



HWBP Projectgebonden Innovatie 'Naar een geohydrologische aanpak voor piping'



Deelproduct 3: Kwantificering Onzekerheden

Beschrijving en kwantificering onzekerheden in de stijghoogte

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 3: Beschrijving en kwantificering onzekerheden in de stijghoogten
Datum 31 maart 2020
Referentie

Auteur(s) Jacco Hoogewoud (Advies in water)
Heleen Niele (Tauw)

Checklist	Door Wie	Vink of paraaf
Interne review	Wim Kanning	✓
Eindcontrole	CvE + TM	✓
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 het innovatieproject	10
1.3	Kwantificeren van onzekerheden	10
2	AANPAK OP HOOFDLIJNEN	12
2.1	Inleiding	12
2.2	Afleiden geohydrologisch referentiemodel	12
2.3	Aanpak kwantificeren onzekerheden.	13
3	AFBAKENING EN GEDRAG ONZEKERHEDEN	14
3.1	Inleiding	14
3.2	Beschouwde situatie	14
3.3	Bronnen van (on)zekerheid en afbakening	15
3.3.1	Onzekerheid	15
3.3.2	Zekerheid	16
3.3.3	Conclusie	16
3.4	Aannames over (stijghoogte) onzekerheden in het BOI	16
3.5	Conclusie en doel	17
4	AANPAK KWANTIFICERING ONZEKERHEDEN OP HOOFDLIJNEN	18
4.1	Overzicht van alternatieve aanpakken	18
4.2	Voor- en nadelen van alternatieve aanpakken	18
4.3	Gekozen aanpak	19
5	NADERE UITWERKING PROBABILISTISCHE ANALYSE	20
5.1	Geselecteerde onzekerheden en hun kansverdelingen	20
5.1.1	BOI-kansverdeling parameters	21
5.2	Opstellen metamodel	23
5.2.1	Response surface	23

5.2.2	Ruimtelijke correlatie in parameteronzekerheden	24
5.3	Monte-Carlo simulatie	24
5.4	Berekende onzekerheden	25
6	RESULTATEN MONTE CARLO-SIMULATIE	26
6.1	Berekende kansverdelingen van de stijghoogtes	26
6.1.1	Berekende verdelingsfuncties van de stijghoogte	26
6.1.2	Vlak-dekkende resultaten	28
6.2	Enkele opvallende resultaten	31
6.2.1	Effect van kD op stijghoogte	31
6.2.2	Ruimtelijke variatie onzekerheid	32
6.2.3	Verschillende verdelingsfuncties	33
6.3	Vergelijk met BOI-aannames stijghoogte onzekerheid	33
6.3.1	Response is afhankelijk van het hoogwater	34
6.3.2	Variatiecoëfficiënt	36
7	INTERPRETATIE	39
7.1	Inleiding	39
7.2	Betekenis van gehanteerde vereenvoudigen	39
7.3	Vergelijk met metingen	40
7.3.1	Afwijkingen met grondwatermetingen	41
7.3.2	Historische waarnemingen	41
7.4	Synthese karakteristieke waarde stijghoogte	41
8	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	42
8.1	Conclusies	42
8.2	Aanbevelingen	43
9	LITERATUURLIJST	45
	Laatste pagina	46
	Bijlage(n)	Aantal pagina's
I	Uitwerking omgaan met lognormale kansverdelingen van geohydrologische parameters	2
II	Stijghoogteverdeling voor een aantal locaties	3
III	Inschatting parameteronzekerheid van het BOI	1
IV	gemeten onzekerheden in andere grondwater modellen	2

SAMENVATTING

Inleiding

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 bij deze opgave behorende versterkingsmaatregelen kosten veel geld en ruimte. 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 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. Centrale onderzoeksvraag van het innovatieproject is hoe je de pipingopgave nauwkeuriger kunt vaststellen door geohydrologische informatie en modellen te gebruiken voor het beter inschatten van stijghoogtes onder maatgevende omstandigheden. Een regionaal grondwaterstromingsmodel wordt hierbij gekoppeld aan de reguliere WBI2017/BOI-sterktemodellen voor opbarsten, piping en heave. Of anders gezegd: De sterkte kant van de beoordelings- en ontwerpberoeeningen laten we ongemoeid.

Doel

Het hoofddoel van dit rapport (deelproduct 3) is het vlak-dekkend bepalen van de stijghoogte onzekerheid gegeven:

- dat er geen stijghoogtemetingen zijn in het gebied tijdens een hoogwater;
- een geo(hydro)logisch scenario;
- een hoogwatergolf;
- een geactualiseerde versie van het niet stationaire grondwatermodel van Aa en Maas (GRAM).

Het neven-doel is om de aannames van het BOI met betrekking tot de onzekerheid van stijghoogtes te vergelijken met de uitkomsten van deze studie.

Methode

Het regionale grondwatermodel van Aa en Maas is geactualiseerd met lokale kennis en geschikt gemaakt voor hoogwater berekeningen. Hiervoor is een Monte Carlo analyse uitgevoerd op een metamodel van de stijghoogte waarbij de twee meest gevoelige parameters in het model onzeker zijn verondersteld. Voor de verdeling van de onzekere parameters zijn de WBI-BOI-richtlijnen gebruikt. De leemtes in de probabilistische analyses en kennis worden ingevuld op basis van expert judgement.

Resultaten

Met de methode is een 95-percentiel (p95) van de stijghoogte bepaald. Het verschil tussen de p95 en de mediaan (p50), een maat voor de onzekerheid, is het grootst in het voorland of in het achterland. Ter plekke van de dijk is de onzekerheid vaak relatief klein. Het berekende verschil tussen de p50 en p95 langs de dijk varieert van 5 tot 60 cm. Op plekken waar het zomerbed vlak langs de dijk loopt is de onzekerheid relatief klein, op plekken met meer voorland wordt de onzekerheid vaak groter. Er zijn enkele opmerkelijke resultaten, waarvan de belangrijkste is dat een hogere k_D niet altijd zorgt voor een hogere stijghoogte langs de dijk. De bepaalde p95 is vertaald naar een karakteristieke waarde voor de semi probabilistische sterkte sommen voor opbarsten, heave en piping door de p95 met 10 cm. te vergroten. De resultaten zijn vergeleken met de BOI-aannames. De onzekerheden, zoals nu berekend, blijken vaak kleiner en soms groter te zijn. En de aangenomen relaties in het BOI blijken soms anders te liggen.

Conclusies en aanbevelingen.

Met deze methode is een goede eerste stap gezet om onzekerheden van stijghoogten in beeld te brengen. Er zijn nog steeds parameteronzekerheden die niet in beeld zijn gebracht. Deze zijn voorlopig verdisconteerd door in de semi-probabilistische berekeningen in Uitvoerbaarheidstoets II 10cm bij de p95-stijghoogte op te tellen. Voor de volgende fase van onderzoek wordt aanbevolen om andere bronnen van onzekerheid, zoals geologische scenario's, nader in beeld te brengen en het geohydrologisch model verder te actualiseren. De sturende modelparameter 'insnijden van waterlopen in het watervoerend pakket' kan wellicht ook in het veld gemeten 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 (MM). 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 (de rode lijn geeft de dijk van traject 36-3 weer)



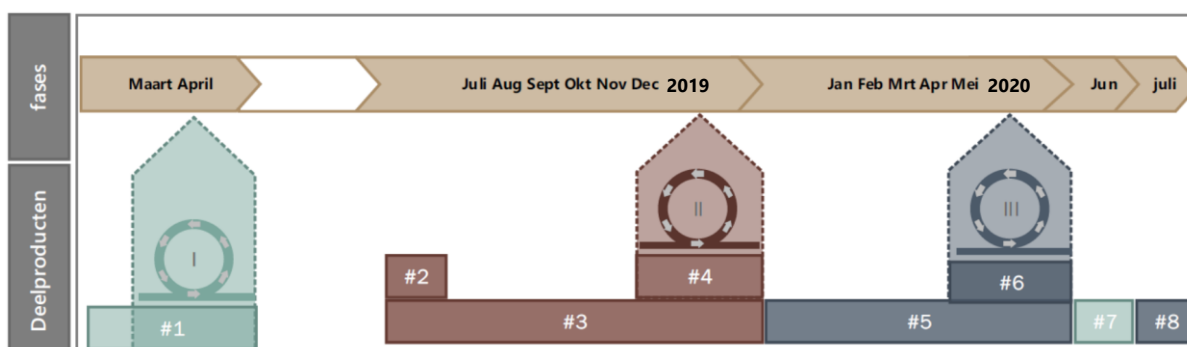
In het kader van de Innovatie Meanderende Maas wordt onderzocht hoe geohydrologische informatie en modellen gebruikt kunnen worden om stijghoogtes beter in te schatten om zo de pipingopgave nauwkeuriger vast te stellen. De geohydrologische modellen worden hierbij gekoppeld aan de reguliere sterktemodellen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

1.2 Plaats in het innovatieproject

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. Deze fase 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);
- deelproduct 3 (#3) is de voorliggende rapportage en gaat over het kwantificeren van onzekerheden van de stijghoogte. Hier is een concept methode ontwikkeld om met behulp van de geactualiseerde geohydrologische modellen een 95 %-waarde van de stijghoogte af te leiden. In een volgende fase van het project zal de methode verder uitgewerkt worden;
- in deelproduct 4 (#4) wordt de aanpak en het resultaat van uitvoerbaarheidstoets II beschreven. Doel is om te beoordelen of het een werkbare methode is om de 95 % waarde van de stijghoogte te gebruiken in de dijkbeoordeling.

Afbeelding 1.2 Verschillende fases in de projectinnovatie



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 Kwantificeren van onzekerheden

Onzekerheden vormen een integraal onderdeel van de BOI-systematiek. In de semi probabilistische benadering van de sterkte modellen, voor bijvoorbeeld opbarsten, heave en piping, wordt gebruik gemaakt zogenaamde karakteristieke waarden. Dit zijn waarden met een onderschrijdingskans van 95 % voor belastingparameters (met een negatieve invloed op de beschouwde grenstoestand), 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 dus de karakteristieke waarde (P95) van gezocht bij een gegeven hoogwater. In het Plan van aanpak is het volgende opgenomen over het kwantificeren van onzekerheden van stijghoogten (deelproduct 3).

Kwantificeren onzekerheid ten aanzien van stijghoogtevoorspellingen met regionale modellen:

1. actualiseren regionaal grondwaterstromingsmodel met lokale kennis;
2. identificeren bronnen van onzekerheid;
3. beschrijven opties voor kwantificering van deze onzekerheden of voor de 'overall-onzekerheid':
 - a) expert judgement;
 - b) statistische analyse van residuen (verschil voorspelling en observatie), en
 - c) Bayesiaanse analyse waarin prior-verdelingen worden geactualiseerd op basis van waarnemingen/metingen bij hoogwaters en lagere waterstanden (ook het feit dat bij niet al te hoge waterstanden bijvoorbeeld nergens excessieve kwel is waargenomen kan nuttige informatie zijn);
4. toepassen van bovengenoemde opties: kwantificeren onzekerheden. Hierbij zal onder andere worden gekeken naar het effect van onzekerheden ten aanzien van de geologie (bijvoorbeeld door voor alternatieve ondergrondopbouw verschillende grondwaterstromingsmodellen te ontwikkelen en verschillen te analyseren)

Begin september heeft de commissie van experts nog het volgende meegegeven voor het onderzoek bedoeld in deelproduct 3:

1. ga verder met de systeemanalyse en het actualiseren van de regionale grondwatermodellen, dat heeft meerwaarde;
2. streef er naar dat regionale modellen in de modelketen van BOI ingepast kunnen worden door de onzekerheden in stijghoogten te kwantificeren en te werken met ondergrond scenario's;
3. reliability updating is belangrijk en geldt als aanbeveling voor de volgende fase (#5).

Dit deelrapport beschrijft de resultaten van het onderzoek naar het kwantificeren van onzekerheden van berekende stijghoogtes. De 95 % waarde van de stijghoogte die is afgeleid is gebruikt als invoer voor deelproduct. In een volgende fase van het project zal de methode om een 95 % waarde te bepalen verder worden geoptimaliseerd.

2

AANPAK OP HOOFDLIJNEN

2.1 Inleiding

Centrale onderzoeksvraag van het innovatieproject is hoe je de pipingopgave nauwkeuriger kunt vaststellen door geohydrologische informatie en modellen te gebruiken voor het beter inschatten van stijghoogtes onder maatgevende omstandigheden. Een regionaal grondwaterstromingsmodel wordt hierbij gekoppeld aan de reguliere WBI2017/BOI-sterktemodellen voor opbarsten, piping en heave. Of anders gezegd: De sterkte kant van de beoordelings- en ontwerpberoeeningen laten we ongemoeid.

De koppeling met het WBI2017 wordt inhoudelijk gelegd door te werken met dezelfde grenstoestandsfuncties, zoals toegelicht in deelproduct 2. Grenstoestandsfuncties zijn een modelmatige beschrijving van de fysica en vormen de basis voor probabilistische en semi-probabilistische beoordingen. Bij probabilistische beoordingen worden grenstoestandsfuncties gevoed met de kansverdelingen van de verschillende onzekere grootheden. Bij semi-probabilistische beoordingen worden grenstoestandsfuncties gevoed met veilige waarden van de onzekere grootheden, zg. rekenwaarden of karakteristieke waarden.

De belastingparameter voor de grenstoestandsfuncties voor piping is de stijghoogte. Deze stijghoogte vormt dus de 'linking pin' tussen de al bestaande (semi-) probabilistische aanpak voor sterkte en de vernieuwde aanpak voor bepalen van de belasting met behulp van regionale grondwatermodellen.

In de onderzoeksperiode tot en met december 2019 hebben twee parallele sporen gelopen die nu samen komen in voorliggende rapportage 'deelproduct 3'. In het ene spoor is een geohydrologisch referentiemodel gebouwd welke geschikt is voor het berekenen van stijghoogtes tijdens een hoogwater in het projectgebied. In het andere spoor is een methode ontwikkeld om de onzekerheid in de stijghoogte zo goed mogelijk te kwantificeren, gegeven een referentiemodel. Dit laatste is nodig om met het regionale grondwatermodel de karakteristieke waarde (95 %-waarde) voor de stijghoogte af te leiden.

Voorliggende rapportage concentreert zich in de hoofdttekst op de methode voor het kwantificeren van onzekerheden, en beschrijft op hoofdlijnen hoe het verbeterde geohydrologische model¹ tot stand is gekomen.

2.2 Afleiden geohydrologisch referentiemodel

Als vertrekpunt voor de geohydrologische modellering is het Grondwatermodel Aa en Maas (GRAM) gebruikt. Een semi 3D en tijdsafhankelijk model met een resolutie van 25 m. In fase 1 van het project is dit model aangepast en gebruikt en dit model is verder geactualiseerd met bestaande kennis. Het model beschrijft de huidige situatie, dus nog zonder rivierverruimende maatregelen. Het referentie model is onderbouwd in een apart werkdocument. In deze paragraaf wordt de hoofdlijn samengevat zodat in dit rapport een leesbaar geheel ontstaat.

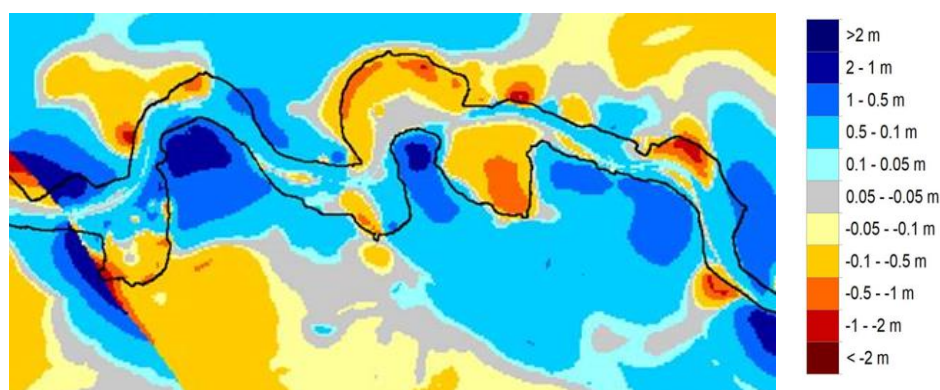
¹ Waarbij voor verdieping wordt verwezen naar de zelfstandig leesbare bijlage geohydrologie.

Voor het afleiden van het geohydrologische referentiemodel zijn op hoofdlijnen de volgende aanpassingen gemaakt ten opzichte van het eerdere model:

- de deklaagdikte en weerstand is aangepast op basis van de beschikbare boringen uit het MeMa-project;
- de diepere ondergrond, de schematisatie van het eerste watervoerend pakket, is aangepast op basis van REGIS en expert kennis over de hydrologische werking van de peelrandbreuk;
- de bergingscoëfficiënt van de ondergrond is aangepast;
- inbrengen van nevengeulen en plassen;
- de insnijding van waterlopen in het watervoerend pakket is opnieuw bepaald.

Deze veranderingen samen hebben tot gevolg dat de berekende stijghoogte voor de meeste locaties tijdens een hoogwatersituatie hoger is dan berekend in april 2019, zie Afbeelding 2.1. Er zijn overigens geen metingen bij een relevant hoogwater beschikbaar om het model te valideren.

Afbeelding 2.1 Verschil in berekende verwachtingswaarde van de stijghoogte tussen de versie van april 2019 en de versie van feb 2020. Blauw in feb2020 hogere stijghoogtes, rood lagere stijghoogtes



2.3 Aanpak kwantificeren onzekerheden.

Om de onzekerheden rond het berekenen van een stijghoogte tijdens een hoogwater in beeld te brengen zijn, op basis van het plan van aanpak, de volgende stappen doorlopen.

1. er is een zo goed mogelijk referentie model afgeleid voor het berekenen van de grondwaterstroming. Met dit model wordt de verwachtingswaarde (best estimate) van de maximale stijghoogte tijdens een hoogwater (5.000 m³/s) berekend. Er zijn in principe geen conservatieve keuzes in opgenomen (zie vorige paragraaf);
2. op basis van een analyse van de hydrologische situatie en verschillende bronnen die bijdragen aan de onzekerheid is het onderzoek afgebakend. De bijdrage van de bron parameteronzekerheid is verder onderzocht;
3. er zijn verschillende methodes afgewogen om te komen tot een kwantificering van de onzekerheid in berekende stijghoogten. Er is gekozen voor een probabilistische methode;
4. de gekozen probabilistische methode is nader uitgewerkt. Hierbij is gekozen om een Monte-Carlo analyse te doen op een meta-model van de stijghoogtes, gegeven een tweetal gevoelige modelparameters. De gevoelige modelparameters zijn bepaald middels een gevoeligheidsanalyse.
5. de resultaten zijn geanalyseerd en de karakteristieke waarden zijn bepaald;
6. op basis van het onderzoek worden aanbevelingen geformuleerd om richting te geven aan de verdere uitwerking van de methode voor de volgende fase van onderzoek.

