



HWBP Projectgebonden Innovatie 'Geohydrologische Aanpak voor Piping'



Kwantificering onzekerheden stijghoogte Achtergrond bij syntheserapport

Waterschap Aa en Maas

12 november 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 Kwantificerig onzekerheden stijghoogte
Datum 12 november 2020
Referentie 113164/20-017.084

Auteur(s) Heleen Niele, Hendrik Kok en Jacco Hoogewoud

Checklist	Door wie	Vink of paraaf
Interne review	Ruben Jongejan Wim Kanning	✓
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	6
1.1	Aanleiding	6
1.2	Plaats in het innovatieproject	7
1.3	Kwantificeren van onzekerheden	8
1.4	Leeswijzer	8
2	OPTIES KWANTIFICERING STIJGHOOGTE (-ONZEKERHEDEN)	9
3	OPZET STOCHASTISCH GRONDWATERSTROMINGSMODEL	11
3.1	Parameteronzekerheden	11
3.2	Schematiseringonzekerheid	14
3.3	Opzet stochastisch model	15
3.4	Modelonzekerheid	16
4	RESULTATEN	19
4.1	Stochastisch model zonder restonzekerheid	19
4.2	Stochastisch model met modelonzekerheid	23
4.3	Vergelijking met andere methoden	24
5	CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN	26
5.1	Conclusie	26
5.2	Aanbevelingen	26
	Laatste pagina	28
	Bijlage(n)	Aantal pagina's
I	Geologische scenario's	6
II	Gaat in de deklaag voorland	3
III	Stijghoogteberekeningen op basis van engineering judgement voor duiding en controle	2

SAMENVATTING

De nieuwe normering stelt het waterschap Aa en Maas voor de opgave om circa 100 km primaire waterkering te versterken. Een deel van deze versterkingsopgave is toe te schrijven aan het faalmechanisme piping. Het eerste dijktraject dat waterschap Aa en Maas heeft opgestart loopt van Ravenstein tot Lith, is ruim 26 km lang en draagt de naam Meanderende Maas.

Met de komst van het op de risicobenadering gebaseerde beoordelingsinstrumentarium in 2017 worden voor veel dijken in het bovenrivierengebied hoge faalkansen voor piping berekend. Deze hoge faalkansen vertalen zich in grote opgaves voor piping in de HWBP projecten. Hoewel de ervaring bij hoogwater leert dat het rivierengebied inderdaad gevoelig is voor piping, leeft bij beheerders en experts ook het gevoel dat aanscherping van het veiligheidsbeeld mogelijk is. Dit is aanleiding geweest om in verschillende kennisprogramma's te werken aan optimalisatie en verbetering van de aanpak van pipinganalyses om daarmee reëlere faalkansen en opgaves te kunnen bepalen.

Voor het dijkversterkingsproject Meanderende Maas is een projectgebonden subsidie verleend door het Hoogwater Beschermingsprogramma (HWBP) om te onderzoeken hoe geohydrologische informatie en modellen gebruikt kunnen worden om stijghoogtes beter in te schatten om zo de pipingopgave nauwkeuriger vast te stellen. Regionale geohydrologische modellen worden hierbij gekoppeld aan de reguliere sterktemodellen voor opbarsten, heave en terugschrijdende erosie. De aanpak is ontwikkeld voor Meanderende Maas met oog voor de bredere toepasbaarheid in Nederland.

Het innovatietraject bestaat uit verschillende fasen. In fase I is aangetoond dat de toepassing van een geohydrologisch model grote invloed kan hebben op de versterkingsopgave. In fase II is een eerste stap gezet om de onzekerheden ten aanzien van de stijghoogte in kaart te brengen. Hiervoor zijn actualisaties aan het grondwatermodel voor het projectgebied van Meanderende Maas gedaan. Vervolgens is in fase II aangetoond dat het gebruik van stijghoogtes volgens een geohydrologisch model in de dijkbeoordeling een werkbare methode is. In fase III zijn het referentie-grondwatermodel en de aanpak ten aanzien van de omgang met onzekerheden doorontwikkeld en definitief gemaakt. Met de combinatie van geohydrologisch model en onzekerheden aanpak is vlakdekkend de 95% waarde van de stijghoogte onder norm-omstandigheden berekend, voor toepassing in een semi-probabilistische beoordeling. Hiermee kan vervolgens met de reguliere sterktemodellen uit het Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium (BOI) vlakdekkend de piping-opgave in kaart worden gebracht.

Voorliggend rapport beschrijft de gekozen omgang met onzekerheden ten aanzien van de stijghoogte, voor een geval waarin er nauwelijks stijghoogtemetingen bij hoogwater beschikbaar zijn. Omdat statistische analyses ('klassiek' of Bayesiaans') niet haalbaar zijn door het gebrek aan metingen bij hoogwater, is gekozen voor een combinatie van expert judgement met probabilistische berekeningen. De leemtes in de probabilistische analyses (geen modelonzekerheid) zijn ingevuld op basis van expert judgement. Daarbij zijn twee alternatieven bekeken:

- 1 de modelonzekerheid wordt als een losse stochastische variabele gemodelleerd en zo in rekening gebracht;
- 2 de modelonzekerheid wordt meegenomen door de onzekerheid ten aanzien van de stijghoogte volgens de probabilistische analyses 'naar boven af te ronden', naar een vaste variatiecoëfficiënt.

De tweede optie is uiteindelijk afgefallen omdat de uitgevoerde modelberekeningen tonen dat de onzekerheid ten aanzien van de stijghoogte bij hoogwater ruimtelijk zeer variabel is. Bij het hanteren van een vaste variatiecoëfficiënt voor de gehele dijkstrekking zou dit inzicht verloren gaan en zou een grote, vermijdbare onnauwkeurigheid worden geïntroduceerd. Bovendien zou het gebruik van uniforme variatiecoëfficiënt lokaal kunnen leiden tot fysisch onmogelijke resultaten, zoals kansen op stijghoogtes die hoger zijn dan de buitenwaterstand.

Optie 1 is uitgewerkt door een stochastisch model op te stellen waarin de belangrijkste parameteronzekerheden stochastisch zijn meegenomen. De meeste parameters zijn ruimtelijk uniform gevarieerd, de dikte van de deklaag is ruimtelijk gevarieerd in een random gepositioneerd schaakbordpatroon. Binnen elk vak van het schaakbord is overal dezelfde waarde aangehouden. De vakken zijn iedere run verplaatst. Voor de overige 'gevoelige parameters' (dat wil zeggen parameters waardoor de berekende stijghoogtes wezenlijk worden beïnvloed) zijn licht veilige waarden gebruikt en voor de ongevoelige parameters gemiddelde waarden. Alle onzekerheden die niet expliciet zijn gemodelleerd zijn gevat in een modelonzekerheidsterm.

Op grond van stochastisch model inclusief modelonzekerheid is de 95 %-waarde van de stijghoogte berekend, als karakteristieke waarde. Ter controle is door geohydrologen een behoudend (conservatief) geohydrologisch model opgesteld op basis van engineering-judgement. De karakteristieke waarden uit het stochastisch model komen redelijk goed overeen met de stijghoogtes uit het engineering-judgement model, wat vertrouwen geeft in het stochastisch model.

De aanpak is beschreven op een wijze dat hij ook kan toegepast op toekomstige dijkversterkingsprojecten, en hij is concreet uitgewerkt voor de casus Meanderende Maas. De karakteristieke waarden die zijn bepaald met het stochastisch model zijn geschikt als uitgangspunt voor semi-probabilistische analyses van opbarsten, piping en heave. De definitieve keuze voor ontwerpuitgangspunten wordt binnen het dijkversterkingsproject gemaakt.

1

INLEIDING

1.1 Aanleiding

Met de komst van het op de risicobenadering gebaseerde beoordelingsinstrumentarium in 2017 worden voor veel dijken in het bovenrivierengebied hoge faalkansen voor piping berekend. Deze hoge faalkansen vertalen zich in grote opgaves voor piping in de HWBP projecten. Door beheerders en experts werden de uitkomsten vaak als te conservatief en daarmee niet voldoende realistisch bestempeld. Dit is aanleiding geweest om in verschillende kennisprogramma's te werken aan optimalisatie en verbetering van de aanpak van pipinganalyses om daarmee reëlere faalkansen en opgaves te kunnen bepalen.

De nieuwe normering 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. Het eerste dijktraject dat waterschap Aa en Maas heeft opgestart loopt van Ravenstein tot Lith, is ruim 26 km lang en draagt de naam Meanderende Maas.

Afbeelding 1.1 Projectgebied Meanderende Maas (de rode lijn geeft het dijktraject 36-3 weer)



Voor dit dijkversterkingsproject is een projectgebonden subsidie verleend door het Hoogwater Beschermingsprogramma (HWBP) om te onderzoeken hoe geohydrologische informatie en modellen gebruikt kunnen worden om stijghoogtes beter in te schatten om zo de pipingopgave nauwkeuriger vast te stellen. Regionale geohydrologische modellen worden hierbij gekoppeld aan de reguliere sterktemodellen voor opbarsten, piping en heave. Inmiddels is aangetoond dat deze aanpak een goede basis biedt voor aangescherpte piping-analyse en, met name in gebieden met veel voorland, lagere stijghoogtes oplevert. De aanpak ontwikkeld voor algemene toepasbaarheid en de aanpak is getest op de casus Meanderende Maas.

Tijdens de Innovatie Meanderende Maas is geconstateerd dat de geohydrologische modellen niet alleen bruikbaar zijn voor het vaststellen van de noodzaak van pipingmaatregelen, maar ook bruikbaar zijn voor de bepaling van de lengtes van heaveschermen en het aanscherpen van de macrostabiliteitsopgave. Daarbij wordt namelijk ook gebruik gemaakt van de stijghoogte in het watervoerend pakket.

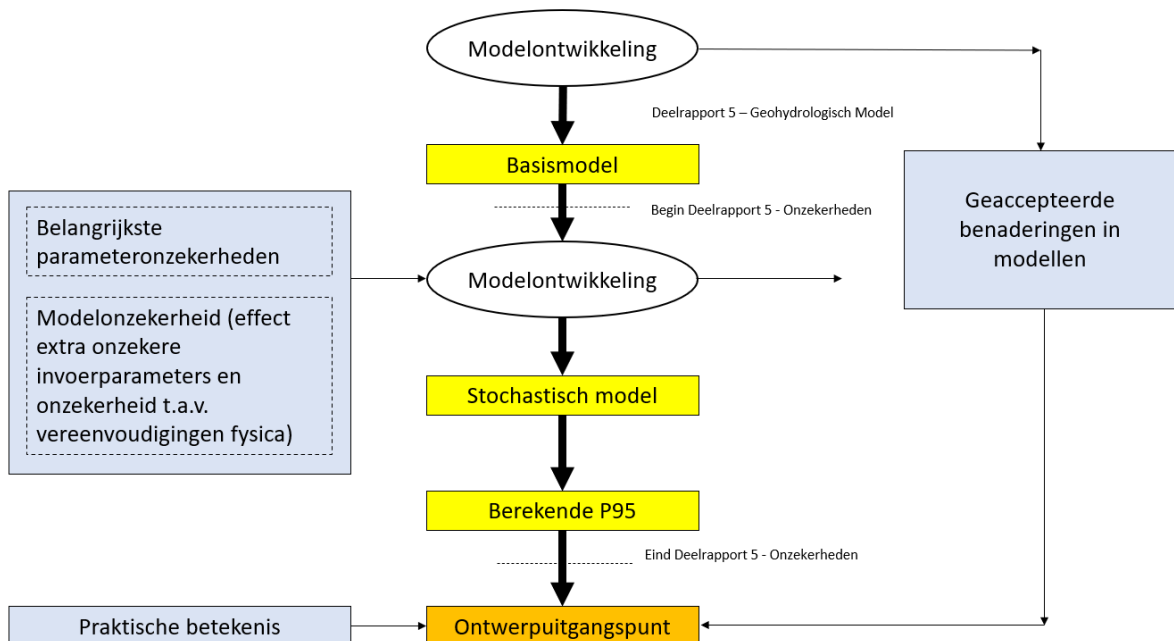
De beschreven aanpak in deze rapportage kan dus ook voor het ontwerp van heaveschermen en macrostabiliteitsberekeningen gebruikt worden.

1.2 Plaats in het innovatieproject

Het innovatietraject bestaat uit verschillende fasen. In fase I is aangetoond dat het meenemen van een geohydrologische aanpak potentie heeft en een grote invloed kan hebben op de versterkingsopgave. In fase II is een conceptmethode ontwikkeld om de onzekerheden van de stijghoogte in kaart te brengen. Hiervoor zijn actualisaties aan het grondwatermodel gedaan. Vervolgens is in uitvoerbaarheidstoets II aangetoond dat het gebruiken van de 95 %-waarde van de stijghoogte volgens een geohydrologisch model in de dijkbeoordeling een werkbare methode is. In fase III worden het grondwatermodel en de aanpak onzekerheden definitief gemaakt. In uitvoerbaarheidstoets III zal bepaald worden of het gebruiken deze geohydrologische aanpak winst oplevert in de dijkbeoordeling.

Voorliggend rapport is onderdeel van fase III. Het beschrijft de gekozen onzekerheden aanpak ten aanzien van de stijghoogte, gegeven dat er weinig stijghoogte metingen beschikbaar zijn. In onderstaand schema is de afbakening van deze rapportage weergegeven. De aanpak heeft als uitgangspunt de basisschematisatie in het geactualiseerde geohydrologisch model, beschreven in Deelrapport 5 – Geohydrologie. In onderliggende rapportage worden parameteronzekerheden en/of restonzekerheden van dit model bepaald. Deze leiden tot een gemiddelde stijghoogte met onzekerheidsband. Hier eindigt de scope van dit deelrapport. De implementatie in de sterkteberekeningen volgt in de uitvoerbaarheidstoets en/of de ontwerpogave. De ontwerpogave valt buiten de scope van het innovatieproject. Bij de implementatie zal nog een vertaalslag gemaakt moeten worden van de modeluitkomsten naar ontwerpuitgangspunten, rekening houdend met aanvullende lokale kennis en de praktische betekenis van de aanpassing of aanscherping van ontwerpuitgangspunten.

