

Modelonzekerheid belastingen

Wettelijk Toetsinstrumentarium WTI-2017



Modelonzekerheid belastingen

Wettelijk Toetsinstrumentarium WTI-2017

Houcine Chbab
Jacco Groeneweg

1209433-008

Titel

Modelonzekerheid belastingen

Opdrachtgever

RWS - WVL

Project

1209433-008

Kenmerk

1209433-008-HYE-0007

Pagina's

38

Trefwoorden

WTI-2017, belastingmodellen, productieberekeningen, onzekerheden, modelonzekerheid waterstand, modelonzekerheid golfcondities.

Samenvatting

Dit rapport beschrijft de (model)onzekerheid in waterstanden en golfcondities die verkregen worden door middel van productieberekeningen met WAQUA en IMPLIC voor waterstanden en SWAN en Bretschneider voor golfcondities. Uitgangspunt hierbij is dat modelonzekerheid onafhankelijk is van de terugkeertijd, maar wel afhangt van lokale aspecten zoals locatie en hydraulische eigenschappen van het systeem.

Voor verschillende watersystemen waar gebruik wordt gemaakt van bovenvermelde modellen is modelonzekerheid gekwantificeerd. Hierbij is gebruikt gemaakt van de belastingmodellen en indeling in regio's van Hydra-Ring. Het schatten van modelonzekerheid is pragmatisch van aard. De onzekerheid wordt uitgedrukt in een bias en een standaardafwijking. De gemaakte schattingen zijn tot stand gekomen op basis van de resultaten van reeds uitgevoerde (hindcast)studies en gevoeligheidsberekeningen, aangevuld met expert judgement.

Voor rivieren en meren is er geen bias in de lokale waterstand. De standaardafwijkingen liggen tussen 0,15 m en 0,40 m. Voor de Oosterschelde geldt een bias van 0,15 m en standaardafwijkingen tussen 0,15 en 0,20 m.

Modelonzekerheden in de golfcondities zijn gegeven in termen van relatieve bias en relatieve standaardafwijking. Voor kust, (rand)meren en brede wateren in rivierengebied wordt SWAN gebruikt, voor de smalle wateren in het rivierengebied de golfgroeiformule van Bretschneider. In de Markermeer-regio worden zowel SWAN (IJburg), Bretschneider (Eemvallei) en HISWA (overig) gebruikt. De afgeleide onzekerheidsschattingen zijn weergegeven in onderstaande tabel.

Hoofdsysteem	H_{m0}		$T_{m-1,0}$		T_p	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ
I. Kust, IJsselmeer	-0,01	0,19	-0,04	0,11	-	-
II. Brede wateren in rivierengebied/randmeren	-0,06	0,15	-0,11	0,04	-0,01	0,07
III. Smalle wateren in rivierengebied, Eemvallei	-0,04	0,27	-	-	+0,03	0,13
IV. Markermeer - IJburg	-0,05	0,11	+0,04	0,08	-0,04	0,05
V. Markermeer - overig (excl. IJburg)	-0,02	0,20	-	-	+0,16	0,11

Referenties

Projectplan WTI-2017; projectplan clusters WTI-2017

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	Jan. 2015	Houcine Chbab		Janneke IJmker		Marcel van Gent	
		Jacco Groeneweg					
7	Juli 2015	Houcine Chbab		Ferdinand Diermanse	FD	Marcel van Gent	
		Jacco Groeneweg					

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Achtergrond	1
1.2 Doelstelling	2
1.3 Leeswijzer	3
2 Belastingmodellen en onzekerheden Hydra-Ring	5
2.1 Belastingmodellen Hydra-Ring	5
2.2 Omgaan met onzekerheden	7
2.2.1 Typen onzekerheden	7
2.2.2 Omgaan met onzekerheden	7
2.3 Modelonzekerheid Hydra-Ring	9
2.4 Aanpak en uitgangspunten modelonzekerheid waterstanden	10
2.5 Aanpak en uitgangspunten modelonzekerheid golfcondities	11
3 Modelonzekerheid lokale waterstand	13
3.1 Inleiding	13
3.2 Regio 1 en 2: Bovenrivieren	13
3.2.1 Regio 1: Rijntakken	13
3.2.2 Regio 2: Maas	13
3.3 Regio 3 en 4: Benedenrivieren	14
3.3.1 Regio 3: Benedenrivieren Rijn	14
3.3.2 Regio 4: Benedenrivieren Maas	16
3.4 Regio 5: IJsseldelta	16
3.5 Regio 6: Vechtdelta	16
3.6 Regio 7: IJsselmeer	17
3.7 Regio 8: Markermeer	18
3.8 Regio 14: Oosterschelde	19
3.9 Correlaties statistische en modelonzekerheden	21
3.10 Samenvatting modelonzekerheden lokale waterstanden	22
4 Modelonzekerheid golfcondities	25
4.1 Inleiding	25
4.2 Achtergrondstudies voor bepaling onzekerheden	27
4.3 Correctie voor meetfouten	28
4.4 Schattingen voor modelonzekerheden golven	29
4.5 Onzekerheden voor gecorreleerde golfparameters	30
4.5.1 Waterstanden, golfhoogte en golfperiode in het belastingmodel voor duinen	31
4.5.2 Waterstanden, golfhoogte en golfperiode in het belastingmodel voor dijken	31
5 Samenvatting en conclusies	33
6 Referenties	35
Bijlage(n)	
A Modelonzekerheid locaties IJsselmeer	A-1

B Modelonzekerheid rivierengebied met correctie voor correlatie ruwheden	B-1
B.1 Rijntakken	B-1
B.2 Benedenrivieren	B-1
B.3 IJsseldelta	B-3

Summary

This report describes the model uncertainties in water levels and wave conditions in primary water ways, that are a consequence of using WAQUA and IMPLIC in water level computations and SWAN and the Bretschneider wave growth formula in the wave computations in WTI2017. One of the assumptions in the report is that the model uncertainty estimates are independent of the return period. Uncertainties are dependent on the location and the hydraulic properties of the system under consideration.

For all water systems in the Netherlands where the models mentioned above have been applied, the model uncertainty has been quantified. Uncertainties are derived separately for each region as defined in the load models of Hydra-Ring. The model uncertainty is assumed to be normally distributed and expressed in terms of a bias and a standard deviation. The estimation of the model uncertainties has been carried out in a pragmatic way, based on results of existing (hindcast) studies and sensitivity studies, complemented with expert judgement.

For rivers and lakes there is no bias in the water level prediction. The standard deviations in the water levels are between 0,15 m and 0,40 m. For the Eastern Scheldt the bias is -0,15 m and the standard deviation between 0,15 m and 0,20 m.

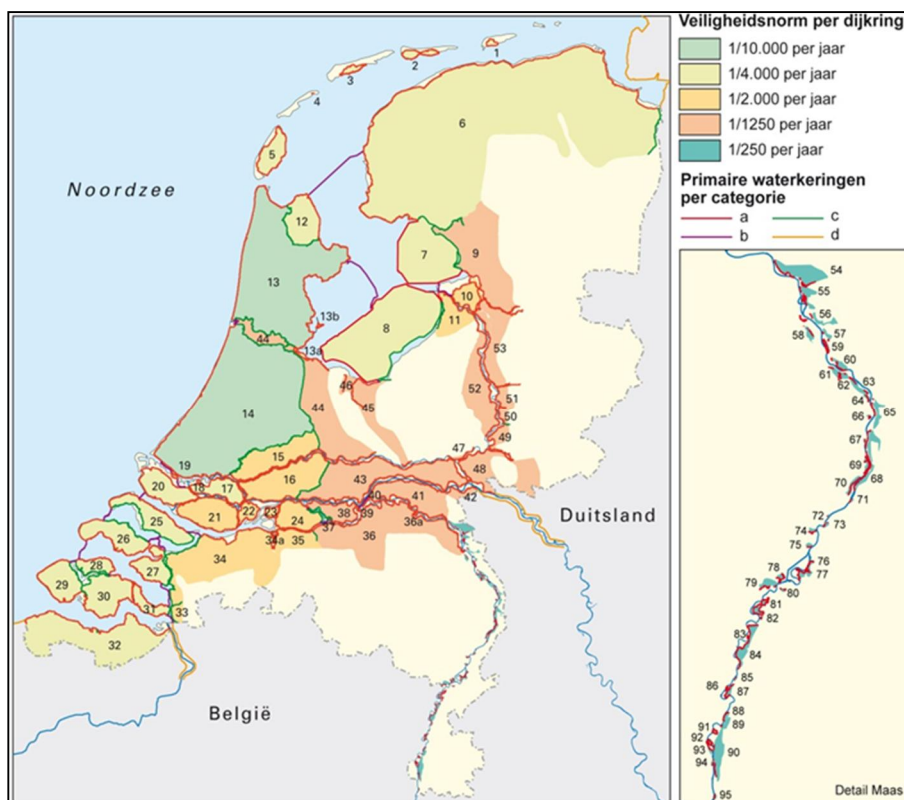
Model uncertainties in the wave conditions have been quantified in terms of relative bias and relative standard deviation. For the coastal regions, the lakes and the relatively wide stretches of the river region SWAN is applied, for the narrower parts of the river region the wave growth formula of Bretschneider is applied. The uncertainty estimates are presented in the table below.

Hoofdsysteem	H_{m0}		$T_{m-1,0}$		T_p	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ
I. Coastal region, IJsselmeer	-0,01	0,19	-0,04	0,11	-	-
II. Broad part of the river region	-0,06	0,15	-0,11	0,04	-0,01	0,07
III. Narrow part of the river region. Eemvallei	-0,04	0,27	-	-	+0,03	0,13
IV. Markermeer - IJburg	-0,05	0,11	+0,04	0,08	-0,04	0,05
V. Markermeer – other (excl. IJburg, Eemvallei)	-0,02	0,20	-	-	+0,16	0,11

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Volgens de Waterwet (2009) dienen periodiek Hydraulische Randvoorwaarden (HR) voor de primaire keringen te worden afgeleid voor o.a. maatgevende gebeurtenissen. Deze hebben herhalingsjaren variërend afhankelijk van het watersysteem en type bedreiging van 250 tot 10.000 jaar (Figuur 1.1). In WTI-2017 zullen de nieuwe nog vast te stellen normen worden gehanteerd. Bij gereedkomen van dit rapport waren deze formeel nog niet beschikbaar en zijn daarom hier achterwege gelaten. Volgens de huidige methode (combinatie HR2006 en VTV2006) bestaan de HR per locatie uit een combinatie van waterstand en/of golfhoogte, -periode en -richting, afhankelijk van het beschouwde watersysteem (kust, meer of rivier). Deze worden op probabilistische wijze met behulp van Hydra-modellen bepaald, waarbij statistiek van de basisstochasten (wind, zeewaterstand, afvoer, meerpeil, beheersituatie van de stormvloedkeringen en/of offshore golfcondities wordt vertaald naar waterstanden en, waar relevant, golfcondities aan de teen van de dijk. Met behulp van deze afgeleide randvoorwaarden kan volgens het VTV2006 een toetsing worden uitgevoerd (voor de hoogtetoets wordt een volledig probabilistische toets uitgevoerd). Deze toetsing gaat uit van de overschrijdingskansbenadering, welke kijkt naar de lokale kans van overschrijding van de belasting voor de betreffende waterkeringssectie in relatie tot de sterkte van de waterkering.



Figuur 1.1 Huidige normfrequenties voor de primaire keringen in Nederland

In 2017 wordt de overstap van de overschrijdingskansbenadering naar de overstromingskansbenadering gemaakt. Deze laatste gaat niet alleen uit van het feit dat de belasting voor een specifieke waterkeringssectie bij een gegeven kans op overschrijden

groter is dan de sterkte, maar neemt ook de kans op falen (rekening houdend met meerdere faalmechanismen) van enige waterkeringssectie binnen een dijkkring in beschouwing. Dit laatste wordt de overstromingskansbenadering genoemd.

In de huidige overschrijdingskansbenadering en HR-bepaling wordt in beperkte mate rekening gehouden met onzekerheden aan de belastingkant. Er wordt alleen rekening gehouden met onzekerheden door de natuurlijke variabiliteit in de basisvariabelen (afvoer, meerpeil, zeewaterstand en wind). Het is de bedoeling dat in WTI-2017 ook andere typen onzekerheden aan de belastingkant expliciet worden verdisconteerd, waar deze in de vigerende benadering impliciet en op niet-transparante wijze aan de sterktekant werden meegenomen. Deze typen onzekerheden aan de belastingkant betreffen kennisonzekerheden.

Het meenemen van deze onzekerheid leidt enerzijds tot een realistischer beeld van de lokale belastingen, en daarmee een scherper beeld van de actuele veiligheid. Anderzijds biedt het effect van het expliciet verdisconteren van onzekerheden op de lokale belastingen de mogelijkheid tot doelmatiger investeren in waterveiligheid. Dat we juist nu de onzekerheden meenemen heeft te maken met de gemaakte systemsprong (overgang op overstromingskansbenadering, nieuwe normen) die de introductie van (het meenemen van) onzekerheden vergemakkelijkt, d.w.z. betrokkenen zijn mentaal voorbereid op andere uitkomsten. Daarnaast geldt dat de onzekerheden nu voor het eerst op grote schaal gekwantificeerd zijn.

In de afgelopen periode zijn diverse studies uitgevoerd waarin aandacht is besteed aan verschillende typen onzekerheden en hun mogelijke effect op de hydraulische randvoorwaarden. In dit rapport beperken we ons tot de modelonzekerheden, één van de 2 typen van kennisonzekerheid. Het andere type kennisonzekerheid betreft statistische onzekerheid en is beschreven in een andere integrale rapportage (Deltares, 2015b). Beide typen kennisonzekerheid zijn geïmplementeerd in Hydra-Ring.

Hydra-Ring is het nieuwe probabilistisch instrumentarium dat gebruikt gaat worden voor de probabilistische berekeningen binnen WTI-2017. Het instrumentarium is volop in ontwikkeling. Ten aanzien van deze ontwikkeling zijn keuzes gemaakt over de implementatie van de functionaliteit in de belastingmodellen op basis van “Scientific Documentation Hydra-Ring” (Diermanse et al, 2013). Specifiek is in dit document beschreven hoe kennisonzekerheid in het algemeen en modelonzekerheid in het bijzonder gemodelleerd en geïmplementeerd moeten worden.

1.2 Doelstelling

De doelstelling van dit rapport is het beschrijven van modelonzekerheid in WTI-2017. De meer specifieke vraag is welke kansverdelingen geïmplementeerd moeten worden in Hydra-Ring om rekening te houden met modelonzekerheden in lokale waterstanden en golfcondities. We ondernemen de volgende stappen om de bovenstaande doelstelling te realiseren:

- Ten eerste geven we een korte beschrijving van de belastingmodellen, en gerelateerde indeling in regio's, van Hydra-Ring,
- Vervolgens beschrijven we modelonzekerheid per regio en welke uitgangspunten er gelden voor implementatie van de onzekerheden in Hydra-Ring;
- Tot slot geven we per regio de parameters die de modelonzekerheid beschrijven. Waar nodig delen we de regio's elke regio in deelgebieden.

1.3 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 beschrijft de belastingmodellen van Hydra-Ring; ook bevat dit hoofdstuk een korte beschrijving van verschillende typen onzekerheden en uitgangspunten die worden gehanteerd bij de implementatie in Hydra-Ring. Hoofdstuk 3 gaat in op de gekwantificeerde modelonzekerheid in lokale waterstand. Hoofdstuk 4 behandelt modelonzekerheid in golfcondities. In hoofdstuk 5 zijn de samenvatting en conclusies van het rapport beschreven.

2 Belastingmodellen en onzekerheden Hydra-Ring

2.1 Belastingmodellen Hydra-Ring

Hydra-Ring definieert 17 regio's. Merk op dat Kust duinen formeel geen regio is, maar in Hydra-Ring wel als zodanig is gekenmerkt. Deze regio's zijn beschreven in onderstaande Tabel 2.1. De regio's 1 – 15 zijn weergegeven in Figuur 2.1. Een uitgebreide beschrijving van de belastingmodellen in Hydra-Ring is te vinden in (Diermanse et al, 2013) en (Nicolai et al, 2014).