Tijdens deze stappen is 2 keer overleg gevoerd met een expert-groep. De eerste keer aan het begin van het onderzoek voor dit deelproduct om richting te geven, in stap 2. De tweede keer om de resultaten te presenteren en aanbevelingen te verzamelen voor de volgende fase.

3

AFBAKENING EN GEDRAG ONZEKERHEDEN

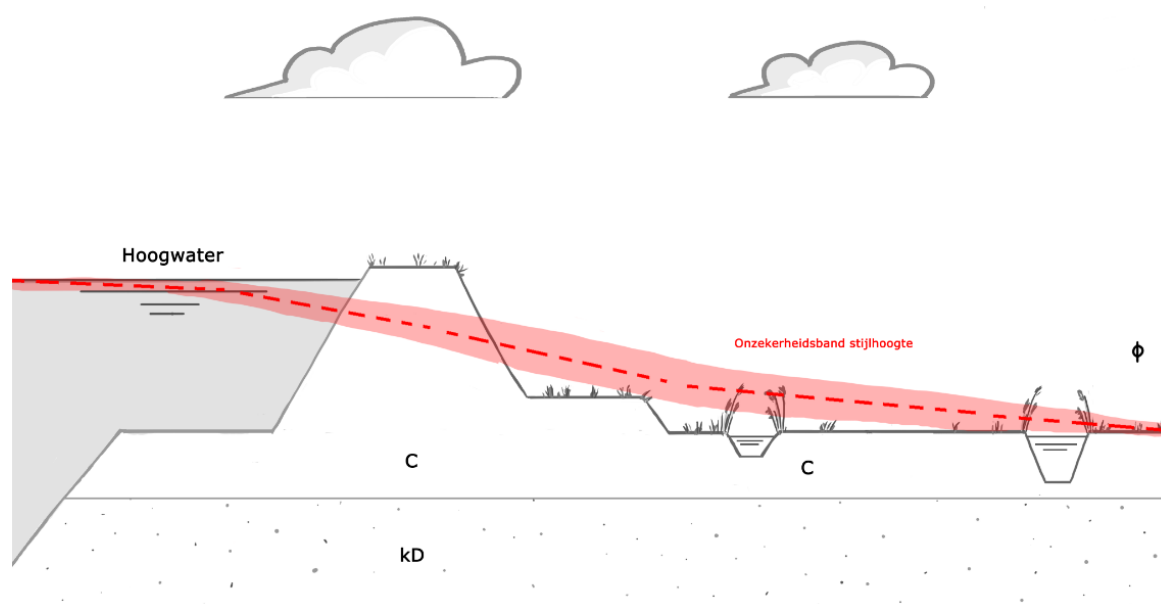
3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een algemene beschouwing gegeven op de onzekerheid in de stijghoogte tijdens hoogwatersituaties en aan de hand daarvan wordt de afbakening van het onderzoek toegelicht. Achtereenvolgens wordt de geohydrologisch te beschouwen situatie verkend, worden bronnen van onzekerheid geïdentificeerd en wordt een afweging gemaakt voor de te onderzoeken bronnen. Tot slot is kort samengevat welke aannames het BOI doet over onzekerheden van stijghoogtes en onderliggende parameters.

3.2 Beschouwde situatie

De sterktemodellen worden gevoed met een karakteristieke stijghoogte tijdens een maatgevend hoogwater. In afbeelding 3.1 staat de schematische weergave van de door te rekenen situatie waarvoor de onzekerheid in beeld wordt gebracht. Het betreft een maatgevend hoogwater met verdronken voorlanden en de bijbehorende stijghoogte, voordat er sprake is van opbarsten. In deze (vereenvoudigde) schematisatie worden twee bodemlagen onderscheiden: een deklaag van klei (met weerstand C) en een watervoerende laag van zand (met transmissiviteit kD). De stijghoogte van het watervoerend pakket in het sterktemodel wordt bij hoogwater bepaald en is aangegeven met een stippellijn en symbool φ . De band hierom heen stelt de onzekerheid in de stijghoogte voor. Rondom de dijk zal de invloed van het hoogwater op de stijghoogte dominant zijn over andere zaken als neerslag en verdamping. In deze situatie is het hydrologische systeem vrij lineair. Dat wil zeggen dat alle waterlopen actief zullen zijn en de onverzadigde zone zal klein of afwezig zijn. De aanloop van de hoogwatergolf is niet lineair, dat zit hem vooral in het moment dat het voorland onderwater zal komen te staan. De invloed hiervan op de hoogste grondwaterstand zal gering zijn, echter is wel van belang als metingen en responsfactoren tijdens een klein hoogwater geëxtrapoleerd worden naar maatgevende omstandigheden.

Afbeelding 3.1 Schematische weergave van het traject waarvoor de onzekerheidsband van de stijghoogte geïdentificeerd wordt



De hoogwatergolf bouwt zich in de tijd op en af. In het grondwatermodel wordt de hoogwatergolf ook tijdsafhankelijk doorgerekend. De opgebouwde druk (stijghoogte) onder de rivier zal zich door de ondergrond verplaatsen. Dat kost tijd. De maximaal berekende stijghoogte langs een doorsnede wordt niet op eenzelfde tijdstip berekend. Om te voorkomen dat er met te lage stijghoogtes wordt gerekend is daarom de maximale stijghoogte tijdens een hoogwaterperiode berekend. Deze maximale stijghoogtes worden gebruikt voor de sterkte sommen.

3.3 Bronnen van (on)zekerheid en afbakening

3.3.1 Onzekerheid

Er zijn verschillende bronnen van onzekerheid benoemd die invloed hebben op de berekende stijghoogte, we hebben hier drie bronnen onderscheiden:

1 parameter onzekerheid

- dit is de onzekerheid als gevolg van het niet exact kennen van de juiste parameterwaarde in het grondwatermodel. Dus als we weten dat een kleilaag aanwezig is zijn we nog steeds niet zeker over de dikte van deze laag of de doorlatendheid (k -waarde) van deze laag. In hoofdstuk 5 wordt verder ingegaan op de vraag welke parameters de grootste bijdrage aan onzekerheid hebben. In voorliggend rapport is vooral aandacht gegeven aan deze bron van onzekerheid. Hierbij is uitgegaan van een referentie situatie die representatief is om de te verwachten stijghoogte uit te rekenen, zonder hierbij al conservatief te zijn. Als we voor een referentie situatie de onzekerheid als gevolg van parameteronzekerheid in beeld kunnen brengen, kan dat ook voor een ander geohydrologisch scenario. Daarmee kan voor elk scenario de onzekerheid in beeld gebracht worden en wordt aangesloten op de reeds bestaande systematiek in het BOI;

2 de onzekerheid in de geologie:

- hier wordt bedoeld dat we niet zeker zijn van de lithologie van de ondergrond. Is een kleilaag vlakdekkend aanwezig en als dat niet zo is waar zitten dan de gaten. Een typisch voorbeeld is ook het voorkomen van tussenzandlagen of zandbanen. Soms zie je er iets van terug in de boringen, maar het is niet zeker of ze allemaal in beeld zijn. Het idee is om deze onzekerheid te vatten in een scenario analyse. Een extra grondwaterstromingsmodel naast het referentie model met een andere geologie. Voor elk scenario moet dan de stijghoogte kansverdeling worden bepaald als gevolg van de parameteronzekerheid. Daarom is eerst een methode gezocht om het effect van de

parameteronzekerheid in beeld te brengen en wordt de onzekerheid in de geologie in de volgende fase (bij deelproduct 5) van het onderzoek nader beschouwd. Door middel van verschillende analyses in het geohydrologische model is wel inzicht ontstaan in de gevoeligheid van het hydrologische systeem voor een aantal scenario's;

3 een modelonzekerheid:

- een model is een vereenvoudiging van de werkelijkheid. In een grondwaterstromingsmodel wordt de werkelijkheid ook vereenvoudigd. Losse zandkorrels worden niet in het model geschematiseerd, maar het effect van zand op de grondwaterstroming wordt geabstraheerd tot een doorlatendheid. Ook rekent het model met een bepaalde resolutie, waardoor de werkelijkheid verschaald zal moeten worden. Dus zelfs als we de geologie en de bijbehorende parameters zouden kennen zal het model de werkelijkheid nog niet exact kunnen voorspellen. Door de rekenresolutie op 25 m te stellen is de onzekerheid in de berekende stijghoogte klein gehouden, maar op plekken zonder deklaagweerstand of bij insnijdende sloten waar grote gradiënten in stijghoogten optreden is deze resolutie wellicht nog te grof. De verwachting is dat de bijdrage van deze bron veel kleiner is dan de twee eerder benoemde bronnen. Deze bron van onzekerheid wordt voorlopig ingeschat op basis van expert judgement en bevat naast de resolutie ook andere componenten.

3.3.2 Zekerheid

Er zijn ook bronnen van zekerheid. Zo zijn er boringen van de ondergrond en is er een peilbuis meetnet ingericht. De boringen geven vooral zekerheid over de geologie ter plekke van de boring, tussen de boringen is de lithologie nog steeds onzeker. Hoewel er veel boringen zijn van de deklaag, is bekend dat de deklaagdikte in het rivierengebied erg variabel is. Er zijn niet genoeg boringen om de onzekerheid in geologie van de belangrijke bovenste meters weg te nemen. Het grondwatermeetnet is een andere bron van zekerheid. Sinds de plaatsing is echter nog geen hoogwater voorbijgekomen dat ook het voorland goed onderwater heeft gezet. De kleine hoogwaters die wel zijn voorgekomen kunnen wel wat meer zekerheid opleveren voor de parameterwaarden van het watervoerend pakket. Bij de nog uit te voeren modelcalibratie van het grondwatermodel wordt hier meer aandacht aan gegeven. Wanneer een echt hoogwater zou optreden kan het meetnet ook meer zekerheid geven over de stijghoogte tijdens een hoogwater.

3.3.3 Conclusie

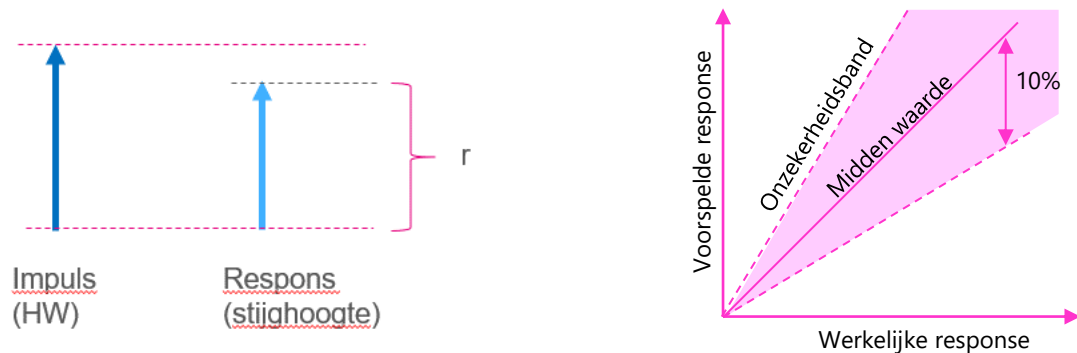
Samenvattend, het onderzoek is momenteel afgebakend tot de onzekerheid binnen één ondergrond scenario, het referentie scenario. Hierin veronderstellen we een vaste bodemopbouw en beschouwen we één amplitude voor het maatgevend hoog water. We zullen later meer scenario's beschouwen, waaraan bijvoorbeeld zandbanen onder de dijk door worden toegevoegd of stukken deklaag ontbreken. Dit kan de kans op piping verhogen. Van de modelonzekerheid is aangenomen dat deze ondergeschikt is aan de onzekerheid als gevolg van parameterwaarden en geologie. De modelonzekerheid wordt niet verder gekwantificeerd.

3.4 Aannames over (stijghoogte) onzekerheden in het BOI

In het BOI worden aannames gedaan over het gedrag van onzekerheden. In deze paragraaf worden de aannames kort toegelicht. Later in deze rapportage worden de aannames vergeleken met de resultaten van het onderzoek. In het BOI wordt voor probabilistische sommen een kansverdeling aangenomen voor de stijghoogte verdeling. Deze wordt uitgedrukt als covariantie van een impuls-respons relatie. De response (factor) van de stijghoogte op het hoogwater wordt uiteindelijk bepaald door fysische eigenschappen van het hydrologisch systeem. In systemen met een groot voorland met een kleilaag zal de response ter plekke van de dijk kleiner zijn dan wanneer de dijk direct aan het zomerbed van de rivier ligt. De impuls response relatie kan vastgesteld worden met metingen, maar ook worden berekend met een grondwatermodel. Als dan de onzekerheid met de aannames van het BOI wordt vastgesteld geldt het volgende: De onzekerheid is proportioneel met de stijghoogte respons op het hoogwater. Met andere woorden, als de response van de

stijghoogte op de impuls (het hoogwater) groot is, is ook de onzekerheid in absolute zin groot. De onzekerheid is vastgelegd met een lognormale verdeling en een variatiecoëfficiënt.

Afbeelding 3.2 Illustratie van BOI-aannames met betrekking tot onzekerheden van stijghoogtes



In afbeelding 3.2 staat de impuls reponse relatie schematisch weergegeven. De impuls (het hoogwater) met grootte 1 geeft bijvoorbeeld een respons van 0.8 in de stijghoogte. Rondom deze respons van 0.8 wordt een variatie coëfficiënt van 0.1 aangenomen. Dat betekent dat de standaardafwijking 10 % van de respons bedraagt. De standaardafwijking is dan 10 % van 0.8, dus 0.08. Als nevensdoel worden de hier beschreven aannames van het BOI vergeleken met de bevindingen van deze studie.

Ook voor parameters die gebruikt worden bij het berekenen van de grondwaterstroming, zoals k-waarde en dikte van een lithologische eenheid, heeft het BOI aannames gedaan voor de onzekerheid van deze parameters. Deze onzekerheid is wederom uitgedrukt als een verdeling met een variatiecoëfficiënt. In bijlage III staan deze genoteerd.

3.5 Conclusie en doel

Het hoofddoel van dit rapport (deelproduct 3) is het bepalen van de stijghoogte onzekerheid met een geohydrologisch model, gegeven een aantal randvoorwaarden:

1. de maatgevende golf wordt niet stationair ingebracht in het grondwatermodel;
2. het grondwatermodel wordt niet stationair doorgerekend;
3. de op een gridpunt, maximaal berekende stijghoogte in de tijd wordt gebruikt voor het bepalen van de statistieken;
4. de stijghoogten worden berekend voor de huidige inrichting en zonder opbarsten van de ondergrond;
5. de bijdrage van parameteronzekerheid op de stijghoogte wordt in beeld gebracht;
6. de onzekerheid als gevolg van geologische onzekerheid of modelonzekerheid wordt nu niet gekwantificeerd.

Het nevensdoel is om de aannames van het BOI met betrekking tot de onzekerheid van stijghoogtes te vergelijken met de uitkomsten van deze studie. In het volgende hoofdstuk wordt een keuze gemaakt in de aanpak van deze studie om het doel te verwezenlijken.

4

AANPAK KWANTIFICERING ONZEKERHEDEN OP HOOFDLIJNEN

Er zijn verschillende methoden mogelijk om de onzekerheid van de stijghoogte te kwantificeren. In dit hoofdstuk geven we een kort overzicht van de mogelijke aanpakken en selecteren we de meest geschikte methode voor het sterktemodel.

4.1 Overzicht van alternatieve aanpakken

Voor het kwantificeren van de onzekerheden ten aanzien van berekende stijghoogtes bij hoogwatercondities kan onderscheid worden gemaakt tussen de volgende methoden. De eerste 3 lenen zich vooral voor het onderzoeken van de totale onzekerheid. De laatste methode is beter geschikt om ook het effect van de onzekerheden van de modelparameters in beeld te brengen:

- 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 ge-updatet 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 de pure modelonzekerheid. Deze laatste onzekerheid kan immers nooit op basis van het model zelf worden bepaald. Wel kunnen metingen tijdens lab-proeven een idee geven van de modelonzekerheid.

4.2 Voor- en nadelen van alternatieve aanpakken

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 eenvoudig gekwantificeerd kan worden. Dat zou met lab-proeven onderbouwd moeten worden.

4.3 Gekozen aanpak

Omdat er (nog) geen stijghoogtemetingen tijdens hoogwater zijn lijken statistische analyses ('klassiek of Bayesiaans') niet haalbaar en is gekozen voor een combinatie van expert judgement en probabilistische analyses. De leemtes in de probabilistische analyses (geen modelonzekerheid) kunnen dan worden ingevuld op basis van expert judgement. Overigens is een probabilistische analyse nooit los te zien van expert judgement aangezien de beschrijvingen van de parameteronzekerheden uit het WBI2017/BOI voor een groot deel daarop berusten.

De bovenstaande aanpak is in lijn met de gedachte dat nooit 'mechanisch' met modellen moet worden omgegaan maar dat modellen altijd dienen voor deskundige oordeelsvorming. Alleen zo zijn grote fouten te voorkomen. In een latere fase van het innovatieproject Meanderende Maas zal nog worden geprobeerd om de beschrijving van de onzekerheden aan te scherpen op basis van een Bayesiaanse analyse.

NADERE UITWERKING PROBABILISTISCHE ANALYSE

In dit hoofdstuk volgt de verdere uitwerking van de probabilistische analyse (voor parameteronzekerheden) gecombineerd met expert judgement (voor modelonzekerheden en rest onzekerheden) om zo de onzekerheid in stijghoogte te bepalen. Door een gebrek aan relevante metingen kunnen residuen tussen model en meting niet gebruikt worden om de onzekerheid in beeld te brengen. De probabilistische analyse van stijghoogtes wordt uitgevoerd door een Monte-Carlosimulatie te doen op basis van een metamodel van de stijghoogte. Het metamodel is opgezet gebruikmakend van een response surface: Deze geeft de maximale stijghoogte als functie van inputvariabelen. Als een groot deel van de onzekerheid verklaard kan worden met slechts een paar parameters kan een respons surface worden opgesteld met een relatief beperkt aantal grondwatermodellen. Op basis van parameteronzekerheden en de response surface wordt de maximale stijghoogte-onzekerheid bij waterstand bij norm (WBN) in beeld gebracht. Het resultaat is in een verdelingsfunctie die alle mogelijke waarden van de stijghoogte met hun kans van voorkomen weergeeft.