Afbeelding 1.2 Plaats van dit deelrapport in innovatietraject Meanderende Maas



1.3 Kwantificeren van onzekerheden

Onzekerheden vormen een integraal onderdeel van de BOI-systematiek. In de semi probabilistische benadering worden modellen, voor bijvoorbeeld opbarsten, heave en piping, gevoed met zogenaamde karakteristieke waarden. Dit zijn doorgaans waarden met een onderschrijdingskans van 95 % voor belastingparameters (met een negatieve invloed), ook wel de P95 genoemd. Voor sterkteparameters (met een positieve invloed op de grenstoestand) wordt doorgaans een 5 % onderschrijdingswaarde gebruikt. De stijghoogte is een bepalende (belasting)parameter in de sterktemodellen, en hier wordt daarom de karakteristieke waarde (P95) van gezocht bij een gegeven hoogwater

1.4 Leeswijzer

In dit deelrapport wordt beschreven hoe een stochastisch model kan worden opgesteld, om bij een gegeven hoogwatergolf de stijghoogte en bijbehorende onzekerheid te berekenen. Idealiter wordt een grondwatermodel gekalibreerd met metingen en kan op basis van metingen ook de onzekerheid van de stijghoogte worden ingeschat. Er zijn echter geen metingen beschikbaar van situaties met een ondergelopen voorland die vergelijkbaar zijn met een hoogwatergolf zoals die in dit innovatieproject bepaald is. De kalibratie van het grondwatermodel is in Deelrapport 5 – Geohydrologie beschreven. In hoofdstuk 2 worden de opties voor het kwantificeren van de stijghoogteonzekerheid behandeld en wordt toegelicht waarom is gekozen voor een stochastisch model waarin parameters als onzekere grootheden worden behandeld. In hoofdstuk 3 wordt ingegaan op de onzekere parameters en scenario's waarmee we in dit geohydrologisch model te maken hebben, en op het complete stochastische model, inclusief modelonzekerheid. Vervolgens worden in hoofdstuk 4 de resultaten besproken. In hoofdstuk 5 wordt de conclusie gegeven en wordt kort ingegaan op de vervolgstappen richting het vaststellen van ontwerpuitgangspunten.

2

OPTIES KWANTIFICERING STIJGHOOGTE (-ONZEKERHEDEN)

Zoals toegelicht in deelrapport III kan op hoofdlijnen onderscheid worden gemaakt tussen de volgende methoden voor het kwantificeren van de onzekerheden ten aanzien van berekende stijghoogtes bij hoogwatercondities door model- en parameteronzekerheden:

1 **Expert judgement**

Bij deze methode wordt aan experts gevraagd om de onzekerheden ten aanzien van berekende stijghoogtes te beschrijven in de vorm van kansen/kansverdelingen. De experts baseren zich daarbij op hun ervaringskennis, de theorie en eventueel beschikbaar statistisch materiaal.

2 **'Klassieke' statistische analyse van de verschillen tussen modelresultaten en waargenomen stijghoogtes**

Op basis van de verschillen tussen modelresultaten en waargenomen stijghoogtes kan de modelonzekerheid in beeld worden gebracht (systematische en toevallige afwijkingen). Bij bijvoorbeeld de kleinste kwadratenmethode (Ordinary Least Squares, OLS) wordt de som van de gekwadrateerde verschillen tussen observaties en modelvoorspellingen geminimaliseerd uitgaande van een lineaire relatie tussen de onafhankelijke en de afhankelijke variabele (hier: de voorspelde stijghoogte en de waargenomen stijghoogte).

3 **Bayesiaanse statistische analyse waarin prior-verdelingen worden bijgesteld op basis van metingen en veldwaarnemingen**

Bij Bayesiaanse parameterschatting wordt de gezamenlijke (a-priori) kansdichtheidsfunctie van de onzekere parameters bijgesteld op basis van veldwaarnemingen, gebruik makend van het theorema van Bayes. Deze waarnemingen kunnen meer omvatten dan alleen waargenomen stijghoogtes, zoals ook wel/geen waargenomen zandtransport (heave).

4 **Probabilistische analyse waarin het effect van onzekerheden ten aanzien van invoerparameters wordt bepaald**

Bij deze methode wordt de doorwerking beschouwd van de onzekerheden ten aanzien van de invoer van het grondwaterstromingsmodel. Deze aanpak berust op de veronderstelling dat het belang van parameteronzekerheid (veel) groter is dan dat van de pure modelonzekerheid. Wanneer dit niet zo is, dan levert deze methode een onderschatting op van de onzekerheid ten aanzien van de stijghoogte.

Het puur op basis van expert judgement kwantificeren van onzekerheden is relatief laagdrempelig (vergt geen complexe analyses) maar verdient niet de voorkeur omdat de ervaringskennis zeer beperkt is. De onzekerheden ten aanzien van de met regionale grondwaterstromingsmodellen berekende stijghoogtes bij hoogwaters zijn namelijk zelden of nooit systematisch bepaald.

Een 'klassieke' statische analyse is onmogelijk vanwege het gebrek aan stijghoogtemetingen bij hoogwatercondities in het projectgebied. In een Bayesiaanse statistische analyse kunnen ook andere waarnemingen worden benut. Het systematisch beschrijven van deze waarnemingen en het berekenen van posterior-verdelingen zou echter een zeer grote inspanning vergen zonder garantie op succes.

Probabilistische analyses waarin het effect van onzekerheden ten aanzien van invoerparameters wordt bepaald vergen enige inspanning maar zijn goed mogelijk. Een nadeel is dat de onzekerheid ten aanzien van het model zelf bij deze aanpak niet gekwantificeerd kan worden.

Omdat statistische analyses ('klassiek' of Bayesiaans) niet haalbaar lijken, is gekozen voor een combinatie van expert judgement met probabilistische analyses. De leemtes in de probabilistische analyses (geen modelonzekerheid) worden dan ingevuld op basis van expert judgement. Daarbij zijn twee alternatieven bekeken:

- 1 de modelonzekerheid wordt als een losse stochastische variabele gemodelleerd en zo in rekening gebracht;
- 2 de modelonzekerheid wordt meegenomen door de onzekerheid ten aanzien van de stijghoogte volgens de probabilistische analyses 'naar boven af te ronden', naar een vaste variatiecoëfficiënt zoals in het BOI.

De tweede optie is uiteindelijk afgefallen omdat de uitgevoerde modelberekeningen tonen dat de onzekerheid ten aanzien van de stijghoogte bij hoogwater ruimtelijk zeer variabel is. Bij het hanteren van een vaste variatiecoëfficiënt voor de gehele dijkstrekking zou dit inzicht verloren gaan en zou een grote, vermijdbare onnauwkeurigheid worden geïntroduceerd. Bovendien zou het gebruik van uniforme variatiecoëfficiënt lokaal kunnen leiden tot fysisch onmogelijke resultaten, zoals kansen op stijghoogtes die hoger zijn dan de buitenwaterstand. In paragraaf 4.3 wordt dit getoond.

De resultaten van berekende stijghoogtes die op grond van basis van expert judgement als 'veilig maar reëel' worden gezien, zijn gebruikt voor duiding en controle (zie bijlage III).

In hoofdstuk 3 wordt nader ingegaan op het stochastisch grondwaterstromingsmodel, inclusief de omgang met modelonzekerheid.

3

OPZET STOCHASTISCH GRONDWATERSTROMINGSMODEL

In dit hoofdstuk wordt een toelichting gegeven op het stochastisch grondwaterstromingsmodel dat in het kader van het Innovatieproject Meanderende Maas is ontwikkeld. De onzekerheid van de stijghoogte in het geohydrologisch model komt ten eerste door onzekerheden ten aanzien van invoerparameters van het model. Ten tweede bestaat er onzekerheid over de schematisatie (bijv. ondergrondopbouw) die recht doet aan de realiteit. In dit verband wordt in de geotechniek gesproken over schematiseringonzekerheden. Ten derde is er modelonzekerheid doordat een model een versimpeling van de werkelijkheid is.

3.1 Parameteronzekerheden

Er zijn zeer veel parameters in het grondwaterstromingsmodel die in meer of mindere mate onzeker zijn. Om de complexiteit van het stochastisch grondwaterstromingsmodel en de rekentijd te beperken, zijn niet alle onzekere parameters als stochastische variabelen gemodelleerd. Er is onderscheid gemaakt tussen parameters die een relatief groot effect op de stijghoogteonzekerheid hebben, en parameters die een klein effect hebben. Dit is gedaan door een gevoeligheidsanalyse in het geohydrologisch model uit te voeren (Deelrapport 5 - Geohydrologie).

Er zijn 7 parameters geselecteerd die een relatief grote invloed hebben op de stijghoogte tijdens een hoogwater. Deze parameters zijn als stochastische variabelen behandeld. Als er onvoldoende lokale (statistische) informatie beschikbaar was, zijn de kansverdelingen van deze variabelen kansverdelingen gebaseerd op de default-kansverdelingen uit het BOI. Hier is voor gekozen, omdat er verder weinig informatie bekend is over de kansverdelingen van deze parameters. In tabel 3.1 zijn alle stochastische parameters met hun variatiecoëfficiënten weergegeven. Daarnaast is aangegeven of de werkelijke waarde van de parameter onzeker is en vooral lokaal varieert, of dat de parameterwaarde onzeker is en ruimtelijk weinig varieert.

De ruimtelijke variabiliteit van stochastische variabelen kan worden beschreven met autocorrelatiefuncties waarmee random fields gegenereerd kunnen worden. In het BOI wordt standaard gewerkt met een autocorrelatiefunctie met twee invoerparameters¹:

- 1 de fluctuatieschaal: deze parameter geeft aan hoe snel de onzekerheid toeneemt als functie van de afstand van een meting;
- 2 de restcorrelatie (=ondergrens van de autocorrelatiefunctie): deze parameter geeft aan welk gedeelte van de onzekerheid ruimtelijk volledig gecorreleerd is.

Omdat het genereren van random fields op basis van autocorrelatiefuncties relatief bewerkelijk en rekenintensief is, is een vereenvoudigde werkwijze gehanteerd die praktisch en veilig is. Er is uitgegaan van volledige ruimtelijke correlatie (ofwel: restcorrelatie gelijk aan 1,0) bij een grote fluctuatieschaal (bijv. >500m) en/of grote restcorrelatie. Dit is het geval bij vrijwel alle stochastische variabelen in het geohydrologische model. De deklaagdikte vormt hierop de uitzondering. De onzekerheid over de deklaagdikte is als ruimtelijk variabel gemodelleerd, waarbij een benaderingswijze is gehanteerd om random fields te genereren (zie paragraaf 3.3).

¹ Zie ook: Deltares (2016). WBI – Onzekerheden. Overzicht van belasting- en sterkteonzekerheden in het wettelijk beoordelingsinstrumentarium. 1220080-001-ZWS-0004, Versie 1, 5 augustus 2016, definitief.

In werkelijkheid zijn alle stochastische variabelen ruimtelijke variabelen. Voor watervoerende pakketten levert volledige ruimtelijke correlatie een overschatting van de stijghoogteonzekerheid op, deze aanname is dus conservatief. Dit komt omdat deze lagen zich als weerstanden in serie gedragen. Ruimtelijke variatie dempt dan de stijghoogteonzekerheid. Deklagen gedragen zich echter als parallelle weerstanden, waardoor het effect van ruimtelijke variatie niet per sé dempend is. De deklaag varieert dusdanig veel dat ervoor gekozen om de ruimtelijke variabiliteit ten aanzien van deze variabele wel expliciet te modelleren.

Tabel 3.1 Onzekere parameters die kwantitatief in de onzekerhedenaanpak worden meegenomen

	Parameter	Type verdeling	Variatiecoëfficiënt	Ruimtelijk variabel
weerstand deklaag	dikte deklaag	lognormaal	0,5 ¹	ja
	doorlatendheid deklaag per meter	lognormaal	0,4	nee
doorlatendheid eerste watervoerende pakket	dikte eerste watervoerende pakket	lognormaal	0,1	nee
	doorlatendheid eerste watervoerende pakket per meter	lognormaal	0,5	nee
conductance zomer- en winterbed Maas	dikte zomer- en winterbed	lognormaal	0,1	nee
	doorlatendheid zomer- en winterbed per meter	lognormaal	0,4	nee
conductance waterlopen	dikte waterlopenbedding	lognormaal	0,1	nee
	doorlatendheid waterlopenbedding per meter	lognormaal	0,4	nee
weerstand scheidende laag	dikte eerste scheidende laag	lognormaal	0,1	nee
	doorlatendheid eerste scheidende laag per meter	lognormaal	0,4	nee
doorlatendheid tweede watervoerende pakket	dikte tweede watervoerende pakket	lognormaal	0,1	nee
	doorlatendheid tweede watervoerende pakket per meter	lognormaal	0,5	nee
bergingscoëfficiënt	dikte eerste watervoerende pakket	lognormaal	0,1	nee
	bergingscoëfficiënt per meter	lognormaal	0,5	nee

De variatiecoëfficiënten voor de dikte van de deklaag, de dikte van het eerste watervoerende pakket en de doorlatendheid van het eerste watervoerende pakket komen direct uit Bijlage III Sterkte en veiligheid van de Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017 (Ministerie van Infrastructuur en Milieu). Voor de dikte van het watervoerend pakket zijn twee mogelijke variatiecoëfficiënten gegeven en is de laagste waarde gebruikt, omdat deze parameter vlakdekkend gevarieerd wordt. Een variatiecoëfficiënt van 0,1 is dan groot genoeg (lokale variaties zijn mogelijk groter, maar onbelangrijk voor de stijghoogte).

¹ Verwijzing naar BOI, of vergelijkbare parameter in BOI.

Voor de dikte van de deklaag is een hogere coëfficiënt dan in het WBI gekozen – 0,5 in plaats van 0,3 – omdat deze volgens het beschikbare grondonderzoek lokaal sterk kan variëren. De variatiecoëfficiënt van de doorlatendheid van de deklaag is op 0,4 geschat (veilige waarde). Op basis van voorgaande variatiecoëfficiënten zijn door geohydrologen de andere variatiecoëfficiënten ingeschat op basis van vergelijkbare eigenschappen.

In het geohydrologisch model is een stationaire kalibratie uitgevoerd en een verificatie gedaan aan een laag hoogwater (zie Deelrapport 5 – Geohydrologisch model). Bij deze verificatie was het hoogwater niet hoog en langdurig genoeg om de deklaag goed te kalibreren, maar de watervoerende pakketten zijn wel goed gekalibreerd. Door ook voor deze lagen een onzekerheidsmarge zoals hierboven beschreven aan te nemen overschatten we de onzekerheid van de parameters in deze lagen en dus ook de stijghoogteonzekerheid. De onzekerheid van de deklaagparameters door de onzekerheid in het effect van een langdurig hoogwater is afgedekt door deze parameters in het stochastisch model te variëren met eerder genoemde variatiecoëfficiënten.

In Deelrapport 3 – Onzekerheden is een response surface model opgesteld. Per onzekere parameter is hiermee in kaart gebracht hoeveel effect een variabele op de stijghoogteonzekerheid heeft, uitgedrukt in de variantie (eerste-orde benadering). De wortel van de variantie is de standaarddeviatie. Per locatie (gridcel) verschillen deze waarden. Voor elke onzekere parameter is uit de standaarddeviaties die per gridcel zijn berekend binnen het interessegebied de 95 %-waarde geselecteerd. Deze standaardafwijkingen zijn weergegeven in Tabel 3.2. In 95 % van de gridcellen is de standaardafwijking kleiner.

Tabel 3.2 Individuele bijdrage van onzekere parameters en aanname van normaalverdeling aan de stijghoogteonzekerheid, uitgedrukt in de waarde van de standaarddeviatie die in 95 % van de gridcellen wordt onderschreden. De waarden zijn berekend met het response surface model en een eerste-orde benadering.

