 m	afbeelding III.5
Profiel 2	1.330 m	afbeelding III.6
Profiel 3	327 m	afbeelding III.7

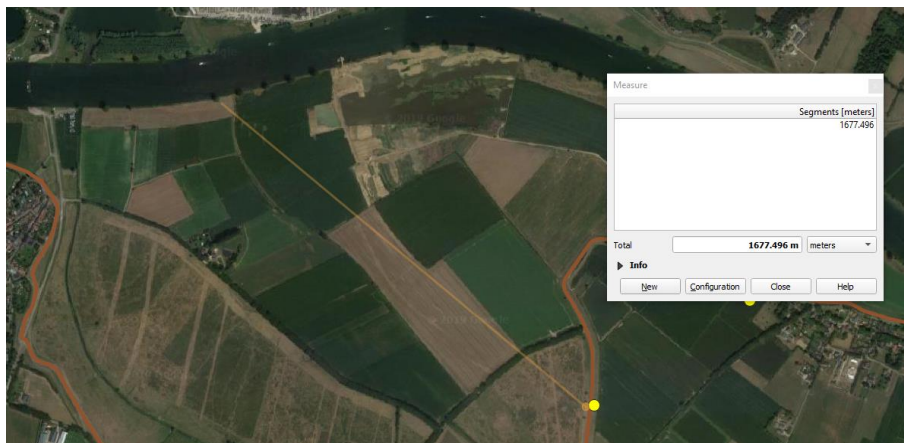
Afbeelding III.5 Lengte voorland profiel 1



Afbeelding III.6 Lengte voorland profiel 2



Afbeelding III.7 Lengte voorland profiel 3



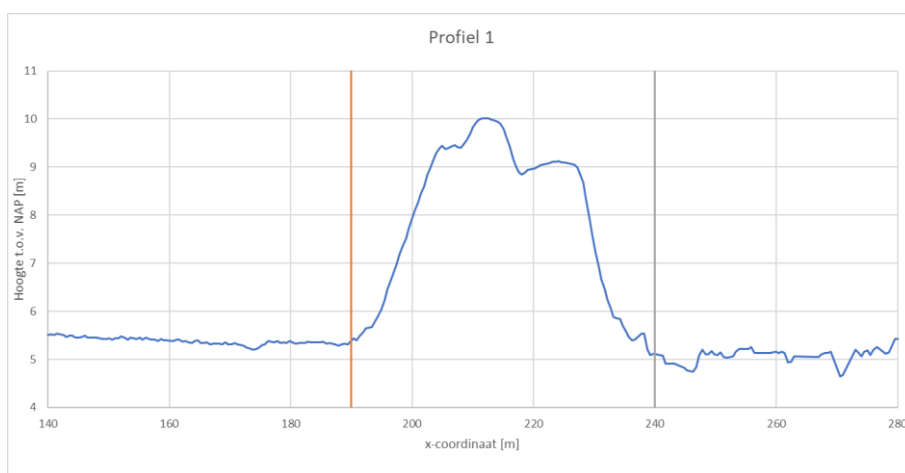
Lengte dijkbasis

Voor de lengte van het voorland zijn de waarden conform tabel III.4 gehanteerd. De profielen zijn gebaseerd op het AHN-3.

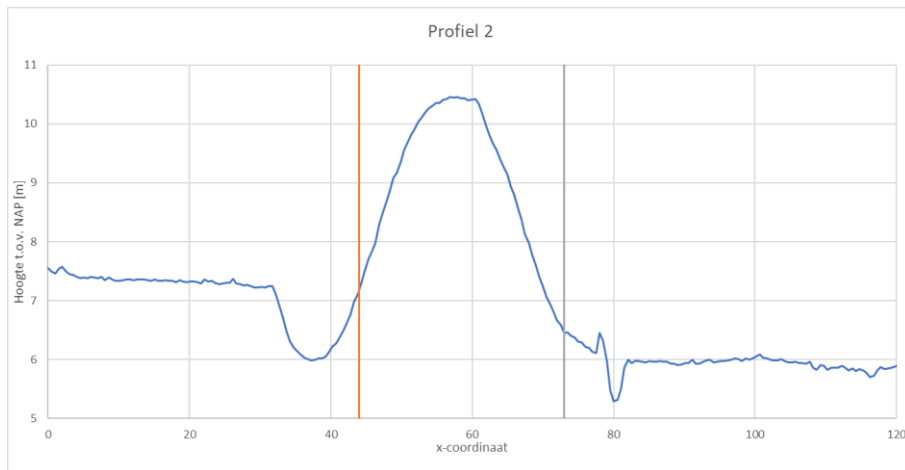
Tabel III.4 Voorlandlengte

Profiel	Lengte dijkbasis	Zie afbeelding
Profiel 1	50 m	afbeelding III.8Afbeelding
Profiel 2	29 m	afbeelding III.9Afbeelding
Profiel 3	313 m	afbeelding III.10