Met een response surface kan de stijghoogte onzekerheid als gevolg van de parameteronzekerheid voor slechts een paar parameters efficiënt in beeld worden gebracht. Om te bepalen welke modelparameters gevarieerd worden, voeren we eerst een gevoeligheidsanalyse uit op de parameters in het grondwatermodel. Vervolgens worden de parameteronzekerheden vastgesteld op basis van het BOI en expert judgement. Daarna worden de aannames ten aanzien van de methode toegelicht. Tot slot volgt de uitwerking van de response surface en van de Monte-Carlosimulatie.

5.1 Geselecteerde onzekerheden en hun kansverdelingen

Er zijn een aantal parameters die invloed hebben op de stijghoogte tijdens een hoogwater. Hiervan zijn, gegeven een geologie en lithologie, de meest gevoelige parameters geselecteerd. Hiermee is bedoeld dat gegeven de onzekerheid van een parameter bekeken is welke parameters de grootste effecten hebben op de stijghoogte tijdens een hoogwater. Het aantal te beschouwen parameters is in deze fase van het project beperkt tot twee, om het aantal modelruns, ten behoeve van het opstellen van de surface response functie, behapbaar te maken; er is dus gezocht naar de twee meest invloedrijke variabelen.

Van een groot aantal parameters is de gevoeligheid op de stijghoogte bepaald, de belangrijkste hiervan zijn:

- het doorlaatvermogen van het watervoerend pakket, een vermenigvuldiging van twee parameters: de k -horizontaal en de dikte (kD);
- de weerstand van de deklaag (C), deze geldt zowel voor voorland als achterland, ook een deling van twee verschillende parameters: de dikte gedeeld door de k -verticaal ;
- bergingscoëfficiënten van de verschillende bodemlagen (S);
- intreeweerstand Maas;
- weerstand waterlopen binnendijks.

Op basis van een gevoeligheidsanalyse is geconcludeerd dat de doorlatendheid van het watervoerend pakket [kD] en de weerstand van de deklaag [C] de twee meest gevoelige parameters in het grondwatermodel zijn (zie bijlage geohydrologie).

5.1.1 BOI-kansverdeling parameters

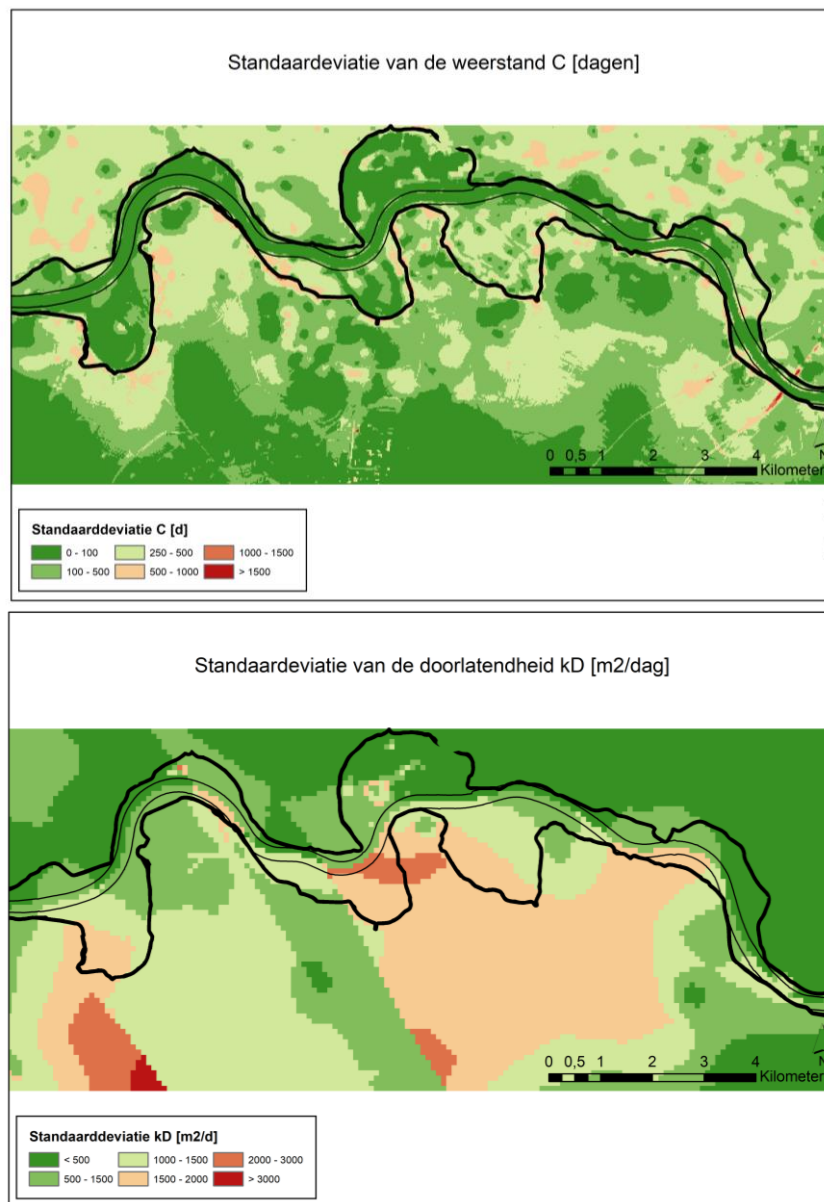
KD en C zijn beide een combinatie van twee parameters. De C wordt berekend door de dikte van de weerstand-biedende deklaag te delen door de k-verticaal en de kD is een vermenigvuldiging van de k-horizontaal met de dikte van een watervoerende pakket. Samen bevatten ze dus vier onafhankelijke parameters. Het BOI heeft voor deze parameters uitgangspunten voor de variatiecoëfficiënt opgesteld. Deze gelden voor het sterktemodel. Het geohydrologisch model heeft een grotere schaal dan het sterktemodel. Variaties kunnen lokaal groot zijn en direct invloed hebben op bijvoorbeeld opbarsten van de ondergrond. De stijghoogte is minder sterk afhankelijk van deze lokale variaties, maar hangt meer af van de spreidingslengte ($\sqrt{kD \cdot C}$) in de grotere omgeving die bepaald wordt door gemiddelden van de kD van het watervoerend pakket en de C van de deklaag. In dit gebied is de spreidingslengte vaak groter dan 500 m. Daarnaast wordt het geohydrologisch model vlak-dekkend doorgerekend, waarbij tussen ieder gridpunt 100 % ruimtelijke correlatie wordt verondersteld. Daarom zijn, waar mogelijk, de laagste variatiecoëfficiënten uit het BOI gekozen.

Tabel 5.1 Gehanteerde variatiecoëfficiënten voor de doorlatendheid k en dikte D van de deklaag en het watervoerend pakket gebaseerd op het BOI

Bodemlaag	Type verdeling	Variatiecoëfficiënt van k	Variatiecoëfficiënt van D
Deklaag	lognormaal	0,4	0,1
Watervoerend pakket	lognormaal	0,5	0,1

De variatie in de parameters wordt uitgedrukt in factoren ten opzichte van de verwachtingswaarde, waarvoor dus geldt dat het gemiddelde bij factor 1 ligt. De doorlatendheid heeft een grotere variatiecoëfficiënt, waardoor deze voornamelijk de verdelingen van C en kD bepaalt. Zie afbeelding 5.3 voor de verdelingsfunctie van de kD. In bijlage I staat weergegeven hoe beide COV's zijn gecombineerd tot één verdelingsfunctie. Onderstaand is de resulterende standaard deviatie weergegeven voor de ruimtelijke verdeling van de paramters C en kD.

Afbeelding 5.1 Ruimtelijke verdeling van de STD voor de C (boven) en kD (onder) in het studiegebied



In onderstaande tabel is voor de verdelingen van C en kD de 1 en 99 percentielwaarden gegeven. Hieruit kan grofweg worden opgemaakt welke parameter ruimte beschreven dient te worden met de surface response functie om betrouwbaar een 95 percentiel van de stijghoogte vast te kunnen stellen.

Tabel 5.2 Percentielwaarden voor weerstand C en doorlatendheid kD op basis van de gehanteerde lognormale verdelingen

Parameter	1%-percentiel	99%-percentiel
C	0,36	2,33
kD	0,29	2,72

De staarten lopen bij de hoge percentielen verder uit. Om binnen de gehele verdeling betrouwbaar te blijven is ervoor gekozen om de response surface op te stellen met onderstaande parameter reeksen.

C: [0.33, 0.5, 0.7, 1, 1.4, 2, 3]

kD: [0.25, 0.5, 0.7, 1, 1.4, 2, 4]

5.2 Opstellen metamodel

5.2.1 Response surface

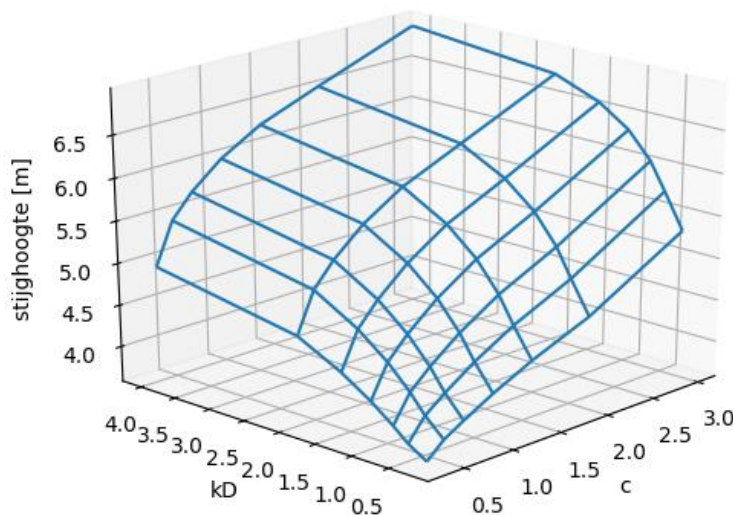
Het metamodel wordt opgesteld door een response surface te berekenen. Dit metamodel wordt gebruikt om de relatie tussen een aantal verklarende variabelen en een respons variabele vast te leggen. Het metamodel is opgesteld voor een discreet aantal waarden van de verklarende variabelen. Met deze punten kan dan een parameterruimte worden beschreven, en door tussen de punten te interpoleren wordt een 'response surface' opgesteld (zie Afbeelding 5.2). Voor deze studie is de response surface van de stijghoogte opgesteld aan de hand van twee verklarende parameters, te weten de kD van het watervoerende pakket en C van de deklaag. Op ieder gridpunt van het grondwatermodel is een response surface berekend voor C en kD. De berekeningen zijn met de volgende factoren en voor alle parametercombinaties uitgevoerd:

C: [0.33, 0.5, 0.7, 1, 1.4, 2, 3]

kD: [0.25, 0.5, 0.7, 1, 1.4, 2, 4]

De C-waarde is dus gevarieerd met maximaal een factor 3 (3 keer zo klein en 3 keer zo groot), de kD is gevarieerd met maximaal een factor 4. Tussen de berekende stijghoogtes wordt een lineair verloop verondersteld. In Afbeelding 5.2 wordt voor één gridpunt (locatie in het model) een voorbeeld van de response surface gegeven.

Afbeelding 5.2 Voorbeeld van de response surface op één locatie. De stijghoogte hangt af van kD en c. Op alle snijpunten is met het geohydrologisch model een stijghoogte berekend. Daartussen wordt de stijghoogte bepaald met lineaire interpolatie



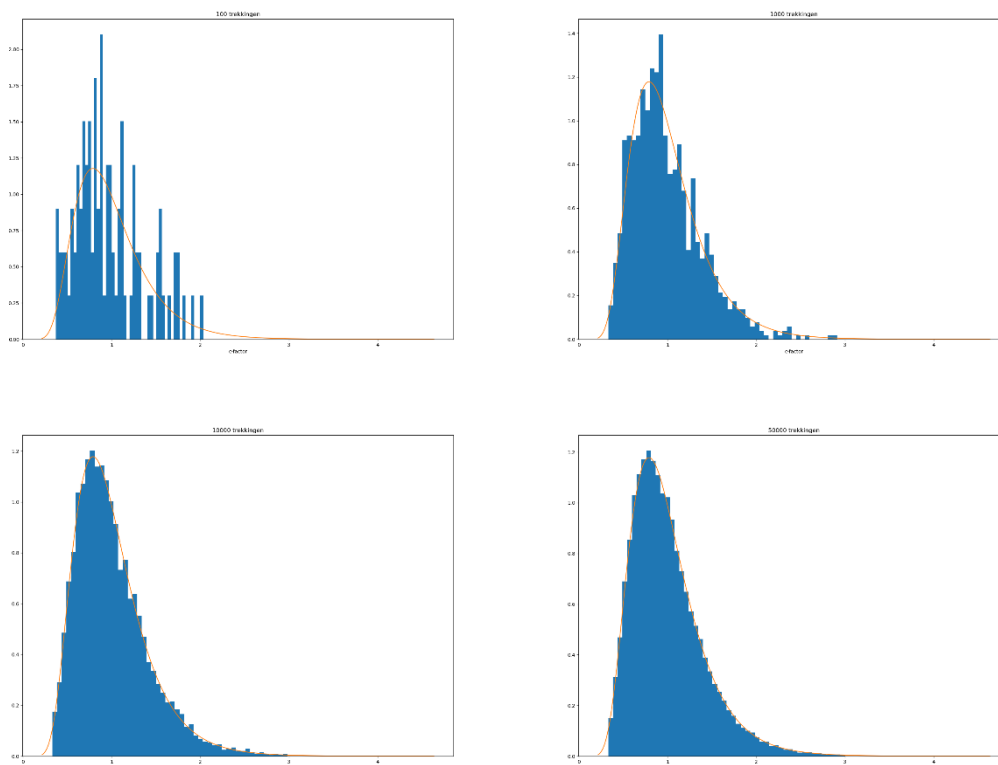
5.2.2 Ruimtelijke correlatie in parameteronzekerheden

Een grondwatermodel draaien voor een gebied ter grootte van het traject Ravenstein-Lith duurt 4 tot 6 uur. Om efficiënt een response surface te kunnen berekenen is aangenomen dat, ruimtelijk gezien, de onzekerheid 100 % gecorreleerd is. Op deze wijze kan met 49 runs het metamodel worden opgesteld. Dit betekent dat een trekking van een parameter in de Monte Carlo-simulatie geldt voor het hele grondwaterdomein. De trekkingen zijn daarom uit te drukken als vermenigvuldigingsfactoren. Als in de trekking een vermenigvuldigingsfactor voor de kD is geselecteerd van een 1.5 wordt de kD overal 1,5 keer zo groot als in het referentie grondwatermodel.

5.3 Monte-Carlo simulatie

Op basis van de respons surface en een Monte-Carlo simulatie kan de onzekerheid in stijghoogte, en daarmee de P95, worden bepaald. In een Monte-Carlo simulatie wordt een groot aantal trekkingen gedaan in de kansverdeling van de parameterwaarden; de trekkingen worden met de respons surface vertaald in een stijghoogte. Dat resulteert dan in een groot aantal verschillende stijghoogtes. Met de response surface uit de vorige paragraaf, de aangenomen parameterverdeling en een stukje software kan de Monte-Carlosimulatie uitgevoerd worden. Er is gekozen om op basis van een vuistregel een aantal simulaties te kiezen en deze keuze visueel te checken. De vuistregel stelt dat het aantal benodigde trekkingen gelijk is aan $400 \cdot 1/\text{faalkans}$. Hier zijn we op zoek naar het 95 percentiel van de stijghoogte. De faalkans is dan 5 % en zouden er 8.000 trekkingen nodig zijn. Dit is afgerond naar 10.000 trekkingen. Visueel zijn deze aannames gecontroleerd door de histogram van de getrokken parameters te vergelijken met de originele verdeling (zie Afbeelding 5.3). Bij 10.000 trekkingen volgt het histogram de ideale verdeling redelijk goed en loopt de software nog niet aan tegen geheugenproblemen.

Afbeelding 5.3 Bepaling aantal runs in Monte-Carlosimulatie. Linksboven is $N=100$, met de klok mee volgen $N=1.000$, 10.000 en 50.000



5.4 Berekende onzekerheden

Na het uitvoeren van de Monte-Carlosimulatie zijn er per model-gridcel 10.000 stijghoogtes berekend. Dat betekent dat per gridpunt, dat representatief is voor een gebied van 25 bij 25 m (625 m²), statistieken berekend kunnen worden van de stijghoogte. De volgende statistieken zijn beschouwd.

- gemiddelde;
- standaardafwijking;
- 50-percentiel;
- 95-percentiel.

De berekende onzekerheid is vervolgens gedefinieerd als het verschil tussen de p50 en de p95.

6

RESULTATEN MONTE CARLO-SIMULATIE

In dit hoofdstuk wordt de berekende kansverdeling van de stijghoogte als gevolg van de aangenomen parameteronzekerheid gepresenteerd in de eerste paragraaf. Een paar opvallende resultaten worden in de volgende paragraaf besproken. In paragraaf 6.3 wordt tot slot een vergelijking gemaakt tussen deze resultaten en BOI aannames over de onzekerheid van de stijghoogte.

In dit hoofdstuk wordt alleen de berekende stijghoogte verdeling, gegeven een aangenomen parameteronzekerheid, besproken. De interpretatie van de resultaten en de betekenis voor de sterkte modellen worden in hoofdstuk 8 besproken. In dat hoofdstuk wordt ook een karakteristieke waarde van de stijghoogte voor de sterktemodellen vastgesteld.