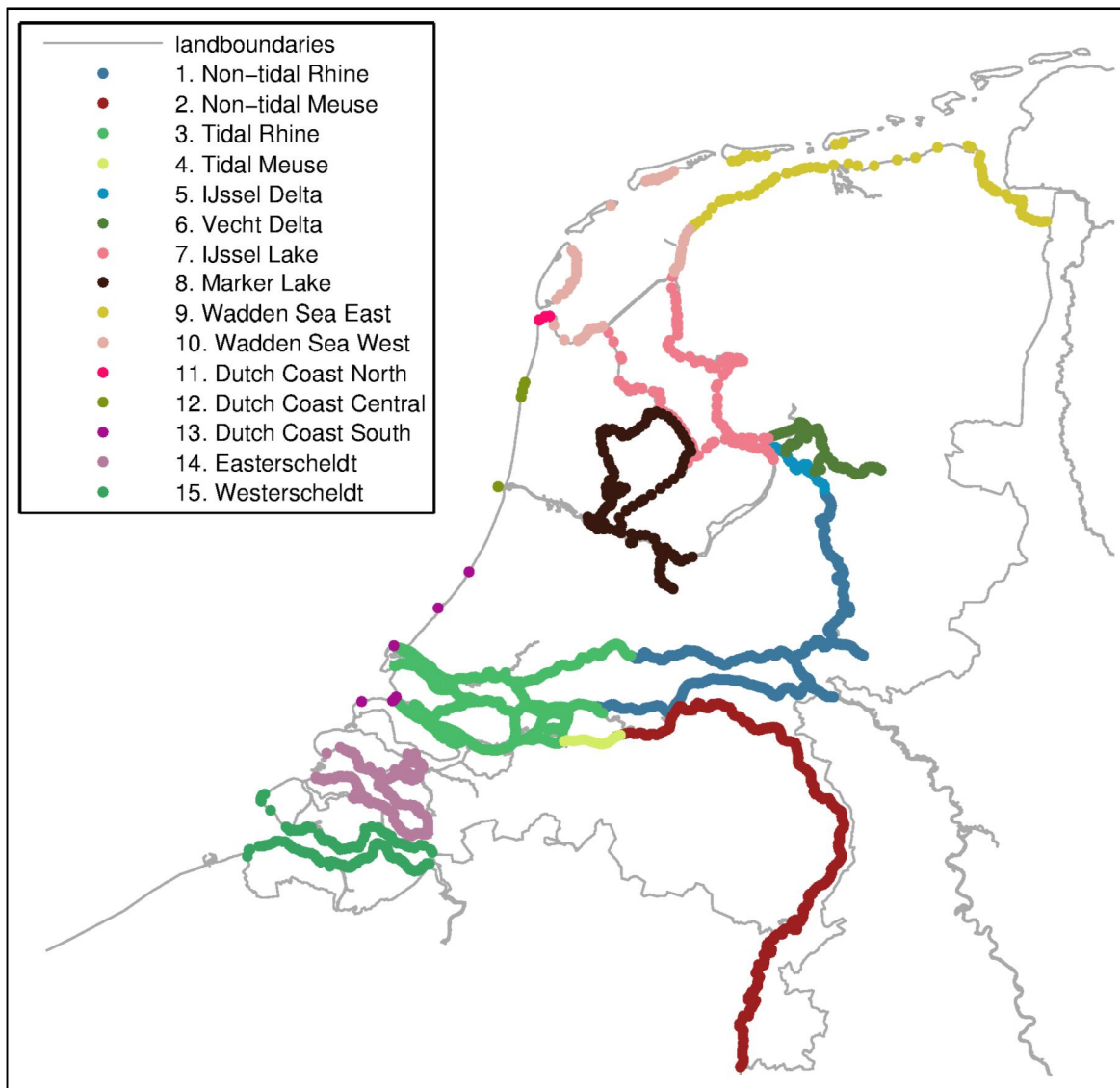
Tabel 2.1 Regio's in Hydra-Ring

1. Bovenrivieren (Rijn)	7. IJsselmeer	13. Hollandse Kust Zuid
2. Bovenrivieren (Maas)	8. Markermeer	14. Oosterschelde
3. Benedenrivieren (Rijn)	9. Waddenzee Oost	15. Westerschelde
4. Benedenrivieren (Maas)	10. Waddenzee West	16. Kust duinen
5. IJsseldelta	11. Hollandse Kust Noord	17. Europoort
6. Vechtdelta	12. Hollandse Kust Midden	

Tabel 2.2 laat zien op welke manier de rekenfunctionaliteit voor deze 17 regio's is geclusterd in 7 typen belastingmodellen. Bij deze typering wordt uitgegaan van de huidige Hydra's op basis van de hoofdwatersystemen.

Tabel 2.2 Belastingmodellen in Hydra-Ring

Belastingmodel	Afkorting	Regio's
Bovenrivierengebied	BOR	1, 2
Benedenrivierengebied	BER	3, 4, 17
Vecht- en IJsseldelta	VIJD	5, 6
Kustgebieden (dijken)	Kust	9, 10, 11, 12, 13, 15
Merengebied	M	7, 8
Oosterschelde (dijken)	O	14
Kust duinen	D	16



Figuur 2.1 Weergave van de regio's, zoals deze in Hydra-Ring zijn opgenomen, met uitzondering van Kust duinen en Europoort

Regio 7, IJsselmeer, omvat het IJsselmeer zelf en Ketelmeer en Vossemeer inclusief de westelijke zijde van de verbindende Ramspolkering. Regio 8, Markermeer, omvat het Markermeer zelf, IJburg, IJmeer en de zuidelijke randmeren die in open verbinding staan met het Markermeer, inclusief de Eem. Wanneer in het vervolg van dit rapport spreken van IJsselmeer of Markermeer, dan is dat inclusief bovengenoemde randmeren. Merk op dat de Veluwerandmeren afgesloten zijn van het IJsselmeer en het Markermeer en daarom geen onderdeel uitmaken van de regio's 7 en 8.

Per regio geldt in Hydra Ring een apart belastingmodel. Details met betrekking tot deze belastingmodellen zijn te vinden in (Diermanse et al., 2013) en (Nicolai et al, 2014).

Modelonzekerheid in lokale waterstand wordt meegenomen voor de volgende regio's 1 t/m 8 en regio 14 en regio 17. Voor de regio's 9 t/m 13 en de regio's 15 en 16 wordt modelonzekerheid in lokale waterstand niet beschouwd. Enerzijds omdat lokale waterstanden

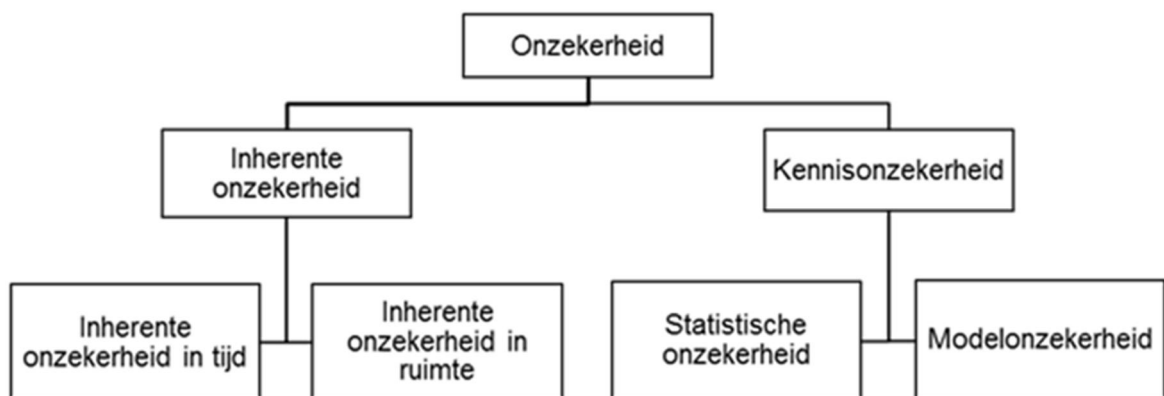
in deze regio's verkregen worden via interpolaties van zeewaterstanden op representatieve stations en anderzijds de onzekerheid in deze zeewaterstanden via statistische onzekerheid in beschouwing wordt genomen.

2.2 Omgaan met onzekerheden

2.2.1 Typen onzekerheden

Onzekerheden kunnen over het algemeen onderverdeeld worden in twee belangrijke groepen: inherente onzekerheid en kennisonzekerheid (zie Figuur 2.2). Voor een uitgebreide beschrijving van verschillende soorten onzekerheden wordt verwezen naar (Vrouwenfelder en Vrijling, 2001).

Inherente onzekerheid, ook wel natuurlijke variabiliteit genoemd, is het gevolg van de natuurlijke fluctuaties in tijd en/of ruimte van een bepaald fysisch proces zoals hydraulisch ruwheid en de rivierafvoer. Deze van nature aanwezige onzekerheid kan niet worden gereduceerd maar wel worden gemodelleerd door middel van kansverdelingen.



Figuur 2.2 Belangrijke typen onzekerheden

Kennisonzekerheid bestaat hoofdzakelijk uit modelonzekerheid en statistische onzekerheid. Statistische onzekerheid is het gevolg van een beperkt aantal gegevens/metingen. Dit type onzekerheid valt buiten het kader van dit rapport en is uitgebreid beschreven in Deltares (2015b).

Modelonzekerheid is het gevolg van wiskundige recepten, meestal een vereenvoudigde weergave van de werkelijkheid, die worden gehanteerd om bepaalde fysische verschijnselen te modelleren, zoals waterbeweging en golfopwekking en –voortplanting.

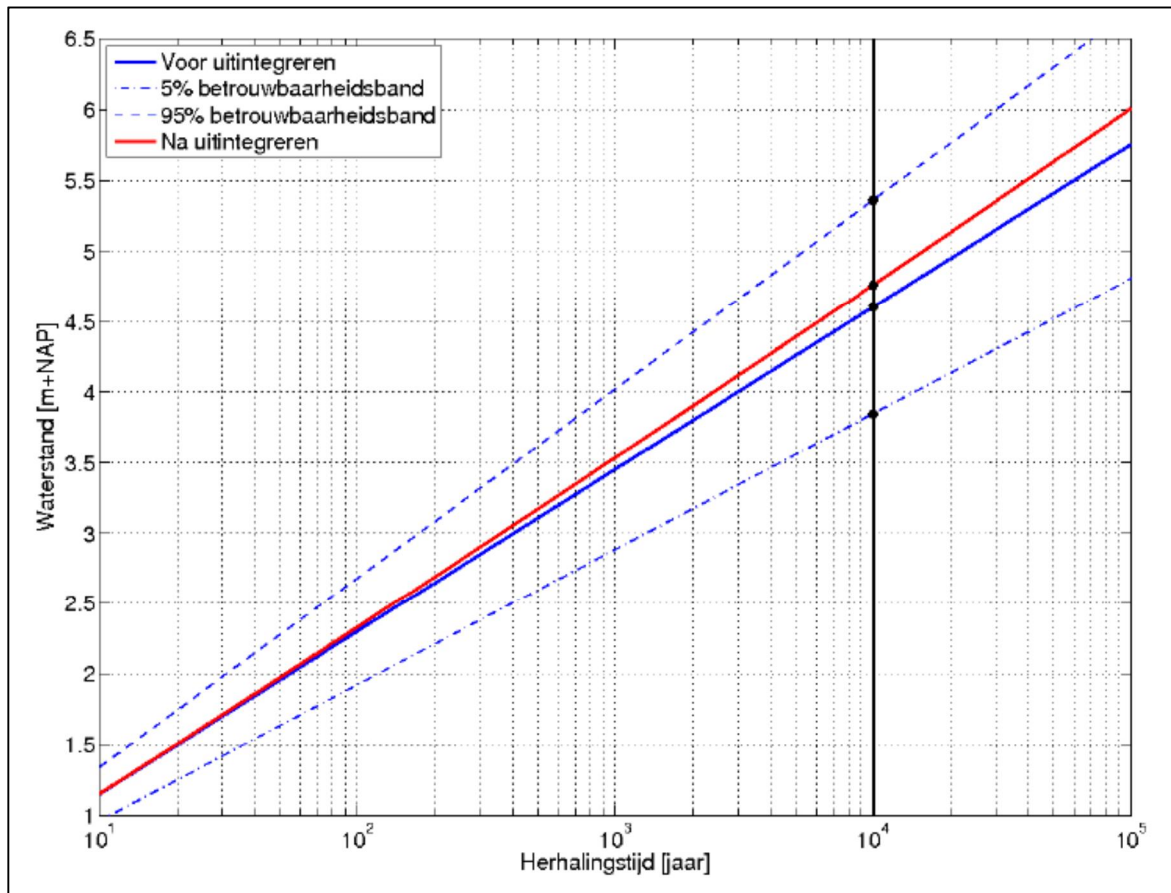
2.2.2 Omgaan met onzekerheden

Ten aanzien van methoden voor het omgaan met onzekerheden is het onderscheid van belang tussen inherente onzekerheid en kennisonzekerheid zoals hierboven gedefinieerd. Het is gebruikelijk dat inherente onzekerheden worden beschreven middels een kansverdeling. De natuurlijke variatie in afvoeren of zeewaterstanden wordt bijvoorbeeld beschreven met overschrijdingskansen, die worden gebruikt als (basis)invoer voor kansberekeningen. De huidige Hydra's (Hydra-Zoet, Hydra-K, e.d.) houden uitsluitend rekening met dit type onzekerheid. Voor het gebied van de Benedenrivieren houdt Hydra-Zoet rekening met inherente onzekerheid in afvoer (de Rijn bij Lobith of de Maas bij Borgharen), zeewaterstand bij Hoek van Holland, windsnelheid en windrichting bij Schiphol en de voorspellingfout in waterstand (voor aansturing van de stormvloedkeringen) en de faalkans van de stormvloedkering.

Kennisonzekerheid wordt niet meegenomen in de huidige HR bepaling; ook is er nog geen standaard benadering voor omgaan met dit type onzekerheid. Verschillende benaderingen komen in de praktijk voor, variërend van simpelweg verwaarlozen tot volledig verdisconteren en uit-integreren. Uit-integreren leidt net als in de huidige aanpak tot een schatting van de verwachte waarde van de HR, maar dan wel met inachtneming van alle (relevante) onzekerheden: zowel inherente als kennisonzekerheden.

Recentelijk zijn twee studies uitgevoerd waarin mogelijke effecten op de HR van het meenemen van kennisonzekerheid in beeld zijn gebracht. Het betreft (Beckers, 2009) en (Nicolai et al, 2010). De eerste studie was kwalitatief van aard en de tweede betreft een kwantitatieve analyse waarin de relevante kennisonzekerheden zijn uit-geïntegreerd. Hierbij is gebruik gemaakt van het probabilistisch model PC Ring. Het beeld dat naar voren kwam uit deze studie is dat het meenemen van kennisonzekerheid leidt tot iets hogere hydraulische belastingen (waterstanden en belastingniveaus).

Figuur 2.3 toont een voorbeeld van uit-integreren, uitgewerkt door prof. Vrouwenfelder (Nicolai et al, 2010). De doorgetrokken blauwe lijn in dit voorbeeld is een overschrijdingslijn van de waterstand op een locatie langs de kust. De helling van deze lijn is onzeker. De gestippelde blauwe lijnen rond de blauwe doorgetrokken lijn zijn de betrouwbaarheidsintervallen. Deze intervallen beschrijven de variatie in de waterstand als functie van de herhalingstijd. Door de statistische onzekerheid in (de helling van) de blauwe lijn expliciet mee te nemen (uit-integreren over alle mogelijke lijnen binnen het betrouwbaarheidsinterval) wordt de rode lijn gevonden.



Figuur 2.3 Voorbeeld uit-integreren statistische onzekerheid in waterstand, (Nicolai et al, 2010).

2.3 Modelonzekerheid Hydra-Ring

In de huidige HR wordt alleen rekening gehouden met inherente onzekerheid van de belangrijke bedreigingen (basisstochasten); kennisonzekerheid wordt hierbij vooralsnog buiten beschouwing gelaten. Binnen WTI-2017 gaan we er vooralsnog vanuit dat zowel de statistische onzekerheid als de modelonzekerheid in lokale waterstand en golfcondities worden meegenomen. Deze functionaliteit is geïmplementeerd in Hydra-Ring; zie (Diermanse et al., 2013) en (Nicolai et al., 2014).

Modelonzekerheid heeft in dit rapport betrekking op de onzekerheid in modelresultaten die worden gegenereerd door gebruik te maken van wiskundige/fysische modellen voor de waterbeweging. Het betreft concreet de uitkomsten van de productieberekeningen met WAQUA, IMPLIC en PHAROS¹ voor de waterstanden en SWAN en Bretschneider voor de golfcondities.

Hydra-Ring is zo flexibel ontworpen dat het toevoegen van extra stochasten mogelijk maakt. Kennisonzekerheden worden dan ook als extra stochasten toegevoegd aan Hydra-Ring (Diermanse, 2014). Tabel 2.3 geeft de parameters weer die, als weergave van modelonzekerheid, geïmplementeerd worden in Hydra-Ring als extra stochasten. De wijze van implementatie in Hydra-Ring is beschreven in Scientific Documentation Hydra-Ring (Diermanse et al, 2013).

¹ PHAROS wordt gebruikt om waterstandsslingeringen in o.a. havens (Europoort) te bepalen

Tabel 2.3 Parameters die als extra stochasten geïmplementeerd worden in Hydra-Ring (bron (Chbab, 2014)).

