

**Achtergrondrapport
Hydraulische Belastingen**

Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017



Achtergrondrapport Hydraulische Belastingen

Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017

Houcine Chbab
Hans de Waal

1230087-008

Titel

Achtergrondrapport Hydraulische Belastingen

Opdrachtgever
RWS-WVL**Project**
1230087-008**Kenmerk**
1230087-008-HYE-0001**Pagina's**
249**Trefwoorden**

WBI-2017, Hydraulische Belastingen, Keten Hydraulische Belastingen, marginale statistiek kennisonzekerheden, Hydra-Ring.

Samenvatting

Het doel van het project WBI-2017 is het leveren van een beoordelingsinstrumentarium voor voor de vierde wettelijke beoordelingsronde van primaire waterkeringen (2017-2023). Onderdeel hiervan zijn de Hydraulische Belastingen (HB). Deze bestaan uit: lokale waterstand en golfcondities bij diverse overschrijdingsfrequenties, waaronder de normfrequentie, het hydraulisch belastingniveau (HBN) voor golfoverslag en randvoorwaarden voor faalmechanismen van bekledingen en waterstandsverlopen. De HB worden bepaald met het nieuwe probabilistische instrumentarium Hydra-Ring, dat onderdeel uitmaakt van de WBI-software.




Nieuw ten opzichte van HR-2006 en WTI-2011 zijn de overstap van overschrijdingskans naar de overstromingskansbenadering, daarbij behorende nieuwe normen en het expliciet meenemen van kennisonzekerheden. Daarnaast is voor sommige gebieden de statistiek van de basisstochasten geactualiseerd. De afvoerstatistieken van zowel de Rijn bij Lobith als van de Maas bij Borgharen zijn bepaald met GRADE (Generator for Rainfall And Discharge Extremes). Dit geldt ook voor de afvoerstatistiek bij de benedenstroomse stations Olst langs de IJssel en Lith langs de Maas. De afvoerstatistiek van de Vecht bij Dalftsen is opnieuw afgeleid; hierbij zijn overstromingen in het bovenstroomse deel van de Vecht en zijleidingen beschouwd. Verder is de windstatistiek en de wind-waterstandstatistiek geactualiseerd op basis van langere en betrouwbare meetreeksen. In verband met Ruimte voor de Riviermaatregelen zijn voor het rivierengebied nieuwe productieberekeningen gemaakt van de lokale waterstanden en golfparameters bij de teen van de dijk. Modelonzekerheid in lokale waterstanden en golfparameters, evenals de statistische onzekerheid in de basisstochasten zijn gekwantificeerd en als extra stochasten opgenomen in Hydra-Ring.

Met uitzondering van de Oosterschelde zijn voor alle watersystemen waterstandsverlopen afgeleid of geactualiseerd. Deze waterstandsverlopen zijn opgenomen in de daarvoor ontwikkelde Waterstandsverlooptool. Met deze tool kan het waterstandsverloop van de waterstand op iedere willekeurige locatie worden gevisualiseerd.

Dit rapport maakt onderdeel uit van de documentatie van het WBI-2017, en is een globale verslaglegging van de achtergronden betreffende de totstandkoming van de Hydraulische Belastingen.

Referenties

Plan van Aanpak WTI KPP 2016, maart 2016

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	Aug 2016	E.H. Chbab		J. Beckers		M. van Gent	
2	Dec 2016	E.H. Chbab		J. Beckers		M. van Gent	
4	Sep 2017	E.H. Chbab H. de Waal		J. Beckers		M. van Gent	