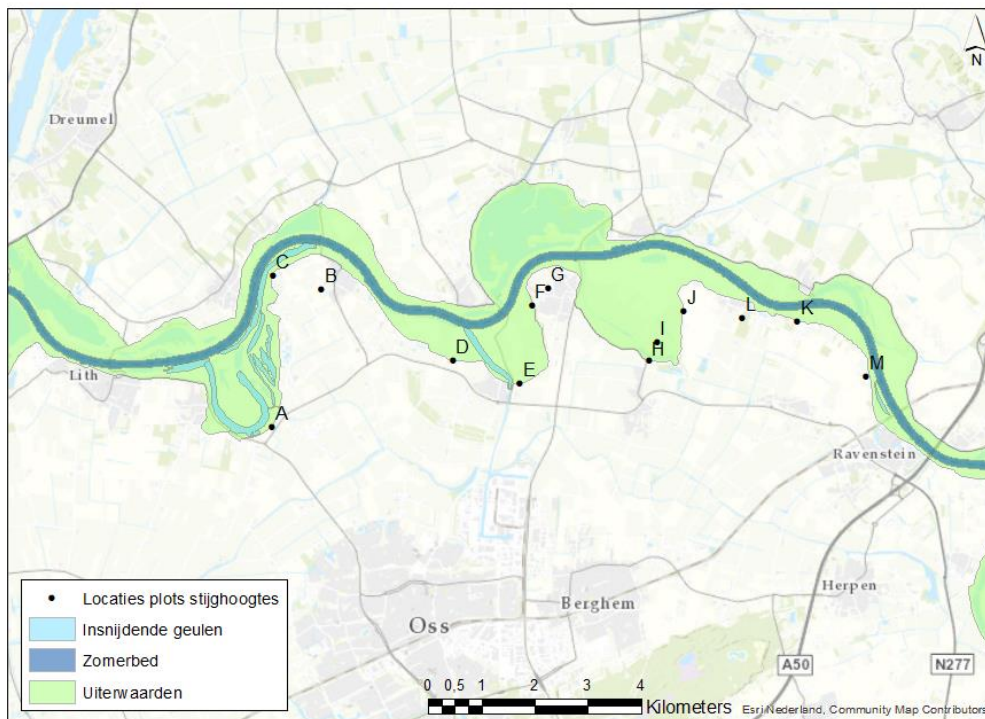
6.1 Berekende kansverdelingen van de stijghoogtes

In deze paragraaf worden de berekende stijghoogte kansverdeling gepresenteerd voor een aantal geselecteerde punten. De berekende onzekerheid ($p_{95} - p_{50}$) is vlak-dekkend in kaart gebracht om de ruimtelijke samenhang te kunnen zien. Specifiek langs de dijk is de onzekerheid ook in beeld gebracht, omdat dit een belangrijk punt is voor de vertaling van deze uitkomsten naar invoer voor de sterkte modellen.

6.1.1 Berekende verdelingsfuncties van de stijghoogte

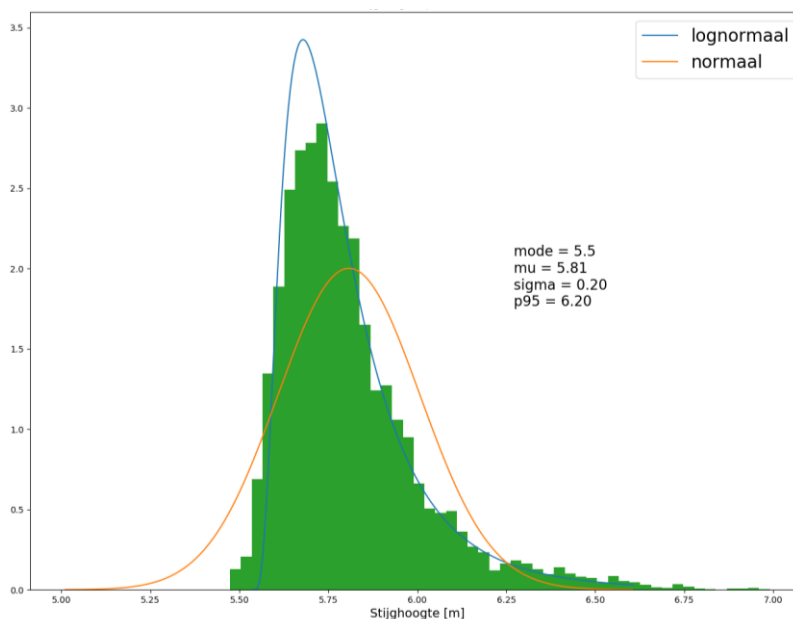
We hebben vlak-dekkend de verdelingsfuncties van de stijghoogtes op het traject Ravenstein-Lith berekend. Voor een aantal locaties is deze functie in de vorm van een histogram weergegeven. In Afbeelding 6.1 is weergegeven voor welke locaties een verdelingsfunctie zichtbaar is gemaakt. In bijlage II staan alle berekende verdelingsfuncties van de stijghoogte. In dit hoofdstuk worden de verdelingsfuncties van de stijghoogte van enkele locaties toegelicht.

Afbeelding 6.1 Locaties waarvoor de verdelingsfunctie van de stijghoogte in grafiekvorm is weergegeven



Afbeelding 6.2 is de grafiek voor de locatie G. In het tekstvlak van de afbeelding staan het gemiddelde, de standaardafwijking, de verschuiving van de lognormaal ten opzichte van de x-as¹ en het 95-percentiel die bij de verdelingsfunctie horen. De verdelingsfunctie is als histogram geplot. Met het gemiddelde, de standaardafwijking en verschuiving zijn de normale en lognormale verdelingen die bij dit histogram horen geplot. In dit geval lijkt de lognormale verdeling de stijghoogte beter te beschrijven dan de normale verdeling. En is er een vrij grote staart van hoge stijghoogtes.

Afbeelding 6.2 Het histogram is de verdelingsfunctie van de stijghoogte op locatie L. Mu is het bijbehorende gemiddelde, sigma de standaardafwijking, mode de verschuiving van de lognormaal t.o.v. de x-as en p95 het 95-percentiel. De oranje grafiek is de normale fit en de blauwe de lognormale fit

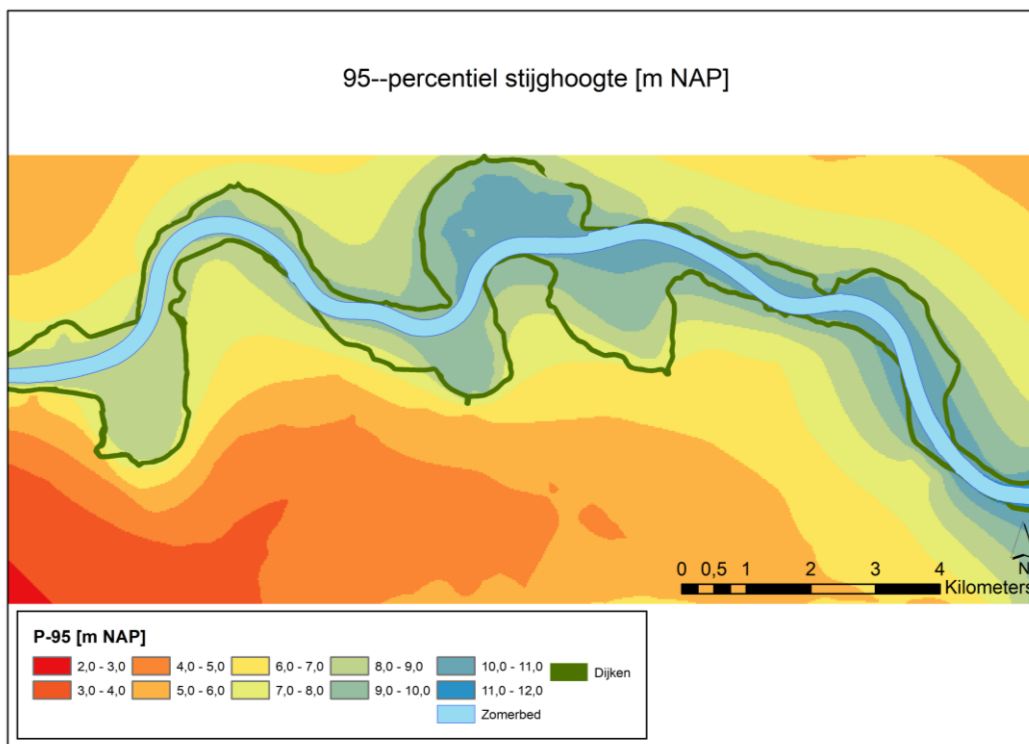


¹ Dit is de minimale waarde van de stijghoogte die voorkomt in de verdelingsfunctie. Normaal gesproken begint de lognormaal op nul, in Afbeelding 6.2 begint deze pas op 5,2

6.1.2 Vlak-dekkende resultaten

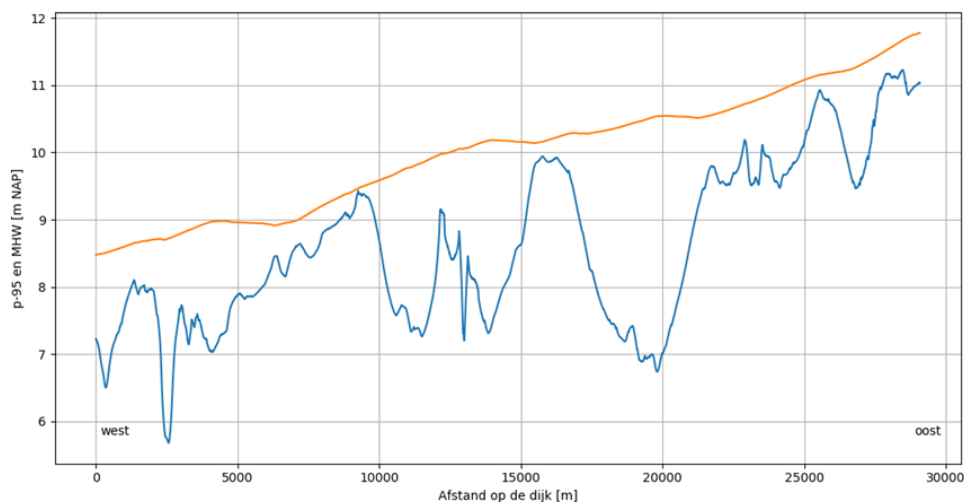
Per gridpunt zijn een aantal statistieken berekend, zoals de P50, standaarddeviatie en de P95. Onderstaand is de berekende P95 van de stijghoogte weergegeven. Het is te zien dat de stijghoogte langs het zomerbed van de rivier het grootst is. Verder neemt de stijghoogte af in benedenstroomse (westwaartse) richting.

Afbeelding 6.3 De berekende P95 van de stijghoogte



Het is te zien dan de grootste stijghoogtes optreden langs het zomerbed van de rivier. Op grotere afstand neemt de stijghoogte af. Langs de dijk kan de stijghoogte dan ook sterk wisselen, mede afhankelijk van de ligging van de dijk ten opzichte van het zomerbed. Uit de grafiek is al af te lezen dat de respons van de stijghoogte op het hoogwater langs de dijk ook sterk kan verschillen.

Afbeelding 6.4 Berekende stijghoogte (P95) onder de dijk (blauw) met de hoogwaterstand (oranje) langs het dijktraject van Lith (west) tot Ravenstein (oost)



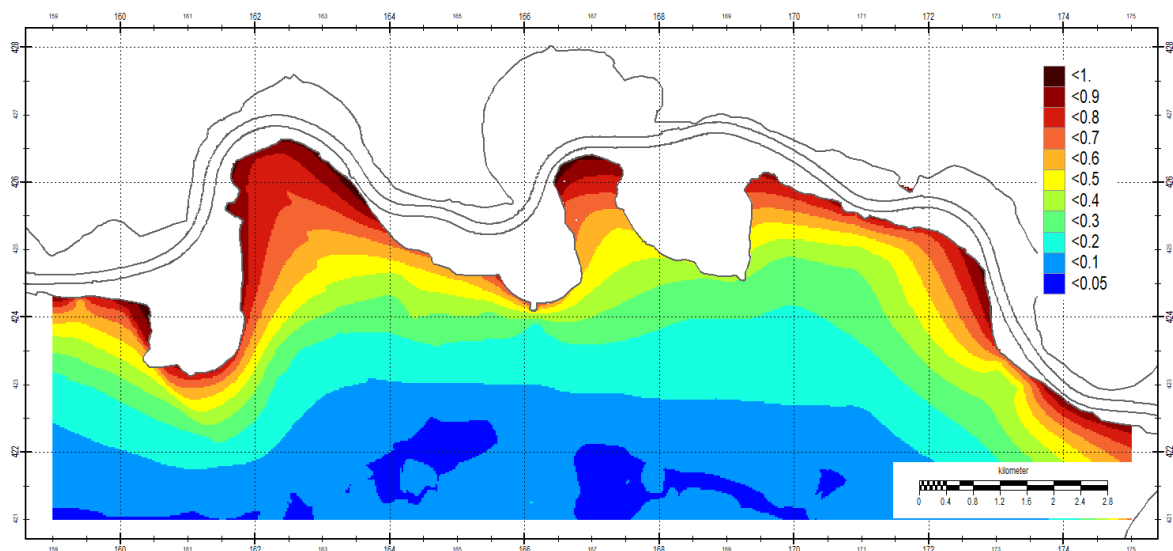
De responsfactor zelf is ook vlak-dekkend bepaald, waarbij de volgende vergelijking is gebruikt.

$$r = \frac{\varphi_{2,p95} - \varphi_1}{HW_2 - HW_1}$$

- r = hydrologische responsfactor
- φ_1 = begin stijghoogte tijdens de hoogwatergolf
- $\varphi_{2,p95}$ = karakteristieke waarde (p95) van de maximale stijghoogte tijdens de hoogwatergolf op
- HW_1 = peil op tijdstap 0
- HW_2 = maximale rivierpeil tijdens het hoogwater

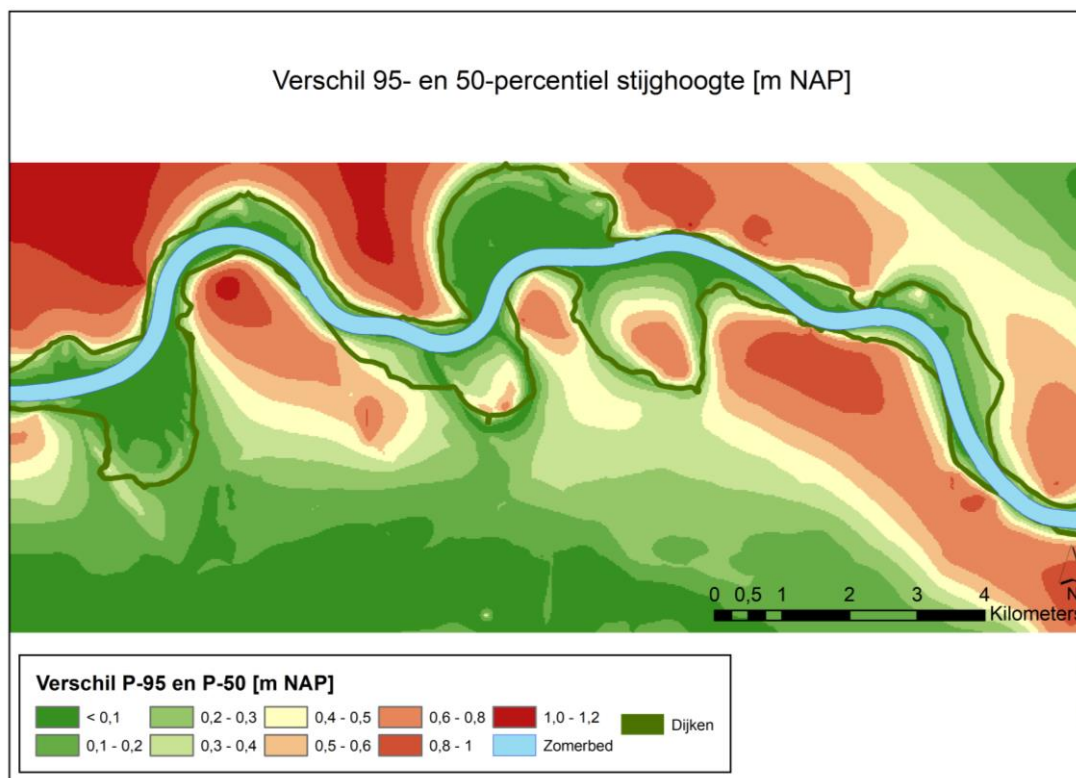
In onderstaande Afbeelding is de ruimtelijke verbreiding van de responsfactor weergegeven berekend voor de karakteristiek waarden van de stijghoogte. De responsfactor voor de p95 van de stijghoogte ter plekke van de dijk ligt typisch tussen de 0.5 en 0.9, maar zowel naar boven als beneden zijn uitschieters mogelijk. Waar het zomerbed of een nevengeul vlak aan de dijk ligt worden hoge responses berekend, op plekken met grote voorlanden met relatief veel klei worden kleine responsfactoren berekend.

Afbeelding 6.5 Berekende responsfactor voor p95 van de stijghoogte



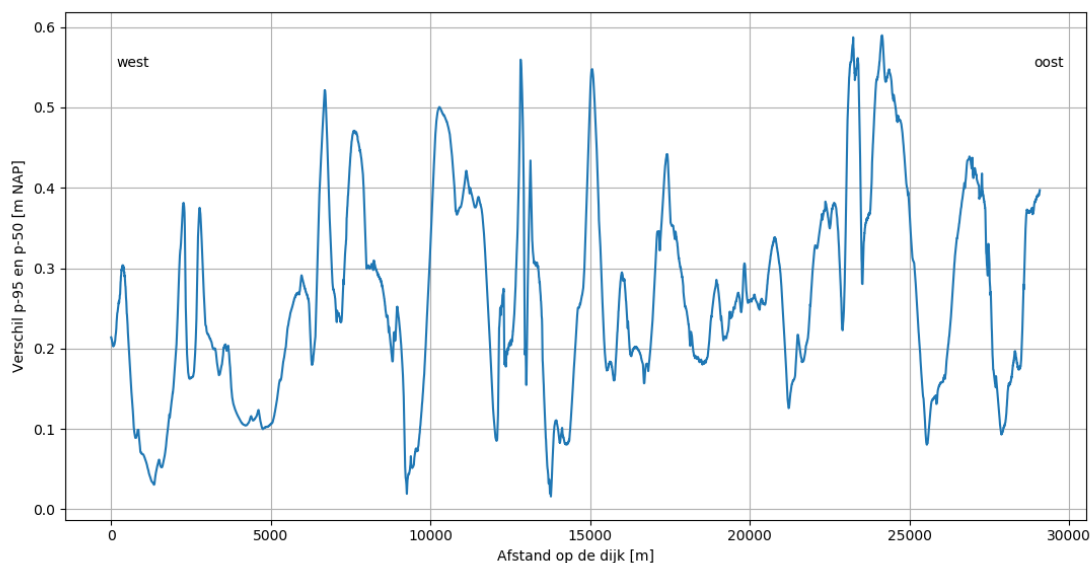
De P50 geeft de mediaan van de stijghoogte weer. De verschillen tussen de mediaan en het rekenkundig gemiddelde is in orde grootte van enkele centimeters. De P50 is niet apart weergegeven omdat de patronen erg lijken op de die van de P95. Door het verschil tussen de P95 en de P50 te berekenen ontstaat een ruimtelijk beeld van de onzekerheid in de berekende stijghoogte (Afbeelding 6.6). De P95-P50 varieert van minder dan 5 cm onder de rivier tot meer dan 1 m op sommige plekken binnendijks. In het algemeen is de P95-P50, conform verwachting, onder het zomerbed van de rivier heel klein. De stijghoogte is hier bijna gelijk aan het rivierpeil. Op grote afstand van de rivier hebben de parameters kD en C weinig invloed op de berekende stijghoogte. De vele waterlopen bepalen hier in hoge mate de stijghoogte. Ook hier is de onzekerheid (P95-P50) in de berekende stijghoogte gering. In een zone van ca 0.5-2 km is de onzekerheid (P95-P50) het grootst. In deze zone heeft de hoogwatergolf relatief veel invloed op de stijghoogte hetgeen logisch is gezien de spreidingslengte van circa 500 m in het gebied. De parameters C en kD hebben beide invloed op de spreidingslengte bepalen daarmee ook voor een groot deel de onzekerheid in de stijghoogteverdeling. Toch is het niet zo dat een grote spreidingslengte automatisch zorgt voor hogere stijghoogtes langs de dijk, daarover meer in de volgende paragraaf.