Parameter/Aanname	Eenheid	Standaarddeviatie die in 95 % van de gridcellen wordt onderschreden [cm]
doorlatendheid eerste watervoerende pakket	cm	38,5
weerstand deklaag	cm	35,1
- doorlatendheid	cm	23,8
- dikte	cm	25,8
conductance Maasbedding	cm	11,9
conductance waterlopen	cm	10,7
doorlatendheid WVP2	cm	4,7
weerstand eerste scheidende laag	cm	2,1
bergingscoëfficiënt WVP1	cm	1,3

Parameters die betrekking hebben op de diepe ondergrond zijn niet als stochastische variabelen behandeld. Voor deze parameters is met verwachtingswaarden gerekend. Hieronder vallen onder andere de weerstand van diepere scheidende lagen en doorlatendheid van diepere watervoerende pakketten. Daarnaast zijn de volgende veilige instellingen gebruikt voor topsysteempparameters die veel invloed kunnen hebben op de stijghoogte rond de dijk: waterlopen snijden nauwelijks in, waardoor de waterdruk nauwelijks verlicht wordt;

- de dikte van de deklaag in het achterland is conservatief gekozen, waardoor de waterdruk relatief hoog oploopt. Dat wil zeggen dat een methode is gehanteerd waarbij het afleiden van de deklaagdikte uit boringen tot een dikke deklaag leidt;
- de dikte van de deklaag in het voorland is conservatief gekozen, dat wil zeggen dat methode is gehanteerd waarbij een dunne deklaag is afgeleid uit te beschikbare boringen;
- de gemiddelde waarde van de bergingscoëfficiënt is conservatief gekozen ($10^{-6}/m$);

- de intredeweerstand van de rivier is op slechts 1/10 dag gezet, omdat bij een hoogwater deze weerstand daalt;
- het waterpeil van de waterlopen is tot 2 kilometer achter de dijk conservatief.

3.2 Schematiseringonzekerheid

Er zijn verschillende schematiseringen (scenario's) denkbaar. Er zijn verschillende scenario's onderzocht. Uiteindelijk is een conservatief scenario gekozen, zodat de scenario's die niet in het stochastisch model zitten een verlagend effect op de stijghoogte hebben. Er is besloten om in het project Meanderende Maas uit te gaan van de enkele, conservatieve basisschematisatie uit het referentiemodel. Dit is gedaan op basis van de volgende overwegingen:

- 1 het opzetten van een stochastisch grondwaterstromingsmodel met daarin (random gepositioneerde) lokale fenomenen is relatief bewerkelijk;
- 2 voor een goede koppeling tussen de sterktemodellen en een vlakdekkend stochastisch geohydrologisch model met kansen op lokale ondergrondfenomenen zou een geïntegreerd model gemaakt moeten worden (belasting en sterkte niet langer gescheiden). Dit zou echter een grote inspanning vergen en een relatief complex model opleveren dat minder transparant en minder gebruiksvriendelijk is;
- 3 de schematiseringonzekerheid is bij dit dijktraject relatief beperkt door het relatief uitgebreide geotechnisch onderzoek dat is uitgevoerd. In een dijkversterkingsproject is het ook raadzaam om onzekerheid over de ondergrondopbouw weg te nemen door nader onderzoek als deze onzekerheid van groot belang is voor het type en de omvang van de lokale versterkingsmaatregelen.

Om de conservatieve basisschematisatie te bepalen zijn de volgende aspecten beschouwd:

- geologische scenario's in het achterland;
- geologische scenario's in het voorland;
- gat in de deklaag;
- vorm en piek van hoogwatergolf.

In het achterland kunnen gaten ontstaan als gevolg van (grootschalig) opbarsten. Dit zorgt voor een verminderende druk op het grondwater en dus een verlaging van de stijghoogte. In het gekozen scenario worden geen gaten in het achterland door opbarsten meegenomen, dit is het meest conservatieve scenario wat betreft gaten in het achterland. Verder is aangenomen is dat de waterlopen nauwelijks insnijden, waardoor de waterdruk nauwelijks verlicht wordt.

De geologische scenario's in het voorland zijn uitgewerkt in bijlage **Error! Bookmark not defined.**. Er zijn twee extreme scenario's doorgerekend, die bijna overal voor een daling in de stijghoogte blijken te zorgen. Het huidige referentiemodel is dus conservatief.

Het effect van een gat in deklaag is in bijlage II onderzocht. Lokale intredepunten als gevolg van deklaagverstoring door fauna hebben slechts een klein effect op de stijghoogte voor dit studiegebied. Het effect tijdens een hoogwater zal liggen in orde grootte van een centimeter op een afstand groter dan 2 meter. Het is zodoende niet nodig om de kans op een gat in de deklaag mee te nemen bij de kwantificering van de onzekerheden ten aanzien van de stijghoogtes in het studiegebied.

In de memo 'Hoogwatergolf geohydrologisch model' is een gevoeligheidsanalyse op de piek en vorm van de hoogwatergolf gedaan. Hieruit bleek dat de piekwaterstand belangrijker is dan de vorm voor de afvoergolf voor de stijghoogte. De combinatie van piekwaterstand met standaard-afvoergolf levert de grootste stijghoogtes op. In het basis geohydrologisch model is daarom gerekend met de Waterstand bij Norm en een standaard-afvoergolf.

Gebruik bij ontwerp: Je ontwerpt grondoplossingen voor 50 jaar vooruit en constructies voor 100 jaar vooruit. Gedurende die levensduur kunnen ingrepen worden gedaan (bijvoorbeeld verdere uiterwaard vergravingen) die effect hebben op bijvoorbeeld de intredeweerstand en daarmee de stijghoogte. Het voordeel aan de methode ontwikkeld in innovatietraject Meanderende Maas is dat het effect van potentiële

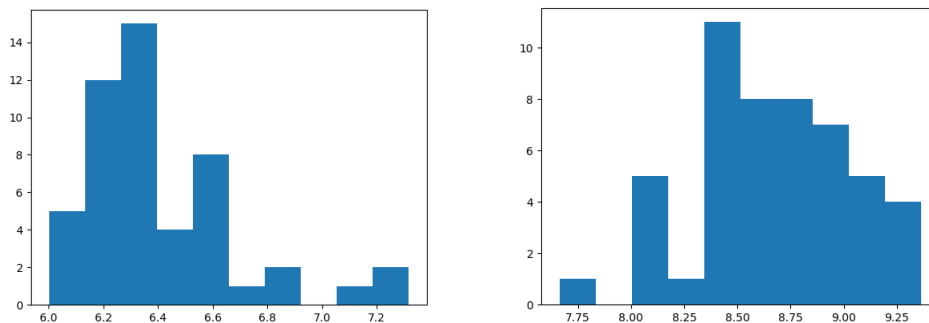
ingrepen onder hoogwateromstandigheden kan worden berekend én dat je ook de mitigerende maatregelen kunt berekenen.

3.3 Opzet stochastisch model

Achtergrond: In dit innovatieproject is aanvankelijk een stochastisch model opgesteld waarin de meest onzekere parameters uniform gevarieerd werden. Er bleken in dit model omslagpunten op de dijk te liggen, waardoor de onzekerheid rondom de dijk soms erg klein was. Dit was op voorhand niet voorzien; het op deze manier ontwikkelen van een stochastisch regionaal grondwaterstromingsmodel was nieuw binnen de geohydrologie. Aangezien bekend is dat vooral de deklaag erg heterogeen is, is onderzocht of in een model waarin alle variabelen ruimtelijk gevarieerd worden deze omslagpunten zouden verdwijnen. Dat was het geval, maar de benaderingswijze voor het ruimtelijk variëren zorgde voor gemiddeld genomen kleinere onzekerheden. Daarom is besloten om een zo realistisch mogelijk model op te stellen, waarin de dikte van de deklaag ruimtelijk gevarieerd wordt en de rest van de parameters uniform. Dit is het stochastisch model dat hieronder wordt beschreven. Om als geohydrologen meer gevoel bij de bijbehorende onzekerheden te krijgen is vervolgens ook een voorzichtig model gemaakt op basis van engineering judgement. Dit wordt beschreven in bijlage III.

In het stochastische model zijn alle parameters uit tabel 3.1 als stochastische variabelen behandeld. Met het model zijn 50 Monte-Carlosimulaties uitgevoerd, waarbij in iedere run de onzekere parameters zijn gevarieerd. Uit iedere run volgen stijghoogtes, zie voor twee voorbeelden in het interessegebied Afbeelding 3.1. Met de resultaten uit deze 50 runs kunnen de gemiddelde stijghoogte, de skew, de variatiecoëfficiënt en de standaarddeviatie bepaald worden. Om ook een 95 %-waarde te kunnen bepalen is aangenomen dat de stijghoogteverdeling normaal verdeeld is. Bij deze benadering is de 95 %-waarde het gemiddelde plus 1,64 maal de standaarddeviatie. De veronderstelling dat de onzekerheid ten aanzien van de stijghoogte grofweg normaal verdeeld is, past bij de constatering dat de skew van de onzekerheid ten aanzien van de stijghoogte in de zone nabij de dijk varieert tussen -0,5 en 0,5 (zie ook hoofdstuk 4).

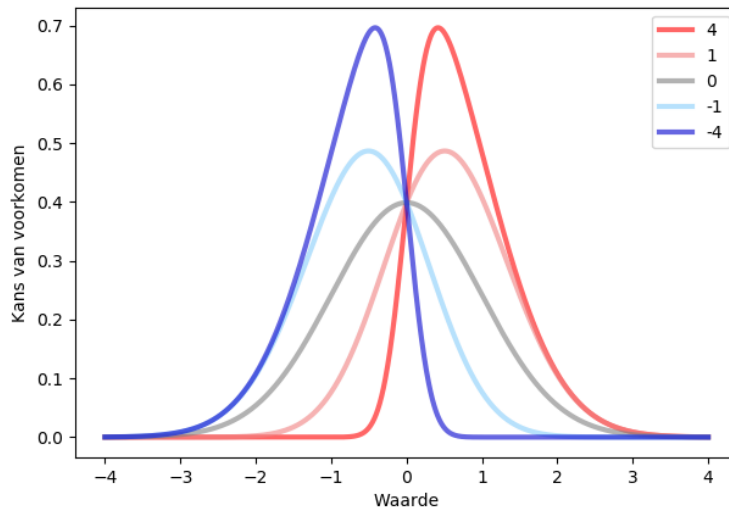
Afbeelding 3.1 Twee locaties met 50 stijghoogtes berekend met het stochastisch model



De skew geeft aan hoe symmetrisch een verdeling is. Bij waarde 0 is de verdeling perfect symmetrisch. Voor een negatieve waarde verschuift de piek naar rechts, voor positieve waarden naar links. In afbeelding 3.2

worden verdelingen met verschillende skewwaarden weergegeven, ter illustratie. Hoe kleiner de skew, hoe meer een verdeling symmetrisch is. De normale verdeling is een symmetrische verdeling.

Afbeelding 3.2 Voorbeeld van verschillende skewwaarden voor een verdeling



Voor de parameters die uniform gevarieerd zijn, is in iedere run een waarde getrokken uit hun (lognormale) kansverdeling.

De dikte van de deklaag is iedere run ruimtelijk variabel gevarieerd in een schaakbordpatroon. De deklaag is hiertoe opgedeeld in vlakken van 200 bij 200 m. Per run verschuift de ligging van deze vlakken. Voor ieder vlak is willekeurig een deklaagdikte getrokken uit de lognormale kansverdeling van de dikte van de deklaag. Vlakdekkend gezien is de verschilfactor met de deklaagdikte uit het basismodel gemiddeld steeds gelijk aan één, maar lokaal treden grote verschillen in dikte op. Zie onderstaand figuur voor een voorbeeld van een schaakbord met willekeurig getrokken factoren waarmee de basis deklaagdikte uit het basismodel in één run vermenigvuldigd kan worden.

Afbeelding 3.3 Voorbeeld schaakbordpatroon van de factoren die de onzekerheid van de dikte van de deklaag beschrijven in één Monte-Carlurun

1.0	0.6	0.7	1.5
0.8	1.3	1.1	0.1
0.3	1.7	1.0	1.3

3.4 Modelonzekerheid

Naast parameteronzekerheid en schematiseringonzekerheid is er modelonzekerheid. Deze komt voort uit het feit dat het model op benaderingen berust. De voornaamste zijn:

- er zijn onzekere parameters die in het model worden behandeld als deterministische variabelen;
- de variatie in de deklaagdikte is versimpeld gemodelleerd, door onafhankelijke random trekkingen voor de dikte toe te kennen aan vlakken (gridcellen) van 200 * 200 m (geen random field op basis van 2D-autocorrelatiefunctie); overige parameters zijn vlakdekkend gevarieerd;

- er is aangenomen dat de onzekerheid ten aanzien van de stijghoogte door parameteronzekerheid normaal verdeeld is; het opstellen van empirische verdelingen vereist te veel model runs (10.000 runs * 6 uur rekentijd). Daarom is op het resultaat van 50 modelruns een normale verdeling gefit.
- er zijn onzekerheden ten aanzien de Darcy-stromingsvergelijkingen en er ontstaat onzekerheid door (de kans op) numerieke fouten en de ruimtelijke resolutie. De ervaring leert dat deze onzekerheden echter zeer gering zijn (ordegrootte millimeters).

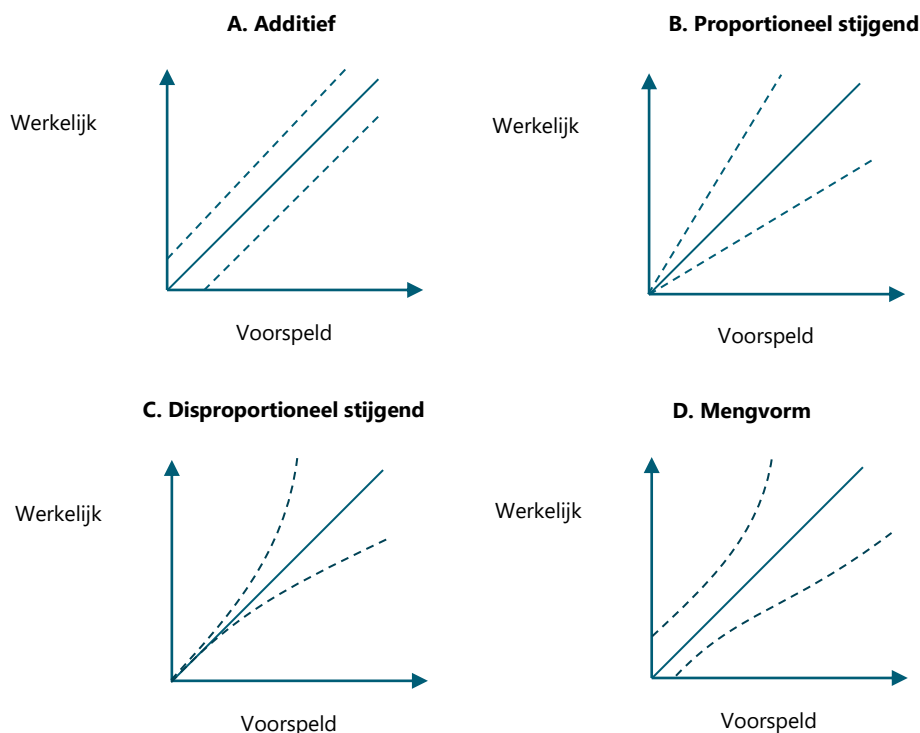
De modelonzekerheid die uit bovenstaande aspecten voorkomt, is gemodelleerd als een onzekere grootheid die (1) onafhankelijk, (2) normaal verdeeld en (3) additief is. Dit betekent:

- 1 dat de modelonzekerheid onafhankelijk is van de onzekerheid ten aanzien van de stijghoogte door parameteronzekerheden (zie par. 3.1);
- 2 dat de modelonzekerheid symmetrisch verdeeld is, waarbij grotere afwijkingen steeds minder waarschijnlijk zijn;
- 3 dat de kansverdeling van de modelonzekerheid bij elke stijghoogte hetzelfde is.