Status

definitief

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Achtergrond	1
1.2	Positionering rapportage in WBI-2017 structuur	1
1.3	Doelstelling	2
1.4	Aanpak en scope	3
1.5	Doelgroep	3
1.6	Proces en organisatie	4
1.7	Leeswijzer	4
2	Hydraulische belastingen binnen WBI-2017	5
2.1	De probabilistische rekenmethode	5
2.1.1	Normen, kansen, onzekerheden	5
2.1.2	Stochasten	7
2.1.3	Kansen aggregeren	8
2.1.4	Grenstoestandsfuncties voor toetssporen	8
2.1.5	Grenstoestandsfuncties voor rekenwaarden voor de Hydraulische Belastingen	9
2.2	Basiskenmerken van de hydraulische belastingen	10
2.2.1	Parameters met betrekking tot de hydraulische belasting	10
2.2.2	Uitvoerlocaties	11
2.2.3	Rol van de toetsers	12
2.3	Omgaan met inherente onzekerheid rond lokale hydraulische belastingen	12
2.3.1	Inleiding	12
2.3.2	Watersystemen: gebieden met verschillende bronnen voor hoge hydraulische belasting	13
2.3.3	De basisstochasten	16
2.3.4	De fysische relatie tussen basisstochasten en lokale hydraulische belastingen	19
2.3.5	Statistiek basisstochasten	21
2.4	Kennisonzekerheden	22
2.4.1	Statistische onzekerheid	22
2.4.2	Modelonzekerheid	23
2.5	Actualisatie van hydraulische belastingen in WBI-2017	23
3	Productieketen Hydraulische Belastingen	25
3.1	Inleiding	25
3.2	Productieketen berekeningen fysica	26
3.2.1	Basisgedachten bij 'Fysische relatie tussen Basisstochastwaardecombinaties en Lokale hydraulische belastingparameters'	26
3.2.2	Overzicht processtappen	27
3.2.3	Nadere uitwerking in pseudo code per processtap	28
3.3	Modellen fysica	30
3.3.1	Wind	30
3.3.2	Waterstandsmodellen	31
3.3.3	Golfmodellen	33
3.4	Korte beschrijving watersystemen (regio's)	34
3.4.1	Bovenrivieren (regio's 1, 2 en 18)	34

3.4.2	Benedenrivieren (regio's 3, 4 en 17)	34
3.4.3	IJssel- en Vechtdelta (regio 5, 6)	36
3.4.4	Meren (regio's 7 en 8)	36
3.4.5	Kustgebieden - harde keringen (regio's 9, 10, 11, 12, 13 en 15)	37
3.4.6	Oosterschelde (regio 14)	37
3.4.7	Duinen (regio 16)	38
4	Productieberekeningen fysica: waterstanden	39
4.1	Inleiding	39
4.2	Waterstanden Bovenrivieren: Rijntakken (regio 1)	39
4.2.1	Inleiding	39
4.2.2	Modelschematisatie en rekenrooster	39
4.2.3	Specifieke elementen en Ruimte voor de Riviermaatregelen	40
4.2.4	Randvoorwaarden en productieberekeningen	42
4.2.5	Uitvoerlocaties en controle productieberekeningen	45
4.3	Waterstanden Bovenrivieren: Maas (regio's 2 en 18)	46
4.3.1	Inleiding	46
4.3.2	Modelschematisatie en rekenrooster	46
4.3.3	Specifieke elementen en Maaswerken	48
4.3.4	Randvoorwaarden en productieberekeningen	49
4.3.5	Uitvoerlocaties en controle berekeningen	51
4.4	Waterstanden Benedenrivieren (regio's 3, 4 en 17)	51
4.4.1	Inleiding	51
4.4.2	Studiegebied, modelschematisatie en rekenrooster	52
4.4.3	Specifieke elementen en Ruimte voor de Riviermaatregelen	54
4.4.4	Keringscript	57
4.4.5	Randvoorwaarden en productieberekeningen	58
4.4.6	Uitvoerlocaties en controle productieberekeningen	62
4.5	Waterstanden IJssel- en Vechtdelta (regio's 5 en 6)	63
4.5.1	Inleiding	63
4.5.2	Studiegebied, modelschematisatie en rekenrooster WAQUA	63
4.5.3	Specifieke elementen en Ruimte voor de rivier maatregelen	64
4.5.4	Randvoorwaarden en productieberekeningen	66
4.5.5	Uitvoerlocaties en controle productieberekeningen	70
4.6	Waterstanden Meren	70
4.6.1	IJsselmeer (regio 7)	70
4.6.2	Markermeer (regio 8)	74
4.7	Waterstanden Kustgebieden - harde keringen	83
4.7.1	Inleiding	83
4.7.2	Hollandse kust (regio 11, 12, 13)	83
4.7.3	Waddenzee (regio 9, 10)	84
4.7.4	Westerschelde (regio 15)	86
4.8	Waterstanden Oosterschelde (regio 14)	86
4.9	Waterstanden Duinen (regio 16)	88
5	Productieberekeningen fysica: golfparameters	89
5.1	Inleiding	89
5.2	Golfcondities smalle wateren rivierengebied	89
5.3	Golfcondities bredere wateren rivierengebied	90
5.3.1	Zwarte Meer	90
5.3.2	Haringvliet, Hollandsch Diep en Biesbosch (HHDB)	92