Afbeelding 6.6 Ruimtelijke weergave van de onzekerheid (P95-P50) in de berekenden stijghoogte, berekend als P95 minus P50



Ter plekke van de dijk is de onzekerheid (P95-P50) gemiddeld in orde grootte 30 cm, maar deze varieert sterk (zie Afbeelding 6.7). Waar de dijk vlak bij het (in WVP1 insnijdende) zomerbed van de rivier ligt is de onzekerheid (P95-P50) klein, de stijghoogte is hier bijna gelijk aan het rivierpeil. Op plekken waar de dijk verder van de rivier of nevengeul af ligt is de stijghoogte lager dan de rivierwaterstand en is ook de onzekerheid (P95-P50) groter. De berekende onzekerheid loopt op tot bijna 80 cm. Hoe de onzekerheid oploopt hangt af van het geohydrologische systeem.

Afbeelding 6.7 Berekende onzekerheid (P95-P50) in stijghoogte ter plekke van de dijk voor het dijktraject van Lith (west) tot Ravenstein (oost)

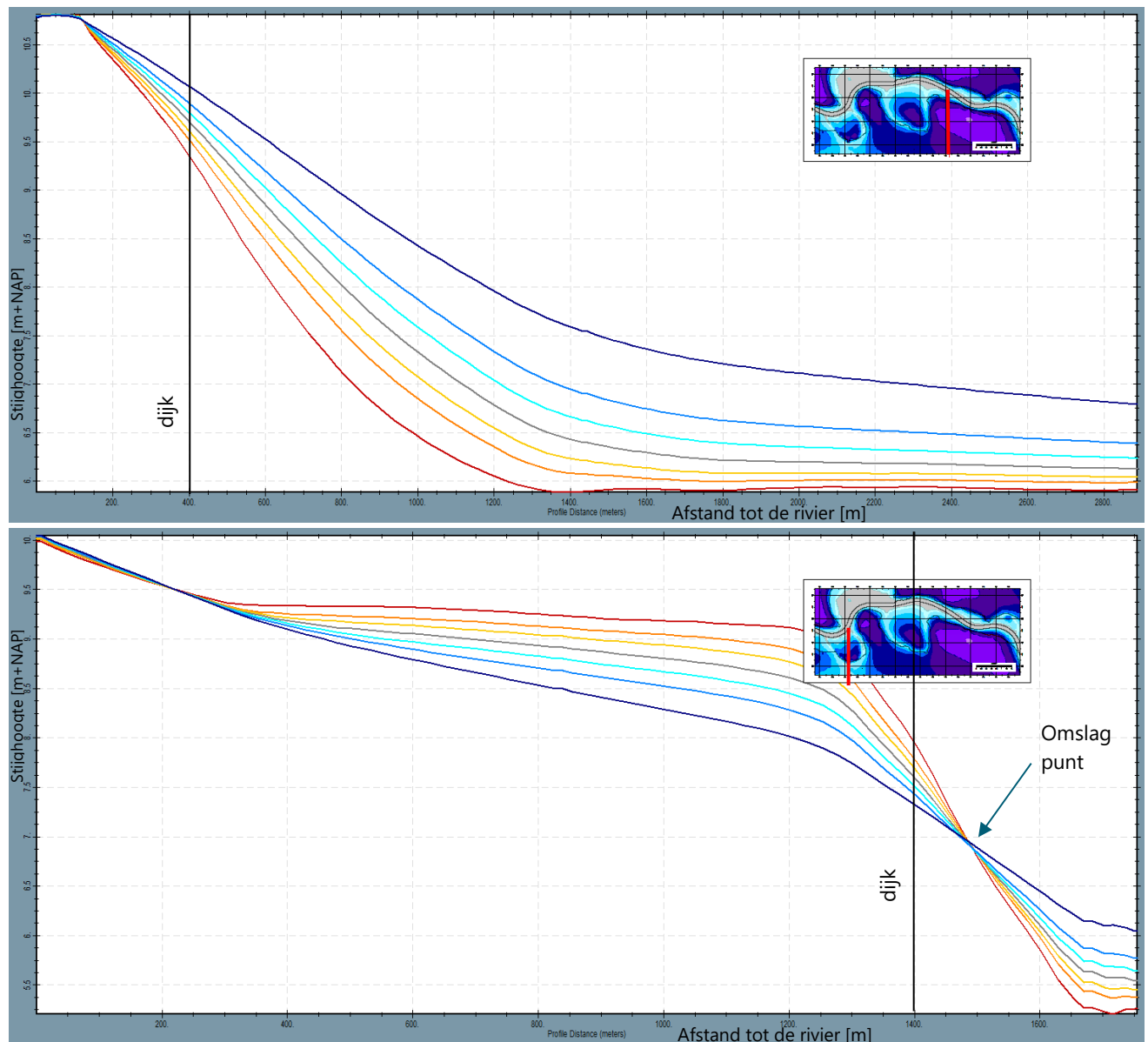


6.2 Enkele opvallende resultaten

6.2.1 Effect van kD op stijghoogte

De grootte van de kD heeft effect op de berekende stijghoogte. Vaak is de aanname dat een ondergrond met een hoge kD ervoor zorgt dat de invloed van een hoogwater op de stijghoogte toeneemt. Een hoge kD zorgt dan voor een hoge stijghoogte. Bij analyse van de verschillende parameterisaties van het grondwatermodel komt naar voren dat deze relatie niet altijd geldt. Er zijn ook situaties waar het tegengestelde waar is. In Afbeelding 6.8 worden beide situaties toegelicht. Aan de linkerkant van de doorsnede ligt de Maas, aan de rechterkant het achterland. Blauwe lijnen zijn uitkomsten van het model met steeds hogere kD -waarden, in rood de uitkomsten bij steeds lagere kD -waarden. Bovenste afbeelding bevat de modelresultaten voor een plek waar een hogere kD zorgt voor hogere grondwaterstanden rondom de dijk. Te zien is dat een groot deel van de onzekerheid op grotere afstand van de dijk ligt. De onderste afbeelding bevat een situatie waar een hogere kD juist een lagere stijghoogte veroorzaakt langs de dijk. De meeste onzekerheid ligt hier in het voorland. Ook is te zien dat op enige afstand van de dijk het systeem 'omslaait' waarna een hogere kD weer leidt tot hogere stijghoogten. Rondom het omslagpunt wordt de stijghoogte op eenzelfde niveau berekend en is de onzekerheid in de stijghoogte kleiner dan buiten het omslagpunt.

Afbeelding 6.8 Dwarsdoorsneden van de maximaal berekende stijghoogte (m+NAP) tijdens een hoogwater

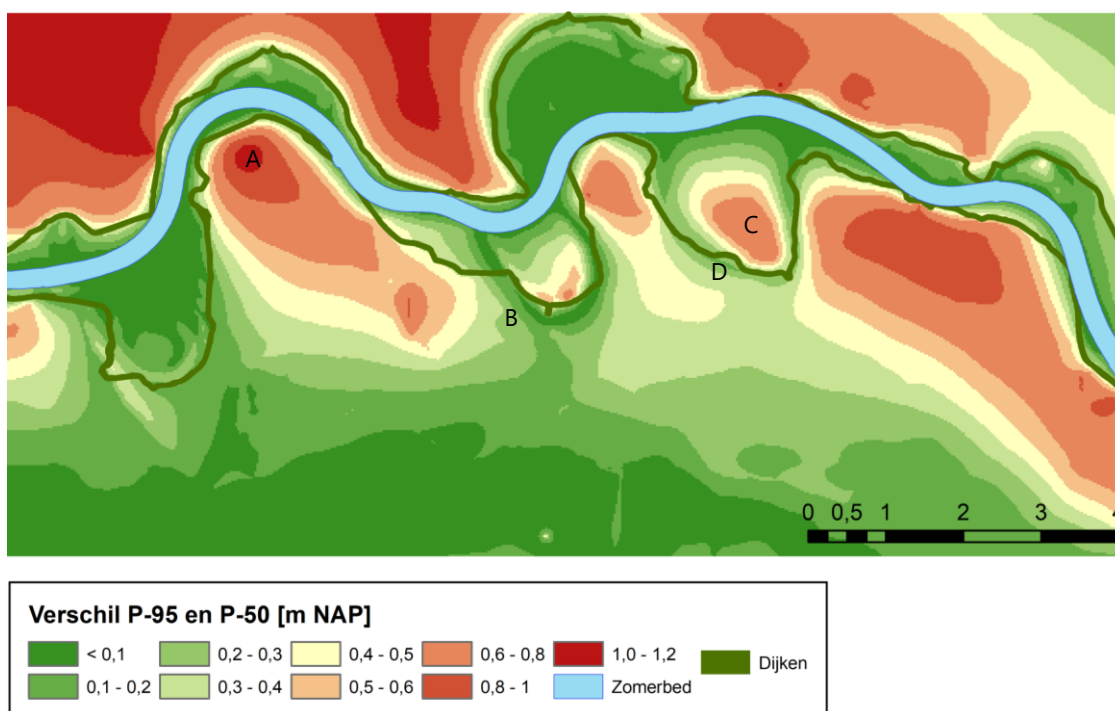


Een verklaring voor het fenomeen uit het onderste deel van de afbeelding kan de volgende zijn. Een hoge kD zorgt er niet alleen voor de invloed van de rivier op de omliggende stijghoogtes groter wordt, maar ook dat de invloed van het achterland op het voorland groter wordt. Als het voorland als een 'meander' in het achterland uitstulpt, zorgen radiale effecten nog voor extra invloed van het achterland op de stijghoogten. In sommige gevallen resulteert dat dus (lokaal) in lagere stijghoogtes rondom de dijk. Op grotere afstand van de dijk blijft gelden dat een hogere kD leidt tot meer invloed van de rivier. Er is dan een omslagpunt tussen het lokale en regionale systeem. Rond het omslagpunt is de stijghoogte vrij stabiel (weinig berekende onzekerheid) ondanks de grote variatie in parameterwaarden

6.2.2 Ruimtelijke variatie onzekerheid

Het is duidelijk dat de onzekerheid ruimtelijk niet uniform is. In de binnenbochten van de dijk-'meanders' is de onzekerheid in de berekende stijghoogten aanzienlijk groter (A) dan in de buitenbochten (B). 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 meanderende uiterwaarden de meeste onzekerheid vaak buitendijks (C), 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 (D) dan in de omgeving. Dit wordt enerzijds veroorzaakt omdat dijken zich vaak bevinden rondom de eerder beschreven omslagpunten en omdat 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.

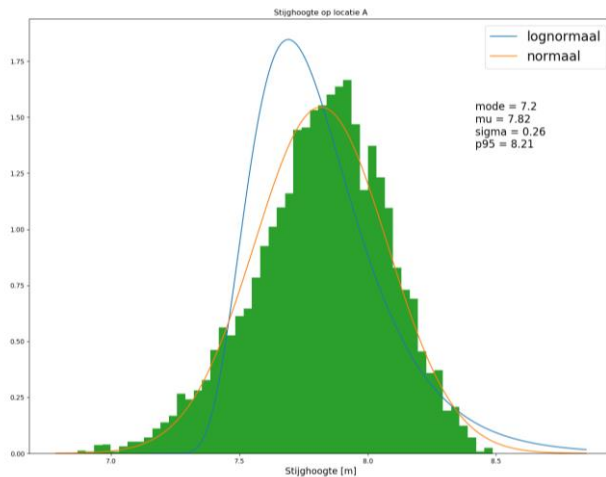
Afbeelding 6.9 Ruimtelijke variatie in berekende onzekerheden op verschillende plekken



6.2.3 Verschillende verdelingsfuncties

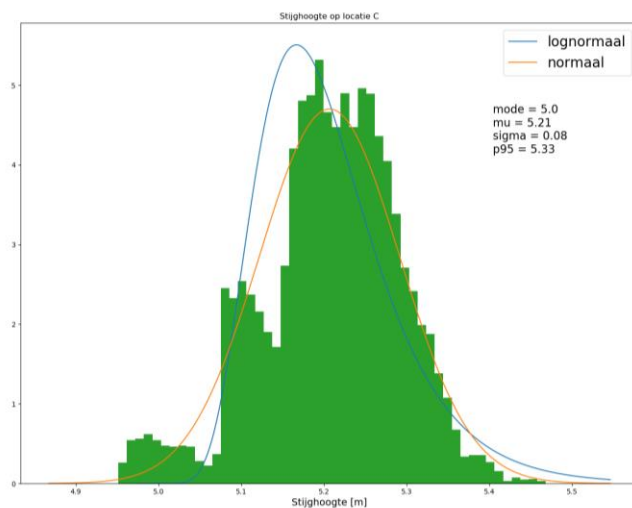
Uit bijlage II blijkt dat de verdelingsfuncties van de stijghoogte vaak lijken op de bijbehorende lognormale verdeling. Op een aantal locaties zoals locatie A (zie Afbeelding 6.10) is de verdeling eerder normaal dan lognormaal. De kans op hogere stijghoogtes neemt hier relatief snel af boven bepaalde waarden.

Afbeelding 6.10 Verdelingsfunctie van de stijghoogte op locatie A



Daarnaast hebben sommige verdelingsfuncties van de stijghoogte meer dan één piek. Op locatie C zijn extra pieken bij de minimale waarden voor de stijghoogte aanwezig. Er is (nog) geen eenduidige verklaring voor deze verschillende pieken in de stijghoogteverdeling. De aangenomen spreiding van kD en C zijn continu. Wellicht dat het metamodel dat is opgesteld voor deze locatie toch te grof is of dat het hydrologisch systeem meerdere pieken mogelijk maakt.

Afbeelding 6.11 Verdelingsfunctie van de stijghoogte op locatie C



6.3 Vergelijk met BOI-aannames stijghoogte onzekerheid

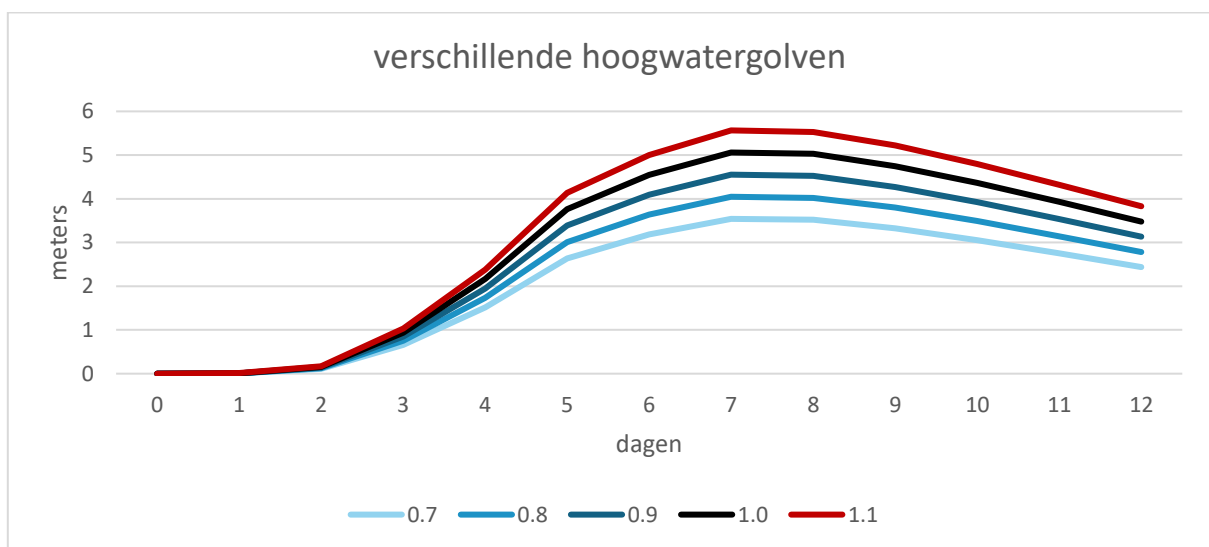
Bij het BOI-instrumentarium zijn aannames gedaan voor stijghoogte onzekerheden. Zo wordt de stijghoogte respons constant verondersteld en wordt de onzekerheid in stijghoogte proportioneel verondersteld met de stijghoogte response. In deze paragraaf worden de eerste bevindingen van deze studie vertaald naar een respons en een variatiecoëfficiënt, zodat ze makkelijk vergeleken kunnen worden met de aannames van het BOI. De vergelijking is dus bedoeld om op hoofdlijnen de BOI aannames te kunnen vergelijken.

6.3.1 Response is afhankelijk van het hoogwater

Noot: De in deze paragraaf beschreven analyses zijn -vanuit planningsoverwegingen- gedaan met een conceptversie van het grondwaterstromingsmodel en dus niet met het referentie model dat in deze projectfase is opgeleverd en gedocumenteerd. De verwachting is dat de resultaten met de referentie versie van het grondwaterstromingsmodel regionaal gezien vergelijkbaar zullen zijn, lokaal zullen de uitkomsten kunnen afwijken.