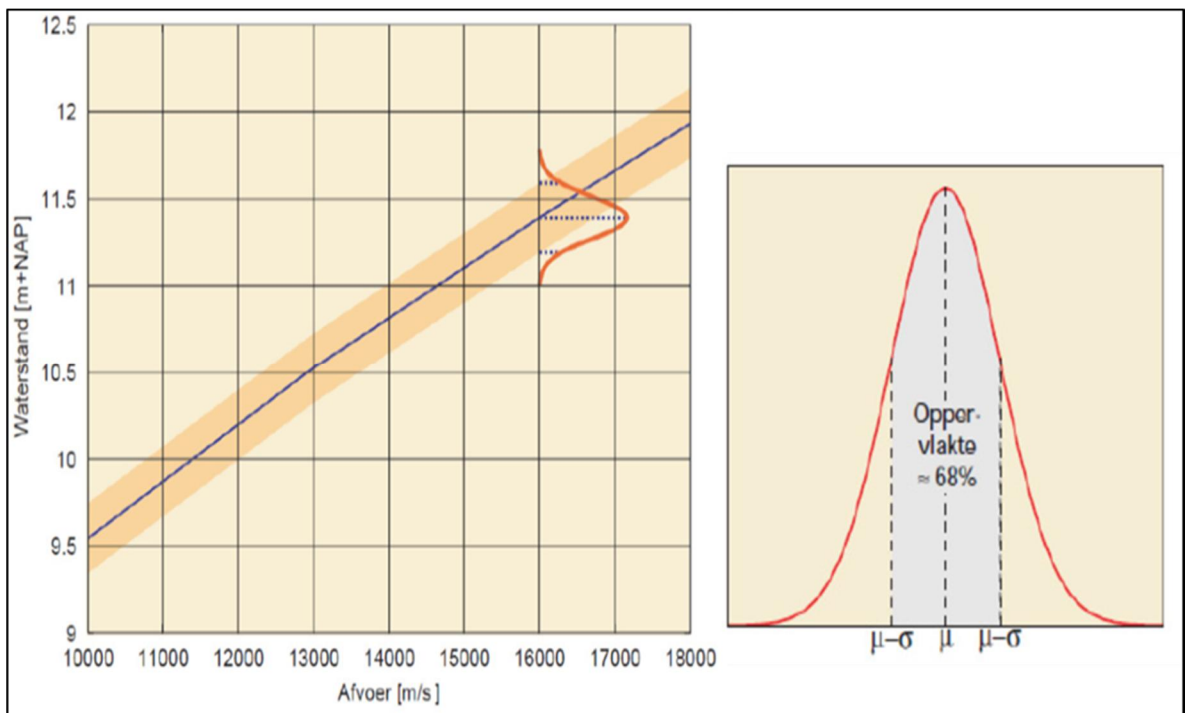
Model	Onzekerheidsparameter	Relevant voor regio
WAQUA	waterstand h	1 t/m 8 en 17
IMPLIC	waterstand h	14
SWAN	golfhoogte H_{m0} golfperiode $T_{m-1,0}$ golfrichting θ	7 t/m 17 en delen van 3, 4 en 6
Bretschneider	golfhoogte H_s golfperiode T_p	1 en 2 en delen van 3 en 4

2.4 Aanpak en uitgangspunten modelonzekerheid waterstanden

Voor het kwantificeren van modelonzekerheid in lokale waterstand is gebruik gemaakt van enerzijds een vergelijking tussen gemeten en berekende waterstanden en anderzijds de resultaten van een aantal uitgevoerde gevoeligheidsberekeningen en expert judgement, waarbij extreme omstandigheden zijn beschouwd. De hydraulische eigenschappen van de verschillende watersystemen zijn hierbij bepalend. Per watersysteem zijn de belangrijkste onzekerheidsbronnen geïdentificeerd; hierbij is onderscheid gemaakt in drie typen onzekerheidsbronnen:

1. Modelrandvoorwaarden of forcering/invoer,
2. Modelleren van fysische processen, schematisaties en kalibratie van het model zelf en
3. Niet-gemodelleerde aspecten en/of grootheden.

Binnen elke type onzekerheidsbron zijn verder de belangrijkste bijdragende factoren/bronnen geïdentificeerd en vervolgens de bijbehorende onzekerheid geschat. Waar nodig is het beschouwde watersysteem opgesplitst in deelgebieden. Deze splitsing is voornamelijk gebaseerd op de resultaten van de vershilanalyse en illustratiepunten uit WTI-2011 of HR2006. Illustratiepunten leveren informatie over de kans-bijdrage van verschillende stochasten in extreme omstandigheden. Deze informatie is gebruikt om de voor de waterstanden relevante stochasten en derhalve de belangrijke onzekerheidsbronnen te identificeren. De illustratiepunten zijn gebaseerd op de huidige veiligheidsnormen en het huidige klimaat en leveren ons inziens voldoende informatie over de dominantie van de stochasten en het identificeren van de belangrijke onzekerheidsbronnen. Bij het schatten van modelonzekerheid is waar nodig in verband met de nog vast te stellen nieuwe normen wel rekening gehouden met nog extremere situaties.



Figuur 2.4 Illustratie van onzekerheid in waterstand (als functie van afvoer). In de figuur is een 95%betrouwbaarheidsband van 1 m aangehouden: 0,5 m hoger en 0,5 m lager voor het hele bereik.

Modelonzekerheid is tot stand gekomen uit enerzijds de resultaten van de kalibratie en validatie (vergelijking tussen gemeten en berekende waterstanden) en anderzijds de resultaten van enkele gevoeligheidsberekeningen en expert judgement, waarbij extreme omstandigheden zijn beschouwd. Zo is de indeling in deelgebieden gebaseerd op waarden van de illustratiepunten (huidige normen en huidig klimaat) en uitsplitsingen. De gevoeligheidsberekeningen (ruwheden, cd coëfficiënten, etc.) zijn uitgevoerd met extreme condities.

Met betrekking tot implementatie in Hydra-Ring gelden de volgende uitgangspunten; zie voor een uitgebreide beschrijving (Diermanse, 2014). Als eerste uitgangspunt geldt dat modelonzekerheid (in lokale waterstand) normaal verdeeld is, zie bovenstaande Figuur 2.4. Modelonzekerheid kan in principe uitgedrukt worden in een bias (μ) en een standaardafwijking (σ). Omdat de productieberekeningen uitgevoerd worden met gekalibreerde en gevalideerde modellen, waarbij de kalibratie als doel heeft een bias te minimaliseren, is besloten om de modelonzekerheid enkel uit te drukken in een standaardafwijking en de bias gelijk aan nul te stellen. . Uitzondering hierop vormt de Oosterschelde, waar expliciet een bias in rekening is gebracht. Het tweede uitgangspunt is dat er een getal wordt gebruikt voor het hele bereik. Bij de vaststelling van dit getal wordt wel rekening gehouden met extreme situaties. Het uitgangspunt houdt feitelijk in dat modelonzekerheid niet afhangt van de terugkeertijd zoals geïllustreerd in Figuur 2.4. Voor lage terugkeertijden kan er sprake zijn van een overschatting van modelonzekerheid, maar dit bereik is in veel gevallen minder relevant voor de HR.

2.5 Aanpak en uitgangspunten modelonzekerheid golfcondities

Modelonzekerheid wordt geïntroduceerd in de relatie tussen de basisstochasten (wind, afvoer etc.) enerzijds en de lokale hydraulische condities (waterstanden, golven) anderzijds. De onzekerheid in de waterstanden is reeds aangekaart in de voorgaande paragraaf. De

modellen die gebruikt worden binnen het toetsinstrumentarium om de golfbelasting aan de harde en zachte keringen te bepalen zijn SWAN, HISWA en Bretschneider. Wanneer we de watersystemen van Nederland verdelen in vijf hoofdsystemen:

- 1 Kustgebieden en IJsselmeer
- 2 Brede delen van het rivierengebied en randmeren
- 3 Smalle wateren in het rivierengebied
- 4 Markermeer – IJburg
- 5 Markermeer – overig (excl. IJburg en Eemvallei)

dan geldt dat SWAN wordt toegepast in de systemen (1), (2) en (4), terwijl de golfgroeikromme van Bretschneider wordt gebruikt om de golfcondities in systeem (3) te bepalen. De Markermeer-regio vormt een uitzondering. Daar worden rekenresultaten gebruikt die verkregen zijn met SWAN (IJburg), Bretschneider (Eemvallei) en HISWA (overig). In hoofdstuk 4 gaan we gedetailleerder in op deze onderverdeling. Voor deze vijf hoofdsystemen zijn de belangrijkste bronnen van onzekerheid geïdentificeerd, afhankelijk van het type golfmodel dat wordt gebruikt, in de relatie tussen de basisstochasten en de lokale golfcondities en zijn vervolgens de resulterende modelonzekerheden in termen van bias en standaard deviatie op de significante golfhoogte en gemiddelde en/of piekperiode bepaald (en dus niet de golfrichting).

Ruwweg zijn twee onzekerheidsbronnen onderscheiden: 1) benadering van fysische processen en 2) onzekerheden in modelinvoer (bijv. wind boven open water), schematisatie en het niet modelleren van fysische aspecten en/of grootheden (bijv. stroming bij gebruik Bretschneider). Middels een groot aantal hindcasts is inzicht verkregen in de verschillen tussen gemeten en berekende golfparameters op meetlocaties. Deze verschillen geven een schatting van de modelonzekerheden aan als gevolg van de bronnen van onzekerheden, zoals boven geclassificeerd, voor zover dit het gebruik van SWAN en HISWA betreft. Bij het gebruik van de formulering van Bretschneider geldt een sterke versimpeling van de werkelijkheid ten aanzien van bodemhoogte en strijklengte en er worden aannames gedaan ten aanzien van het verwaarloosbaar zijn van o.a. stroming. Daarom zijn de bronnen 1 en 2 gescheiden behandeld. Aan de hand van een vergelijking met metingen zijn de resulterende onzekerheid als gevolg van bron 1 bepaald. Een groot aantal gevoeligheidsberekeningen hebben geleid tot een schatting van de onzekerheden als gevolg van bron 2. De onzekerheidsschattingen van beide bronnen zijn samengevoegd tot een schatting voor het gebruik van de golfgroeiformule van Bretschneider. Daarbij is de aanname gedaan dat de bronnen onafhankelijk zijn, zodat standaardafwijkingen kwadratisch kunnen worden opgeteld. Formeel is dit een onjuiste aanname, maar omdat de standaardafwijking als gevolg van bron 1 ongeveer de helft is van die van bron 2, bedraagt het verschil slechts enkele procenten.

Met betrekking tot implementatie in Hydra-Ring gelden een aantal uitgangspunten. Voor een uitgebreide beschrijving verwijzen we naar Diermanse (2014). Als eerste uitgangspunt geldt dat modelonzekerheid (in lokale golfparameters) normaal verdeeld is. Modelonzekerheid kan in principe uitgedrukt worden in een bias (μ) en een standaardafwijking (σ). In tegenstelling tot lokale waterstand, is de mogelijke bias niet verwerkt in de standaardafwijking. Voor zowel SWAN, HISWA en Bretschneider treedt een bias op in de golfparameters. Het tweede uitgangspunt is dat om praktische en implementatie-technische redenen geen onderscheid wordt gemaakt tussen meetbereik en extreme situaties. Dit wil zeggen dat de onzekerheid in lokale golfparameters feitelijk niet afhangt van de terugkeertijd. Deze aanname is consistent met de geloofssprong die voor WTI2011 is gemaakt door SWAN toe te passen op extreme condities waar het feitelijk niet op is afgeregeld.

3 Modelonzekerheid lokale waterstand

3.1 Inleiding

Modelonzekerheid is in dit rapport gedefinieerd als de onzekerheid in lokale waterstanden die voortvloeien uit de productieberekeningen. Modelonzekerheid heeft bijgevolg een bredere betekenis en er zijn in principe 3 hoofdbronnen die hieraan bij kunnen dragen: 1) modelrandvoorwaarden of forcering/invoer, 2) modellering van fysische processen, schematisaties en kalibratie van het model zelf en 3) niet gemodelleerde aspecten en/of grootheden. Met uitzondering van de kustgebieden (Westerschelde, Hollandse kust en Waddenzee) waar geen productiesommen worden gemaakt met WAQUA of een ander waterbewegingsmodel², is modelonzekerheid in lokale waterstanden gekwantificeerd en in verschillende deelrapporten of memo's vastgelegd. In onderstaande paragrafen wordt hiernaar gerefereerd.

3.2 Regio 1 en 2: Bovenrivieren

Het Bovenrivierengebied is in Hydra-Ring ingedeeld in 2 regio's: regio 1 voor de Rijntakken en regio 2 voor de Maas. Voor beide regio's is modelonzekerheid gekwantificeerd en gerapporteerd in (Tijssen et al, 2013); op basis van expert judgement zijn later enkele aanpassingen doorgevoerd, zie (Chbab, 2015a)

3.2.1 Regio 1: Rijntakken

Tabel 3.1 bevat de schattingen voor de locaties langs verschillende riviertakken van de Rijn. De belangrijkste onzekerheidsbron betreft volgens geraadpleegde experts de ruwheden en morfologische veranderingen onder extreme omstandigheden. De onzekerheid in afvoerverdeling is ten opzichte van deze twee onzekerheidsbronnen relatief klein. Deze draagt alleen bij in het gebied van de IJssel.

Tabel 3.1 Modelonzekerheid regio 1: Rijntakken

Riviertak	Bias [m]	Standaardafwijking [m]
Waal	0	0,30
Lek/Nederrijn	0	0,30
IJssel	0	0,35

3.2.2 Regio 2: Maas

Tabel 3.2 bevat de schattingen voor de locaties langs Maas.

Tabel 3.2 Modelonzekerheid regio 2: Maas

Riviertak	Bias [m]	Standaardafwijking [m]
Maas	0	0,30

De belangrijkste onzekerheidsbronnen betreffen evenals de Rijn kalibratie, ruwheden en morfologische veranderingen onder extreme omstandigheden. De bijdrage van de bodemligging aan de totale onzekerheid is relatief klein.

² De maatgevende waterstanden in de kustgebieden worden in Hydra-Ring bepaald op basis van interpolatie van waterstandstatistiek, die beschikbaar is op meetlocaties. Omdat de interpolatiefouten (orde decimeters) een orde kleiner zijn dan de statistische onzekerheden (orde meter) worden deze interpolatiefouten hier niet verder beschouwd.

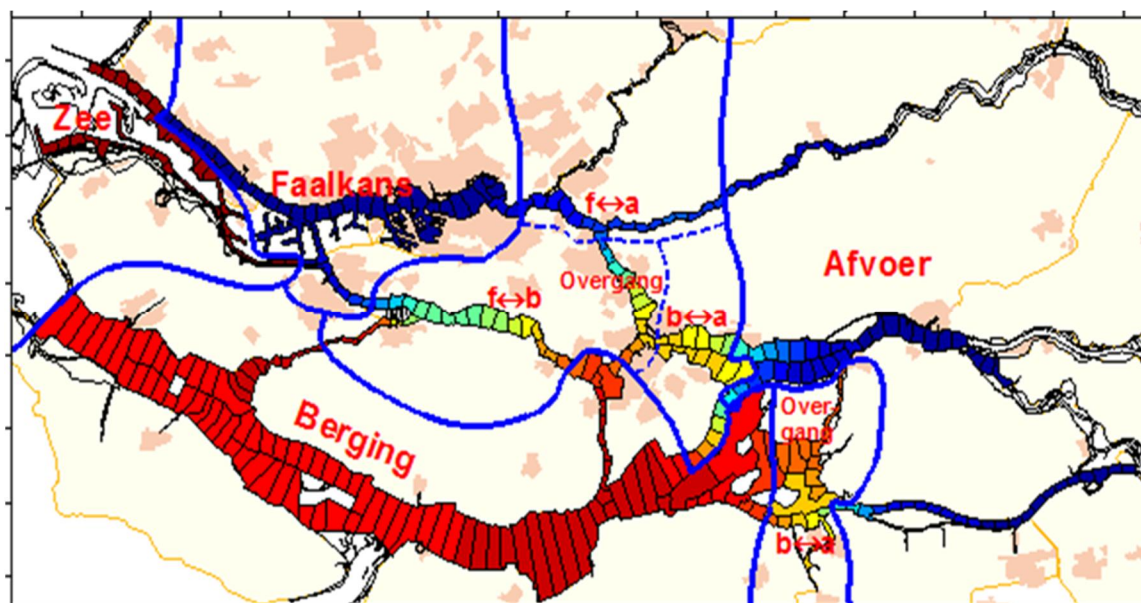
3.3 Regio 3 en 4: Benedenrivieren

Het Benedenrivierengebied is in Hydra-Ring ingedeeld in 2 regio's: regio voor de Rijntakken (Rijnafvoer is dominant) en één regio voor de Maas (Maasafvoer is dominant). Daar de waterstanden in het Benedenrivierengebied sterk beïnvloed worden door de Europoortkering zijn bij de kwantificering van modelonzekerheid voor dit gebied beide beheersituaties, open en dicht, beschouwd.