5.3.3	Europoortgebied	95
5.4	Golfcondities Meren	99
5.4.1	IJsselmeer	99
5.4.2	Ketelmeer en Vossemeer	101
5.4.3	Markermeer	105
5.5	Golfcondities Kustgebieden - harde keringen	107
5.5.1	Hollandse Kust	107
5.5.2	Waddenzee	110
5.5.3	Westerschelde	112
5.6	Golfcondities Oosterschelde	114
5.7	Golfcondities Duinen	114
6	Statistiek: inherente onzekerheid	115
6.1	Inleiding	115
6.2	Statistiek van de rivierafvoeren	116
6.2.1	Statistiek van de Rijnafvoer bij Lobith	116
6.2.2	Statistiek van de Maasafvoer bij Borgharen	118
6.2.3	Statistiek van de IJsselafvoer bij Olst	121
6.2.4	Statistiek van de Maasafvoer bij Lith	125
6.2.5	Statistiek van de Overijsselse Vecht bij Dalfsen	129
6.3	Windstatistiek	131
6.3.1	Windstatistiek hoog bereik	131
6.3.2	Kans windrichting	137
6.3.3	Windstatistiek laag bereik	140
6.3.4	Windstatistiek gehele bereik	141
6.3.5	Effect nieuwe windstatistiek op de hydraulische belastingen	143
6.3.6	Windstatistiek met correctie voor winddrag	144
6.4	Statistiek meerpeil	147
6.4.1	IJsselmeer	147
6.4.2	Markermeer	148
6.5	Zeewaterstandstatistiek	150
6.5.1	Basispeilen	150
6.5.2	Effect verlenging meetreeks	151
6.5.3	Toeslagen hoogwaterstijging en trendcorrecties	152
6.6	Statistiek met betrekking tot stormvloedkeringen	153
6.6.1	Faalkans per sluitvraag	153
6.6.2	Waterstandsvoorspellingen ten behoeve van een sluitcommando	154
6.7	Correlaties	155
6.7.1	Inleiding	155
6.7.2	Correlatie meerpeil-afvoer (IJssel en Vecht)	155
6.7.3	Correlatie IJssel- en Vechtafvoer	156
6.7.4	Correlatie Rijn-Maas	156
6.7.5	Correlatie wind-zeewaterstand voor kustregio's	157
6.7.6	Correlatie wind-waterstand Maasmond (Benedenrivieren)	158
6.7.7	Correlatie seiches en zeewaterstand Maasmond	162
6.8	Statistiek golfcondities zachte keringen	164
7	Statistiek: statistische onzekerheid basisstochasten	169
7.1	Inleiding	169
7.2	Modellering statistische onzekerheid	169
7.3	Statistische onzekerheid afvoer	171

7.3.1	Rijnafvoer bij Lobith	171
7.3.2	Maasafvoer bij Borgharen	174
7.3.3	Maasafvoer bij Lith	176
7.3.4	IJsselafvoer bij Olst	178
7.3.5	Vechtafvoer bij Dalfsen	180
7.4	Statistische onzekerheid windsnelheid	182
7.5	Statistische onzekerheid meerpeil	184
7.5.1	IJsselmeerpeil	184
7.5.2	Markermeerpeil	185
7.6	Statistische onzekerheid zeewaterstand	186
7.7	Onzekerheid seichetoeslag	188
7.8	Onzekerheid golfparameters H_s en T_p voor duinen	188
8	Statistiek: modelonzekerheid lokale waterstand en golfparameters	191
8.1	Inleiding	191
8.2	Modellering modelonzekerheid lokale waterstand	191
8.2.1	Modellering modelonzekerheid in lokale waterstand	191
8.2.2	Modellering modelonzekerheid golfparameters	193
8.3	Modelonzekerheid waterstand	195
8.3.1	Bovenrivieren (regio 1, 2 en 18)	195
8.3.2	Benedenrivieren (regio 3 en 4)	196
8.3.3	Vecht- en IJsseldelta (regio 5 en 6)	198
8.3.4	IJsselmeer (regio 7)	200
8.3.5	Markermeer (regio 8)	201
8.3.6	Oosterschelde	204
8.3.7	Overige watersystemen	205
8.4	Modelonzekerheid golfparameters	205
9	Probabilistische berekeningen	207
9.1	Probabilistisch model: Hydra-Ring	207
9.1.1	Inleiding	207
9.1.2	De grenstoestandsfunctie	207
9.1.3	Rekenen met kansverdelingen	207
9.1.4	Berekeningen met Hydra-Ring	207
9.1.5	Rekentechieken in Hydra-Ring	208
9.1.6	Tijdsintegratiemethodes in Hydra-Ring	209
9.1.7	Modellering tijdsverloop basisstochasten in Hydra-Ring	209
9.2	Bepaling van rekeninstellingen voor Hydra-Ring	211
9.2.1	Werkwijze	211
9.2.2	Bovenrivieren: Rijntakken en Maas	212
9.2.3	Benedenrivieren	213
9.2.4	Meren	214
9.2.5	IJssel- en Vechtdelta	217
9.2.6	Kust	218
9.2.7	Hydraulische Belastingen voor bekledingen	218
9.2.8	Samenvatting	219
10	Waterstandsverlopen	221
10.1	Inleiding	221
10.2	Toepassingsgebied waterstandsverlopen	221