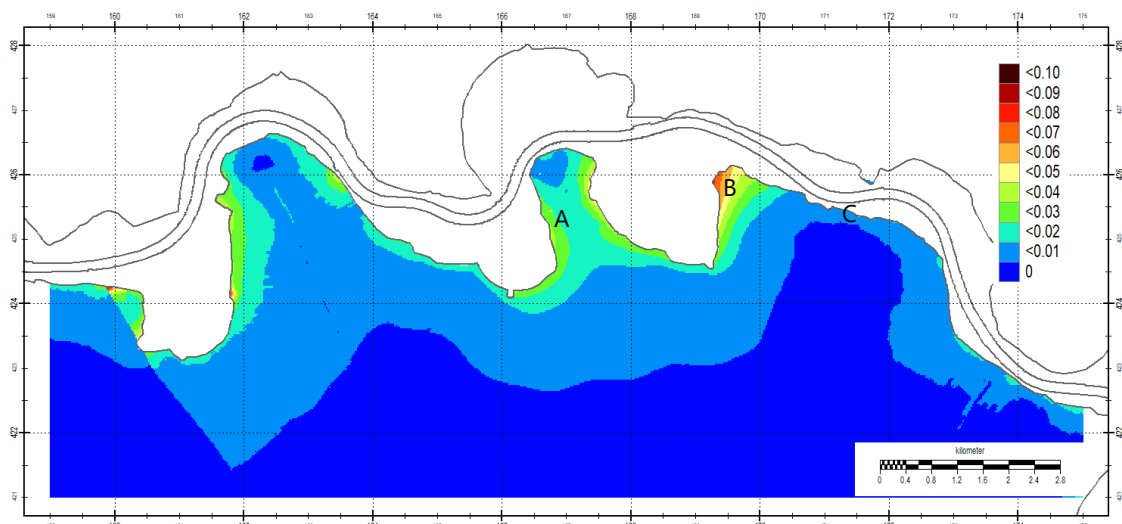
In het BOI is aangenomen dat de response factor constant is tijdens een hoogwatergolf. Om deze veronderstelling te toetsen zijn 5 hoogwatergolven doorgerekend. Hiervoor is het verloop van de representatieve golf met de normwaterstand aangepast met een factor (0.7 tot 1.1). In onderstaande Afbeelding staan de doorgerekende golven weergegeven.

Afbeelding 6.12 Verschillende hoogwatergolven, waarbij de golf met de norm waterstand (1.0) is aangepast met een factor



Voor elke golf is een hydrologische stijghoogte respons berekend. De stijghoogte respons tijdens een lage hoogwatergolf is bijna altijd kleiner dan de respons tijdens een hoge watergolf. Dat komt door niet-lineariteiten in het grondwatersysteem, zoals het moment waarop het voorland overstroomt. Het verschil in de berekende responsfactor tussen de laagste (0.7) en hoogste (1.1) doorgerekende hoogwatergolf is weergegeven in onderstaande Afbeelding.

Afbeelding 6.13 Verschil in berekende stijghoogte response bij een lage (0.7) en een hoge (1.1) golf



Het is te zien dat de responsfactor niet (helemaal) constant is en dat de verschillen ruimtelijk gezien ook niet constant zijn. Voor een drietal in de afbeelding aangegeven locaties zijn de verschillende responsfactoren per hoogwatergolf weergegeven in onderstaande tabel. Op locatie A en B (met een relatief groot en variabel voorland) is een toename van de respons te zien, en op locatie C (met een klein voorland) is de respons voor de verschillende golven gelijk.

Tabel 6.1 Responsfactor voor 3 locaties en 5 verschillende hoogwatergolven. (Locaties zie Afbeelding 6.13)

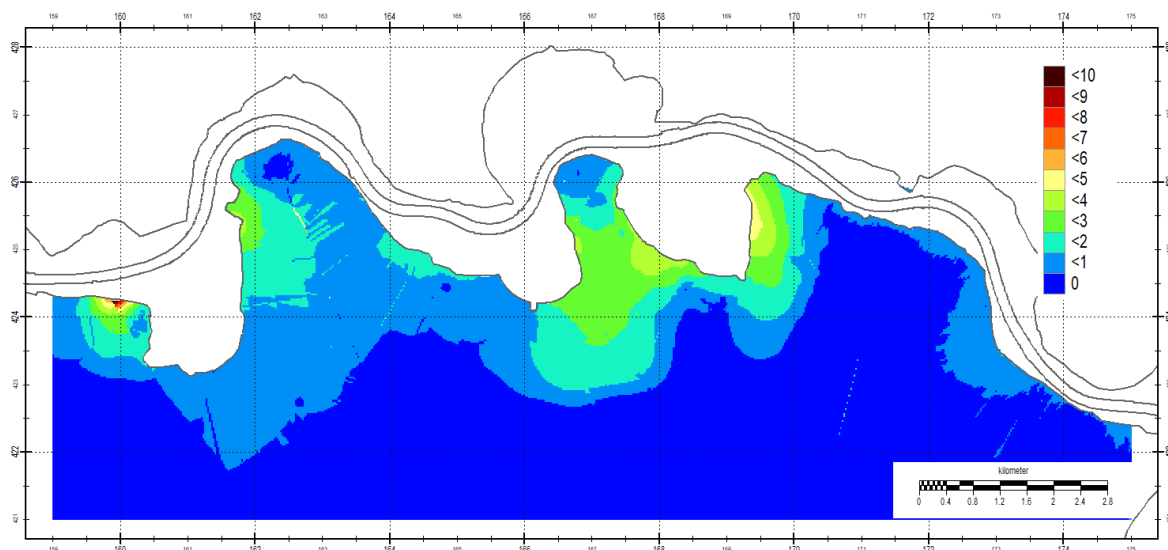
	Responsfactor stijghoogte		
	Locatie A	Locatie B	Locatie C
HW golf 0.7	0.358	0.514	0.542
HW golf 0.8	0.371	0.540	0.546
HW golf 0.9	0.382	0.556	0.546
HW golf 1.0	0.392	0.570	0.546
HW golf 1.1	0.395	0.579	0.546

Er is ook gekeken naar de procentuele verandering van de respons rondom het maatgevend hoogwater. Deze verandering is als volgt berekend.

$$\partial r = \frac{r_{1.1} - r_{0.9}}{r_{1.0}}$$

- ∂r = Procentuele verandering in de response rond een MHW-golf
- $r_{1.1}$ = stijghoogte response bij een golf die 1.1 x zo groot is als de standaard MHW-golf
- $r_{1.0}$ = stijghoogte response bij een standaard MHW-golf
- $r_{0.9}$ = stijghoogte response bij een golf die 0.9 x zo groot is als de standaard MHW-golf.

Afbeelding 6.14 Berekende procentuele verandering in de stijghoogte response voor het interessegebied



De procentuele verandering in de respons voor een norm waterstand is vaak kleiner van 2% per meter buitenwaterstand verandering (zie Afbeelding 6.14). Er zijn echter uitzonderingen waar de respons tot wel 5% kan toenemen. Dit heeft waarschijnlijk met maaiveldhoogten in het voorland te maken, maar dat is niet verder onderzocht. Bij Lith in het westen van het model zijn percentages van 10% te vinden, dat berust op een onvolkomenheid in het model, omdat deze specifieke analyse is gedaan met een oudere modelversie dan uiteindelijk is opgeleverd.

Conclusie

Hoe hoger het hoogwater, hoe groter de stijghoogte respons. Naar mate de golf hogere wordt vlakt de toename in stijghoogterespons verder af. Rondom het maatgevend hoogwater neemt de stijghoogte respons met gemiddeld 1 tot 2% toe als de hoogwatergolf een meter toeneemt. Op sommige plekken kan deze toename groter zijn, circa 5% tot 10%. Als de respons wordt bepaald bij de WBN en met de bijbehorende golf dan wordt een hoge (en juiste) responsfactor gebruikt. Bij ijking van een model met een gemeten responsfactor bij een kleine(re) hoogwatergolf is het echter belangrijk te realiseren dat een grotere golf in combinatie met veel voorland tot een hogere responsfactor kan leiden.

6.3.2 Variatiecoëfficiënt

In het BOI wordt de onzekerheid vaak uitgedrukt als een variatiecoëfficiënt (VC) op een stijghoogte respons. Zo ook de onzekerheid in de stijghoogte. Op basis van de hydrologische response van de stijghoogte op het hoogwater is de variatiecoëfficiënt (VC) berekend op basis van de modeluitkomsten.

$$VC = \frac{\sigma}{|\varphi_{2,p50} - \varphi_1|}$$

VC = variatiecoëfficiënt van de respons [%]

σ = standaarddeviatie [m]

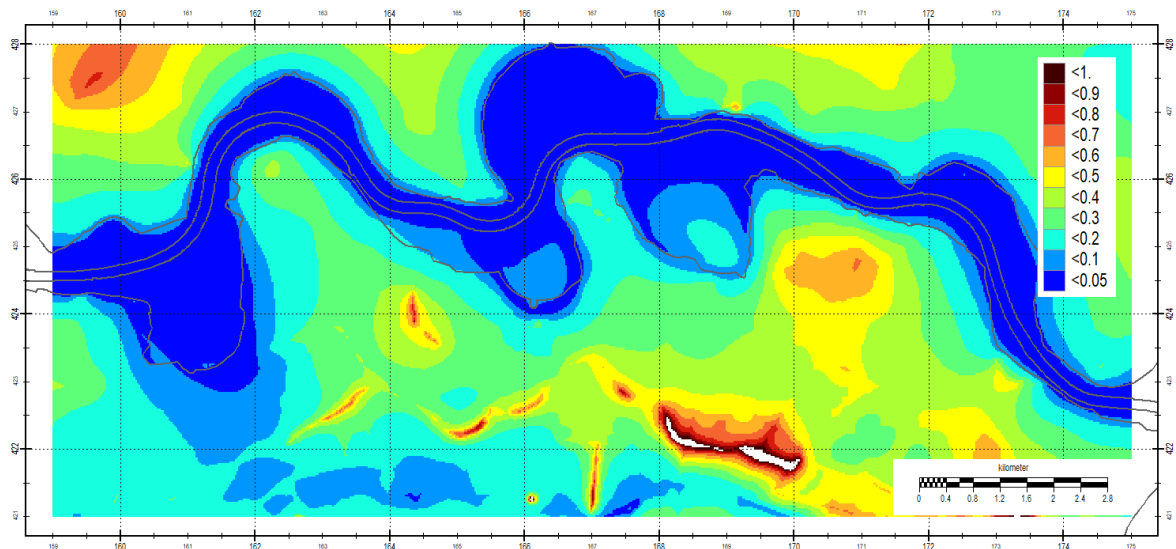
φ_1 = stijghoogte voor aanvang van de hoogwatergolf [m +NAP]

$\varphi_{2,p50}$ = verwachtingswaarde (p50) van de maximale stijghoogte tijdens de hoogwatergolf [m +NAP]

Deze is ruimtelijk in onderstaande afbeelding weergegeven. In het zomerbed is de VC klein. Rond de dijk neemt de VC toe tot maximaal 0.12. Verder binnendijs neemt de VC toe tot 0.5. Aangezien de meeste

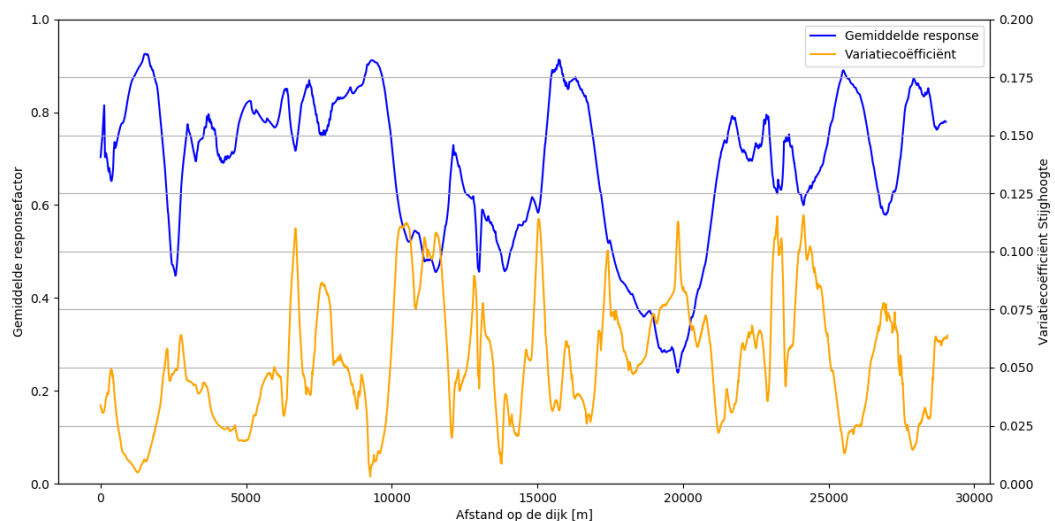
onzekerheid binnendijs ligt en de respons ($\varphi_2 - \varphi_1$) daar relatief klein is zijn dit logische patronen. In het BOI wordt voor de stijghoogte een CV van 0.1 gehanteerd en constant verondersteld.

Afbeelding 6.15 Berekende variatiecoëfficiënt voor het interessegebied



Langs de dijk is de variatiecoëfficiënt en de responsfactor voor de gemiddelde situatie (p50) bepaald. De VC heeft een maximum van 0.12. Gemiddeld wordt een waarde van 0.06 gevonden. Op plekken met een hele hoge respons (> 0.9) is de VC vaak klein (< 0.03). Dit is ook logisch omdat deze plekken min of meer een stijghoogte hebben gelijk aan de rivierwaterstand. De onzekerheid voor deze gebieden is ook klein. Voor andere gebieden is de relatie minder duidelijk, maar gebieden met een lage respons lijken grotere VC's te hebben dan gemiddeld.

Afbeelding 6.16 Berekende variatiecoëfficiënt (oranje) en responsfactor (blauw) langs de dijk van west (links) naar oost (rechts)



In het BOI wordt de VC uitgerekend ten opzichte van maaiveld. Vanuit dijkveiligheid een logisch aangrijpingspunt omdat het iets zegt over de overdruk. Vanuit een impuls respons benadering is dat minder

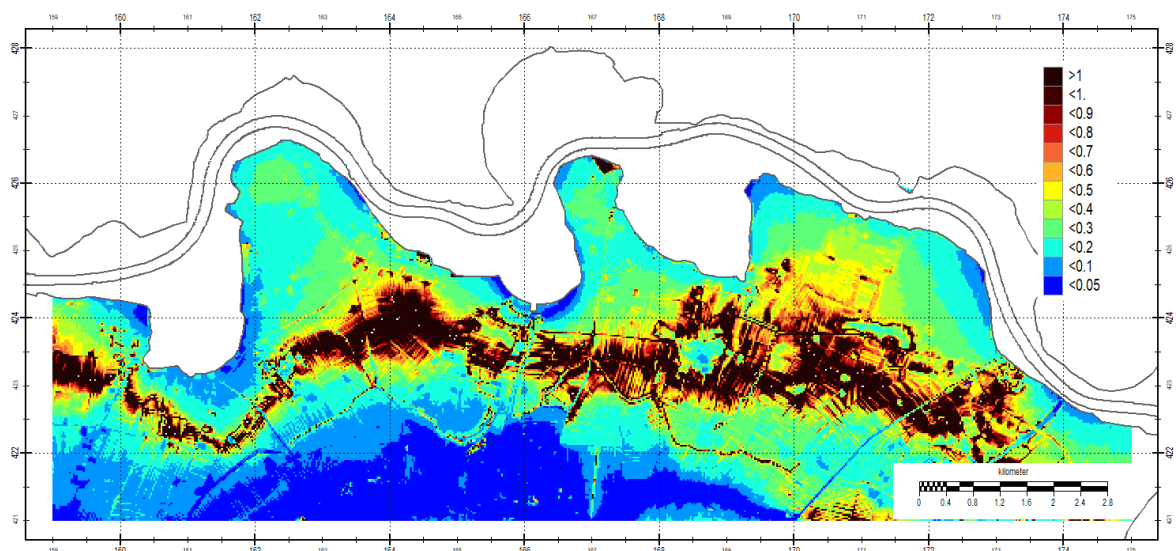
logisch, omdat de startstijghoogte aan het begin van de impuls lang niet altijd gelijk zal zijn aan het maaiveld.

$$VC_{BOI} = \frac{\sigma}{|\varphi_2 - mv|}$$

- VC_{BOI} = variatiecoëfficiënt op de respons zoals gebruikt in het BOI [%]
- σ = standaarddeviatie [m]
- mv = maaiveld [m+NAP]
- φ_2 = maximale stijghoogte tijdens de hoogwatergolf [m+NAP]

In onderstaande Afbeelding is de VC_{BOI} weergegeven. Omdat er nu gebruikt wordt gemaakt van het maaiveld als referentie punt is het mogelijk om VC's te berekenen die groter zijn dan 1. De VC langs de dijk varieert nu tussen de meestal tussen de 0 en 0.15 maar er zijn ook uitschieters naar groter dan 1. Ook zijn er plekken waar het maaiveld hoger is dan de stijghoogte en de VC dus eigenlijk niet zoveel betekenis heeft. Zeker op plekken waar de maximale stijghoogte maar net boven of onder het maaiveld ligt kan de VC snel relatief groot worden.

Afbeelding 6.17 Berekende 'BOI' - variatiecoëfficiënt voor het interessegebied



Conclusie

De VC rondom de dijk op basis van de hydrologische respons is niet constant, maar varieert voor het overgrote deel van het dijktraject tussen de 0 en 0.1. De BOI-inschatting van 0.1 lijkt voor dit gebied een goede veilige maat voor het inschatten van de onzekerheid rondom stijghoogtes. Gemiddeld is de VC op basis van de hydrologische respons langs de dijk ongeveer 0.05. Hierbij wordt opgemerkt de VC hier is berekend als gevolg van alleen parameteronzekerheid, terwijl de BOI-VC van 0.1 gaat over de totale onzekerheid in de stijghoogte. Wanneer de VC berekend wordt in een maat ten opzichte maaiveld, zoals gebruikelijk binnen de BOI-systematiek, dan is ruimtelijke spreiding in de VC groter en is de respons relatief ruimtelijk gezien minder eenduidig. Het is daarom te overwegen ook in het BOI gebruik te maken van VC's op basis van een puur hydrologische respons.

INTERPRETATIE

7.1 Inleiding

In het vorige hoofdstuk is een onzekerheid van de stijghoogte in beeld gebracht gegeven een verdeling van kD en C . In dit hoofdstuk worden de resultaten verder geïnterpreteerd en wordt bekeken wat er nog moet gebeuren om ze te kunnen toepassen in de sterkte sommen. Daarvoor is gekeken naar welke bronnen van onzekerheid nog niet zijn meegenomen en wat modelvergelijkingen met metingen kunnen leren over te verwachten onzekerheden. In dit hoofdstuk is ook een grootdeel van de feedback uit de expert sessie van januari 2020 verwerkt.