3.3.1 Regio 3: Benedenrivieren Rijn

Modelonzekerheid in lokale waterstand voor de Benedenrivieren is beschreven in (Chbab, 2015a). In vergelijking met Bovenrivieren spelen in het Benedenrivierengebied naast afvoeren, zeewaterstanden/getij, wind en de Europoortkering een belangrijke rol. Daarnaast worden de Benedenrivieren bedreigd door beide rivierafvoeren: Rijn en Maas. Afhankelijk van locatie spelen al deze aspecten in meer of mindere mate een rol. Om deze reden is het gebied van de Benedenrivieren opgesplitst in deelgebieden zoals beschreven in Figuur 3.1. De deelgebieden zijn:

Afvoergebied:	De maatgevende situatie wordt in dit gebied (volledig) bepaald door hoge rivierafvoer van orde 16.000-17.000 m ³ /s voor Rijndominantgebied of 3.800-4.000 m ³ /s voor Maasdominantgebied.
Zeegebied:	De maatgevende situatie wordt in het zeegebied volledig bepaald door hoge stormvloed langs de Hollandse kust waarbij een waterstand te Maasmond van ca. 5,00 m+NAP wordt bereikt. De Europoortkeringen zijn gesloten en veroorzaken enige opstuwning in het Europoortgebied, al dan niet in combinatie met seiches.
Faalkansgebied:	De maatgevende situatie in dit gebied is een middelbare storm met een waterstand van ca. 3,5 m+NAP te Maasmond in combinatie met het falen van de sluiting van de Europoortkeringen.
Bergingsgebied:	De maatgevende situatie in dit gebied is een middelbare afvoer van 6.000 á 10.000 m ³ /s (met soms nog hogere afvoeren) die samenvalt met een middelbare storm die de afvoer vanuit de Rijn- en Maasmonding naar zee enige tijd stremt. De Europoortkeringen zijn meestal gesloten. Door de relatief hoge afvoer zijn de hoge waterstanden in dit gebied gevoelig voor de stormduur, al dan niet in combinatie met het faseverschil tussen opzet en getij.
Overgangsgebied:	In het overgangsgebied is sprake van een combinatie van bovenstaande bedreigingen in wisselende samenstelling. Er komen drie overgangen voor:
f-a:	De maatgevende situatie is altijd met open Europoortkeringen, maar gaande van het faalkansgebied naar het rivierengebied wordt de rol van de afvoer steeds belangrijker en die van de stormopzet minder.
f-b:	De maatgevende situatie gaat gaande van faalkansgebied naar bergingsgebied van open naar dichte keringen, onder maatgevende omstandigheden stijgt de afvoer van ca. 2.000 naar 6.000 á 10.000 m ³ /s bij vrije constante middelbare stormopzet van ca. 3,5 m+NAP.
b-a:	De maatgevende situatie gaat gaande van berging naar afvoergebied van dichte naar open stormvloedkeringen waarbij de rol van de afvoer steeds hoger wordt en die van de stormopzet terugloopt.



Figuur 3.1 Deelgebieden van RMM: zee-, faalkans-, afvoer-, bergings- en overgangsgebied.

Onderstaande Tabel 3.3 bevat de schattingen voor modelonzekerheid per gebied dat wordt gedomineerd door afvoer van de Rijn.

Tabel 3.3 Modelonzekerheid per deelgebied in regio 3: Benedenrivieren Rijn

Gebied	Standaard deviatie [m]	
	Open keringen	Gesloten keringen
Lek: bovenstrooms van km 981 Boven Merwede Beneden Merwede bovenstrooms van km 968, Nieuwe Merwede bovenstrooms van 970	0,30	0,30
Faalkansgebied Nieuwe Maas Nieuwe Waterweg binnenzijde Oude Maas, beneden km 997	0,15	0,25
Zeegebied: het gebied buiten de stormvloedkeringen	0,15	0,15
Bergingsgebied	0,25	0,30
Overgangsgebied		
f-a	0,25	0,30
f-b	0,25	0,30
b-a	0,25	0,30

Per deelgebied in regio 3 gelden in principe verschillende onzekerheidsbronnen. In het rivierengebied van regio 3 is de Rijnaafvoer de belangrijkste stochast en de belangrijkste onzekerheidsbronnen hangen dan voornamelijk hiermee samen. Ruwheden en morfologische veranderingen onder extreme omstandigheden vormen dan ook de belangrijkste onzekerheidsbronnen. Voor het faalkansgebied van regio 3 vormt de onzekerheid in stormopzetduur de belangrijkste onzekerheidsbron. Andere bijdragende onzekerheidsbronnen zijn faseverschil tussen getij en opzet, windmodellering, schematisatie

en onafhankelijk falen de keringen. De belangrijkste onzekerheidsbronnen voor het bergingsgebied zijn stormopzetduur, faseverschil tussen opzet en getij, windmodellering en ruwheden/morfologische veranderingen. In overgangsgebieden is sprake van een combinatie van bovengenoemde onzekerheidsbronnen in wisselende samenstelling.

3.3.2 Regio 4: Benedenrivieren Maas

Modelonzekerheid in lokale waterstand voor de Benedenrivieren is beschreven in Chbab (2015a). Regio 4 bestaat uit locaties in de Benedenrivieren die Maasgedomineerd zijn; deze liggen langs de Bergsche Maas en de Maas. Het betreft alle locaties die bovenstrooms van km 246 liggen.

Tabel 3.4 Modelonzekerheid regio 4: Benedenrivieren Maas

Riviertak	Bias [m]	Standaardafwijking [m]
Bergsche Maas en Maas	0	0,35

In het rivierengebied waar de Maas dominant is gelden in principe dezelfde onzekerheidsbronnen als in het Rijndominante gebied. Daarnaast draagt de onzekerheid in laterale toestroom bij aan de totale onzekerheid.

3.4 Regio 5: IJsseldelta

De hele IJsseldelta is in Hydra-Ring als één regio gedefinieerd: regio 5. Modelonzekerheid in lokale waterstand voor de IJsseldelta is beschreven in (Chbab, 2015b). Het gebied van de IJsseldelta is opgesplitst in drie deelgebieden: De IJssel bovenstrooms, een overgangsgebied en de IJsseldelta benedenstrooms.

Tabel 3.5 Modelonzekerheid regio 5: IJsseldelta

Deelgebied	Bias [m]	Standaardafwijking [m]
IJssel bovenstrooms van km 993	0	0,35
Overgangsgebied: km 993 – km 996	0	0,40
IJsseldelta benedenstrooms van km 996	0	0,35

In het bovenstroomse deel van de IJssel wordt modelonzekerheid voornamelijk bepaald door ruwheden/kalibratie en morfologische veranderingen onder extreme omstandigheden. De bijdrage van de onzekerheid in windmodellering, bovenrand (permanent rekenen) en Bypass Kampen is relatief klein in dit gebied.

Benedenstrooms in de IJsseldelta geldt de onzekerheid in windmodellering (windstress en waterruwheid, windvelden en transformatie naar open-water wind) als de meest bijdragende onzekerheid. De bijdrage van de onzekerheid als gevolg van aansturing en schematisatie van Ramspol alsmede de bodemligging is relatief klein.

In het overgangsgebied van de IJsseldelta bepalen verschillende onzekerheidsbronnen de totale onzekerheid, maar in wisselende samenstelling.

3.5 Regio 6: Vechtdelta

De hele Vechtdelta is in Hydra-Ring als één regio gedefinieerd: regio 6. Modelonzekerheid in lokale waterstand voor de Vechtdelta is beschreven in Chbab (201b). Het gebied van de

Vechtdelta is opgesplitst in drie deelgebieden: de Overijsselse Vecht bovenstrooms, Zwarte Water en Zwarte Meer.

Tabel 3.6 Modelonzekerheid per deelgebied van regio 6: de Vechtdelta

Deelgebied	Bias [m]	Standaardafwijking [m]
Vecht bovenstrooms van km 60 en Zwarte Water bovenstrooms van km 08	0	0,35
Zwarte Water benedenstrooms van km 08	0	0,40
Zwarte Meer: het hele gebied van Zwarte Meer, de grens met Zwarte Water ligt bij km 20 (punt hoort bij Zwarte Water)	0	0,40

De onzekerheden als gevolg van kalibratie, ruwheden en morfologische veranderingen bepalen de onzekerheid in het bovenstroomse deel van de Vecht. Deze onzekerheidsbronnen gelden ook voor het Zwarte water en zwarte Meer. Afvoer speelt immers ook in dit gebied een belangrijke rol. Daarnaast dragen de onzekerheid in windmodellering en onderloopgedrag van Kampereiland ook bij in deze 2 gebieden aan modelonzekerheid. De bijdrage van de onzekerheid in de bodemligging en falen van Ramspolkering is relatief klein.

3.6 Regio 7: IJsselmeer

Het hele IJsselmeer, inclusief Ketelmeer en Vossemeer, is in Hydra-Ring gedefinieerd als één regio: regio 7. Modelonzekerheid in lokale waterstand voor deze regio is beschreven in (Chbab, 2015b). Het IJsselmeer is hierbij opgesplitst in 3 deelgebieden, zie Tabel 3.7 en :

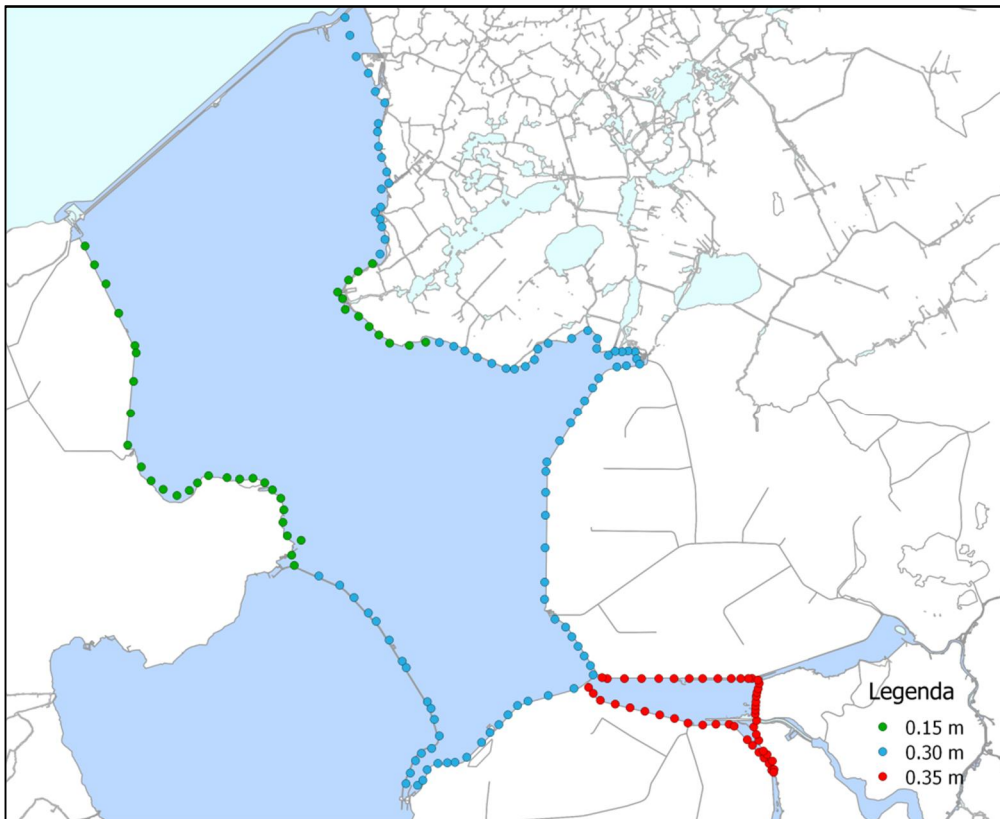
1. Deelgebied 1 en omvat alle locaties in het Ketelmeer, het Vossemeer en de westzijde van de verbindende Ramspolkering tot de IJsselmonding,
2. Deelgebied 2; deze omvat alle locaties in het IJsselmeer waar de wind bepalend is voor de waterstand,
3. Deelgebied 3 en omvat alle locaties in het IJsselmeer die meerpeil gedomineerd zijn.

Tabel 3.7 Modelonzekerheid verschillende deelgebieden van regio 7: het IJsselmeer

Deelgebied	Bias [m]	Standaardafwijking [m]
Ketelmeer en Vossemeer (alle locaties ten oosten van Ketelbrug)	0	0,35
IJsselmeer winddominant: Locaties langs Noordoostpolder + Flevoland + deel Friesland + deel Houtribdijk	0	0,30
IJsselmeer meerpeildominant: locaties langs de kust van Noord-Holland + deel Houtribdijk	0	0,15

Wind is de bepalende factor op het IJsselmeer en vormt dan ook de belangrijkste bron voor modelonzekerheid. Wind gerelateerde aspecten zoals windstress, windvelden en transformatie naar open-water wind dragen hier aan bij. Daarnaast spelen parameterinstellingen en numerieke aspecten van het WAQUA model en slingeringen op het IJsselmeer ook een rol. De bijdrage van de bodemligging aan de totale onzekerheid is volgens geraadpleegde experts marginaal.

In het gebied dat gedomineerd wordt door het meerpeil is de modelonzekerheid klein en wordt bepaald door voornamelijk parameterinstellingen en numerieke aspecten van het model.



Figuur 3.2 Deelgebieden en bijbehorende standaardafwijking van regio 7: het IJsselmeer

3.7 Regio 8: Markermeer

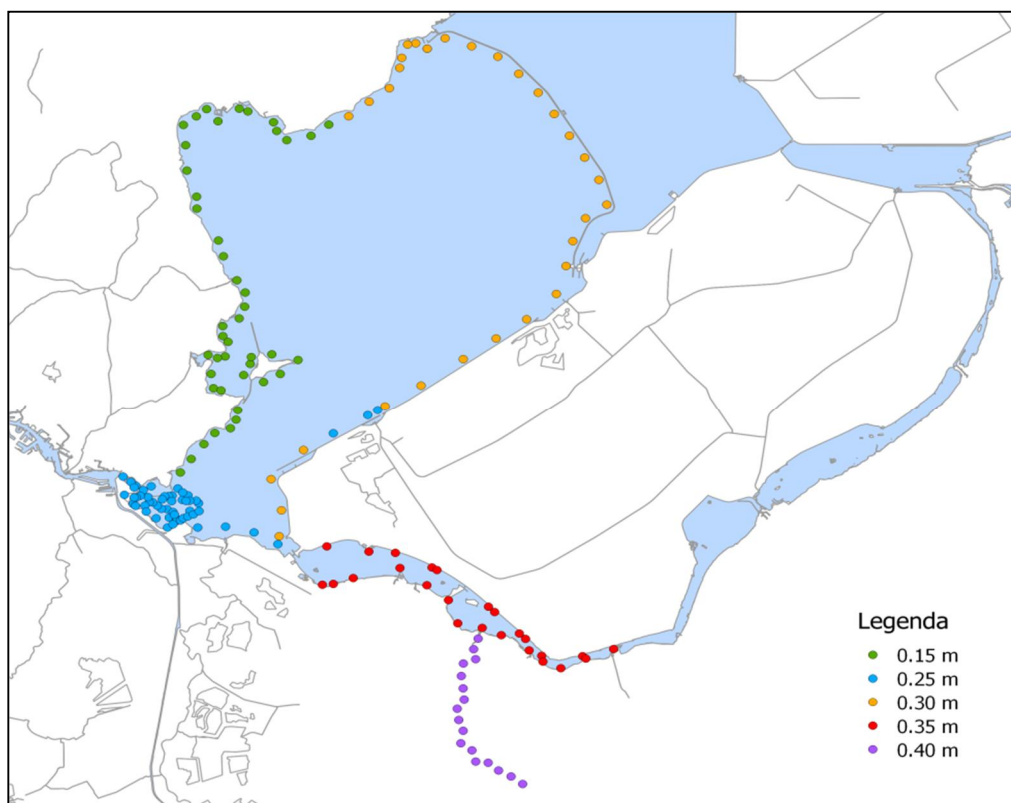
Het hele Markermeer, inclusief IJmeer, IJburg, Gooimeer, Eemmeer, Nijkerkernauw en Eem is in Hydra-Ring gedefinieerd als één regio: regio 8. Modelonzekerheid in lokale waterstand in deze regio is beschreven in (Chbab, 2015b).

Het Markermeer is hierbij opgesplitst in vier deelgebieden. Deze indeling komt overeen met de indeling die reeds werd toegepast voor het bepalen van waterstandsverlopen, zie (Chbab, 2012):

1. deelgebied waarbij extreem hoge wind in combinatie met laag meerpeil bepalend is,
2. deelgebied waarbij hoog meerpeil en hoge windsnelheid een rol spelen,
3. deelgebied waarbij extreem hoge meerpeilen de waterstanden bepalen, wind speelt in dit gebied nauwelijks een rol en
4. deelgebied waar de wind, windopzet vanuit het Markermeer samen met afvoer de Eem de waterstanden bepalen (Eem).

Tabel 3.8 Modelonzekerheid deelgebieden van regio 8: het Markermeer

Deelgebied	Bias [m]	Standaardafwijking [m]
Markermeer winddominant: locaties langs Flevoland (deelgebied 1)	0	0,30
Gooimeer (deelgebied 1)	0	0,30
Markermeer wind en meerpeil bepalend: locaties langs IJburg	0	0,25
Markermeer meerpeilgedomineerd: locaties langs kust van Noord-Holland	0	0,15
Eemmeer en Nijkerkernauw	0	0,35
Eem (deelgebied 4)	0	0,40



Figuur 3.3 Modelonzekerheid Locaties Markermeer.

Het Markermeer is qua indeling in deelgebieden en onzekerheidsbronnen vergelijkbaar met het IJsselmeer. Wind (windstress, windvelden en transformatie naar open-water wind) is de belangrijkste onzekerheidsbron voor grote delen van het Markermeer. Vanwege o.a. ligging en lange strijklengtes geldt voor de zuidelijke randmeren de stormduur en winddraaiing als bron van onzekerheid. Voor het gebied van de Eem draagt de afvoer nog bij aan de totale modelonzekerheid.