11 Samenvatting en conclusies	235
Referenties	239
Bijlage(n)	
A Watersystemen en hun stochasten	A-1

Lijst van Tabellen

Tabel 2.1	Regio's in Hydra-Ring	14
Tabel 2.2	Watersysteemtypes en hun stochasttypes.	15
Tabel 2.3	Relatie tussen de namen van watersysteemtypes in voorliggend rapport en het WTI-2011 rekenmodel. SVK staat voor "stormvloedkering".	16
Tabel 2.4	Benaming van windrichtingen.	17
Tabel 3.1	Veelgebruikte relatie tussen potentiële windsnelheid U_p en open water windsnelheid $U_{10,ow}$	30
Tabel 4.1	Piekwaardes afvoergolven van de Rijn bij Lobith die doorgerekend zijn met het WAQUARijntakken-model.	43
Tabel 4.2	Qh-relaties op de benedenranden van het Rijntakken-model.	45
Tabel 4.3	Piekwaardes afvoergolven van de Maas bij Borgharen die doorgerekend zijn met het WAQUA	50
Tabel 4.4	Qh-relatie op de benedenrand van de Maas bij Keizersveer	51
Tabel 4.5	Stochastwaardecombinaties Benedenrivieren (Deltares, 2016h).....	59
Tabel 4.6	Opgelegde afvoeren (m^3/s) bij Hagestein (Lek), Tiel (Waal) en Lith (Maas) (Deltares, 2016h).....	61
Tabel 4.7	Stochastwaardecombinaties productieberekeningen waterstanden met WAQUA voor de IJssel- en Vechtdelta (Deltares, 2016i)	67
Tabel 4.8	Relatie afvoer Rijn bij Lobith en afvoer IJssel bij Olst.....	68
Tabel 4.9	Laterale toestromingen op de Vecht en de IJssel, afhankelijk van de IJsselafvoer bij Olst in m^3/s (Deltares, 2016i)	68
Tabel 4.10	Basisstochastwaardecombinaties voor productieberekeningen waterstanden met WAQUA voor het IJsselmeer.	73
Tabel 4.11	Gehanteerde koppeling tussen IJsselmeerpeil en afvoer IJssel en Vecht in productieberekeningen waterstand.....	74
Tabel 4.12	Stochastwaardecombinaties voor de productieberekeningen waterstanden Markermeer (WL Delft Hydraulics, 1997, fase 1b-4).....	78
Tabel 4.13	Stormduur en stormverloop OOM-studie en HR-2006 (WL Delft Hydraulics, 1997, fase 1b-4)	78
Tabel 4.14	Stormduur en stormverloop Markermeer (OOM studie) en IJburg en Eem (HR-2006).....	81
Tabel 4.15	Gekozen steunpunten voor de triangulaire interpolatie van lokale waterstanden Hollandse kust (regio 11 t/m 13)	83
Tabel 4.16	Deelgebieden Hollandse kust en gekozen steunpunten voor triangulaire interpolatie lokale waterstanden.....	84
Tabel 4.17	Gekozen steunpunten voor de triangulaire interpolatie van lokale waterstanden in de Waddenzee (regio 9 en 10).....	85