De eerste aanname ligt in de rede gelet op de verschillende achtergronden van de model- en parameteronzekerheden. De tweede aanname berust deels op expert judgement en deels op de opgedane inzichten uit de uitgevoerde stochastische berekeningen. De derde aanname berust volledig op engineering judgement en is deels ingegeven doordat een eventuele fout eerder aan de veilige dan de onveilige kant zal zitten.

In Afbeelding 3.4 is schematisch weergegeven wat hierboven wordt bedoeld met een 'additieve onzekerheid'. Ten aanzien van de modelonzekerheid is uitgegaan van optie A. Het effect van de parameteronzekerheden neemt toe met de forcering en is dus wel afhankelijk van de stijghoogte, zoals bijv. bij gevallen B en C. Het eindresultaat is dus een mengvorm, zoals bijvoorbeeld bij geval D. Anders gezegd: de onzekerheid ten aanzien van de stijghoogte bezit volgens het stochastisch model inclusief modelonzekerheid zowel een constante component (minimum) als een component die toeneemt met de stijghoogte.

Afbeelding 3.4. Voorbeelden van verschillende soorten onzekerheden rond voorspellingen



Het gemiddelde en de standaardafwijking van de modelonzekerheid zijn als volgt bepaald.

Gemiddelde: verwacht wordt dat het model geen systematische fout bezit. Daarom is uitgegaan van een gemiddelde modelonzekerheid van nul.

Standaardafwijking: de standaardafwijking van de modelonzekerheid is gekwantificeerd op basis van de verwachting dat de modelonzekerheid hoofdzakelijk wordt veroorzaakt door:

- 1 de onzekere parameters die als deterministische parameters zijn behandeld;
- 2 de aanname dat de onzekerheid ten aanzien van de stijghoogte die het resultaat is van parameteronzekerheid normaal verdeeld is.

Ad 1: Effect deterministische parameters

Het is aannemelijk dat deze bron van modelonzekerheid kleiner is dan de (berekende) onzekerheid die veroorzaakt wordt door de volgende vijf stochastische variabelen: conductance Maasbedding en waterlopen, doorlatendheid WVP2, weerstand eerste scheidende laag en bergingscoëfficiënt WVP1. Gezamenlijk zorgen deze variabelen in *minstens*¹ 95 % van de gridcellen voor een standaardafwijking van de stijghoogte van:

$$\sqrt{11,9^2 + 10,7^2 + 4,7^2 + 2,1^2 + 1,3^2} = 16,9 \text{ cm, zie Tabel 3.2.}$$

Ad 2: Effect aanname normale verdeling

Parameteronzekerheid leidt tot onzekerheid over de stijghoogte. Deze (berekende) onzekerheid over de stijghoogte is in realiteit niet normaal verdeeld. De praktische betekenis hiervan is geanalyseerd door de karakteristieke waarden van de stijghoogte uit empirische verdelingen op basis van zeer veel modelruns te vergelijken met de karakteristieke waarden uit normale verdelingen op basis van 50 modelruns.² De verschillen tussen de karakteristieke waarden bleken een standaardafwijking van ca. 13 cm te bezitten. Omdat de keuze voor een ander verdelingstype geen eenvoudige oplossing biedt voor de mismatch tussen de normale en de empirische verdelingen (de empirische verdelingen lijken namelijk niet consequent op één verdelingstype) is er pragmatisch voor gekozen om de modelonzekerheid ruimer/groter te definiëren.

De bovenstaande twee aspecten hebben geleid tot een standaardafwijking van de modelonzekerheid van $\sqrt{16,9^2 + 13,0^2} \approx 22 \text{ cm}$. Benadrukt wordt dat de bovenstaande beschouwing niet als een 'harde afleiding' moet worden beschouwd, maar als analyse die enig gevoel geeft bij de mogelijke grootte van de modelonzekerheid. Een modelonzekerheid met een standaardafwijking van 22 cm correspondeert met een symmetrische 95 %-onzekerheidsbandbreedte van 88 cm en een 5 %-bovengrens die 36 cm boven de gemiddelde voorspelling ligt. Dat lijkt ruim maar niet buitensporig/onredelijk. Daarom is hier verder van uitgegaan.

¹ De 95 %-waarden voor de verschillende parameters hoeven niet op de dezelfde locatie voor te komen. Het combineren van een reeks 95 %-waarden levert dus niet noodzakelijkerwijs een 95%-waarde op.

² Er is hierbij gebruik gemaakt van berekeningsresultaten uit een eerdere fase van het Innovatieproject.

4

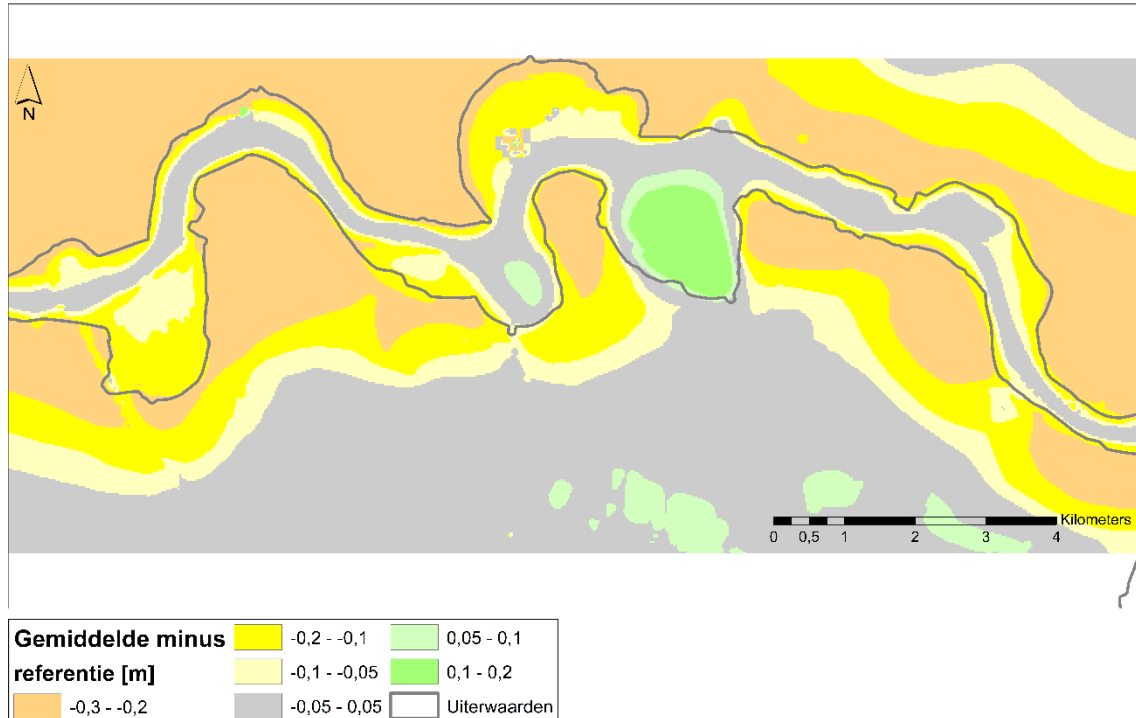
RESULTATEN

In dit hoofdstuk worden de resultaten behandeld van de uitgevoerde berekeningen met het stochastisch grondwaterstromingsmodel.

4.1 Stochastisch model zonder restonzekerheid

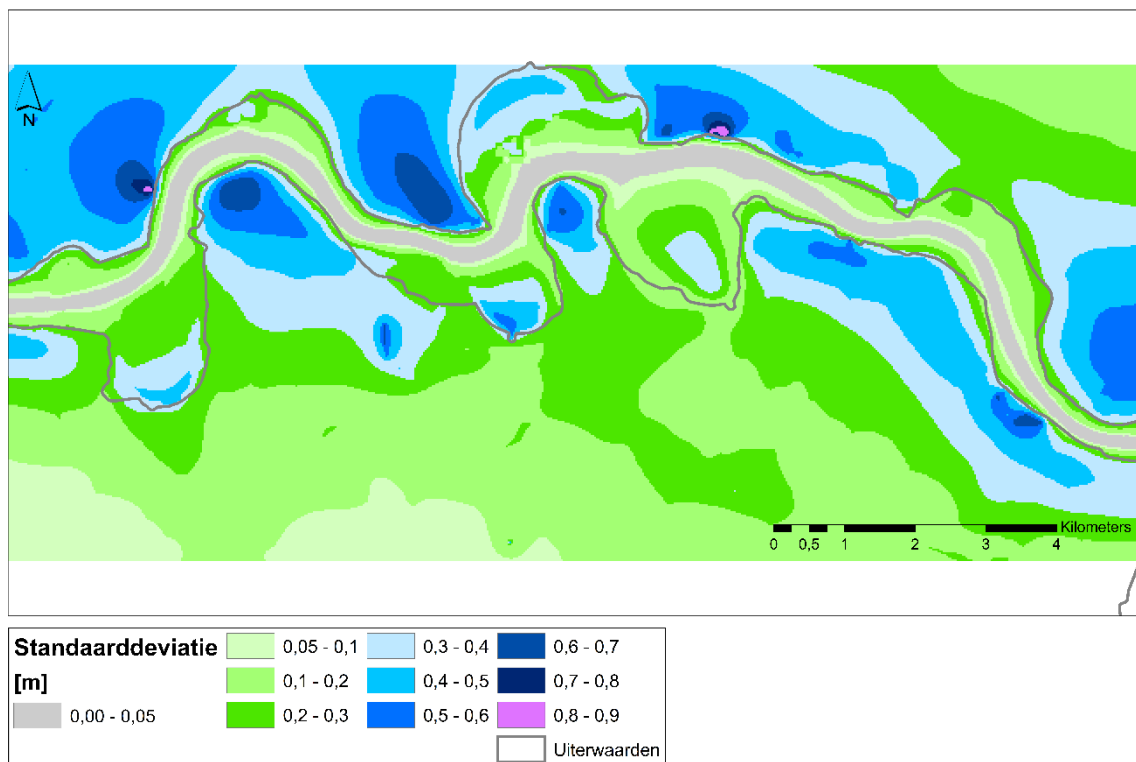
In afbeelding 4.1 is voor het stochastische model het verschil tussen de gemiddelde stijghoogte en de stijghoogte in het referentiemodel weergegeven. Het referentiemodel is het model met de gemiddelde parameterwaarden. De gemiddelde stijghoogte ligt bijna overal binnendijks lager dan de stijghoogte in het referentiemodel. Dit komt omdat de doorwerking van parameteronzekerheden deels niet-lineair is. Voor het berekenen van de overige statistieken wordt daarom de berekende gemiddelde stijghoogte als uitgangspunt genomen.

Afbeelding 4.1 Gemiddelde stijghoogte volgens het stochastisch model zonder modelonzekerheid minus de stijghoogte in het referentiemodel



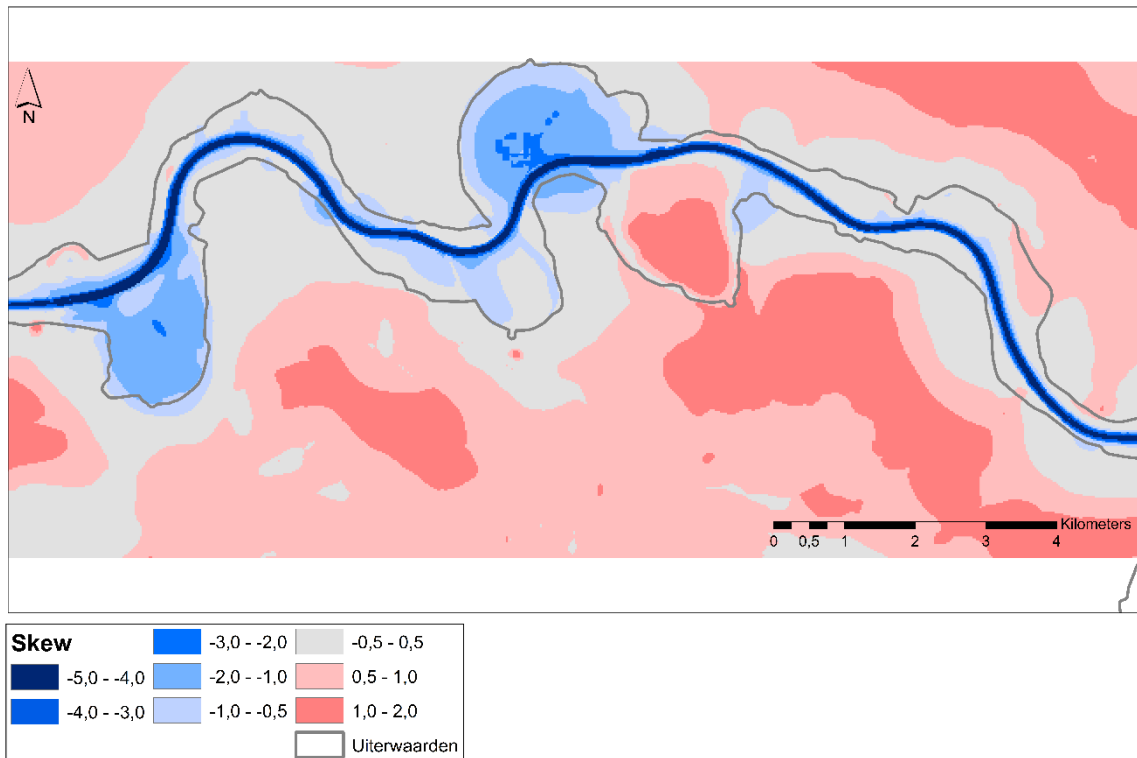
In afbeelding 4.2 is de standaarddeviatie van de stijghoogte in het stochastische model zonder modelonzekerheid weergegeven. Het is duidelijk dat de onzekerheid ruimtelijk variabel is. In de binnenbochten van de dijk-‘meanders’ is de onzekerheid in de berekende stijghoogten aanzienlijk groter dan in de buitenbochten. In de binnenbocht is er toestroming van meerder kanten. Dit betekent dat een verandering in parameterwaarden extra doorwerkt in het effect op de stijghoogte. Bij buitenbochten geldt het omgekeerde. Verder zit bij grote uiterwaarden de meeste onzekerheid vaak buitendijks, maar meestal ligt de grootste onzekerheid een paar honderd meter binnendijks. Onder de dijk is de onzekerheid vaak ‘gemiddeld’ en bij sommige trajecten zelfs expliciet kleiner dan in de omgeving. Dit komt onder andere doordat dijken zich (relatief ten opzichte van de spreidingslengte) vaak dicht bij het zomerbed van de rivier bevinden. Op grote afstand van de rivier (enkele kilometers) neemt de onzekerheid duidelijk weer af tot een waarde kleiner dan 10-20 cm.