3.8 Regio 14: Oosterschelde

De Oosterschelde geldt in Hydra-Ring als een regio: regio 14. In tegenstelling tot bovenstaande watersystemen en regio's waar WAQUA wordt gebruikt, worden lokale waterstanden in de Oosterschelde bepaald met IMPLIC. Modelonzekerheid van IMPLIC is op

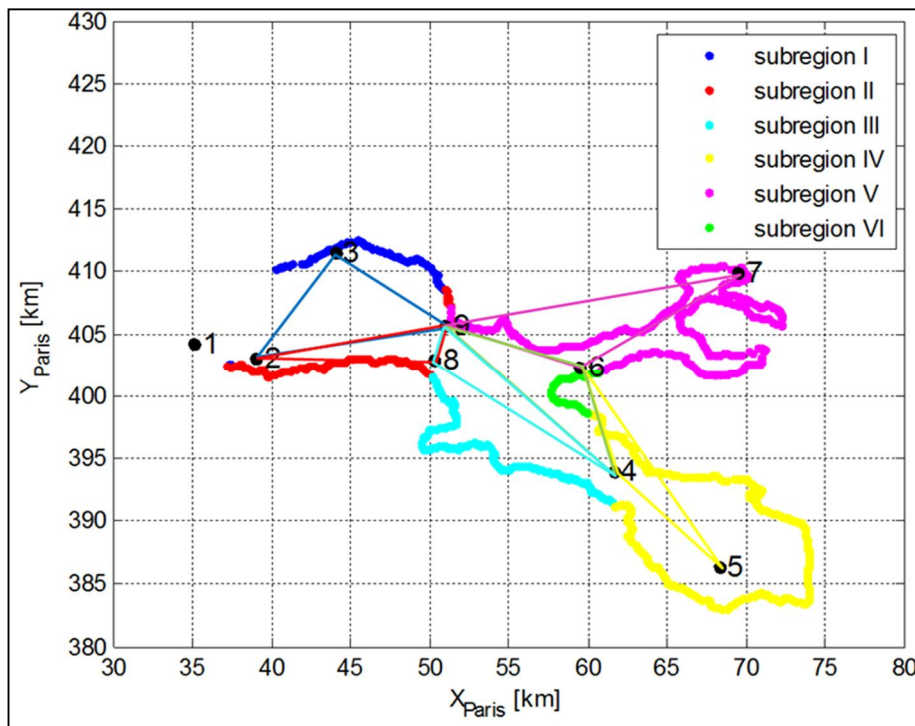
basis van een literatuurstudie en expert judgement vastgesteld; zie (Kramer en Reijmerink, 2015). Hierbij is de Oosterschelde ingedeeld in zes deelgebieden; zie Figuur 3.4.

Om de onzekerheid in de waterstand in beeld te brengen wordt voor de Oosterschelde, in tegenstelling tot andere regio's een bias aangehouden naast een standaardafwijking. De bias is geïntroduceerd omdat er volgens de geraadpleegde experts duidelijk sprake is van een onderschatting van waterstanden door IMPLIC. De IMPLIC resultaten die ten grondslag liggen aan Hydra Ring worden gecorrigeerd om aan te sluiten bij de prestatiepeilen. Deze zijn gebaseerd op veel IMPLIC sommen (ruim 7 miljoen) en worden daarom betrouwbaarder geacht.

Een van de uitgangspunten in Kramer en Reijmerink (2015) is dat het Hydra-K IMPLIC model met 9 uitvoerpunten geïmplementeerd wordt in Hydra-Ring. De modelonzekerheid kan sterk verkleind worden door gebruik te maken van het IMPLIC-RWS-DZL model, welke ook bij bepalen van de prestatiepeilen wordt toegepast.

Tabel 3.9 Modelonzekerheid IMPLIC voor verschillende deelgebieden van regio 14.

Deelgebied	Bias [m]	Standaardafwijking [m]
I	-0,15	0,15
II	-0,15	0,15
III	-0,15	0,15
IV	-0,15	0,20
V	-0,15	0,20
VI	-0,15	0,15



Figuur 3.4 Deelgebieden van Oosterschelde, inclusief steunpunten voor triangulaire interpolatie.

3.9 Correlaties statistische en modelonzekerheden

De statistische verdelingen en bijbehorende statistische onzekerheden voor basisstochasten in de verschillende watersystemen zijn gebaseerd op langjarige meetreeksen. In principe kunnen we aannemen dat er geen correlatie is tussen statistische onzekerheden enerzijds en modelonzekerheden anderzijds. Immers, modelonzekerheden komen voort uit de vertaling van statistiek van basisstochasten naar lokale belastingen.

Uitzondering op bovenstaande vormt de statistische onzekerheid in de rivierafvoer van de Rijn bij Lobith en de Maas bij Borgharen en de modelonzekerheid in de waterstand benedenstrooms van deze locaties. Voor het bovenrivierengebied wordt onder andere de overstap gemaakt naar nieuwe afvoerstatistiek voor de Rijn en Maas, gebaseerd op GRADE.

De bodemruwheid speelt een belangrijke rol in zowel de waterbewegingsmodellen voor rivieren (en dus ook de bijbehorende modelonzekerheid) als in het hydrodynamische model van GRADE (en dus een deel van de statistische onzekerheid van de afvoer), zie Deltares (2015d). Hierbij is het aannemelijk dat de bodemruwheden op strekkingen op de Rijn en Maas aan weerszijden van de grens niet enorm van elkaar zullen verschillen en dat er dus enige vorm van correlatie is tussen beide ruwheden, en dus ook tussen de modelonzekerheid voor rivieren en een deel van de statistische onzekerheid voor de afvoer. Vooralsnog werd deze correlatie niet meegenomen in de probabilistische berekeningen.

In Deltares (2015e) is het mogelijke effect van de keuze voor een correlatie tussen modelonzekerheden in het WAQUA model en (een deel van de) statistische onzekerheden als gevolg van onzekerheid in het hydrodynamisch model van GRADE belicht voor de Rijn. Hieruit blijkt dat de keuze voor een volledige negatieve correlatie leidt tot lagere waterstanden bij Lobith, orde 0,3 m in het relevante bereik aan terugkeertijden. Dit kan beschouwd worden als een maximum, omdat er wordt uitgegaan van een volledige correlatie. In werkelijkheid zal deze lager zijn omdat de correlatiecoëfficiënt ergens tussen -1 en 0 in zit.

Vanwege het forse verschil van maximaal orde 0,3 m in waterstand bij Lobith, valt te overwegen of aanpassingen moeten plaatsvinden op de huidige aanpak waarin we veronderstellen dat de statistische onzekerheid van de afvoer en de modelonzekerheid van WAQUA ongecorrleerd zijn. Omdat essentiële informatie ten aanzien van de bijdrage van ruwheid aan de totale statistische onzekerheid van afvoer enerzijds en modelonzekerheid in de lokale waterstand anderzijds ontbreekt, is geen reële inschatting van de daadwerkelijke correlatiecoëfficiënt ρ te maken.

Op basis van expert judgement hebben we de keuze gemaakt om het reducerend effect van het meenemen van volledige negatieve correlatie te halveren, met andere woorden 0.15 m waterstandsverlaging bij Lobith. Om dit te implementeren in Hydra-Ring zijn er twee opties:

- 1 De waarde van ρ bepalen die leidt tot de gewenste waterstandsverlaging.
- 2 Aanpassen van de modelonzekerheid in lokale waterstand berekend met het WAQUA model en veronderstellen dat de onzekerheden ongecorrleerd zijn.

De eerste methode vergt een aanpassing aan de code van Hydra-Ring en is vooralsnog niet doorgevoerd. De tweede methode vergt slechts een aanpassing van de modelonzekerheid van de lokale waterstand en niet in de code van Hydra-Ring. In Deltares (2015e) is laten zien dat een eerste schatting van $\sigma = 0,15$ m leidt tot een waterstandsverlaging van ongeveer 0,15 m bij Lobith ten opzichte van de situatie van ongecorrleerde onzekerheden ($\sigma = 0,30$ m). Indien voor methode 2 wordt gekozen, stellen we voor de standaardafwijking van de normale

verdeling te verlagen van $\sigma = 0,30$ m tot $\sigma = 0,15$ m. Op deze manier verdisconteren we de aanwezige correlatie tussen ruwheid in Duitsland (via de werklijn van de Rijn) en de ruwheid in de Rijntakken in Nederland.

Naarmate we verder van de grens met Duitsland zijn verwijderd is het ook alleszins redelijk om te veronderstellen dat deze correlatie kleiner wordt en in ieder geval 0 waar de Rijntakken in zee of IJsselmeer uitmonden. Daar worden de maatgevende condities volledig door wind en zeewaterstand of meerpeil beïnvloed en speelt de rivierafvoer en daarmee de bodemruwheid geen rol. In het bovenrivierengebied, waar de zeewaterstand of meerpeil geen rol speelt, is de modelonzekerheid uniform. Ondanks dat er variaties in de bodemruwheid zitten, zien we geen reden om variaties in de reductie van de modelonzekerheid aan te brengen. In het bovenrivierengebied is dit immers de bepalende onzekerheidsbron. Om deze reden beschouwen we de verlaging uniform in het bovenrivierengebied, d.w.z. 0,15 m.

Om een realistische overgang tussen bovenrivieren enerzijds en kust en meren anderzijds te realiseren zullen we de reductie op de onzekerheid, voor zover veroorzaakt door bodemruwheid, laten verlopen van 0,15 m op de grens met het bovenrivieren tot 0 m op de grens met kust of merenregio's. Omdat er geen inhoudelijk gefundeerde voorkeur bestaat voor een bepaald verloop, kiezen we ervoor de om de bijdrage van de bodemruwheid aan de modelonzekerheid met 0,15 m te verlagen. Wanneer de geschatte bijdrage al minder dan 0,15 m was, dan wordt deze bijdrage gelijk gesteld aan 0 cm. Zo komen we uiteindelijk automatisch op 0 m reductie op zee.

Samengevat komen we tot het volgende ruimtelijke verloop van het effect van de correlatie, zoals vertaald in een reductie van de modelonzekerheid:

- Uniform 0,15 cm vanaf Lobith tot aan de locaties waar de zeewaterstand of meerpeil geen effect heeft op de maatgevende condities.
- 0 cm waar afvoer geen effect heeft op de maatgevende condities.
- Verlaging van de bijdrage van de bodemruwheid aan de modelonzekerheid met 0,15 m (of de bijdrage gelijkstellen aan 0 cm, wanneer deze oorspronkelijk minder dan 0,15 m was).

Wat dit concreet betekent voor in voorgaande paragrafen afgegeven modelonzekerheden in de verschillende regio's wordt belicht in Bijlage B.

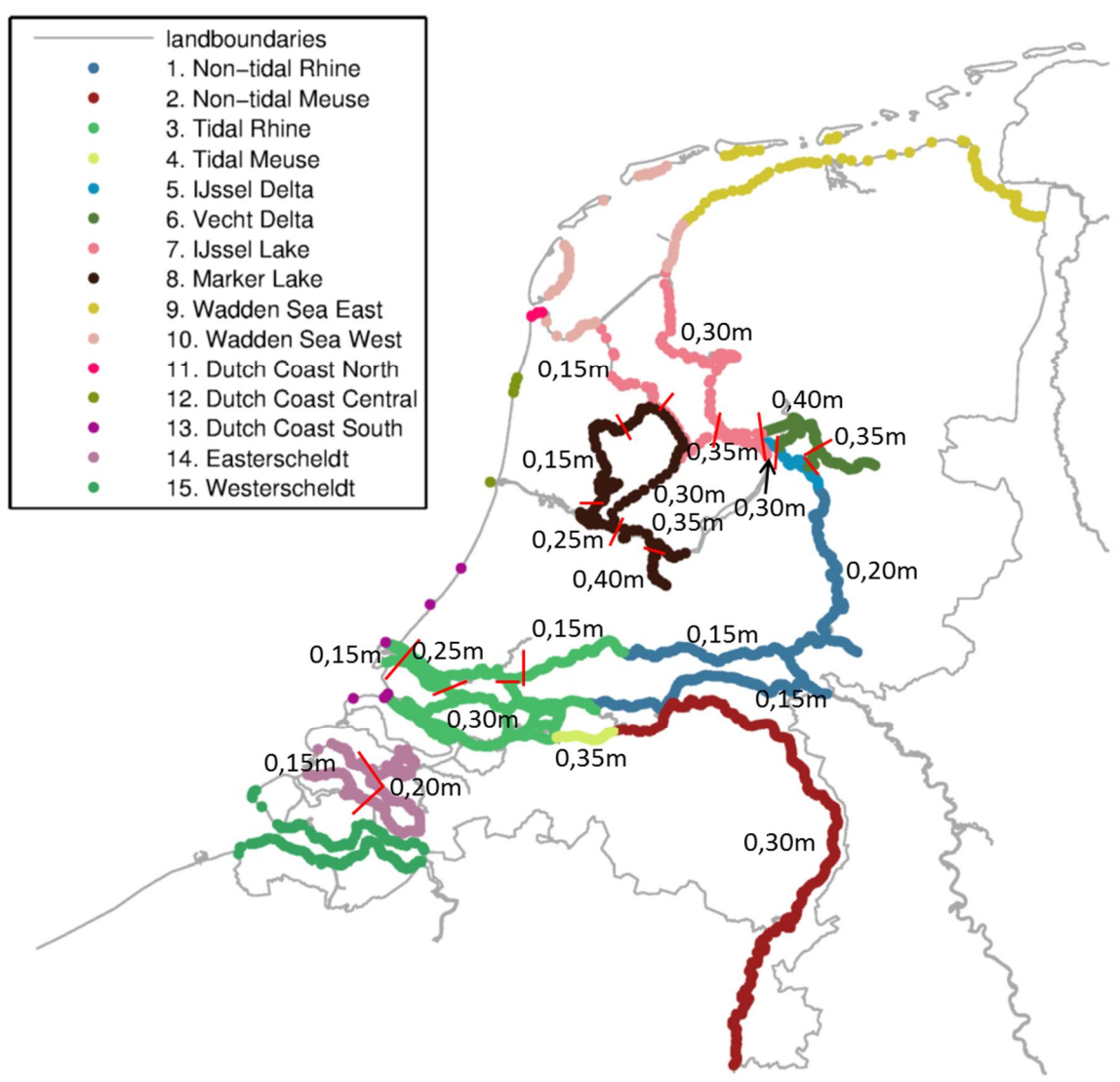
Daar waar voor de Rijn ruwheden in onzekerheden sterk doorwerken in de onzekerheidsband van de werklijn van de Rijn, zijn voor de Maas zijn alleen onzekerheden in het neerslagmodel meegenomen, dus geen effecten van hydraulische onzekerheden. Het ligt dan ook niet voor de hand dit voor de Maas te corrigeren.

3.10 Samenvatting modelonzekerheden lokale waterstanden

In voorgaande paragrafen is beschreven hoe per regio de modelonzekerheden in de lokale waterstand zijn afgeleid en welke waarden voor absolute bias (alleen in geval van Oosterschelde) en absolute standaard afwijking in Hydra-Ring gehanteerd kan worden. In Figuur 3.5 is een landelijk overzicht gegeven van de standaardafwijking. In deze figuur is alleen de situatie voor gesloten Europaotkeringen weergegeven. Voor de waarden met open keringen wordt naar Tabel 3.3 verwezen. Tevens moet worden opgemerkt dat de bias van -0.15 m in de Oosterschelde niet is weergegeven in de figuur.

De standaardafwijkingen liggen tussen 0,15 m en 0,40 m. Over het algemeen kunnen we stellen dat in het afvoergedomineerde deel van het rivierengebied, inclusief Vecht- en

IJsseldelta en Benedenrivierengebied de standaardafwijking maximaal 0,30 – 0,35 m is. Waar de invloed van de zeewaterstand dominant wordt neemt de onzekerheid sterk af met een standaardafwijking van 0,15 - 0,20 m. Anderzijds zien we de standaardafwijking nog iets verder toenemen tot 0,40 m wanneer de windsnelheid dominant wordt ten opzichte van de afvoer. Deze maximale waarden treden op in de benedenstroomse delen van de Vecht- en IJsseldelta en de Eemvallei. In de (rand)meren ligt de standaardafwijking typisch rond de 0,30 - 0,35 m voor die delen waarbij de wind dominant is ten opzichte van het meerpeil. In de omgekeerde situatie neemt de standaardafwijking af tot 0,15 m.



Figuur 3.5 Standaardafwijkingen in lokale waterstanden voor de situatie van gesloten keringen. De gekleurde bollen geven uitvoerlocaties per regio weer. In een aantal regio's is met een rode lijn een onderverdeling gemaakt.