Tabel 4.18	Deelgebieden Waddenzee en corresponderende steunpunten voor de triangulaire interpolatie van lokale waterstanden.	85
Tabel 4.19	Steunpunten Westerschelde voor de triangulaire interpolatie van lokale waterstanden	86
Tabel 4.20	Stochastwaardencombinaties voor IMPLIC berekeningen Oosterschelde.....	87
Tabel 4.21	Steunpunten per deelgebied in de Oosterschelde (zie ook Figuur 4.32).....	88
Tabel 5.1	Stochastwaardecombinaties voor de productieberekeningen golven met SWAN voor het Zwarte Meer.....	92
Tabel 5.2	Karakteristieken van het SWAN-RMM rooster.	93
Tabel 5.3	Stochastwaardecombinaties SWAN berekeningen Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch.	94
Tabel 5.4	Stochastcombinaties SWAN berekeningen voor Europoort, inclusief bijbehorende stochastwaarden van de kust die de golfrandvoorwaarden op de Noordzee leveren (Klein en Kroon, 2011c).	99
Tabel 5.5	Stochastcombinaties voor WBI-2017 SWAN-KEM berekeningen	105
Tabel 5.6	Stochastwaardecombinaties voor productieberekeningen golven met SWAN voor de Hollandse Kust (RWS-RIKZ, 2006)	109
Tabel 5.7	Stochastwaardecombinaties productieberekeningen golven met SWAN voor de Waddenzee (Klein en Kroon,2011b)	112
Tabel 6.1	Afvoeren van de Rijn bij Lobith inclusief 95% betrouwbaarheidsintervallen, voor de situatie met overstromingen in Duitsland in combinatie met noodmaatregelen (Bron: Deltares, 2015j).De laatste kolom omvat afvoeren (behorende bij enkele herhalingstijden) die verkregen zijn met de extrapolatiemethode.....	118
Tabel 6.2	Afvoeren van de Maas bij Borgharen behorende bij verschillende herhalingstijden, inclusief 95%-betrouwbaarheidsintervallen. De laatste kolom omvat afvoeren berekend met de extrapolatiemethode (Deltares, 2009b).....	119
Tabel 6.3	Afvoer Lobith en bijbehorende afvoer bij Olst.	122
Tabel 6.4	Relatie afvoer Olst en herhalingstijd, inclusief bijbehorende 95%-betrouwbaarheidsinterval.....	123
Tabel 6.5	Werklijn IJssel bij Olst inclusief het 95%-betrouwbaarheidsinterval	124
Tabel 6.6	Afvoer Maas bij Borgharen en bijbehorende afvoer bij Lith (productieberekeningen).....	126
Tabel 6.7	Afvoeren van de Maas bij Lith behorende bij verschillende herhalingstijden, inclusief 95%-betrouwbaarheidsintervallen.De laatste kolom omvat afvoeren die bepaald zijn met de extrapolatiemethode.	127
Tabel 6.8	Gegevens van de transformatie van afvoeren zonder overstromingen naar afvoeren met overstromingen (Geerse, 2016a, 2017).	130
Tabel 6.9	Relatie afvoer en herhalingstijd voor de Vecht bij Dalfsen, inclusief 95%-betrouwbaarheidsintervallen.....	130
Tabel 6.10	Gebruikte drempelwaardes voor de selectie van de POT series voor de beschouwde windstations (Caires, 2009).....	132