Afbeelding 4.2 Standaarddeviatie van de stijghoogte in het stochastisch model zonder modelonzekerheid



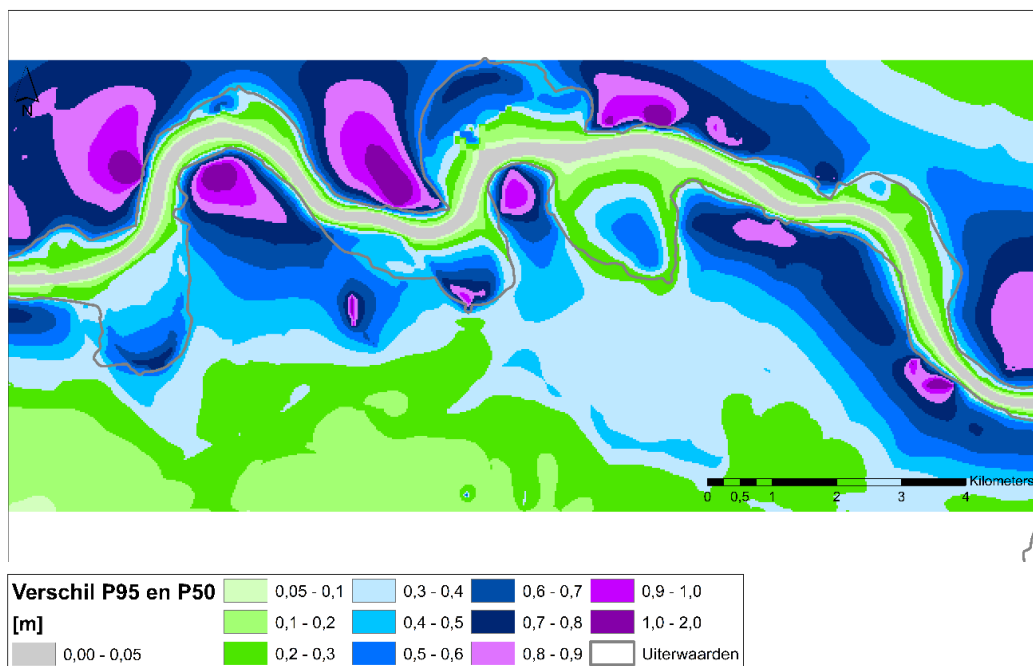
De skew van het stochastisch model zonder modelonzekerheid staat in afbeelding 4.3. Op de rivier is deze duidelijk negatief. Dit komt omdat de waterstand bij norm een duidelijke bovengrens voor de stijghoogte is. Ver binnendijks is de skew juist positief, omdat daar de laagste stijghoogte juist ‘vast’ ligt. Daartussen is de scheefheid van de stijghoogte verdeling vaak beperkt, afhankelijk van de lokale omstandigheden. Vooral grote uiterwaarden kunnen nog een effect hebben. In het response-surface-model (Deelrapport 3 – Onzekerheden) waren de stijghoogteverdelingen ook redelijk normaal verdeeld.

Afbeelding 4.1 Skew van de stijghoogteverdeling in het stochastische model zonder modelonzekerheid



In afbeelding 4.4 staat het verschil tussen het 95- en 50-percentiel van de stijghoogte bij de WBN in het stochastische model zonder modelonzekerheid. Vanwege de aanname dat de stijghoogteonzekerheid normaal verdeeld is, is het verschil tussen deze percentielen gelijk aan 1,645 maal de standaarddeviatie. Deze figuur toont dus dezelfde patronen als afbeelding 4.2.

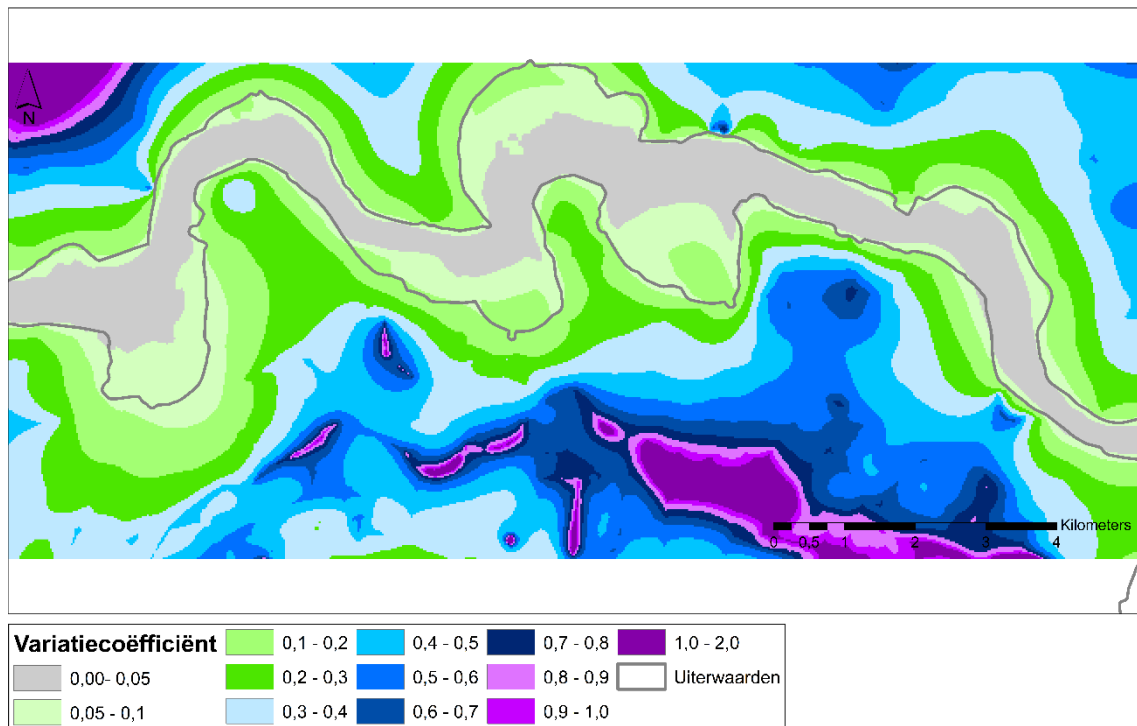
Afbeelding 4.2 Verschil tussen het 95- en 50-percentiel van de stijghoogte in het stochastische model zonder modelonzekerheid



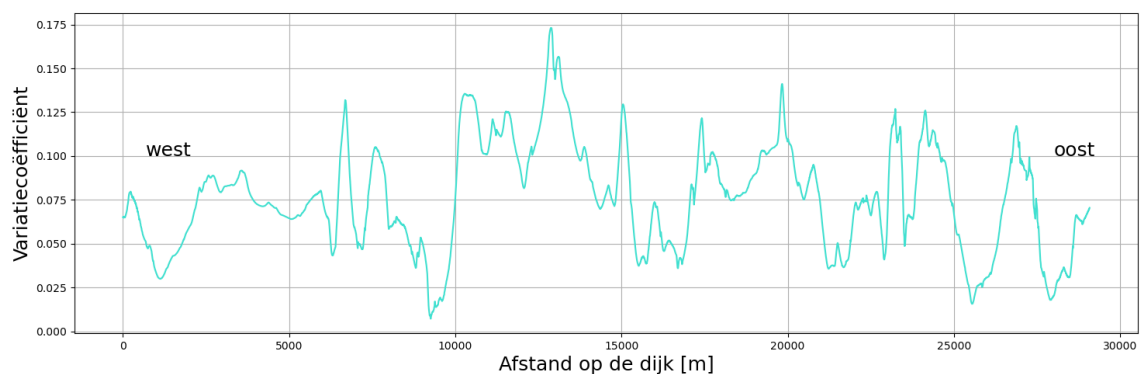
In Afbeelding 4.3 staat de variatiecoëfficiënt van de stijghoogte volgens het stochastische model zonder modelonzekerheid. Dit is de standaarddeviatie gedeeld door de gemiddelde toename ten opzichte van de referentiesituatie. Deze kan tot ruim 1 oplopen aan de randen van het gebied. We zijn echter geïnteresseerd in de variatiecoëfficiënt langs de dijk en daar is de onzekerheid veel kleiner. Deze is ook geplott in Afbeelding 4.4. Hieruit kan worden afgelezen dat deze maximaal circa 0,17 is. Wat daarnaast ook duidelijk te zien is, is dat de variatiecoëfficiënt niet constant is, ook niet in het gebied langs de dijk.

Terwijl de standaarddeviatie hoog is rondom de dijk, is de variatiecoëfficiënt vooral ver van de dijk erg hoog. Dit komt omdat de standaarddeviatie gedeeld wordt door het verschil in stijghoogte voor en na de golf. Ver van de dijk is dit verschil heel klein, maar wel altijd aanwezig. Daarom is standaarddeviatie naar verhouding groot en wordt de variatiecoëfficiënt ook groot.

Afbeelding 4.3 Variatiecoëfficiënt in het stochastisch model zonder modelonzekerheid



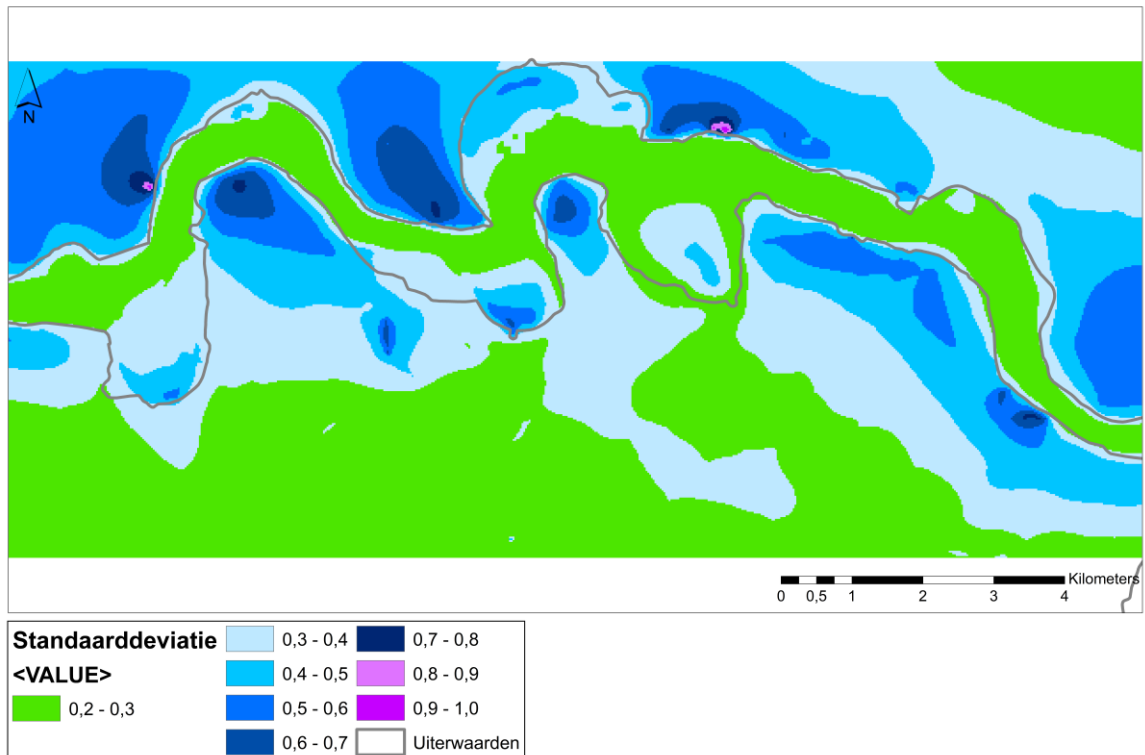
Afbeelding 4.4 Variatiecoëfficiënt in het stochastisch model zonder modelonzekerheid langs de dijk



4.2 Stochastisch model met modelonzekerheid

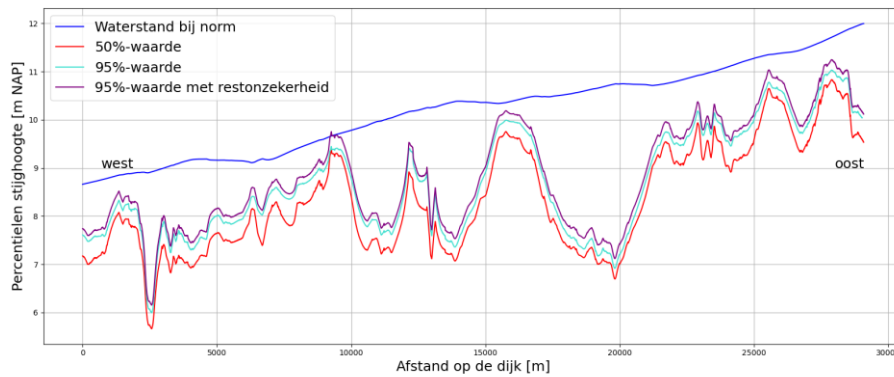
In Afbeelding 4.5 is de standaarddeviatie inclusief modelonzekerheid met standaarddeviatie 22 cm weergegeven. Deze is vlakdekkend opgeteld bij de standaarddeviatie zonder modelonzekerheid, daardoor is het totaal nergens lager dan 22 cm. Vooral in de gebieden met initieel weinig onzekerheid heeft de modelonzekerheid een groot effect.

Afbeelding 4.5 Standaarddeviatie van de stijghoogte in het stochastisch model met modelonzekerheid



In Afbeelding 4.6 zijn de 50 %-waarde en 95 %-waarde volgens het stochastisch model zonder modelonzekerheid gegeven, evenals de 95 %-waarde volgens het stochastisch model met modelonzekerheid. De getoonde stijghoogtes zijn berekend langs de dijk. Ter referentie is ook de Waterstand Bij Norm in de figuur weergegeven. Aan de afstand tussen de verschillende percentielen is te zien hoe groot de onzekerheid is. Op de plekken waar de 95 %-waarde weinig afwijkt van de 50 %-waarde volgens het stochastisch model zonder modelonzekerheid, is het effect van parameteronzekerheid klein, en vice versa. Op de plekken waar de 95 %-waarde zonder modelonzekerheid weinig afwijkt van de 95 %-waarde met modelonzekerheid is het effect van de modelonzekerheid klein, en vice versa. Het effect van de modelonzekerheid moet volgens de theorie groter zijn waar het effect van parameteronzekerheid het kleinst is. Dat is ook in de figuur te zien.