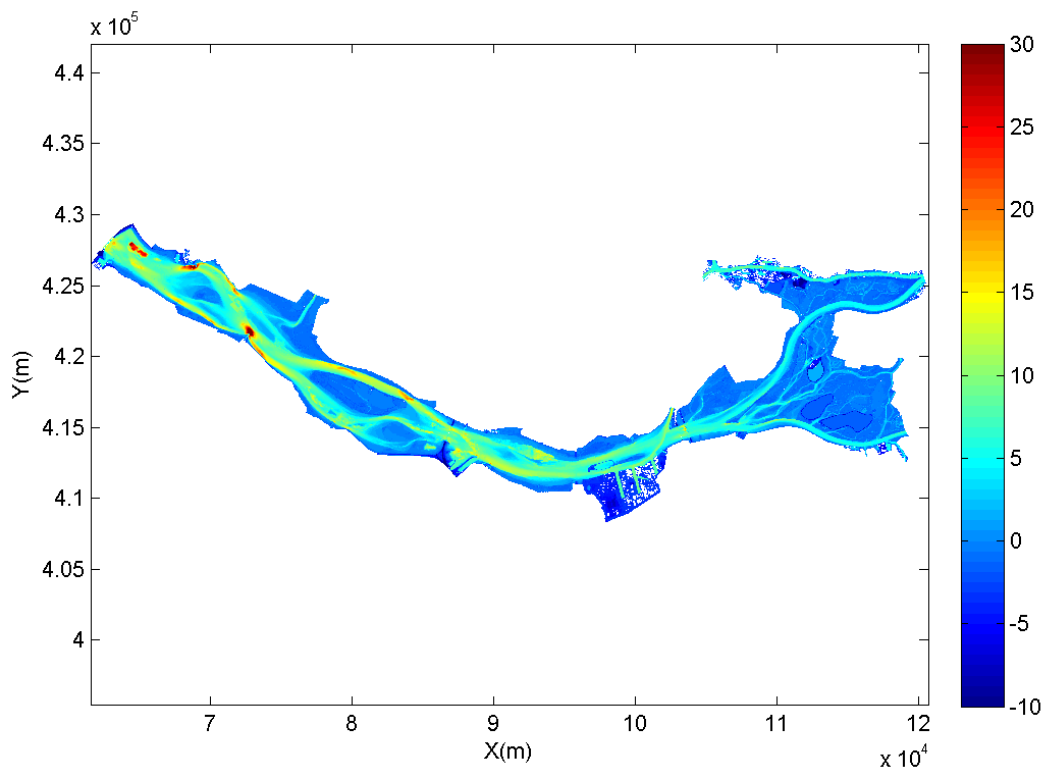
4 Modelonzekerheid golfcondities

4.1 Inleiding

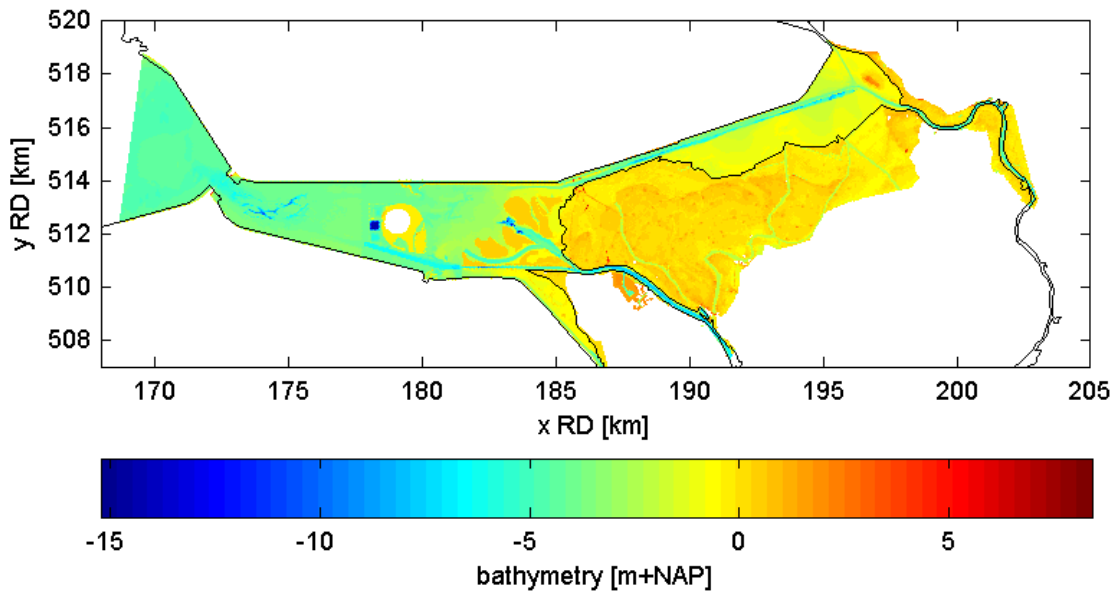
Zoals in paragraaf 2.5 genoemd maken we voor de bepaling van de modelonzekerheden in de relatie tussen basisstochasten en lokale golfbelastingen, onderscheid in vijf hoofdsystemen. Deze opsplitsing is bepaald door het golfmodel dat is toegepast. Het eerste hoofdsysteem betreft de kustsystemen (regio's 9-15 in Figuur 2.1) en IJsselmeer (regio 7 in Figuur 2.1 met uitzondering van Ketelmeer en Vossemeer), en wordt hier verder aangeduid als hoofdsysteem I. Voor deze systemen is SWAN toegepast.

Datzelfde geldt voor de brede wateren van het rivierengebied, al zijn de karakteristieken daar anders. Om deze reden zien we dit als een apart hoofdsysteem II. Onder deze brede wateren vallen:

- Haringvliet, Hollands Diep, Biesbosch (gedeelte van regio 3 in Figuur 2.1); de bodemligging in het gehanteerde SWAN model is weergegeven in Figuur 4.1,
- Ketelmeer en Vossemeer (gedeelte van regio 7 in Figuur 2.1) en Zwartemeer (gedeelte van regio 6, de Vechtdelta, zie Figuur 2.1); de bodemligging in het gehanteerde SWAN-IJVD model is weergegeven in Figuur 4.2.



Figuur 4.1 Bodemligging 2017 van het SWAN model Rijn-Maasmonding.



Figuur 4.2 Bodemligging 2017 van het SWAN model Vecht-IJssel delta.

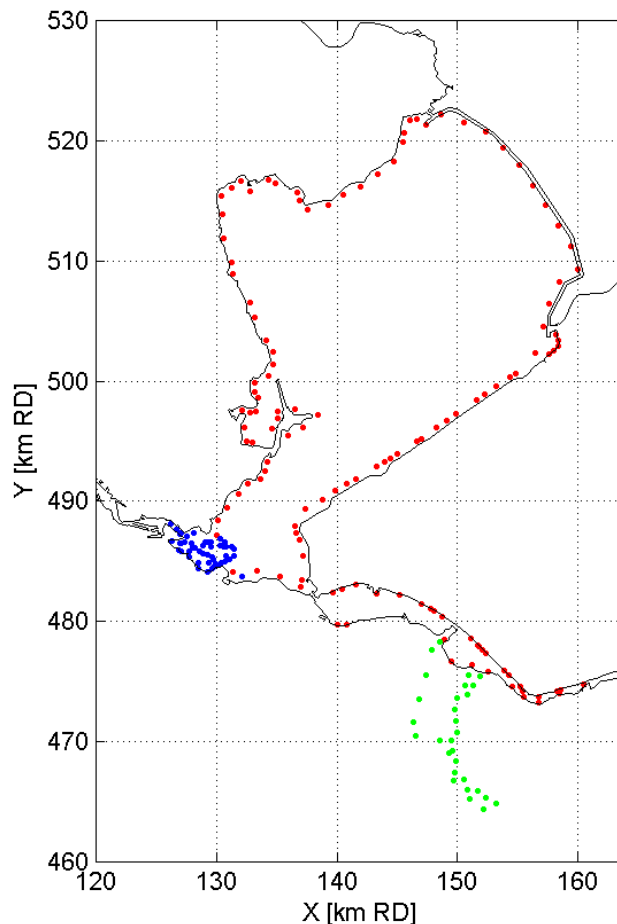
De golfgroeiformule van Bretschneider en de bijbehorende schematisaties worden gebruikt in de smalle delen van het rivierengebied, te weten:

- Bovenrivierengebied (regio's 1 en 2 in Figuur 2.1),
- Benedenrivierengebied (regio's 3 en 4) met uitzondering van Haringvliet, Hollands Diep en Biesbosch,
- IJsseldelta (regio 5),
- Vechtdelta (regio 6) met uitzondering van het Zwartemeer
- Eemvallei als onderdeel van de Markermeer regio (regio 8).

Deze verzameling van (delen van) regio's wordt aangeduid als hoofdsysteem III.

Inde Markermeer regio zijn de golfcondities met verschillende modellen afgeleid. Zowel SWAN (IJburg), Bretschneider (Eemvallei) als HISWA (overig, inclusief Gooimeer, Eemmeer en Nijkerkernauw) zijn hier gebruikt. In Figuur 4.3 is voor een selectie van uitvoerlocaties aangegeven met welk model de golfcondities zijn bepaald. Voor de onzekerheidsschattingen voor Eemvallei volstaan de algemene schattingen die voor hoofdsysteem III worden gedaan. Markermeer – IJburg (SWAN) en Markermeer – overig (HISWA) gelden als twee aparte hoofdsystemen, respectievelijk IV en V.

Figuur 4.3 Uitvoerlocaties in het Markermeer, uitgesplitst naar het model waarmee ze zijn afgeleid (blauw: IJburg – SWAN; groen: Eemvallei – Bretschneider; rood: overig – HISWA).



Figuur 4.4 Uitvoerlocaties in het Markermeer, uitgesplitst naar het model waarmee ze zijn afgeleid (blauw: IJburg – SWAN; groen: Eemvallei – Bretschneider; rood: overig – HISWA).

4.2 Achtergrondstudies voor bepaling onzekerheden

In deze paragraaf beschrijven we welke achtergrondrapportages zijn gebruikt om te komen tot de onzekerheidsschattingen voor de golfparameters. De modelonzekerheid wordt uitgedrukt in termen van relatieve bias en relatieve standaard afwijking. Waarom de relatieve waarden worden beschouwd, wordt aan het einde van voorliggende paragraaf belicht. We doorlopen ieder hoofdsysteem.

De bepaling van modelonzekerheid als gevolg van toepassing van SWAN (hoofdsysteem I en II) is verdeeld over een viertal studies, elk gebaseerd op resultaten van een groot aantal hindcasts. In Deltares (2013a) zijn de modelonzekerheden bepaald voor toepassing in kustwatersystemen en meren. In Deltares (2013b) is de SWAN modelonzekerheid bepaald voor typisch korte strijklengtes, zoals deze in de brede wateren van het rivierengebied en randmeren voorkomen. Deze waarden voor de modelonzekerheden zijn in Deltares (2014) aangepast door toevoeging van resultaten van hindcasts van een aantal recente stormen. De waarden uit laatstgenoemde studie worden gebruikt voor hoofdsysteem II. Naast gemiddelde

waarden voor onzekerheidsparameters zijn ook strijklengte-afhankelijke schattingen bepaald in Deltares (2014). Omdat er een grote variatie tussen strijklengte en onzekerheidsparameters lijkt te bestaan en daardoor de afgeleide relaties arbitrair zijn, hebben we ervoor gekozen geen locatie-afhankelijke waarden te gebruiken, maar een waarde die geldig wordt verklaard voor het gehele watersysteem. Voor IJburg in het Markermeer (hoofdsysteem IV) is gebruik gemaakt van een oudere SWAN versie (40.31) dan de versie 40.72ABCDE waarmee de WTI 2011 berekeningen uitgevoerd en de onzekerheidsschattingen in Deltares (2013a, 2013b, 2014) zijn bepaald. In Deltares (2015c) zijn onzekerheidsschattingen voor dit gebied bepaald. Daarbij is gebruik gemaakt van reeds eerder uitgevoerde hindcaststudies en gevoeligheidsanalyses met de oudere modelversie. Tevens zijn aanvullende berekeningen uitgevoerd met de 40.31 en 40.72ABCDE modelinstellingen voor een aantal stormen in het IJsselmeer waarvoor metingen beschikbaar zijn. Alle resultaten zijn gecombineerd tot een relatieve bias en relatieve standaard afwijking voor IJburg.

In Deltares (2015c) is ook de modelonzekerheid afgeleid voor die delen van het Markermeer waar HISWA is gebruikt (hoofdsysteem V). Dit betreft dus het gehele Markermeer, met uitzondering van IJburg. De resultaten van een drietal reeds uitgevoerde studies is gecombineerd om de modelonzekerheid te bepalen. Ten eerste is gebruik gemaakt van een hindcast studie waarin voor een aantal stormen HISWA resultaten op 1 locatie met metingen zijn vergeleken. Ten tweede zijn resultaten uit een vergelijkingsstudie gebruikt. Daarin zijn SWAN (versie 40.31) en HISWA resultaten voor extreme condities bepaald en vergeleken. Gecombineerd met de onzekerheden voor IJburg, zoals hierboven beschreven, heeft dit tot een schatting voor de onzekerheden met HISWA geleid.

Voor de smalle wateren in het rivierengebied en de Eemvallei (hoofdsysteem III) wordt Bretschneider toegepast om te komen tot golfcondities aan de teen van de kering. De modelonzekerheden als gevolg van de toepassing van Bretschneider zijn in eerste instantie gekwantificeerd in Deltares (2015a). Deze studie leidde tot een systematische onderschatting van ongeveer 20% van de werkelijk optredende significante golfhoogte. Een aanvullende analyse door RWS (2015), waarbij met name andere keuzes gemaakt zijn voor de gehanteerde referentiedata, heeft geleid tot een reductie van deze systematische onderschatting met ongeveer 10%. De bias in de golfperiode schatting, alsmede de schattingen voor de standaardafwijking zijn in Deltares (2015a) en RWS (2015) vergelijkbaar. Uiteindelijk worden alle onzekerheidsschattingen uit RWS (2015) gehanteerd.

4.3 Correctie voor meetfouten

Om de performance van SWAN en de golfgroeiformule van Bretschneider en de resulterende modelonzekerheden voor WTI2017 te bepalen is o.a. gebruik gemaakt van golfmetingen in het IJsselmeer. De gebruikte meetdata zijn verkregen met stappenbaken en capstaven. Recent is geconstateerd dat de metingen van de oppervlakte uitwijking wordt verstoord, zodat niet het zuivere golfsignaal wordt gemeten. Dit probleem is maximaal als de golven het instrument (schuin) van voren naderen. Het water loopt op tegen de paal waaraan het instrument is bevestigd, waardoor een overschatting van de werkelijke golfhoogte ontstaat. De fout in de golfperiode is te verwaarlozen. Indien de golfrichting een hoek van 90 graden met de kijkrichting van het instrument maakt is de 'oplopfout' te verwaarlozen. Hoe groot de fouten werkelijk zijn, is zonder diepgaande en tijdrovende analyse niet te zeggen. Wel kan gebruik worden gemaakt van een tweetal studies om een inschatting van de fout te geven.

TU Delft (2012) concludeert op basis van FINLAB berekeningen en laboratoriumproeven voor langkammige golven dat de golfhoogte ongeveer 10% wordt overschat wanneer de golven

(recht of schuin) op de stappenbaaksensoren toelopen, en ongeveer 10% onderschat wanneer de golven (recht of schuin) van de stappenbaaksensoren aflopen. In een korte analyse van meetdata verkregen met (bij harde wind weinig betrouwbare) log-a-level en capstaven op locatie FL2 op het IJsselmeer, concludeert Bottema (pers. comm.) dat de fout met de capstaven ongeveer +7% is wanneer de golven het instrument deels of geheel van voren naderen. Vergelijking tussen stappenbaak en log-a-level laat een verschil van ongeveer +10% zien voor deze situatie. Deze overschatting, alsmede het gehele windrichtingsverloop van de verhouding van capstaaf/stappenbaak ten opzichte van log-a-level is in lijn met de genoemde bevindingen in TU Delft (2012).

De geconstateerde meetfouten moeten tenminste verwerkt worden in de resultaten van de onzekerheidsstudies die gebruik maken van deze metingen, te weten Deltares (2013b) en Deltares (2014). Omdat er te veel onzekerheden zijn in de exacte afwijking per situatie is het niet mogelijk iedere individuele meting aan te passen. Om deze reden worden alleen de schattingen voor modelonzekerheden, gegeven in termen van bias en standaardafwijking, aangepast. Dat betekent dat de schattingen voor modelonzekerheden bij korte strijklengtes in Deltares (2013b) en Deltares (2014), waarbij voornamelijk gebruik is gemaakt van meetresultaten verkregen met stappenbaken op IJsselmeerlocaties FL48 en FL49, moeten worden aangepast. Dit betreft een correctie van de bias van de golfhoogte. De zuidwestelijke oriëntatie van de stappenbaken op locaties FL48 en FL49, in combinatie met geselecteerde SWAN hindcasts voor korte strijklengtes heeft naar verwachting geleid tot te hoge gemeten golfhoogte. Omdat niet alle golven recht op de stappenbaken toelopen, passen we op de golfhoogte niet een biascorrectie van 10% toe, maar van 8%. Dat betekent dat de in Deltares (2014) gepresenteerde systematische onderschatting door SWAN van 14% wordt verkleind tot 6%. In Deltares (2015a) en RWS (2015) is al rekening gehouden met de oplopfout. De standaardafwijking van de golfhoogte wordt niet aangepast. Daarnaast worden de standaardafwijking en bias van de golfperiode niet aangepast.