7.2 Betekenis van gehanteerde vereenvoudigen

Er is een methode gezocht om de stijghoogte onzekerheid gegeven een geologie in beeld te brengen. Daarvoor zijn de belangrijkste parameters vlak-dekkend gevarieerd. Het is duidelijk dat hiermee een eerste inschatting wordt gegeven van de te verwachten onzekerheden, maar dat nog niet alle onzekerheden in beeld zijn gebracht. Voor een aantal keuzes is nader beschouwd wat de effecten op de onzekerheid zijn.

Geconstrueerde stijghoogtes

De p_{95} van de stijghoogte ziet er ruimtelijk samenhangend uit. Het beschrijft echter een stijghoogte verloop dat in de werkelijkheid nooit zal voorkomen. De p_{95} van de stijghoogte is een constructie, ze is samengesteld uit stijghoogten berekend op verschillende tijdstippen en door verschillende scenario's als onafhankelijk met elkaar te combineren. In werkelijkheid zal er meer samenhang zijn en zullen sommige scenario's niet simultaan waar kunnen zijn.

Geologische fenomenen (scenario analyses)

Er is een analyse uitgevoerd (door Deltares) die aangeeft dat de kans op een zandlichaam in de deklaag in dit studie gebied klein is, of in iedergeval minder dan 1 meter dik. Er is wel een kans op een tussen zandlaag, een plek waar de deklaag dun is. In het geohydrologisch model zijn de keuzes met betrekking tot de deklaag zo gemaakt dat deze eerder te dun dan te dik wordt geïnterpreteerd. Er moet nog worden beschouwd hoe de analyse van Deltares zich verhoudt tot het huidige hydrologische model en aanvullende scenario analyses nog gemaakt moeten worden. Omdat er geen zandbanen worden verwacht zal het effect van deze scenario analyses op de berekende stijghoogtes relatief gering zijn.

Ruimtelijke correlatie van variatie in parameterverdeling

De parameterwaarden van de kD en C hebben een aangenomen verdeling, en fluctuatie in de tijd en ruimte. In de analyse in dit rapport is de fluctuatie in tijd en ruimte vereenvoudigd en constant verondersteld. Dit heeft consequenties voor de berekende stijghoogte functies en de daarvan afgeleide P_{95} van de stijghoogte.

- Het is aannemelijk dat de onzekerheid in de parameterverdeling ruimtelijk fluctueert. Het BOI beschrijft correlatie lengtes van grondwaterparameters tussen de 300 - 1.500 m (zie bijlage III). Het effect van deze ruimtelijke heterogeniteit op de berekende stijghoogte functies en de daarvan afgeleide P_{95} ten opzichte van de aangenomen uniformiteit is niet bekend. Wel kan worden beredeneerd dat bij een heterogene ruimtelijke verdeling van de parameteronzekerheid in kD en C in het studiegebied, de kD en C gemiddeld over het hele studie gebied constanter zullen zijn dan de nu gehanteerde verdeling. Dit heeft effect op de te berekenen kansverdeling van de stijghoogte;

- zo is het bijvoorbeeld aannemelijk dat de deklaagweerstand binnendijs zich anders ontwikkeld hebben dan de deklaagweerstand buitendijs. Binnendijs hoeft de variatie in de k-waarde niet gecorreleerd te zijn aan de k-waarde buitendijs. Daardoor kunnen meer extremen optreden, bijvoorbeeld buitendijs een hoge k-waarde met binnendijs een lage k-waarde, hetgeen een hogere stijghoogte bij de dijk oplevert.

Het effect van het meenemen van ruimtelijke heterogeniteit in de parameterverdeling op de berekende onzekerheid van de stijghoogte is niet bij voorbaat te in te schatten. Daarvoor zouden aanvullende sommen gemaakt moeten worden.

Andere modelparameters

Niet alle parameters die van invloed zijn op de stijghoogte zijn meegenomen in de berekening. kD en C zijn de belangrijkste parameters, maar eigenlijk zijn meer parameters in het grondwatermodel relevant. Deze kunnen niet allemaal meegenomen worden in de gekozen methode. Dat betekent dat de berekende onzekerheid te klein wordt berekend

Hydrologisch systeem tijdens piping

Het grondwatermodel berekent de stijghoogte voordat er sprake is van opbarsten. Deze berekende stijghoogte wordt gebruikt voor de sterkte berekening van opbarsten, heave en piping. Voordat piping kan optreden moet eerst de deklaag zijn opgebarsten. Het opbarsten van de deklaag heeft effect op de berekende stijghoogte. In de directe omgeving van het opbarstpunt zal de stijghoogte afnemen. Als de deklaag op veel plaatsen opbarst zal dit effect nog groter zijn. Dat betekent dat de stijghoogte die nu wordt gebruikt voor het berekenen van de piping sterkte modellen mogelijk iets te hoog is.

In het grondwatermodel wordt nu nog gerekend met 'normale' peilen in de waterlopen. Het is echter bekend dat de peilen tijdens een hoogwater niet gehandhaafd kunnen worden en het peil tot aan of op maaiveld oploopt. Dat betekent dat de berekende stijghoogte wat onderschat wordt.

Modelonzekerheid

Het model is met gridcellen van 25 x 25 m redelijk fijn gediscrètiseerd, gezien de spreidingslengtes in het systeem van vaak 500 m. Voor de meeste hydrologische situaties in het gebied is dat voldoende. Op een aantal plekken snijden de waterlopen door de deklaag heen in het watervoerend pakket. Hier is de spreidingslengte van het systeem klein en kunnen grote gradiënten in stijghoogten ontstaan. Een te grove discretisatie zorgt in dit geval voor wat te lage stijghoogten. De weerstand van de slootbodem is echter ook niet bekend, dat maakt het extra lastig een goede interactie tussen de sloten en het watervoerende pakket te modelleren.

Een andere vorm van modelonzekerheid is dat sommige processen, zoals de onverzadigde zone, elementair gemodelleerd worden, of zelfs helemaal niet. Van de onverzadigde zone is beredeneerd dat deze aan het begin van de hoogwatergolf nog wel relevant is. Op het moment van een maatgevend hoogwater zal deze echter nog weinig invloed hebben op de bijbehorende stijghoogte. Het voorland staat dan al een paar dagen onder water en in het achterland is de kweldruk zo toegenomen dat ook hier de onverzadigde zone geheel gevuld is en het grondwater aan maaiveld staat. Het effect van andere modelonzekerheden is voorlopig ook als klein ingeschat. Het niet mee nemen van modelonzekerheden zal uit eindelijk leiden tot een onderschatting van de totale onzekerheid.

7.3 Vergelijk met metingen

Metingen zijn in dit deelproduct nog niet gebruikt voor toetsing van de modelaannames en het verkleinen van de parameteronzekerheid. Er zijn weinig relevante grondwatermetingen in het gebied van voor 2018. De meetreeksen van het huidige meetnet zijn kort en de gemeten hoogwatergolven zijn binnen het zomerbed gebleven. Uit een meetnet analyse is gebleken dat kleine hoogwatergolven redelijk beschreven (kunnen) worden met het grondwatermodel. In de volgende fase van het opstellen van het grondwatermodel wordt hier meer aandacht aan besteed.

7.3.1 Afwijkingen met grondwatermetingen

Er is een benchmark (zie bijlage 4) uitgevoerd van verschillen tussen metingen en modellering van stijghoogten tijdens gemiddelde situaties rondom rivieren. Dit is op 3 plekken onderzocht. De standaardafwijking bedraagt gemiddeld zo'n 30 cm. Deze 30cm wordt veroorzaakt door de verschillende bronnen van onzekerheid. Het geeft een indicatie van te verwachten afwijkingen voor berekende stijghoogten. De nu berekende standaardafwijking van de onzekerheid in de stijghoogte (als gevolg van alleen parameteronzekerheid) ligt vaak in eenzelfde orde grootte. Voor een aantal plekken langs de dijk is deze echter fors lager berekend. Dat kan juist zijn, maar kan ook een indicatie zijn dat de methode de onzekerheid op sommige plekken soms te conservatief inschat.

7.3.2 Historische waarnemingen

Uit de eerste fase van het innovatieproject is al wel gebleken dat de gevoeligste plekken voor wellen in het model redelijk overeenkomen met de waarnemingen. Visueel is beoordeeld dat nu nog steeds dezelfde plekken het gevoeligst zijn voor opbarsten. In de volgende fase van het project kan eventueel specifiek een hoogwater uit het verleden gemodelleerd worden en vergeleken met de historische waarnemingen. Voor nu is er verder weinig over te melden.

7.4 Synthese karakteristieke waarde stijghoogte

De in hoofdstuk 6 berekende p95 van de stijghoogte is waarschijnlijk nog een onderschatting van de te verwachten onzekerheid, gegeven een bepaalde geologie. Op dit moment is het lastig kwantitatief de onzekerheid verder te onderbouwen. Daarom is op basis van expert judgement voor deze fase van het project besloten de berekende p95 nog met 10 cm te verhogen en op die manier de overige onzekerheden te verdisconteren. In een volgende fase van het onderzoek kan dit getal beter onderbouwd worden en kan het eventueel ook als stochastische variabele worden meegenomen. Daarvoor worden in het volgende hoofdstuk aanbevelingen gedaan.

CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

8.1 Conclusies

In het voorliggende rapport is een methode gepresenteerd waarmee een kansverdeling van stijghoogtes tijdens een hoog water wordt voorspeld. Dit is een eerste versie van de methode die in de volgende fase van dit innovatie programma verder uitgewerkt zal worden. De gepresenteerde berekeningen zijn in die zin dan ook indicatief. Op basis van de onderzoeksvragen en het voorliggende onderzoek zijn de volgende tussentijdse conclusies te trekken:

- 1 Er is een basismethode ontwikkeld waarmee onzekerheden in stijghoogten gekwantificeerd kunnen worden voor een hoogwatersituatie. Een voordeel van de methode is dat zij ook toepasbaar is zonder stijghoogte metingen van een hoogwatersituatie:
 - Er ligt een basismethode om de stijghoogtekansverdeling en een p95 van de stijghoogte tijdens een hoogwater in beeld te brengen, voor gevallen waarin geen stijghoogte metingen zijn tijdens een hoogwater en we de geologie kennen. De stijghoogte kansverdeling wordt berekend aan de hand van aangenomen parameteronzekerheden in het BOI. Met een Monte Carlo analyse op een metamodel van het grondwatersysteem is de onzekerheid gekwantificeerd en is een P95 van de stijghoogte bepaald.
- 2 Deze basismethode lijkt een plausibel eerste beeld van de onzekerheden te geven van de stijghoogte:
 - De onzekerheden in de stijghoogte zien er plausibel uit. De onzekerheid rondom de dijk is vaak in orde-grootte van 0 tot 70 cm. Onder het zomerbed is de onzekerheid gering, evenals op grote afstand van de rivier. Daartussen neemt de onzekerheid toe.
- 3 De methode biedt inzicht in het gedrag van de onzekerheid:
 - Door de onzekerheid vlak-dekkend in beeld te brengen ontstaat meer inzicht in het gedrag. Zo blijkt de onzekerheid variabel te zijn en verschilt de verdelingsfunctie van de stijghoogte op verschillende locaties. Het gedrag is vaak aardig te beschrijven met een (log)normale verdelingsfunctie, maar exacter is om de berekende verdelingsfunctie zelf te gebruiken voor verdere analyses;
- 4 Afleiden karakteristieke waarde stijghoogte ten behoeve van sterktemodellen deels met expert judgement:
 - De semi probabilistische sterkte modellen hebben een karakteristieke waarde van de stijghoogte nodig. De basismethode berekent de onzekerheid als gevolg van een groot deel van parameteronzekerheid. De huidige methode berekent niet alle onzekerheid gegeven een geologie. Daarom is als laatste stap de berekende p95 van de stijghoogte uit de basismethode nog met 10 cm verhoogd om tot een karakteristiek waarden van de stijghoogte te komen die gebruikt is in deelproduct 4. In de toekomst wordt overwogen om voor de modelonzekerheid een stochastische variabele op basis van expert judgement vast te stellen.
- 5 Vlak-dekkend toepassen van bestaande sterktemodellen is mogelijk geworden:
 - Met de methode is een vlak-dekkend de karakteristieke waarde van de stijghoogte af te leiden. Daarmee kunnen de (semi probabilistische) sterkte modellen ook vlak-dekkend gedraaid worden. Dit doet meer recht aan het effect van lokale heterogeniteiten op de pipingopgave.
- 6 Vergelijk met BOI aannames stijghoogte onzekerheden:
 - De variatiecoëfficiënt van 10% uit het BOI is in sommige gevallen te klein en in veel gevallen een veilige aanname.
 - De onzekerheid is niet lineair afhankelijk van de respons. Een grote respons geeft juist minder onzekerheid.

- Door de respons uit te drukken ten opzichte van maaiveld, zoals in het BOI gebeurt, ontstaat ruis. De respons wordt groter of kleiner dan de werkelijke respons en de onzekerheden worden verkeerd ingeschat.

8.2 Aanbevelingen

Op basis van het onderzoek zijn een aantal aanbevelingen geformuleerd. Deze zijn gebundeld per thema.

Kwantificeer zo veel mogelijke de andere bronnen van onzekerheid en de onzekerheid van de methode zelf. Een groot deel van deze punten zijn ook in de expertsessie van januari 2020 zo benoemd. Hier zijn de aandachtspunten in volgorde van belang genoemd.

1. Kwantificeer het effect van Geologische fenomenen op de onzekerheid.
 - a. wat als een deklaag plaatselijk dun is?
 - b. hoe verhoudt de geologische analyse van Ane Wiersma met betrekking tot de kansen op een dunne deklaag zich tot de huidige model parameterisatie en de aangenomen parameteronzekerheid?
 - c. of sloten in het achterland wel of niet de deklaag doorsnijden is ook een belangrijk (geologisch) fenomeen. Op welke manier kan dit worden meegenomen?
2. Onderzoek wat het effect is van de aangenomen ruimtelijke uniformiteit in parameteronzekerheid:
 - In de basismethode wordt ruimtelijke uniformiteit van de onzekerheid verondersteld. Hoe beïnvloedt dit de berekende stijghoogte onzekerheid?
3. Maak inzichtelijk wat het effect is van opbarsten op de berekende stijghoogte onzekerheid:
 - Maak met een paar voorbeeldsommen inzichtelijk wat het effect is van opbarsten op de stijghoogte. Bekijk hier verschillende 'schalen' van opbarsten. Wat als er één opbarst-punt is en wat als over een groot oppervlak sprake is van opbarsten?
4. Bereken de onzekerheid als gevolg van meer onzekere parameters:
 - Nu is de onzekerheid bepaald aan de hand van twee onzekere parameters. Wat is het effect op de onzekerheid als ook andere (minder sturende) modelparameters worden meegenomen?
5. Kwantificeer de modelonzekerheid:
 - Kwantificeer ten slotte de modelonzekerheid, mede gebruik makend van de inzichten uit de bovenstaande activiteiten.

Wat betreft het geohydrologisch model zijn de volgende aanbevelingen geformuleerd:

Regionale grondwaterstromingsmodellen worden zelden gebruikt voor het modelleren van kortdurende, extreme forceringen. Deze studie heeft nuttige lessen opgeleverd over het ontwikkelen van grondwaterstromingsmodellen voor dit soort toepassingen. De aanbevelingen liggen in een logisch vervolg hierop

1. Kalibratie en validatie: Valideer en kalibreer het model met de beperkte beschikbare metingen (wellenkaart 1995 en grondwatermeetnet sinds 2018) en evalueer of de onzekerheid in parameterverdeling hiermee verder te verkleinen is.
2. Schematisering van waterlopen en plassen: Laat het peil van de waterlopen in het achterland ook oplopen tijdens het hoogwater. Het streefpeil zal niet gehandhaafd kunnen worden. Check op de correcte schematisering van insnijding in watervoerend pakket, weerstand en van peilverloop gedurende hoogwater. Zowel binnen- als buitendijks.
3. Schematisering weerstand en deklaagdikte De weerstand en laagdikte van de deklaag kan nog beter worden vastgesteld, o.a. door meer boringen mee te nemen.
4. Kijk of intredelijns verder buitendijks kan liggen (veel winst te behalen).
5. Kijk naar stroming onder een hoek (soms veel winst te behalen).
6. Historische golven. Kijk in hoeverre het mogelijk is de gegevens die bekend zijn van de golven van 1993, 1995, 2019 en 2020 te benutten. De response die gemeten is nav de kleine hoogwaters in 2019 en 2020 benutten voor validatie en kalibratie van het model, evalueren of de onzekerheid in parameterverdeling hiermee verder te verkleinen is.
7. Kwaliteitsborging: Investeer in extra (collegiale) kwaliteitsborging deels door binnen het team meer te werken met goede collegiale toets en vastlegging, deels door voor de nieuwe onderdelen een review-slag te doen met geohydrologen van TU of Deltares.

Metingen in het algemeen zijn belangrijk om onzekerheden te verkleinen in de geohydrologische opbouw van het gebied (middels o.a. boringen) en de grondwaterrespons op een verandering in de rivierwaterstand (peilbuizen). Als de stijghoogte respons gemeten is kunnen veel onzekerheden verkleind worden, daarvoor is reeds een uitgebreid meetnet ingericht. Op korte termijn kunnen we het meten van deze respons niet afdwingen. Voor specifiek deze casus zijn drie aanbeveling gedaan waarmee onzekerheden op korte termijn verkleind kunnen worden.:

1. Insnijdende waterlopen in het achterland zijn bepalend voor de te verwachten stijghoogten langs de dijk. Momenteel zijn er geen metingen van beschikbaar. De verwachting is dat het insnijden van een sloot in het watervoerend pakket wel goed te meten is. Daarom de aanbeveling om hier metingen aan te verrichten en de modelaannames met betrekking tot insnijdingen beter te kunnen toetsen.
2. Combineer bovenstaande actie bijvoorbeeld met een veldbezoek om goed gevoel te houden met de werkelijkheid.
3. Bepalen van de bergingscoëfficiënt van het watervoerend pakket. De onzekerheid lijkt een factor 100 te zijn. Nu hebben we een bergingscoëfficiënt aangenomen die redelijk conservatief zou kunnen zijn.