Afbeelding 4.6 Percentielen van de stijghoogte langs de dijk: 50 %, 95 % en 95 % met modelonzekerheid. De 95 %-waarde met modelonzekerheid is de karakteristieke waarde van het stochastisch model



4.3 Vergelijking met andere methoden

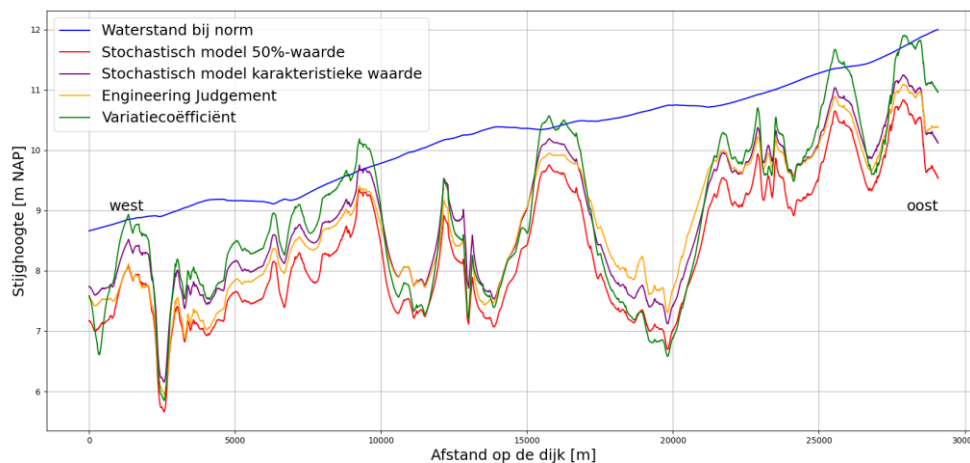
In Afbeelding 4.7 zijn de karakteristieke waarden van de stijghoogte langs de dijk geplot, uitgaande van:

- 1 het model dat geheel berust op engineering judgement (zie bijlage III);
- 2 het gebruik van het referentiemodel met een vaste variatiecoëfficiënt van 0,17 (zelfde methode als in het BOI maar dan 0,17 in plaats van 0,10);
- 3 het gebruik van het ontwikkelde stochastisch model inclusief modelonzekerheid (zie paragraaf 4.2).

Ook de Waterstand Bij Norm is ingetekend. De karakteristieke waarden uit het stochastisch model komen redelijk goed overeen met de berekende stijghoogtes in het engineering-judgement model (dat voor duiding en controle dient). Dit geeft vertrouwen in het stochastisch model.

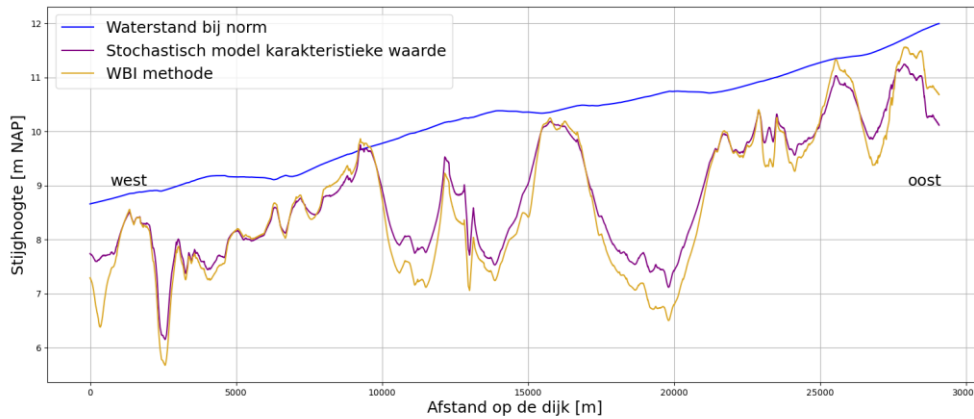
Uit het stochastisch model is gebleken dat de variatiecoëfficiënt die het BOI hanteert – 0,10 – op veel plekken te hoog is en op sommige plekken te laag. Om geen onderschatting te doen is in onderstaande grafiek 0,17 gehanteerd. Hierdoor is de berekende karakteristieke waarde van de stijghoogte soms zelfs hoger is dan de Waterstand Bij Norm. Dit is fysisch niet mogelijk.

Afbeelding 4.7 Vergelijking karakteristieke waarden langs de dijk van het engineering-judgement model, model met variatiecoëfficiënt en stochastisch model met de waterstand bij norm



In Afbeelding 4.8 wordt de stijghoogte berekend met de methode van het BOI - een algehele variatiecoëfficiënt van 0,1 - vergeleken met de karakteristieke waarde uit het stochastische en conservatieve model. Juist als er een grote respons is, voegt de aanpak met een vaste variatiecoëfficiënt veel onzekerheid toe, terwijl uit het stochastisch model volgt dat de onzekerheid hier juist klein is omdat een hoge respons samen gaat met weinig onzekerheid. Bij een lage respons, bijvoorbeeld in de meanders van de rivier, voorspelt de methode van het WBI een kleine onzekerheid, terwijl het stochastisch model hier juist een grote onzekerheid en dus hogere stijghoogte voorspelt.

Afbeelding 4.8 Vergelijking methode BOI (variatiecoëfficiënt 0,1) en de karakteristieke waarde uit het stochastisch model



5

CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

5.1 Conclusies

In het voorliggende rapport is een methode gepresenteerd waarmee met een stochastisch model kansverdelingen van stijghoogtes tijdens een hoogwater in beeld kunnen worden gebracht voor het dijktraject Ravenstein-Lith. In het model worden de belangrijkste onzekere parameters als stochastische variabelen meegenomen. De meeste parameters zijn ruimtelijk uniform gevarieerd, de dikte van de deklaag is ruimtelijk gevarieerd in een schaakbordpatroon. Voor de overige minder gevoelige parameters zijn licht veilige waarden gebruikt en voor de ongevoelige parameters zijn gemiddelde waarden gehanteerd. Niet-beschouwde onzekerheden zijn gevangen in een modelonzekerheidsterm. Met het stochastische model is een 95 %-waarde (de karakteristieke waarde) van de stijghoogte bepaald. Op basis van het voorliggende onderzoek zijn de volgende conclusies te trekken:

De gehanteerde methode biedt inzicht in het gedrag van stijghoogteonzekerheid:

- de onzekerheid is ruimtelijk sterk variabel;
- op de locaties met de grootste stijghoogterespons is de onzekerheid vaak het kleinst;
- in de binnenbochten van de dijk-'meanders' is de onzekerheid ten aanzien van de berekende stijghoogten aanzienlijk groter dan in de buitenbochten, door de toestroming van meerder kanten. Dit geldt ook voor locaties die een paar honderd meter binnendijs liggen;
- de bepaalde standaarddeviatie van de berekende stijghoogte bij Waterstand bij Norm rondom de dijk ligt grosso modo tussen de 25 en 75 cm (Afbeelding 4.5).

Ter controle en duiding van het stochastisch model is door geohydrologen een engineering-judgement model opgesteld. De karakteristieke waarden uit het stochastisch model komen redelijk goed overeen met de stijghoogtes uit het engineering-judgement model. Dit geeft extra vertrouwen in de resultaten van het stochastisch model.

In geval een variatiecoëfficiënt wordt gebruikt om onzekerheden in beeld te brengen zoals in het BOI:

- de variatiecoëfficiënt van 10 % uit het BOI is in sommige gevallen te klein en in veel gevallen te groot. De variatiecoëfficiënt varieert lokaal veel, waardoor het aannemen van één waarde op veel plekken geen goede weerspiegeling van de onzekerheid geeft;
- de onzekerheid is niet lineair afhankelijk van de respons. Een grotere respons geeft minder onzekerheid, terwijl een lagere respons juist meer onzekerheid geeft.

Kortom: met de in dit onderzoek ontwikkelde methode kan een betere inschatting worden gegeven van de onzekerheid ten aanzien van stijghoogtevoorspellingen bij extreme buitenwaterstanden.

5.2 Aanbevelingen

In dit rapport is een stochastisch model gepresenteerd waarmee de 95 %-waarde van de stijghoogte bij de waterstand bij norm berekend kan worden. Deze berekende stijghoogtes kunnen worden gebruikt als basis of vertrekpunt voor het formuleren van ontwerpuitgangspunten. Daarbij kunnen ook andere overwegingen een rol spelen, zoals lokale kennis over omstandigheden die veel afwijken van wat in het model gehanteerd is.

Wat betreft de meetstrategie wordt aanbevolen om langs de strekkingen waar sprake is van een veiligheidstekort aanwezig is vooral metingen uit te voeren waar de stijghoogteonzekerheid het grootste is. Zo kan op deze plekken de onzekerheid beter in beeld worden gebracht en een beter ontwerp voor piping oplossingen als een berm, heave-scherm, filterscherm of drainage gemaakt worden. Aanbevolen wordt om de aandacht dan te richten op de parameters die relatief onzeker zijn: de weerstand van de deklaag en de doorlatendheid van het eerste watervoerende pakket. Met deze metingen kunnen lokaal nieuwe, betere variatiecoëfficiënten bepaald worden. Daarnaast kan bij hoogwater direct de stijghoogte gemeten worden, waaruit een respons afgeleid kan worden. Het stochastisch model kan worden gebruikt om locaties te selecteren waar stijghoogtemetingen relatief veel informatie kunnen opleveren.

De onzekerheden in het eerste watervoerende pakket kunnen ook scherper in beeld gebracht worden door gebruik te maken van onzekerheden die in REGIS gerapporteerd staan. Met deze data kan de variatiecoëfficiënt mogelijk verkleind worden. In het huidige onderzoek is alleen een conservatief scenario doorgerekend. Aanscherpingen op dit scenario zijn mogelijk, vooral in combinatie met metingen. Op basis hiervan kunnen ook meerdere scenario's worden opgesteld en doorgerekend.

Aan het BOI wordt geadviseerd om het gebruik van een constante default-variatiecoëfficiënt voor de stijghoogteonzekerheid te heroverwegen. Deze studie laat zien dat de stijghoogteonzekerheid bij grote responsen klein is, terwijl een variatiecoëfficiënt-benadering op deze plekken juist een grote onzekerheid voorspelt.

Bijlage(n)



BIJLAGE: GEOLOGISCHE SCENARIO'S

Inleiding

De geologische scenario's zijn gebaseerd op de SOS-systematiek zoals dat onderdeel is binnen het WBI. De SOS-systematiek heeft als doel om de onzekerheden die ontstaan door de variatie in de geologie te beschrijven middels scenario's met een bepaalde kans van voorkomen. Omdat de beschikbare SOS voor dit dijktraject gebaseerd is op een beperkt aantal boringen, zijn deze aanvullende geologische scenario's opgesteld door Ane Wiersma. Dit is geen volledige SOS omdat alleen is gekeken naar het niveau van de onderzijde van de deklaag. Langs het dijktraject is op basis van deze extra boringen (op de dijk) een analyse uitgevoerd. Dit gaf de volgende resultaten:

- 1 het dijktraject is verdeeld in verschillende tracés met een vergelijkbaar niveau van de onderzijde van de deklaag;
- 2 binnen de tracés zijn een aantal mogelijke scenario's gedefinieerd met ieder een eigen kans van voorkomen;
- 3 het aantal scenario's per tracé verschilt en ligt tussen de 2 en 5.

Kort samengevat betekent dit dat een scenario met een kleine kans van voorkomen ruimtelijk ook het meest sterk begrensd zal zijn en dus niet langs het hele tracé gelijktijdig kan voorkomen. In dat geval zou dit scenario namelijk in veel meer boringen te zien zijn en dus ook een grotere kans van voorkomen hebben.

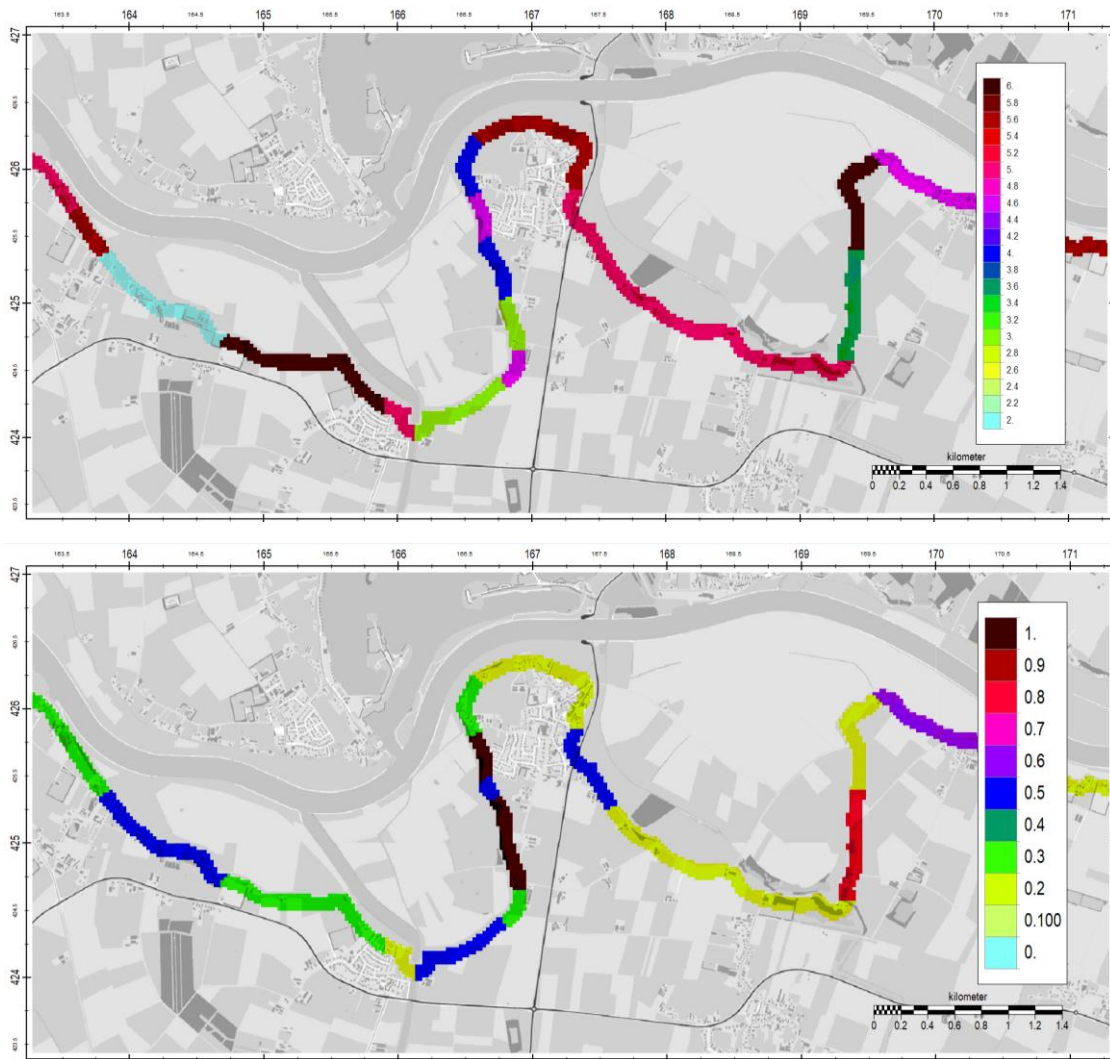
Methode

In de gevolgde aanpak is geen rekening gehouden met de ruimtelijk begrenzing van een scenario binnen een tracé van gelijke geologie. De gebruikte methode is toegespitst om de meest extreme effecten te kunnen kwantificeren. Dit is gedaan middels de volgende uitgangspunten:

- 1 er zijn een tweetal geologische varianten vormgegeven:
 - a. een ondiepe variant waarbij per dijktracé het meest ondiepe scenario is gebruikt;
 - b. een diepe variant waarbij per dijktracé het meest diepe scenario is gebruikt;
- 2 binnen de twee varianten heeft elk dijktracé dus een andere kans van voorkomen;
- 3 de aanpassing van de onderzijde van de deklaag is in een buffer van 100 m, aan de binnenzijde van de dijk ingebrand;
- 4 de scenario's zijn per tracé toegepast. Dit is dus een overschatting van het effect doordat geen rekening is gehouden met de ruimtelijke begrenzing van het scenario.