4.4 Schattingen voor modelonzekerheden golven

Waar de modelonzekerheden in de berekende waterstanden met een additief model worden verdisconteerd (Diermanse, 2014), wordt voor de modelonzekerheden in berekende golfcondities gebruik gemaakt van een multiplicatief model. In een additief model wordt de onzekerheid beschreven als een toeslag,

$$V_{incl} = V_{excl} + (\text{toeslag})$$

$$V_{incl} = V_{excl} + (\mu + \sigma \cdot E_N)$$

V = parameter waarvan de onzekerheid beschreven moet worden

μ = bias (dezelfde dimensie als V)

σ = standaardafwijking (dezelfde dimensie als V)

E_N = stochast met voorgeschreven verdeling (-)

in een multiplicatief model als een factor:

$$V_{incl} = V_{excl} \cdot (\text{factor})$$

$$V_{incl} = V_{excl} \cdot (1 + \mu + \sigma \cdot E_N)$$

μ = relatieve bias (-)

σ = relatieve standaardafwijking (-)

De onzekerheden worden dus niet in termen van de absolute bias en standaardafwijking gegeven moet worden maar in termen van de relatieve waarden. In de bovengenoemde drie studies zijn zowel relatieve bias en scatter index (S.I.) gegeven alsmede het gemiddelde en standaardafwijking van de relatieve verschillen. Laatstgenoemde waarden zijn een schatter van de μ en σ wanneer een normale verdeling door de relatieve verschillen wordt gefit en worden hier gepresenteerd. Mocht binnen Hydra-Ring voor een andere verdeling dan de normale verdeling worden gekozen, dan moeten de waarden voor μ en σ worden aangepast.

In onderstaande tabel zijn voor de vijf hoofdsystemen de schattingen van modelonzekerheden in termen van μ en σ voor de lokale golfbelastingparameters H_{m0} , $T_{m-1,0}$ en T_p gegeven.

Tabel 4.1 Modelonzekerheden significante golfhoogte H_{m0} en periodematen $T_{m-1,0}$ en T_p voor drie gedefinieerde hoofdsystemen: gemiddelde (μ) en standaardafwijking (σ) van de relatieve verschillen. Een negatieve waarde van het gemiddelde geeft een onderschatting van de werkelijkheid door het gehanteerde model weer.

Hoofdsysteem	H_{m0}		$T_{m-1,0}$		T_p	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ
I. Kust, IJsselmeer	-0,01	0,19	-0,04	0,11	-	-
II. Brede wateren in rivierengebied/randmeren	-0,06	0,15	-0,11	0,04	-0,01	0,07
III. Smalle wateren in rivierengebied, Eemvallei	-0,04	0,27	-	-	+0,03	0,13
IV. Markermeer - IJburg	-0,05	0,11	+0,04	0,08	-0,04	0,05
V. Markermeer - overig (excl. IJburg)	-0,02	0,20	-	-	+0,16	0,11

Een aantal cellen voor de onzekerheidsparameters voor golfperiodematen in bovenstaande tabel is niet gevuld. Indien om welke reden dan ook gewenst is een onzekerheidsschatting voor deze parameters te verkrijgen, stellen we voor dezelfde waarden te hanteren als voor de periodemaat waarvoor deze wel beschikbaar is. Dit is een redelijk veilige keuze, omdat de bias en standaardafwijking klein zijn en we geen reden hebben aan te nemen waarom de waarde voor de andere parameter groot zou zijn.

4.5 Onzekerheden voor gecorreleerde golfparameters

Belastingmodellen bevatten diverse correlaties tussen variabelen. In sommige gevallen is dit expliciet in Hydra-Ring gemodelleerd. Zo is in het belastingmodel voor duinerosie de (piek) golfperiode beschreven als de som van een deterministische functie van de golfhoogte en een onafhankelijke stochast die de onzekerheid in de periodemaat representeert. Onzekerheid in golfhoogte introduceert dan automatisch onzekerheid in golfperiode.

In andere gevallen is de correlatie zonder nadere maatregelen niet expliciet gemodelleerd in Hydra-Ring. Zo zijn bijvoorbeeld van oorsprong de golfhoogte en golfperiode in het belastingmodel voor de Hollandse Kust geïmplementeerd als vertalingsmatrix (opzoektabel). De golfcondities zijn gegeven voor verschillende combinaties van windsnelheid, windrichting en waterstand. Hoge waarden voor windsnelheid en waterstand leiden bij aanlandige wind tot hoge waarden voor de golfhoogtes en golfperiode. De golfparameters zijn duidelijk gecorreleerd. Dit is van oorsprong slechts impliciet geïmplementeerd in Hydra-Ring.

Gevolg is dat introductie van onzekerheid in golfhoogte niet noodzakelijk leidt tot een corresponderende onzekerheid in golfperiode. Als de onzekerheden in beide golfparameters ongecorrleerd wordt meegenomen kan het voorkomen dat modelonzekerheid leidt tot een afname in golfhoogte en een toename in golfperiode, en vice versa, met een onrealistische golfsteilheid als resultaat. Dit maakt een gecorrleerd onzekerheidsmodel voor golfhoogte en golfperiode noodzakelijk. Voor belastingmodellen van zowel duinen als dijken wordt in onderstaande paragrafen beschreven hoe de correlatie tussen genoemde parameters is verdisconteerd.

4.5.1 Waterstanden, golfhoogte en golfperiode in het belastingmodel voor duinen

In het hydraulische belastingmodel voor duinen is de golfhoogte beschreven als de som van een deterministische functie van de waterstand en een onafhankelijke stochast die de onzekerheid in de golfhoogte representeert. Zoals al eerder genoemd is ook de (piek) golfperiode beschreven als de som van een deterministische functie van de golfhoogte en een onafhankelijke stochast. Dit betekent dat de statistische onzekerheden zijn verdisconteerd.

Omdat de drie parameters expliciet aan elkaar gelinkt zijn met deterministische relaties, leidt een toename in de onafhankelijke variabele (waterstand, golfhoogte) automatisch tot een toename in de afhankelijke variabele (golfhoogte resp. golfperiode). Merk op dat deze aanpak ook in eerdere WTI rondes is gehanteerd.

4.5.2 Waterstanden, golfhoogte en golfperiode in het belastingmodel voor dijken

De volgende aanpak wordt gehanteerd om onzekerheden in lokale waterstand, golfhoogte en golfperiode in rekening te brengen voor dijken:

1. Pas statistische onzekerheid toe op alle basisstochast variabelen.
2. Bepaal de lokale waterstand op basis van triangulaire interpolatie (kustwateren) of WAQUA (overige watersystemen).
3. Pas de modelonzekerheid toe op de lokale waterstand.
4. Selecteer de golfhoogte en golfperiode uit de vertalingsmatrix (van SWAN, HISWA of Bretschneider resultaten), gebruik makend van de gecorrigeerde waarden (i.e. inclusief statistische onzekerheden) voor windrichting, windsnelheid en waterstand.
5. Bepaal de golfsteilheid.
6. Pas de modelonzekerheid op de golfhoogte toe.
7. Pas de golfperiode aan zodat de golfsteilheid uit stap 5 wordt verkregen.
8. Pas de modelonzekerheid op de golfperiode toe.
9. Optioneel: ga na of verkregen waarden voor golfsteilheid en de verhouding tussen golfhoogte en waterdiepte realistisch zijn.

Met deze aanpak worden de correlaties tussen waterstand en golfhoogte (direct via vertalingsmatrix) en golfhoogte en golfperiode (via golfsteilheid) zo veel mogelijk behouden.

5 Samenvatting en conclusies

Ten behoeve van WTI-2017 is modelonzekerheid in lokale waterstanden en golfcondities gekwantificeerd. Dit is gebeurd voor alle watersystemen waar gebruik wordt gemaakt van waterbewegingsmodellen (WAQUA of IMPLIC) voor de waterstand en golfopwekking en -voortplanting voor de golfcondities. In het rivierengebied wordt de eenvoudige formulering van Bretschneider toegepast voor golfcondities. Ook hier is een schatting gemaakt van de onzekerheid in golfcondities.

De gegeven schattingen voor modelonzekerheid zijn vanwege projectplanning en beschikbare middelen op pragmatische wijze tot stand gekomen en niet op basis van een volledige onzekerheidsanalyse. Ze zijn gebaseerd op enerzijds de resultaten van de kalibratie en validatie (vergelijking tussen gemeten en berekende waterstanden) en anderzijds de resultaten van enkele gevoeligheidsberekeningen en expert judgement, waarbij extreme omstandigheden zijn beschouwd. Hierbij zijn aanvankelijk de belangrijkste onzekerheidsbronnen geïdentificeerd waarna schattingen zijn gemaakt van bijbehorende standaardafwijkingen. Verschillende onzekerheidsbronnen zijn onafhankelijk van elkaar beschouwd. De uitgevoerde analyses en verkregen resultaten worden voldoende geacht voor toepassing in WTI2017.

Modelonzekerheid in lokale waterstand is per watersysteem gekwantificeerd. Hierbij is rekening gehouden met de hydraulische eigenschappen van watersystemen. Waar nodig is opsplitsing gemaakt in deelgebieden. Deze opsplitsing is gebaseerd op de resultaten van de illustratiepunten, deze geven aan welke combinaties van de stochastwaarden bijdragen aan de maatgevende waterstanden en daardoor aan modelonzekerheid. Modelonzekerheid in lokale waterstand is uitgedrukt in een standaarddeviatie. Een belangrijk uitgangspunt hierbij is dat deze standaarddeviatie onafhankelijk is van de terugkeertijd maar wel afhankelijk van de locatie. De gemaakte schattingen voor modelonzekerheid in lokale waterstand zijn weergegeven in hoofdstuk 3 van dit rapport. De presentatie is conform indeling van Hydra-Ring per regio weergegeven.

Voor de golfcondities is een onderscheid gemaakt in vier hoofdsystemen: (1) kustsystemen en IJsselmeer, (2) Markermeer, (3) de brede wateren van het rivierengebied en randmeren (Haringvliet, Hollands Diep, Biesbosch, Ketelmeer, Zwartemeer en Vossemeer) en (4) smalle delen van het rivierengebied. SWAN wordt toegepast in de systemen (1), (2) en (3), terwijl de golfgroeikromme van Bretschneider wordt gebruikt om de golfcondities in systeem (2) en (4) te bepalen. De Markermeerregio vormt een uitzondering. Daar worden rekenresultaten gebruikt die verkregen zijn met SWAN (IJburg), Bretschneider (Eemvallei) en HISWA (overig). Modelonzekerheid in alle gebieden is uitgedrukt in termen van relatieve bias en relatieve standaardafwijking. De schattingen voor deze onzekerheidsparameters voor significante golfhoogte, gemiddelde golfperiode $T_{m-1,0}$ en piekperiode T_p zijn gegeven in Tabel 4.1.

6 Referenties

- Beckers, et al, (2009). Uncertainties of the Hydra models. SBW belastingen. Deltares, March 2009.
- Chbab, E.H. (2012). Waterstandsverlopen Meren, IJsselmeer en Markermeer. Deltares rapport 1204143-003-ZWS-0027. Delft 2012.
- Chbab, E.H. (2015a) Modelonzekerheid in lokale waterstand voor het RMM gebied. Deltares memo.
- Chbab, E.H. (2015b). Modelonzekerheid in lokale waterstand voor IJMVD. Deltares memo1209433-000-HYE-0011
- Deltares (2013a). Quantifying uncertainties of SWAN results. Deltares report 1206011-002HYE-0001. February 2013.
- Deltares (2013b). SWAN uncertainties for short fetches. Deltares report 1207807-001-HYE-0008, December 2013.
- Deltares (2014). SWAN uncertainties based on additional Lake IJssel cases. Deltares report 1209433-007. December 2014.
- Deltares (2015a). Kwantificering van de onzekerheden van het gebruik van Bretschneider in het bovenrivierengebied. Deltares rapport 1209433-007-HYE-0007, Maart 2015.
- Deltares (2015b). Basisstochasten in belastingmodellen: Statistiek en statistische onzekerheid. Deltares rapport 1209433-012-HYE-0006. Maart 2015.
- Deltares (2015c). Quickscan modelonzekerheden golfbelastingen Markermeer. Deltares rapport 1220082-007-HYE-0002. April 2015.
- Deltares (2015d). Onzekerheidsanalyse hydraulica in GRADE. Deltares rapport 1220082-010-HYE-0001. Februari 2015.
- Deltares (2015e). Invloed correlatie modelonzekerheden GRADE en bovenrivieren op waterstand. Deltares memo 1220082-001-HYE-0003, d.d. 27 mei 2015.
- Diermanse et al. (2013). Hydra Ring Scientific Documentation. Deltares & TNO-Bouw. Deltares rapport 1206006-004. Deltares 2013.
- Diermanse, F. (2014). Functional Design for the implementation of load uncertainties in Hydra-Ring. Deltares report, February 2014.
- Kramer N en Reijmerink, B. Model, (2015). Kwantificering van modelonzekerheden in IMPLIC voor de Oosterschelde. Deltares rapport 1209433-008-HYE-0001
- Nicolai, R.P. et al, (2010). Effect onzekerheden op de Hydraulische Randvoorwaarden. Kwantitatieve analyse. PR1831.10. HKV/TNO rapport. September 2010.

- Nicolai, R.P. , Geerse, C.P.M., Chbab, E.H. (2014). Belastingmodellen WTI-2017, overzicht en benodigde gegevens onzekerheden. HKV Lijn in Water & Deltares, PR2829.10, mei 2014.
- RWS (2015). Modelonzekerheden Bretschneider Bovenrivierengebied. Rapport RWS-WVL, maart 2015 (M. Bottema en G. van Vledder).
- Tijssen, A. (2013) Quantification of model uncertainty for WAQUA for the Upper River Area. Deltares report 1207807-002. Deltares, 2013.
- TU Delft (2012). Onderzoek naar prestaties golfmetingen vanaf vaste meetopstellingen. Rapport technische Universiteit Delft, Environmental Fluid Mechanics, December 2012.
- Vrouwenvelder en Vrijling, (2001). Kansen, onzekerheden en hun interpretatie. Memorandum 2000-CON-DYN/M2107. Delft, 31 januari 2001

A Modelonzekerheid locaties IJsselmeer

Locatienaam	X	y	Onzekerheid waterstand	
			mu	sigma
HRbasis_ijsslm_1000	152925	543851	0,0	0,15
HRbasis_ijsslm_1019	154152	545984	0,0	0,15
HRbasis_ijsslm_1028	155282	546604	0,0	0,15
HRbasis_ijsslm_1059	155886	550074	0,0	0,30
HRbasis_ijsslm_906	164670	538768	0,0	0,30
HRbasis_ijsslm_923	162549	539757	0,0	0,30
HRbasis_ijsslm_972	155788	541001	0,0	0,15
HRbasis_ijsslm_987	154191	542461	0,0	0,15
HRcomb_ijsselm_1009	152538	544369	0,0	0,15
HRcomb_ijsselm_1018	153399	545314	0,0	0,15
HRcomb_ijsselm_1045	155874	547357	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_1061	156020	549493	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_1070	155514	550640	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_1074	155924	551041	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_1088	155981	552461	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_1100	156401	553804	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_1114	155757	555799	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_1127	155742	557607	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_1148	155510	560112	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_1184	154001	562864	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_1207	153122	565937	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_799	175945	539674	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_803	175394	539744	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_807	174914	539680	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_811	174385	539719	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_821	173846	539405	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_829	172922	539926	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_852	170952	540729	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_866	169109	540347	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_886	167312	538533	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_892	166453	538325	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_897	165797	538375	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_914	163529	539239	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_929	161680	540108	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_947	159472	540435	0,0	0,15
HRcomb_ijsselm_967	156636	540355	0,0	0,15

HRcomb_ijsselm_981	155022	541656	0,0	0,15
HRcomb_ijsselm_997	153138	543002	0,0	0,15
HRextra_ijsslm_212	176064	539132	0,0	0,30
HRextra_ijsslm_230	172985	540720	0,0	0,30
HRextra_ijsslm_237	172223	541347	0,0	0,30
HRextra_ijsslm_250	168290	539901	0,0	0,30
HRextra_ijsslm_256	168027	539062	0,0	0,30
HRextra_ijsslm_284	160546	540419	0,0	0,30
HRextra_ijsslm_303	158178	540180	0,0	0,15
HRextra_ijsslm_338	156260	548504	0,0	0,30
HRextra_ijsslm_363	156561	552923	0,0	0,30
HRextra_ijsslm_377	156006	554935	0,0	0,30
HRextra_ijsslm_391	155675	556955	0,0	0,30
HRextra_ijsslm_404	156249	559235	0,0	0,30
HRextra_ijsslm_430	154953	561560	0,0	0,30
HRextra_ijsslm_462	153502	564525	0,0	0,30
HRbasis_ijsslm_597	171943	515715	0,0	0,30
HRbasis_ijsslm_609	170971	517229	0,0	0,30
HRbasis_ijsslm_694	168909	528563	0,0	0,30
HRbasis_ijsslm_723	170008	532623	0,0	0,30
HRbasis_ijsslm_741	171426	534921	0,0	0,30
HRbasis_ijsslm_756	172607	536836	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_591	172649	514232	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_597	172433	514960	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_609	171458	516473	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_621	170480	517984	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_628	169638	518605	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_642	168822	520163	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_651	168836	521513	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_669	168864	524213	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_686	168890	526763	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_709	168927	530213	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_714	169003	530954	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_738	170874	534028	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_752	171977	535815	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_766	173080	537602	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_778	174516	538490	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_783	175261	538582	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_790	176303	538710	0,0	0,30
HRcomb_randlm_204	185150	513952	0,0	0,35
HRcomb_randlm_206	184858	513946	0,0	0,35
HRcomb_randlm_210	184258	513946	0,0	0,35