Er is ook een vergelijking gemaakt met BOI aannames met betrekking tot de te verwachten onzekerheid in het bepalen van een stijghoogte. De hier geformuleerde aanbevelingen zijn van minder belang voor het innovatie project, maar wellicht wel van belang voor het HWBP/de community:

- 1 De in het BOI gebruikte VC voor stijghoogte lijkt soms niet conservatief genoeg te zijn. Onderzoek of het relevant is het BOI hierop aan te passen, of aan te geven in welke gevallen de VC voor stijghoogte uit het BOI niet toegepast mogen worden.
- 2 Het BOI gaat uit van een impuls respons relatie ten opzichte van maaiveld om een dempingsfactor te bepalen. Dit is hydrologisch gezien onlogisch en zorgt voor extra ruis in te berekenen dempingsfactoren. Onderzoek of in BOI gewerkt kan worden met hydrologische impuls respons relatie om dempingsfactoren te berekenen.

LITERATUURLIJST

- Diermanse, F. (sd). WBI - Onzekerheden overzicht van belasting- en sterkeonzekerheden in het wettelijk beoordelingsinstrumentarium. Deltares, report no. 1220080-001-ZWS-0004-r, final; 2017.
- Jongejan, R. (2019). *HWBP Projectgebonden Innovatie 'Naar een geohydrologische aanpak voorpijping'; Deelproduct 2: faalpad en grenstoestandfuncties*. Den Bosch: Waterschap Aa en Maas.

Bijlage(n)



BIJLAGE: UITWERKING OMGAAN MET LOGNORMALE KANSVERDELINGEN VAN GEOHYDROLOGISCHE PARAMETERS

Met een grondwaterstromingsmodel willen we uitspraken kunnen doen over onzekerheden van berekende stijghoogten. Dit gaan we doen door parameter verdelingen te schatten voor gevoelige modelparameters, om deze vervolgens gebruiken voor een vereenvoudigde Monte Carlo analyse. Uit de analyse komen dan statistieken vrij waarmee de onzekerheid van berekende stijghoogtes beschreven kunnen worden. Hieronder worden de verschillende werkstappen nader beschreven

I.1 Selectie van gevoelige parameters

Beschrijven parameterruimte

Type verdelingen

Er zijn een aantal kansverdelingen waar veel fenomenen in de natuur op lijken, en die fijne eigenschappen hebben om mee te werken. Alle relevante parameters in dit project volgen volgens het WBI een normale of lognormale verdeling (WBI-onzekerheden' (Diermanse), pag. 116)).

Normale verdeling

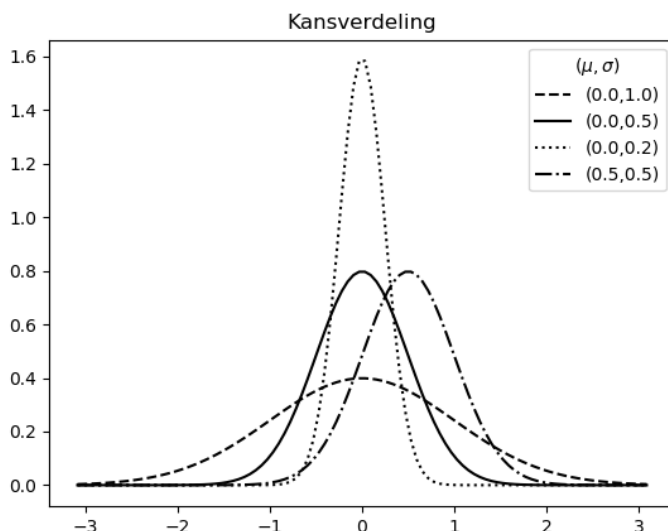
Een normale verdeling is een symmetrische verdeling, waarbij het gemiddelde μ de grootste kans van voorkomen heeft voor een bepaalde variabele. Hoe verder van μ verwijderd, hoe kleiner de kans dat deze waarde voorkomt. σ is een maat voor de spreiding: de kans dat een waarde binnen het interval $(\mu-\sigma, \mu+\sigma)$ valt is 68%. De verdeling wordt door de volgende formule beschreven:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}.$$

In Afbeelding I.1 is de verdeling grafisch weergegeven. Als twee variabelen X en Y niet gecorreleerd zijn geldt voor de som/het verschil:

$$\begin{aligned}\mu &= \mu_X \pm \mu_Y; \\ \sigma &= \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2}.\end{aligned}$$

Afbeelding I.1 Voorbeelden normale verdelingen voor verschillende waarden van μ en σ . Hoe hoger μ , hoe verder de verdeling naar rechts verschoven is. Een grote σ betekent een grote spreiding, een kleine σ geeft een smalle piek rondom μ



Lognormale verdeling

Een lognormale verdeling Y ontstaat wanneer de exponent van een normale verdeling X genomen wordt:

$$Y = e^X.$$

Dit betekent dat de functie die de verdeling Y beschrijft er als volgt uit ziet:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x)-\mu}{\sigma}\right)^2},$$

waarbij μ en σ de verwachtingswaarde en de standaardafwijking zijn van $\ln Y$, oftewel van X . De verwachtingswaarde en variantie van de lognormale verdeling zijn dan:

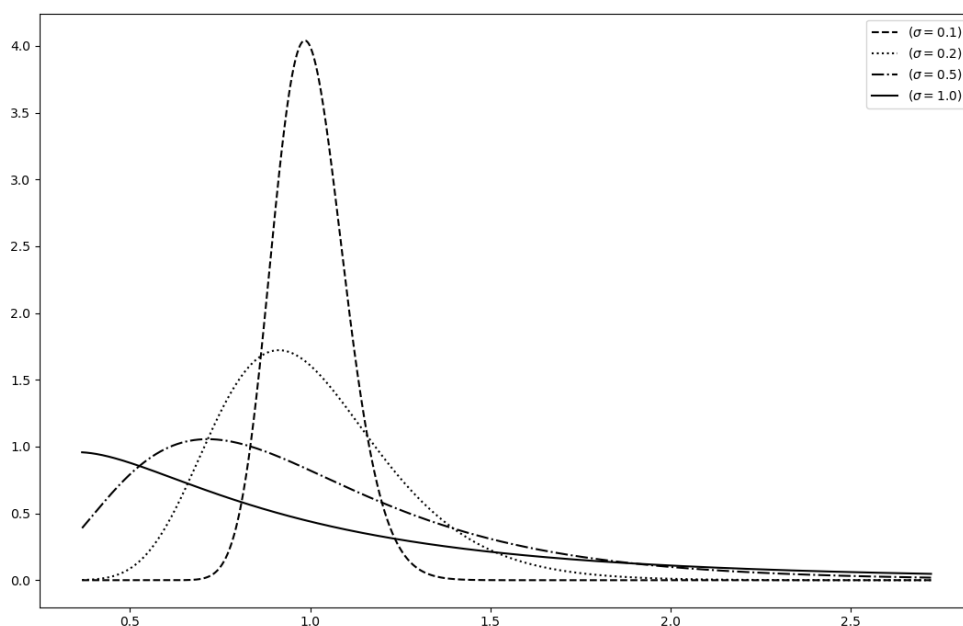
$$\begin{aligned}\mu_{log} &= e^{\mu + \sigma^2/2}, \\ \sigma_{log}^2 &= (e^{\sigma^2} - 1)e^{2\mu + \sigma^2}.\end{aligned}$$

Het product van twee lognormaal verdeelde variabelen heeft ook een lognormale verdeling. Daarom wordt de lognormale verdeling vaak gebruikt voor variabelen die zijn samengesteld uit meerdere onafhankelijke variabelen. Voor μ en σ van het product geldt voor onafhankelijke variabelen:

$$\begin{aligned}\mu &= \mu_Y \times \mu_Z, \\ \sigma &= \sqrt{\sigma_Y^2 + \sigma_Z^2}.\end{aligned}$$

In afbeelding 1.2 is het effect van verschillende waarden voor

Afbeelding 1.2 Lognormale kansverdelingen voor verwachtingswaarden $\mu=1$ en standaardafwijkingen $\sigma=[0.1, 0.25, 0.5, 1]$. Hoe kleiner de afwijking, hoe smaller en symmetrischer de piek



In het WBI staan de variatiecoëfficiënten van parameters met een lognormale verdeling gegeven. Dit is de deler van σ over μ :

$$cov = \frac{\sigma}{\mu}.$$

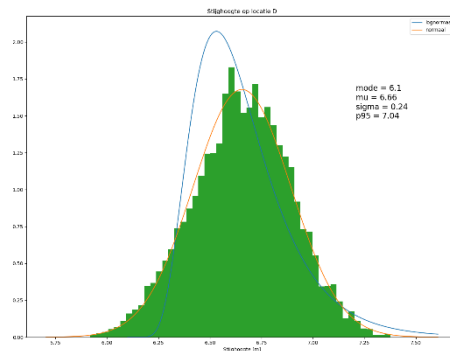
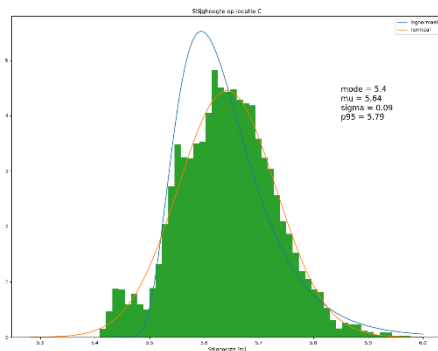
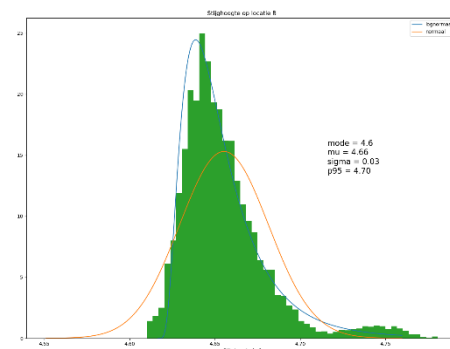
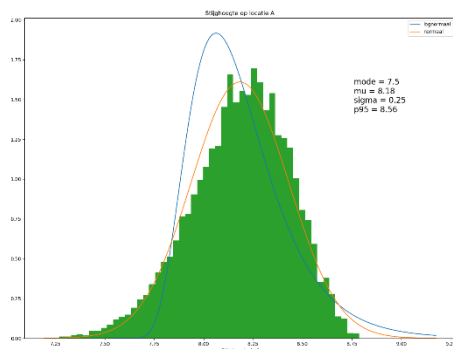
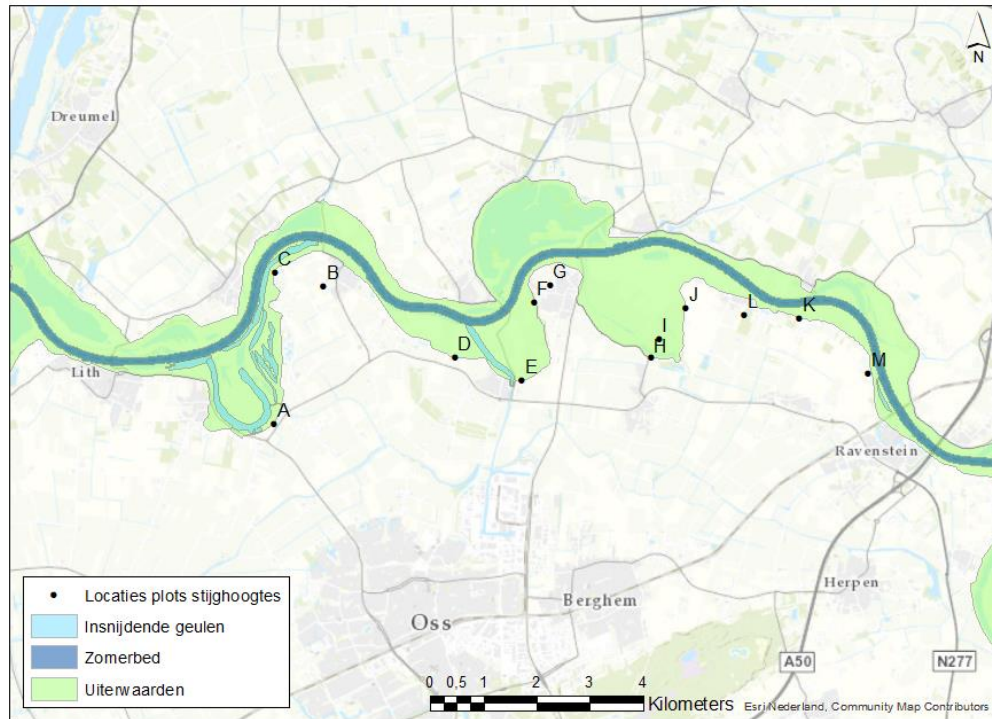
Omdat de gemiddelde waarden worden uitgedrukt in factor 1 zijn de afzonderlijke σ 's gelijk aan de variatiecoëfficiënten. Vervolgens wordt met bovenstaande formules de lognormale verdeling van de weerstand en doorlatendheid berekend.

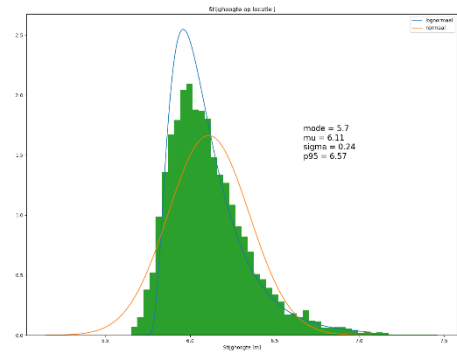
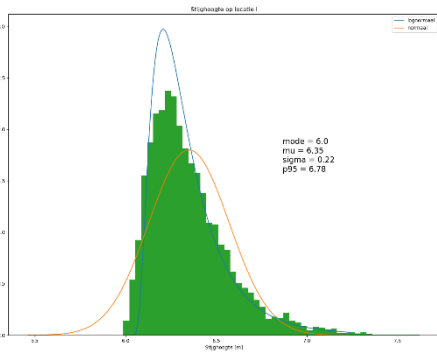
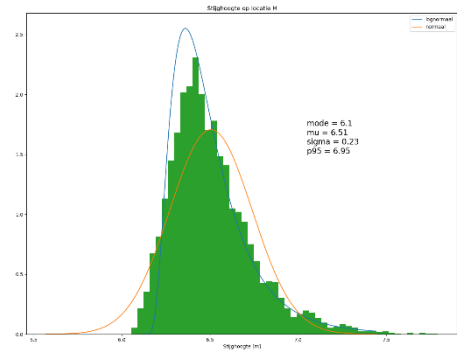
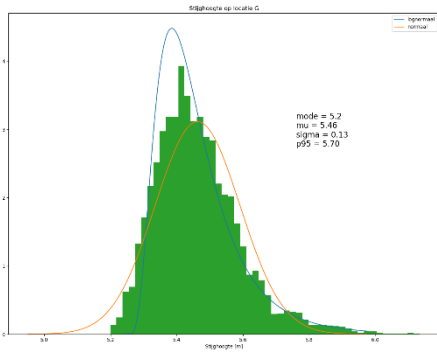
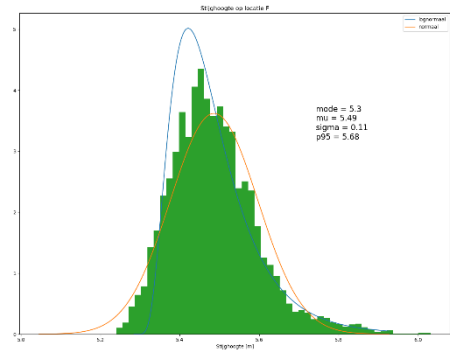
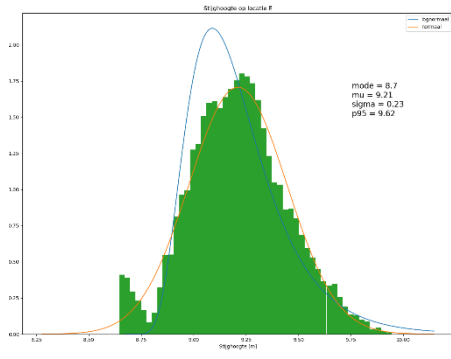


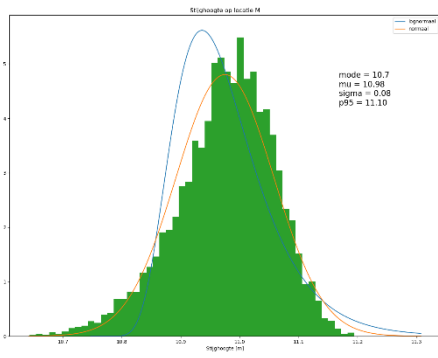
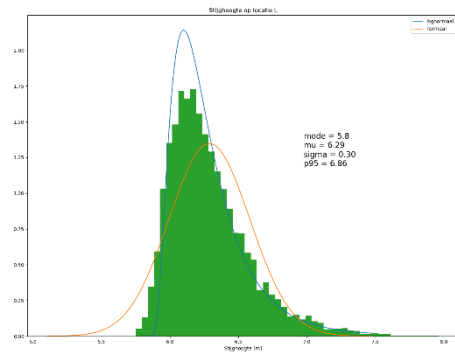
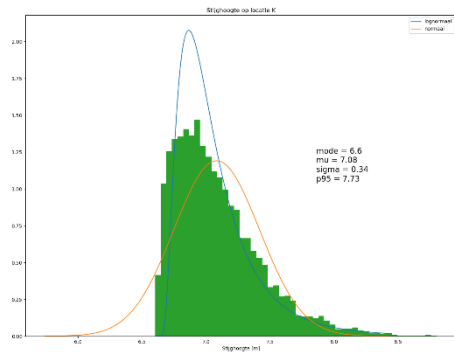
BIJLAGE: STIJGHOOGTEVERDELING VOOR EEN AANTAL LOCATIES

Er zijn voor een aantal locaties stijghoogte-verdelingsfuncties opgesteld. Deze worden in deze bijlage weergegeven

Afbeelding II.1 Overzicht locaties waarvoor de verdelingsfuncties van de stijghoogte geplot zijn









BIJLAGE: INSCHATTING PARAMETERONZEKERHEID VAN HET BOI

In het rapport WBI-onzekerheden (Diermanse, 2017) wordt in de bijlage een overzicht gegeven van sterkteparameters en hun ingeschatte onzekerheid. Deze is hier gekopieerd

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 volumiegewicht van sublaag	5%	Shifted logn. shift=10	Nom.	cov ⁶ = 0.05	0	300
r_{exit}	-	damping factor at exit	dempingsfactor bij uittredepunt	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 uittredepunt	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%-fraktil 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,-

IV

BIJLAGE: GEMETEN ONZEKERHEDEN IN ANDERE GRONDWATER MODELLEN

Voor verschillende regionale modellen (MIPWA en AZURE) is de onzekerheid van de berekende stijghoogte op meetpunten in beeld gebracht voor gemiddelde omstandigheden.