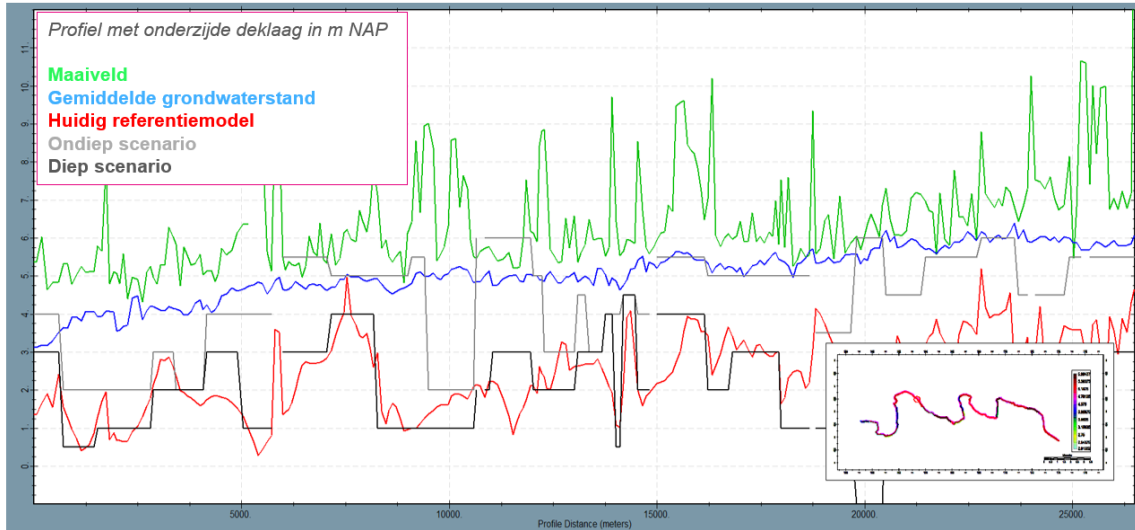
In afbeelding I.1 is ter illustratie de onderzijde deklaag en de bijbehorende kans van voorkomen, voor de ondiepe variant weergegeven.

Afbeelding I.1 De onderzijde deklaag in m NAP (boven) en de bij behoorde kans van voorkomen van dit scenario (onder), voor de ondiepe variant



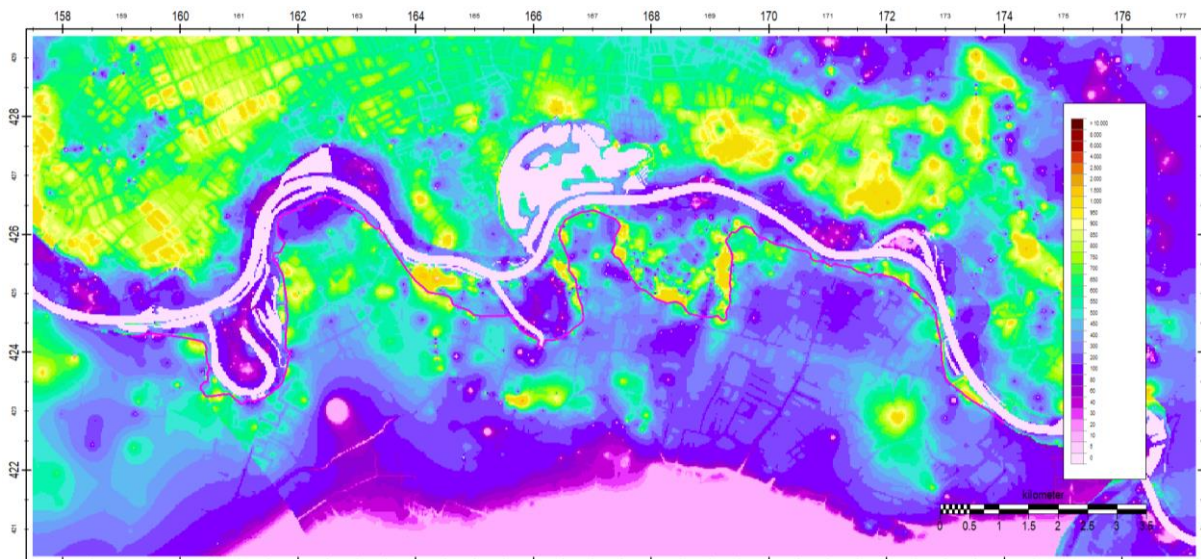
In afbeelding I.2 zijn de onderzijden voor beide varianten weergegeven in een doorsnede langs de dijk. Wat opvalt is dat de onderzijde van de deklaag zoals die gebruikt is in het referentiemodel vergelijkbaar is met de diepe variant. Verder ligt bij de ondiepe variant de onderzijde van de deklaag op verschillende plaatsen boven de gemiddelde grondwaterstand. In deze gebieden zal dus geen deklaagweerstand meer aanwezig zijn.

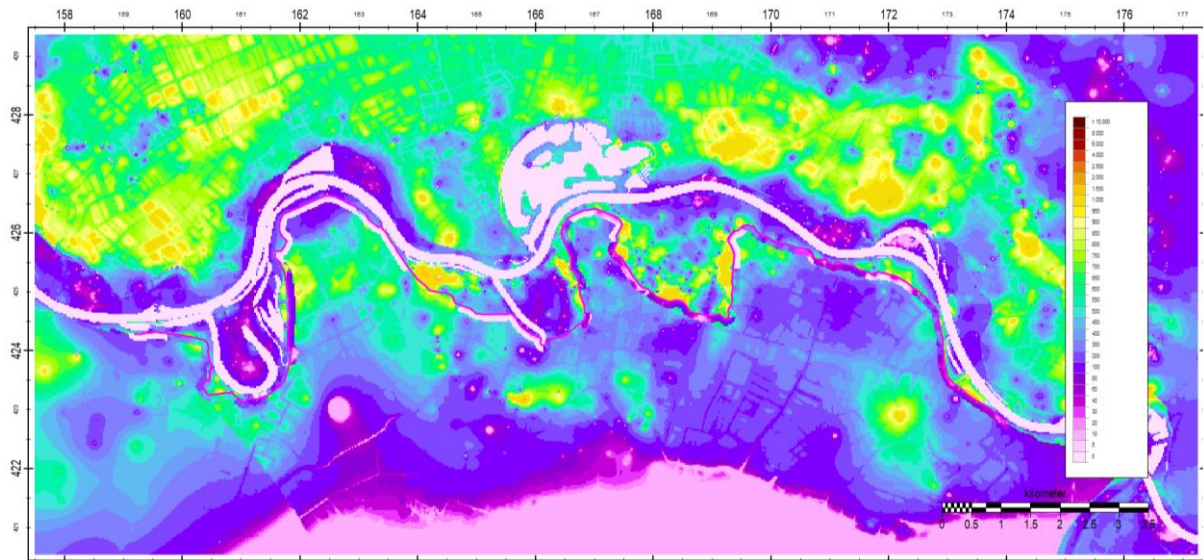
Afbeelding I.2: Een doorsnede langs de dijklijn met hierin de onderzijde van de deklaag van het referentiemodel en beide geologische varianten



Op basis van de deklaagdiktes voor beide varianten, zijn de nieuwe deklaagweerstand berekend. In afbeelding I.3 zijn ter illustratie de deklaagweerstand voor het referentiemodel en die van de ondiepe variant weergegeven.

Afbeelding I.3: De deklaagweerstand voor het referentiemodel (boven) en voor de ondiepe variant (onder). De weerstand is in dagen

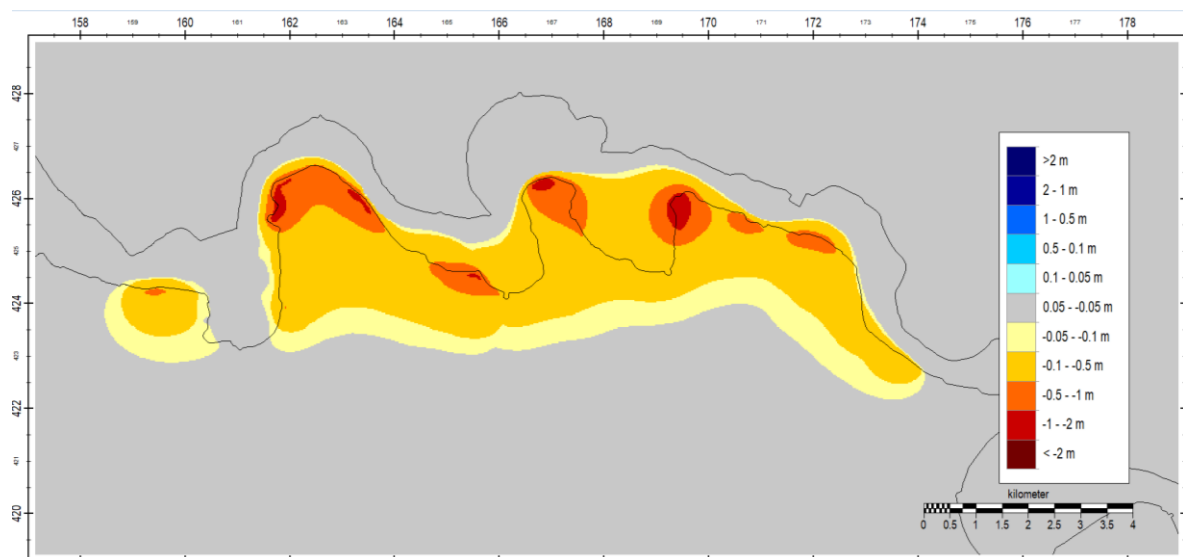


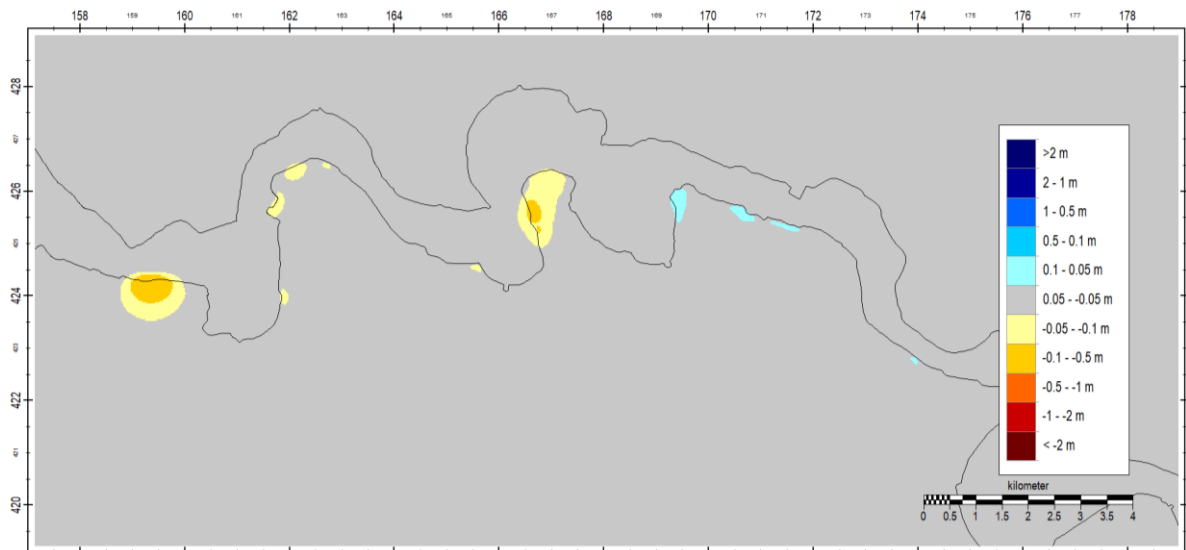


Resultaten

In totaal zijn een drietal berekeningen uitgevoerd. Dit betreft een referentierun en beide geologische varianten. Het berekende effect ten opzichte van de referentie is weergegeven in afbeelding I.4. Dit is het effect op de stijghoogtes in het 1^e watervoerende pakket.

Afbeelding I.4: De berekende effecten voor de ondiep variant (boven) en de diepe variant (onder). Een negatief effect betekend dat de stijghoogte lager is ten opzichte van de referentie

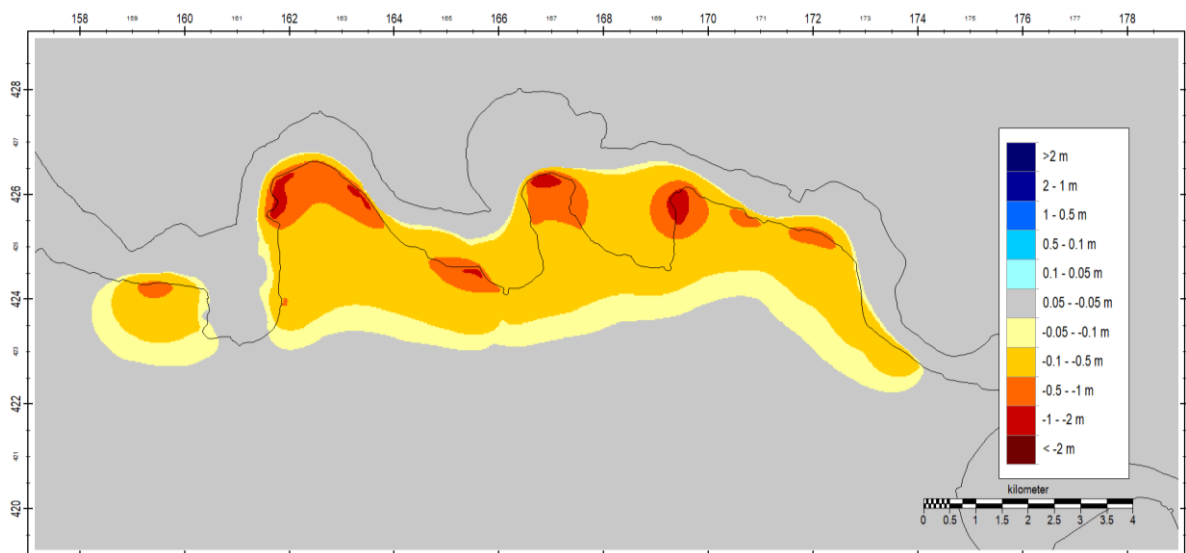




Het effect van de ondiepe variant is het grootst en leidt tot een significante verlaging van de stijghoogtes. Dit komt doordat een afname van de deklaagweerstand leidt tot een grotere 'ontlasting' van de stijghoogten. Dit komt met name doordat de aanpassing in het deklaagniveau alleen is 'ingebrand' aan de binnenzijde van de dijk. Het effect van de diepe variant is beperkt. Dit komt doordat deze schematisatie redelijk overeenkomt met die van het referentiemodel.