HRcomb_randlm_215	183508	513947	0,0	0,35
HRcomb_randlm_222	182458	513946	0,0	0,35
HRcomb_randlm_230	181258	513945	0,0	0,35
HRcomb_randlm_237	180208	513946	0,0	0,35
HRcomb_randlm_245	179009	513942	0,0	0,35
HRcomb_randlm_253	177807	513946	0,0	0,35
HRcomb_randlm_262	176458	513942	0,0	0,35
HRcomb_randlm_271	175108	513941	0,0	0,35
HRcomb_randlm_280	173760	513939	0,0	0,35
HRcomb_randlm_283	173346	514019	0,0	0,35
HRbasis_ijsslm_491	160427	507282	0,0	0,30
HRbasis_ijsslm_518	163865	508932	0,0	0,30
HRbasis_ijsslm_538	165943	511095	0,0	0,30
HRbasis_ijsslm_562	169110	512607	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_472	158828	505564	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_477	159247	505954	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_483	159585	506787	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_495	161176	507327	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_499	161774	507363	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_506	162700	507764	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_537	165227	510327	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_551	166694	511826	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_557	167519	512172	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_582	171135	513162	0,0	0,30
HRcomb_randlm_101	185178	508704	0,0	0,35
HRcomb_randlm_106	185686	508152	0,0	0,35
HRcomb_randlm_110	186093	507711	0,0	0,35
HRcomb_randlm_114	186488	507271	0,0	0,35
HRcomb_randlm_118	186693	506748	0,0	0,35
HRcomb_randlm_14	173210	512239	0,0	0,35
HRcomb_randlm_22	174384	511936	0,0	0,35
HRcomb_randlm_30	175551	511654	0,0	0,35
HRcomb_randlm_38	176717	511372	0,0	0,35
HRcomb_randlm_46	177884	511091	0,0	0,35
HRcomb_randlm_5	172282	513249	0,0	0,35
HRcomb_randlm_54	179050	510807	0,0	0,35
HRcomb_randlm_62	180102	510448	0,0	0,35
HRcomb_randlm_70	181264	510296	0,0	0,35
HRcomb_randlm_77	182307	510357	0,0	0,35
HRcomb_randlm_84	183346	510346	0,0	0,35
HRcomb_randlm_87	183741	510203	0,0	0,35
HRcomb_randlm_9	172654	512777	0,0	0,35

HRcomb_randlm_97	184772	509145	0,0	0,35
HRextra_ijsslm_193	164530	509703	0,0	0,30
HRcomb_randlm_123	186882	506801	0,0	0,35
HRcomb_randlm_128	186753	507466	0,0	0,35
HRcomb_randlm_135	186334	507977	0,0	0,35
HRcomb_randlm_139	186034	508254	0,0	0,35
HRcomb_randlm_148	185677	509084	0,0	0,35
HRcomb_randlm_153	185480	509560	0,0	0,35
HRcomb_randlm_159	185284	510146	0,0	0,35
HRcomb_randlm_164	185506	510649	0,0	0,35
HRbasis_ijsslm_106	136251	534813	0,0	0,15
HRbasis_ijsslm_22	133405	546510	0,0	0,15
HRbasis_ijsslm_51	135312	542706	0,0	0,15
HRbasis_ijsslm_89	136483	537353	0,0	0,15
HRcomb_ijsselm_12	132665	547984	0,0	0,15
HRcomb_ijsselm_125	136020	532274	0,0	0,15
HRcomb_ijsselm_35	134311	545007	0,0	0,15
HRcomb_ijsselm_72	136587	540167	0,0	0,15
HRcomb_ijsselm_76	136687	539593	0,0	0,15
HRcomb_ijsselm_143	137087	530565	0,0	0,15
HRcomb_ijsselm_161	138812	528798	0,0	0,15
HRcomb_ijsselm_171	139894	528316	0,0	0,15
HRcomb_ijsselm_188	141511	529309	0,0	0,15
HRcomb_ijsselm_196	142380	529875	0,0	0,15
HRcomb_ijsselm_206	143834	529720	0,0	0,15
HRcomb_ijsselm_220	145877	529673	0,0	0,15
HRcomb_ijsselm_233	147407	528762	0,0	0,15
HRcomb_ijsselm_240	148067	528096	0,0	0,15
HRcomb_ijsselm_257	148233	526210	0,0	0,15
HRcomb_ijsselm_274	149668	524799	0,0	0,15
HRcomb_ijsselm_284	148921	523635	0,0	0,15
HRextra_ijsslm_100	148311	527197	0,0	0,15
HRextra_ijsslm_118	148580	525150	0,0	0,15
HRextra_ijsslm_42	137859	529472	0,0	0,15
HRextra_ijsslm_70	140863	528717	0,0	0,15
HRextra_ijsslm_76	144830	529608	0,0	0,15
HRextra_ijsslm_90	146802	529319	0,0	0,15
HRcomb_randlm_120	186847	506575	0,0	0,35
HRcomb_ijsselm_299	149130	522828	0,0	0,15
HRcomb_ijsselm_313	151058	521999	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_325	152705	521274	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_335	153831	520302	0,0	0,30

HRcomb_ijsselm_346	154957	519096	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_352	155571	518438	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_364	156598	516966	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_377	157622	515307	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_381	157939	514798	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_402	159603	512123	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_406	159887	511596	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_412	160151	510735	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_421	160541	509443	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_430	159937	508459	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_436	159131	508076	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_441	158665	507495	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_448	158259	506526	0,0	0,30
HRcomb_ijsselm_454	157915	505695	0,0	0,30
HRcomb_randlm_174	185402	511174	0,0	0,35
HRcomb_randlm_177	185417	511498	0,0	0,35
HRcomb_randlm_179	185429	511812	0,0	0,35
HRcomb_randlm_181	185452	512112	0,0	0,35
HRcomb_randlm_184	185491	512562	0,0	0,35
HRcomb_randlm_186	185541	512864	0,0	0,35
HRcomb_randlm_188	185629	513153	0,0	0,35
HRcomb_randlm_192	185717	513565	0,0	0,35
HRcomb_randlm_196	185619	513831	0,0	0,35

B Modelonzekerheid rivierengebied met correctie voor correlatie ruwheden

In de bepaling van de maatgevende waterstand in het rivierengebied speelt de bodemruwheid een rol in het hydrodynamisch model WAQUA en in de afvoerstatistiek die is bepaald op basis van resultaten van GRADE. Oorspronkelijk zijn de bodemruwheden aan beide zijden van de grens tussen Nederland en Duitsland ongecorrleerd verondersteld. In paragraaf 3.9 is een correctie beschreven voor het bestaan van de correlatie tussen de ruwheden in Duitsland (in het SOBEK-model als onderdeel van GRADE) en de ruwheden in Nederland (WAQUA-model). De correctie houdt feitelijk in dat de al vastgestelde modelonzekerheid voor de waterstand bij Lobith gereduceerd wordt met 0,15 m. Deze reductie geldt voor het hele bovenrivierengebied. Om een goede aansluiting met gebieden benedenstrooms te verkrijgen is besloten om de reductie te laten aflopen tot nul in gebieden waar afvoeren en daarmee de bodemruwheid geen rol spelen. Deze aansluiting verkrijgen we door per deelgebied de bijdrage van de van de bodemruwheid aan de totale modelonzekerheid met 15 cm te verlagen.

Benadrukt wordt dat de correctie voor ruwheden betrekking heeft op de Rijntakken inclusief de benedenstroomse delen: IJsseldelta en Benedenrivieren. Voor de Maas en de Overijsselse Vecht geldt geen correctie en worden in dit stuk ook niet behandeld. De modelonzekerheden voor deze twee systemen, zoals genoemd in paragrafen 3.2.2, 3.3.2 en 3.5, blijven ongewijzigd.

B.1 Rijntakken

Langs de Rijntakken is de afvoer dominant en de modelonzekerheid daar wordt gedomineerd door de onzekerheid in bodemruwheid. Zoals hierboven beschreven betekent het meenemen van de correlatie tussen de ruwheden in Duitsland en die in Nederland een reductie van 0,15 m op de spreiding, zoals deze oorspronkelijk was beschreven in Tabel 3.1. Verdisconteren van deze reductie leidt tot een modelonzekerheid zoals gegeven in onderstaande tabel.

Tabel B.1 Modelonzekerheid Rijntakken na correctie voor correlatie tussen ruwheden (de oorspronkelijke modelonzekerheden zijn doorgestreept).

Riviertak	Bias	Standaard afwijking
Waal	0	0,15 (0,30)
Lek / Nederrijn	0	0,15 (0,30)
IJssel	0	0,20 (0,35)

B.2 Benedenrivieren

In het zeegebied, waar de afvoeren geen rol spelen, wordt geen reductie toegepast. De modelonzekerheid voor dit deelgebied blijft onveranderd. Voor het faalkansgebied, bergingsgebied en overgangsgebieden wordt een correctie toegepast; deze is maximaal op de grens met Rijntakken en nihil op de grens met deelgebieden waar de rol van afvoeren relatief klein is.

In Chbab (2015a) zijn de diverse bronnen die bijdragen aan de modelonzekerheid in het benedenrivierengebied geïdentificeerd en geschat. In Tabel B.2 hebben we de bijdrage van de bodemruwheid aan de totale modelonzekerheid gescheiden van de bijdrage van alle

overige bronnen. Vervolgens is de bijdrage van bodemruwheid verlaagd met maximaal 15 cm om tot een nieuwe schatting van de modelonzekerheid te komen.

Tabel B.2 Per deelgebied van het benedenrivierengebied de bijdrage aan de totale modelonzekerheid van bodemruwheid en overige bronnen, voor en na correctie voor verlaging van de bijdrage van bodemruwheid (bron: Chbab, 2015a).

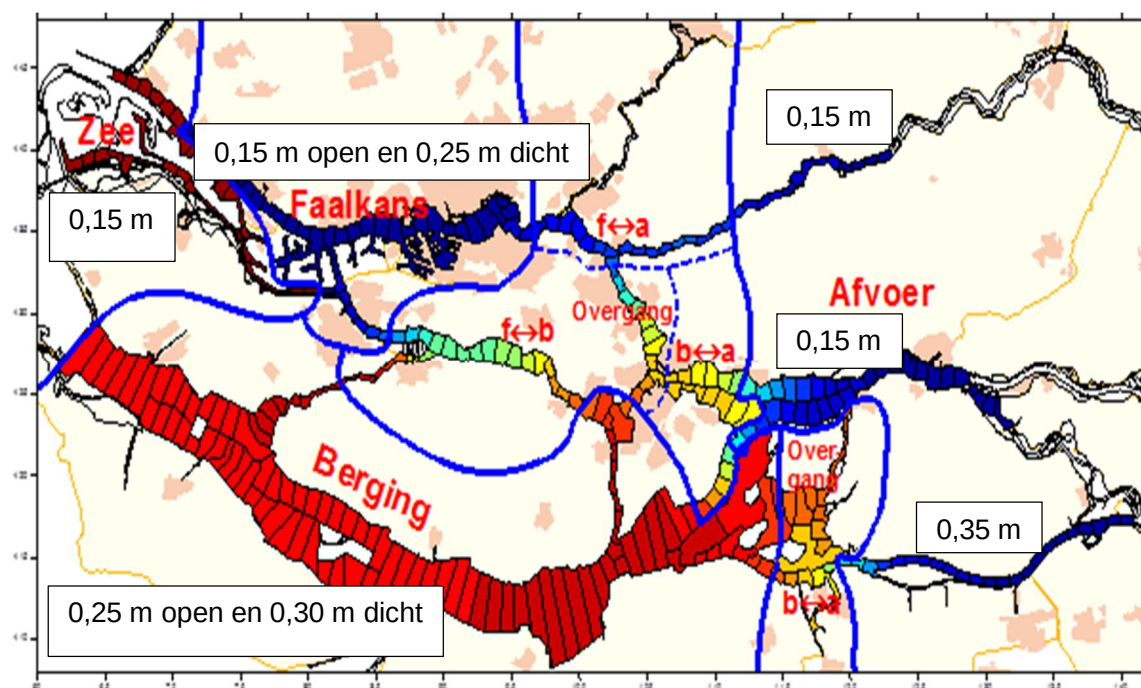
Gebied	Zonder correctie			Na correctie		
	ruwheid	overig	totaal	ruwheid	overig	totaal
Faalkansgebied (open kering)	0,05	0,17	0,17	0,00	0,17	0,17
Faalkansgebied (dichte kering)	0,05	0,22	0,23	0,00	0,22	0,22
Bergingsgebied (open kering)	0,15	0,21	0,25	0,00	0,21	0,21
Bergingsgebied (dichte kering)	0,15	0,29	0,32	0,00	0,29	0,29

In het faalkansgebied, het deelgebied rondom de stormvloedkering, wordt de modelonzekerheid voornamelijk bepaald door de stormvloedkering, de stormopzetduur en aanverwante zaken, zoals het faseverschil. De onzekerheid in afvoer/ruwheden draagt nauwelijks bij. Daarom blijft de modelonzekerheid voor dit deelgebied onveranderd.

De maatgevende situatie in het bergingsgebied bestaat uit een middelmatige/hoge afvoer (orde 8.000 a 14.000 m³/s) in combinatie met hoge stormvloeden (en langere stormduren). Verlaging van de bijdrage van de bodemruwheid aan de totale modelonzekerheid leidt tot een verlaging van de modelonzekerheid van enkele centimeters. De Rijnafvoer is weliswaar dominant maar de Maasafvoer speelt ook een rol. En zoals in paragraaf 3.9 is beschreven wordt voor de Maas de correctie niet verdisconteerd. Om deze reden en het feit dat de verlaging van de bijdrage van de ruwheid aan de totale modelonzekerheid slechts een klein effect heeft, wordt geen correctie toegepast voor mogelijke effecten van de correlatie in ruwheden in het bergingsgebied.

In de overgangsgebieden spelen verschillende aspecten een rol, waaronder geleidelijke overgang van dichte of open naar open of dichte keringen. Voor het schatten van de modelonzekerheid voor dit gebied is in (Chbab, 2015a) de hoogste onzekerheid genomen van de aangrenzende gebieden. Deze aanpak wordt aangehouden wanneer de correlatie in ruwheden wordt beschouwd.

Na correctie voor de effecten van correlatie tussen ruwheden resulteren modelonzekerheden voor het Benedenrivierengebied zoals weergegeven in Figuur B.1 en Tabel B.3. Evenals voor alle andere gebieden zijn de waarden afgerond op veelvouden van 5 cm.



Figuur B.1 Modelonzekerheid Benedenrivieren met open en dichte kering na correctie voor effecten ruwheden

Tabel B.3 Modelonzekerheid Benedenrivieren na correctie voor effecten ruwheden (de oorspronkelijke modelonzekerheden zijn doorgestreept).

Gebied	Standaard deviatie [m]	
	Open keringen	Gesloten keringen
Lek: bovenstrooms van km 981 Boven Merwede Beneden Merwede bovenstrooms van km 968, Nieuwe Merwede bovenstrooms van km 970	0,15 (0,30)	0,15 (0,30)
Faalkansgebied: Nieuwe Maas, Nieuwe Waterweg binnenzijde, Oude Maas, benedenstrooms van km 997	0,15	0,25
Zeegebied: gebied buiten de stormvloedkeringen	0,15	0,15
Berginggebied	0,25	0,30
Overgangsgebied: f → a	0,15 (0,25)	0,25 (0,30)
f → b	0,25	0,30
b → a	0,25	0,30

B.3 IJsseldelta

In Chbab (2015b) zijn de diverse bronnen die bijdragen aan de modelonzekerheid in o.a. de IJsseldelta geïdentificeerd en geschat. In Tabel B.4 hebben we de bijdrage van de bodemruwheid aan de totale modelonzekerheid gescheiden van de bijdrage van alle overige bronnen en is een nieuwe schatting van de modelonzekerheid verkregen door de bijdrage van bodemruwheid te verlagen met maximaal 15 cm.

Tabel B.4 Per deelgebied van de IJsseldelta de bijdrage aan de totale modelonzekerheid van bodemruwheid en overige bronnen, voor en na correctie voor verlaging van de bijdrage van bodemruwheid (bron: Chbab, 2015b).

Gebied	Zonder correctie			Na correctie		
	ruwheid	overig	totaal	ruwheid	overig	totaal
Bovenstrooms deel IJsseldelta	0,30	0,15	0,34	0,15	0,15	0,21
Overgangsgebied IJsseldelta	0,30	0,27	0,41	0,15	0,27	0,31
Benedenstrooms IJsseldelta	0,10	0,32	0,34	0,00	0,32	0,32

Benedenstrooms van de IJsseldelta speelt de IJsselaflow nauwelijks een rol en leidt tot een verlaging van de modelonzekerheid van slechts enkele centimeters. In overgangs- en bovenstrooms gebied speelt de afvoer een belangrijke rol, zie (Chbab, 2015b). In beide deelgebieden is de bijdrage van de onzekerheid in afvoer/ruwheid aan de totale modelonzekerheid gereduceerd met 0,15 m. Dit resulteert in modelonzekerheid voor de IJsseldelta zoals weergegeven in Tabel B.5.

Tabel B.5 Modelonzekerheid IJsseldelta na correctie voor effecten correlatie ruwheden (de oorspronkelijke modelonzekerheden zijn doorgestreept).

Deelgebied	Bias [m]	Standaardafwijking [m]
IJssel bovenstrooms van km 993	0	0,20 (0,35)
Overgangsgebied: km 993 – km 996	0	0,30 (0,40)
IJsseldelta benedenstrooms van km 996	0	0,30 (0,35)