Tabel 6.11	Windsnelheid Up met een overschrijdingskans van 1/10.000 per jaar inclusief betrouwbaarheidsintervallen: omni-directioneel en richtingsafhankelijk (Bron: Caires, 2009).....	136
Tabel 6.12	Windstations Hydra-Ring.....	138
Tabel 6.13	Kansverdelingen windrichting relevante windstations, sectoren van 30 graden.	138
Tabel 6.14	Kansverdeling windrichtingen van 22,5 graden voor Schiphol en Deelen	140
Tabel 6.15	Overzicht gebruikte data afleiding windstatistiek laag bereik	141
Tabel 6.16	Windstatistiek station Schiphol voor het hele bereik, periode van 12 uur, windsectoren van 30 graden.	143
Tabel 6.17	Resultaten effect nieuwe windstatistiek op benodigde kruinhoogten, bron (Geerse en Verkaik, 2010)	144
Tabel 6.18	Relatie IJsselmeerpeil en herhalingstijd, inclusief 95% betrouwbaarheidsbanden	148
Tabel 6.19	Markermeerpeil voor enkele herhalingstijden, inclusief 95% betrouwbaarheidsgrenzen.....	149
Tabel 6.20	Zeewaterstanden behorende bij 5 herhalingstijden voor 12 kuststations.....	150
Tabel 6.21	Veranderingen in 1/10.000-hoogwaterstanden (HW) uit drie studies: basispeilen (BP) 1985 (Dillingh et al,1993), 1985 reproductie, 2007 actualisatie (Deltares, 2009c) en actualisatie 2012 (Eilander, 2014a)	151
Tabel 6.22	Kansen voor verschillende sluitscenario's van de Oosterscheldekering, d.d. april 2015.....	154
Tabel 6.23	Overzicht mv-bestanden en stations voor de afleiding van de wind-waterstandscorrelaties	158
Tabel 6.24	Berekende s-waarden als maat voor de correlatie wind-zeewaterstand voor de 6 kustregio's	158
Tabel 6.25	Parameters van de kansverdeling van de zeewaterstand voor Hoek van Holland (Geerse et al, 2002).....	160
Tabel 6.26	Parameterschattingen $K_r(u)$, met Volkerfactor, inclusief de afknottingsparameter van 0,02.....	161
Tabel 6.27	Parameterschattingen $K_r(u)$, met Volkerfactor, inclusief de afknottingsparameter van 0,02.....	161
Tabel 6.28	Netto seiche effect voor enkele terugkeertijden.....	164
Tabel 6.29	Parameters voor de statistische relatie golfhoogte en zeewaterstand. Bron (Deltares, 2014f).....	165
Tabel 6.30	Steunpunten golfbelastingen diep water (In italic zijn de steunpunten weergegeven die gebruik maken van interpolatie van twee nabijgelegen meetstations. Bron (Deltares, 2014f).	166
Tabel 7.1	Basisstochasten waarvoor statistische onzekerheid beschouwd is in Hydra-Ring	170

Tabel 7.2	Statistische onzekerheid afvoerstatistiek van de Rijn bij Lobith: additief model, normale verdeling met $\mu = 0 \text{ m}^3/\text{s}$ en standaardafwijking die afhangt van afvoerniveau/herhalingstijd.	172
Tabel 7.3	Werklijnen Maas bij Borgharen met en zonder onzekerheden.	174
Tabel 7.4	Statistische onzekerheid afvoerstatistiek van de Maas bij Lith: additief model, normale verdeling met $\mu = 0 \text{ m}^3/\text{s}$ en σ afhankelijk van herhalingstijd (kolom 4).	176
Tabel 7.5	Statistische onzekerheid afvoerstatistiek van de IJssel bij Olst: additief model, normale verdeling met $\mu = 0 \text{ m}^3/\text{s}$ en σ afhankelijk van herhalingstijd (kolom 4).	178
Tabel 7.6	Statistische onzekerheid afvoerstatistiek van de Overijsselse Vecht bij Dalfsen: additief model, normale verdeling met gemiddelde μ en standaardafwijking σ afhankelijk van herhalingstijd.....	180
Tabel 7.7	Modelparameters statistische onzekerheid bij Schiphol, omni-directioneel. Begrensd en multiplicatief model met gemiddelde $\mu = 1$ en standaardafwijking σ volgens kolom 5 in Tabel 7.7.....	182
Tabel 7.8	Windstations en bijbehorende parameters (μ en σ) voor de statistische onzekerheid van zowel de omnidirectionele als de richtingsafhankelijke situaties.....	184
Tabel 7.9	Parameters statistische onzekerheid IJsselmeerpeil, inclusief meerpeil met onzekerheid	184
Tabel 7.10	Parameters statistische onzekerheid Markermeerpeil, inclusief meerpeil met onzekerheid	185
Tabel 7.11	Statistische onzekerheid zeewaterstandsstatistiek Hoek van Holland, omni-directioneel.....	187
Tabel 7.12	Verhogend effect van statistische onzekerheid op 1/1.000 en 1/100.000 kwantiel van de zeewaterstand bij verschillende kuststations.	188
Tabel 8.1	Modelonzekerheid bovenrivieren: regio's 1, 2 en 18.....	196
Tabel 8.2	Modelonzekerheid Benedenrivieren (regio's 3, 4 en 17) voor open en dichte situaties van de Europoortkeringen.	198
Tabel 8.3	Modelonzekerheid regio 5: IJsseldelta	199
Tabel 8.4	Modelonzekerheid deelgebieden Vechtdelta	200
Tabel 8.5	Modelonzekerheid verschillende deelgebieden van regio 7: het IJsselmeer...201	
Tabel 8.6	Modelonzekerheid deelgebieden van het Markermeer (regio 8).	203
Tabel 8.7	Modelonzekerheid waterstand op IMPLIC locaties.	204
Tabel 8.8	Modelonzekerheden significante golfhoogte H_{m0} en periodematen $T_{m-1,0}$ en T_p voor vijf 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.	206
Tabel 9.1	Basisduur en topduur trage stochasten in Hydra-Ring	210
Tabel 9.2	Overzicht aanbevolen Hydra-Ring instellingen voor BER.....	214