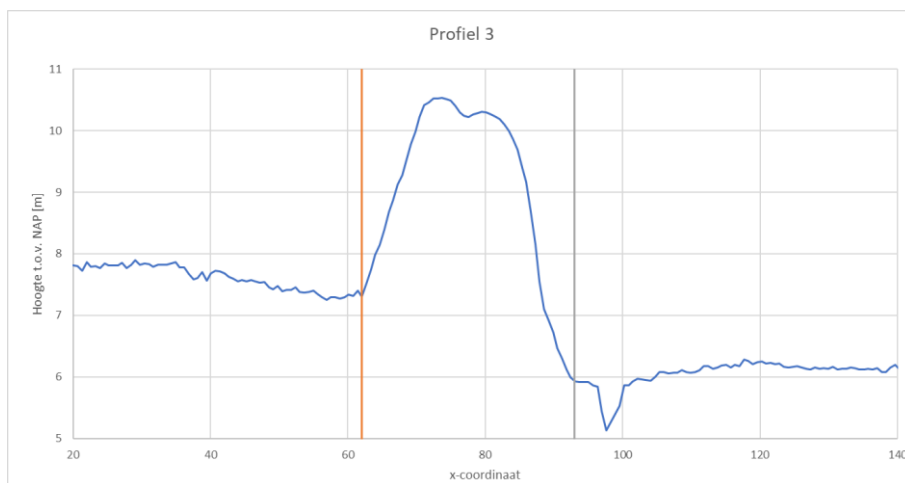
Afbeelding III.8 Dijkbasis profiel 1



Afbeelding III.9 Dijkbasis profiel 2



Afbeelding III.10 Dijkbasis profiel 3

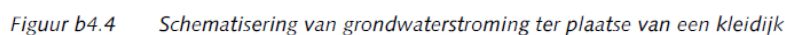


Lengte achterland

Voor de lengte van het achterland is 1.000 meter gehanteerd. Hogere waardes hebben vrijwel geen invloed op de berekende stijghoogte. Er is geen waterpartij in het achterland aanwezig en voor de uitvoerbaarheidstoets is aangenomen dat een deklaag aanwezig is in het gehele achterland.

IV

BIJLAGE: PARAMETERS STIJGHOOGTEBEREKENING TRWD



Parameter	Eenheid	Afkorting	Doorsnede 1	Doorsnede 2	Doorsnede 3
Doorlatendheid zandlaag	m/d	k	55	55	55
Dikte Zandpakket	m	D	50	12	11
Dikte deklaag (voorland)	m	d1	2.81	3.75	2.43
Verticale doorlatendheid deklaag (voorland)	m/d	kv1	0.05	0.05	0.05
Dikte deklaag (achterland)	m	d3	2.86	0.94	2.98
Verticale doorlatendheid deklaag (achterland)	m/d	kv3	0.05	0.05	0.05
Lambda 1	-	$\lambda 1$	393.13	222.49	171.47
Lambda 3	-	$\lambda 3$	396.61	111.39	189.89
L1 (Lengte voorland)	m	L1	575	1330	327
L2 (Dijkbasis)	m	L2	50	29	31
L3 (Lengte achterland)	m	L3	1000	1000	1000
W1 ($0,5 > L1/\lambda 1 < 2$)	-	W1	0.13	0.34	0.27
W2	-	W2	0.02	0.04	0.05
W3 ($0,5 > L3/\lambda 3 < 2$)	-	W3	0.14	0.17	0.31
ΣW		ΣW	0.29	0.55	0.64
phi0 (=MHW)	m	$\varphi 0$	9.98	10.73	10.81
phi3 (= polderpeil)	m	$\varphi 3$	5.35	5.99	5.99
phi 1 ($0,5 > L1/\lambda 1$ en $L3/\lambda 3 < 2$)	m	$\varphi 1$	7.92	7.82	8.76
phi 2 ($0,5 > L1/\lambda 1$ en $L3/\lambda 3 < 2$)	m	$\varphi 2$	7.63	7.45	8.37

V

BIJLAGE: MEMO PROBABILISTISCHE PIPINGBESCHOUWING