In afbeelding I.5 zijn de beide effecten gesommeerd tot een totaal effect van de geologische varianten.

Afbeelding I.5: Het totale effect van de geologische varianten in meter



Conclusie

Uit de geologische scenario's kunnen een aantal conclusies getrokken worden:

- er zijn twee extreme scenario's doorgerekend: met of overal de maximale of overal de minimale deklaagdikte, de resultaten zijn dus extremer dan in de werkelijkheid;
- bijna overal zorgen de geologische scenario's voor een stijghoogtedaling. Het huidige referentiemodel zit qua stijghoogte dus aan de veilige kant;
- omdat het referentiemodel conservatiever is dan de scenario's, hoeven de scenario's uit veiligheidsoverwegingen niet meegenomen te worden in het stochastisch grondwatermodel. Twee keer zoveel scenario's betekent twee keer zoveel runs, dus het is ook wenselijk om zo min mogelijk scenario's door te hoeven rekenen.

Bij bovenstaande conclusies moet worden opgemerkt dat de ondergrondscenario's zowel van invloed zijn op de stijghoogte als de weerstand tegen opbarsten, piping en heave. Als in de stijghoogte wel/geen dikke deklaag aanwezig wordt verondersteld, dan moet dit in de sterkteberekening ook zo zijn. Daarom worden in een werkwijze met ondergrondscenario's idealiter de *beoordelingsresultaten* per scenario gecombineerd, en niet alleen de *stijghoogtes*.

Als in stijghoogteberekeningen wordt uitgegaan van het ongunstigste ondergrondscenario, dan kan aan de sterktekant nog steeds rekening worden gehouden met kansen op gunstigere scenario's. Per scenario resulteert dat dan echter in een overschatting van de faalkans (op 1 scenario na). Deze aanpak is inhoudelijk minder elegant, maar wel eenvoudiger uitvoerbaar en veilig.



BIJLAGE: GAT IN DE DEKLAAG IN HET VOORLAND

Inleiding

Het lokaal ontbreken van de deklaag in het voorland kan een intredepunt vormen wanneer een pipe tot aan het voorland doorgroeit. Zo'n gat zou bijvoorbeeld kunnen ontstaan door konijnen holen, gravende honden of mollengangen. In het kader van het innovatieproject Meanderende Maas is nader onderzocht wat het effect van een lokaal gat in de deklaag op het stijghoogteverloop rond een dijk. Het gaat hier puur over stijghoogtes, niet over de mogelijkheid dat zich een groeiende pipe (na opbarsten en heave) via een lokaal gat 'uit zou kunnen breken'.

Situatie schets

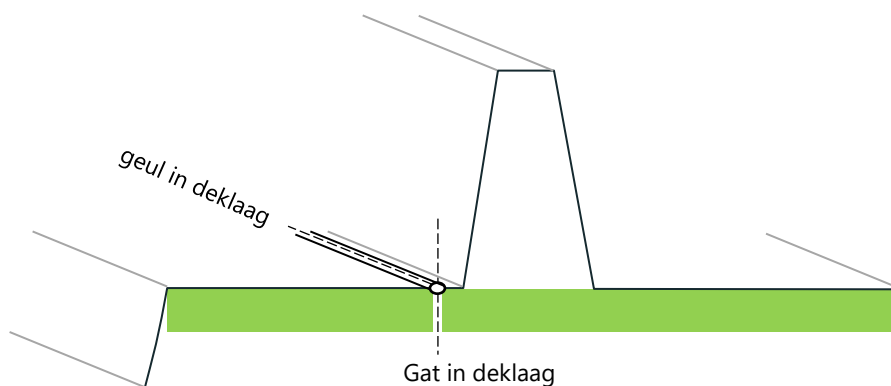
Wanneer in het voorland tijdens een hoogwater een gat aanwezig is zal er water via het gat extra water naar het watervoerend pakket stromen. Dit vertaalt zich ter plekke in een hogere stijghoogte. Hoe groot deze stijghoogte wordt, is afhankelijk van factoren zoals:

- 1 Is er wel of geen intrede weerstand bij het gat?
- 2 In hoeveel dimensies kan het water onder het gat wegstromen?
- 3 Wat is de weerstand van de deklaag?

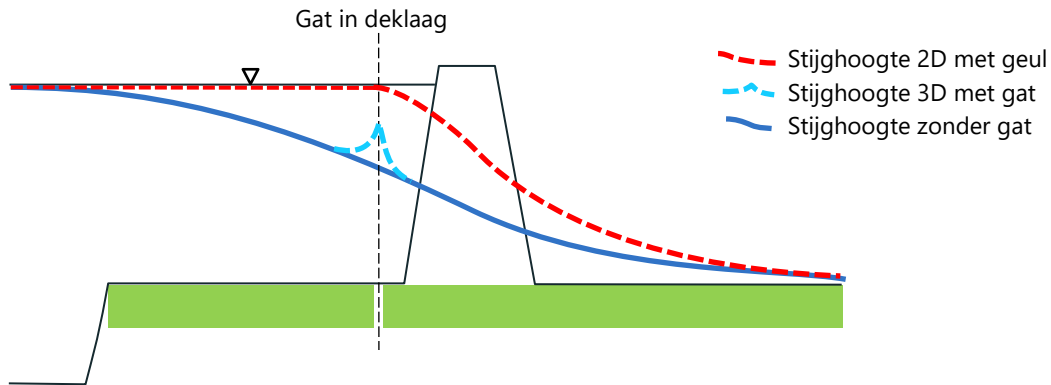
In deze notitie wordt de stijghoogte berekend voor een aantal verschillende (conservatieve) aannames ten aanzien van de factoren.

De stijghoogte zal zich zowel in het horizontale vlak (x, y - richting) als in de diepte (z -richting) verspreiden. Een 3-dimensionale beschouwing is van belang omdat er een radiale uitstroom plaats vindt (zie afbeelding II.1). Bij een 2-dimensionale benadering (alleen x en z - richtingen) is het lokale gat een geul (afbeelding II.2) geworden. De extra druk in de stijghoogte kan niet meer radiaal wegstromen en als gevolg neemt de stijghoogte om het gat sterk toe.

Afbeelding II.1 Een gat in de deklaag bij een 3D benadering wordt een 'geul' in de deklaag bij een 2D benadering



Afbeelding II.1 Stijghoogte verloop bij een gat in de deklaag 2D vs. 3D benadering



Analytische oplossing

Voor het berekenen van het effect van een 'gat' op de stijghoogte wordt uitgegaan van het superpositie beginsel. Het effect komt dus bovenop de al bestaande stijghoogteverdeling die is berekend zonder een 'gat'. De niet-stationaire verlaging van de grondwaterstand in een watervoerend pakket onder de deklaag ten opzichte van het waterpeil boven de deklaag (in ons geval de Maas) wordt beschreven in Analysis and Evaluation of Pumping Test Data (Kruseman, G.P en N.A. de Ridder, 1994). In hoofdstuk 10.2.1 wordt Hantush's modificatie van de Theis methode gegeven, waarmee het stijghoogte verloop in een watervoerend pakket kan worden gesimuleerd bij een onttrekking uit een onvolkomen put. Deze vergelijking is geïmplementeerd in Excel en gebruikt om de berekeningen mee uit te voeren.

De vergelijking mag toegepast worden zolang de spreidingslengte (\sqrt{kDC}) minimaal drie keer zo groot is als de dikte van het watervoerende pakket.

Voor het schatten van de flux ter plekke van het gat is de volgende vergelijking gebruikt.

$$Q_0 = \frac{\partial H}{C_{in}} \cdot oppervlak$$

Waarbij

∂H Verschil in stijghoogte tussen WBN en de stijghoogte in het WVP zonder dat er een gat aanwezig is. [m]

$oppervlak$ Oppervlakte van het gat [m²]

C_{in} Intredeweerstand van het gat [d]

Parameter bepaling

De vergelijkingen zijn gevuld met onderstaande parameterwaarden (tabel II.1 **Error! Reference source not found.**) die typisch zijn voor het projectgebied van Meanderende Maas. In een deel van het gebied is het watervoerend pakket dun door het voorkomen van een scheidende laag. Daarom zijn twee diktes gekozen. De deklaagweerstand is vrij hoog gekozen zodat deze slechts een beperkt dempende werking heeft op de stijghoogte verandering. Met andere woorden, een lagere C waarde leidt tot kleinere veranderingen in de stijghoogte.

De aanname is dat het gat (gemaakt door fauna) contact maakt met het watervoerend pakket en is gevuld met water of grof zand. Het water zal water van de Maas zijn. Dat is geen schoon water, maar water met zwevende stof-, klei- en siltdeeltjes. Deze deeltjes zullen neerslaan op de bovenkant van het gat en zorgen voor weerstand. Het is bekend dat bij grote infiltratie snelheden deze weerstand zich zeer snel (periode < 24 uur) opbouwt. Hier is gekozen voor een nog vrij geringe intredeweerstand van 1 dag. De ∂H is redelijk groot ingeschat door te veronderstellen dat de waterstand bij norm (WBN) 5 m hoger is dan de normale waterstand en dat de respons (zonder rekening te houden met het gat) ter plekke maar 20% is, dus van de +5 m is dan nog 1 m over. Dit resulteert in een ∂H van 4 m.

Tabel II.1 Overzicht van gebruikte parameterwaarden

Parameter	Waarde	Eenheid	Opmerking
Q_0	4	[m ³ /d]	ingeschat op basis van vergelijking
K	50	[m ² /d]	
D	10 - 40	[m]	scenario (B,A)
C	1.000	[d]	veilige waarde, bij lagere C meer demping.
∂H	4	[m]	uitgaande van WBN +5 m en een respons van 20 %
oppervlak	1	[m ²]	een groot konijnen burcht
C_{in}	1	[d]	een klein laagje inspoelend slib in het gat.
t	500	[d]	stationaire (maximale) verandering in stijghoogte

Met deze instellingen voldoen we ruim aan het toepassingsbereik van de analytische vergelijking. De spreidingslengte (707- 1.414 m) is veel groter dan driemaal de dikte (30 – 120 m).

Resultaten

De stijghoogte verandering is berekend voor twee scenario's. In scenario A is de dikte van het WVP gesteld op 40 m en in scenario B op 10 m. Het is te zien dat in beide scenario's het effect van een gat op de stijghoogte in het watervoerend pakket op 5 m afstand van het gat kleiner is dan 1 cm.

Tabel II.2 Effecten van een gat in de deklaag op de stijghoogte in een watervoerend pakket

R (afstand) [m]	1	2	5	10	20	50	100
stijghoogte A [m]	0.0096	0.0063	0.0043	0.0035	0.0029	0.0021	0.0016
stijghoogte B [m]	0.0174	0.0109	0.0070	0.0056	0.0047	0.0035	0.0027

Onderstaande resultaten zijn eventueel ook nog eenvoudig te schalen naar grotere gaten/fluxen. De analytische vergelijking laat zien dat een aantal verbanden bijna lineair zijn. Een twee keer zo grote flux levert ook een twee keer zo groot effect op. Op deze manier kunnen de gepresenteerde resultaten ook makkelijk gebruikt worden voor een eerste inschatting voor andere situaties

Conclusie

Lokale intredepunten als gevolg van deklaag verstoring door fauna hebben slechts een klein effect op de stijghoogte voor dit studie gebied. Het effect tijdens een hoogwater zal liggen in orde grootte van een cm op een afstand groter dan 2 m. Het is dan ook alleszins geoorloofd om het effect van gaten in de deklaag door bijvoorbeeld graverijen buiten beschouwing te laten bij de berekening van stijghoogtes.

Literatuur:

Kruseman, G.P en N.A. de Ridder, 1994. Analysis and Evaluation of Pumping Test Data, second edition; publication 47 ILRI, Wageningen, The Netherlands.



BIJLAGE: STIJGHOOGTEBEREKENINGEN OP BASIS VAN ENGINEERING JUDGEMENT VOOR DUIDING EN CONTROLE

Een manier om de onzekerheden van een te verwachten stijghoogte in beeld te brengen is door middel van engineering judgement. Een aantal geohydrologen in het project is gevraagd om voor de belangrijkste parameters in het grondwatermodel een veilige waarde te kiezen, zodat ter plekke van de dijk een stijghoogte wordt berekend die niet (makkelijk) overschreden kan worden. Op deze manier wordt een voorzichtige schatting van de stijghoogte berekend met het grondwatermodel. Hier hangt geen kans of kansverdeling aan, maar het helpt om uiteindelijk een geïnformeerde keuze te kunnen maken.

Methode

Er zijn veilige waarden gekozen als invoer voor het grondwatermodel:

- C deklaag: deklaagweerstand buitendijks is gemaximeerd op 100 dagen. Binnendijks is al veel weerstand aanwezig, deze is niet nog extra verhoogd;
- kD: een hoge kD kan leiden tot zowel hoge als lage stijghoogten. De kD kan dus niet in één veilige waarde gevat worden. Daarom zijn twee modellen opgesteld. Een model met een verdubbelde kD, en een zelfde model met een gehalveerde kD. Van beide modellen zijn de hoogste stijghoogtes geselecteerd.

Van de overige parameters is ingeschat dat dit al licht veilige (gevoelige parameters) of realistische (ongevoelige parameters) waarden zijn in het model.

Resultaten

In afbeelding III.1 is weergegeven hoe de stijghoogte verandert ten opzichte van het referentiemodel bij de veilig gekozen invoer. In de figuur is per cel altijd het maximale verschil aangehouden. Op de dijk zijn de verschillen vaak nog relatief klein (< 30 cm). Op de plekken met grote voorlanden worden de verschillen groter en kunnen de verschillen onder de dijk oplopen tot bijna 1 m.

Afbeelding III.1 Verschil tussen veilige expert schatting en berekende stijghoogte met het referentiemodel