Tabel 9.3	Overzicht aanbevolen Hydra-Ring instellingen voor het Merengebied	215
Tabel 9.4	Overzicht aanbevolen Hydra-Ring instellingen voor IJVD	217
Tabel 9.5	Rekentechnieken en tijdsintegratiemethoden voor gebruik in Hydra-Ring per watersysteem	219
Tabel 10.1	Parameters trapeziumverloop voor het schematiseren van het waterstandsverloop langs de Rijntakken.	223
Tabel 10.2	Indeling Maas in 6 deelgebieden	224
Tabel 10.3	Parameters trapeziumverloop voor het schematiseren van het waterstandsverloop langs de Maas.....	224
Tabel 10.4	Parameters trapezia tijdsverloop stormopzet en faseverschuiving kustgebieden	232

Lijst met Figuren

Figuur 1.1	Het WBI-2017 en daaraan gerelateerde documenten.	2
Figuur 2.1	Dijktrajecten Rijntakken en Brabantse Maas.	5
Figuur 2.2	Belangrijke typen onzekerheden.	6
Figuur 2.3	Stroomschema voor de transformatie van de hydraulische condities bij de uitvoerlocatie naar de dijkteen.	13
Figuur 2.4	Overzichtskaart watersystemen. Bron: Min. I&M (2016).	14
Figuur 3.1	Processchema op hoofdlijnen voor HB data generatie	27
Figuur 3.2	Windschuifspanningscoëfficiënten zoals gebruikt voor de productieberekeningen.	31
Figuur 3.3	Deelgebieden van het Benedenrivierengebied: zee-, faalkans, bergings-, afvoer- en overgangsgebieden.	35
Figuur 4.1	Overzicht Rijntakken-modelschematisatie.	40
Figuur 4.2	Bodemligging WAQUA-Rijntakken.	41
Figuur 4.3	Overzicht Ruimte voor de Riviermaatregelen langs de Neder-Rijn/Lek en de Waal (al deze maatregelen zijn meegenomen in WAQUA schematisatie).	42
Figuur 4.4	Overzicht van Ruimte voor de Riviermaatregelen langs de IJssel (allen meegenomen in schematisatie).	43
Figuur 4.5	Afvoergolfvorm van de Rijn volgend uit GRADE (Chbab en Eilander, 2016).	44
Figuur 4.6	Overzicht Maasmodel.	47
Figuur 4.7	Bodemligging en locaties open randen Maasmodel.	48
Figuur 4.8	Gemiddelde (standaard) afvoergolfvorm van de Maas bij Borgharen (Deltares, 2016c).	50
Figuur 4.9	Overzicht modelschematisatie Benedenrivieren in 3 modeldomeinen.	53
Figuur 4.10	Bodemligging van verkleinde WAQUA-RMM model.	53
Figuur 4.11	Overzicht van de locaties van de vijf keringen in het WAQUA RMM-model (Deltares, 2010g) zoals deze zijn toegepast in WTI-2011. Bij de groene pijl liggen de Volkeraksluizen, waarmee de waterberging in het Volkerak-Zoommeer kan worden ingezet (in de figuur ontbreekt het Volkerak-Zoommeer).	55
Figuur 4.12	Schematische weergave van de verschillende toestanden van de keringen in opeenvolgende tussenberekeningen. De pijlen geven mogelijke toestandsveranderingen aan (Kerkhoven, 2015).	58
Figuur 4.13	Implementatie algoritme “Waterberging Volkerrak” in het Keringscript (Kerkhoven, 2015).	58
Figuur 4.14	De 50%-lijnen uit WTI-2011 en de 1-1 relatie zoals gebruikt in WBI-2017 (in de figuur beschreven 1-1 Systeemanalyse RMM).	60

Figuur 4.15	Relatie stormopzet, getij voor Maasmond en windverloop. De rode lijn is de waterstand die als randvoorwaarde voor de Maasmond is gebruikt in de berekeningen met WAQUA-RMM.	61
Figuur 4.16	Overzicht en deelgebieden van IJVD modelschematisatie.	64
Figuur 4.17	Bodemligging IJVD model.	65
Figuur 4.18	Winddraaiing voor verschillende sectoren, in graden ten opzichte van de betreffende windrichting. In Zwart het verloop in de tijd van de windsnelheid...69	69
Figuur 4.19	Het rekenrooster van het WAQUA-IJVD model zoals gebruikt voor de productieberekeningen van WTI-2011 voor het IJsselmeer (Deltares, 2010b). 71	71
Figuur 4.20	Bodemligging van het IJsselmeer in WAQUA-IJVD modelschematisatie inclusief Vecht- en IJsseldelta.	72
Figuur 4.21	Schematische weergave van het verloop van de windsnelheid (Deltares, 2012c).	74
Figuur 4.22	Rekenrooster Delft2D model voor het Markermeer zoals ontwikkeld en gebruikt in OOM-studie (WL Delft Hydraulics, 1997, fase 1b-2).	76
Figuur 4.23	Bodemligging Delft2D model voor het Markermeer zoals ontwikkeld en gebruikt in OOM-studie (WL Delft Hydraulics, 1997, fase 1b-2).	77
Figuur 4.24	IJburg (links) en de Eem (rechts), inclusief nummers geactualiseerde onderdelen in WAQUA Markermeer (RWS-RIZA, 2007).	79
Figuur 4.25	Ligging uitvoerlocaties (rode punten) bij IJburg (RWS-RIZA, 2007).	80
Figuur 4.26	Schematische weergave stormverloop productieberekeningen IJburg en Eem (RWS, 2007).	81
Figuur 4.27	Winddraaiing productieberekeningen IJburg en Eem (RWS, 2007)	82
Figuur 4.28	Ruimtelijke variatie van de windsnelheid zoals opgelegd in WAQUA voor IJburg en de Eem (RWS, 2007).	82
Figuur 4.29	Indeling Hollandse kust in 4 deelgebieden voor triangulaire interpolatie. Station nummers corresponderen met nummers in Tabel 4.16.	84
Figuur 4.30	Deelgebieden Waddenzee en gekozen steunpunten voor triangulaire interpolatie waterstanden.....	85
Figuur 4.31	Ligging steunpunten Westerschelde, zie ook Tabel 4.19.....	86
Figuur 4.32	Indeling in deelgebieden inclusief de 9 steunpunten voor de tranguulaire interpolatie.....	88
Figuur 5.1	Ligging van het Zwarte Meer, Zwarte Water en Kampereiland. Bron: Google Earth.....	90
Figuur 5.2	Bodemligging (t.o.v. NAP) Zwarte Meer (inclusief Ketelmeer en Vossemeer) ..	91
Figuur 5.3	Ligging en hoogte van obstakels in SWAN modelschematisatie voor Zwarte Meer (inclusief Ketelmeer en Vossemeer).	91
Figuur 5.4	Gebied Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch.....	93
Figuur 5.5	Bodemligging SWAN-HHDB model WBI-2017 voor Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch.....	94

Figuur 5.6	Gebiedsoverzicht Europoortgebied. Ligging van primaire kering is weergegeven in rode lijn	95
Figuur 5.7	Schematische weergave SWAN model Europoort zoals opgezet voor WTI-2011 voor de productieberekeningen van de golfparameters.	97
Figuur 5.8	Bodemligging t.o.v. NAP van het SWAN-Eupoort model (van Leeuwen, 2011).	97
Figuur 5.9	Resolutie van het Rekenrooster SWAN-Eupoort WTI-2011 (van Leeuwen, 2011).....	98
Figuur 5.10	Bodemligging (t.o.v. NAP) SWAN model IJsselmeer (inclusief Ketelmeer, Vossemeer en Zwarte Meer) inclusief meetlocaties FL2, FL5, FL9, FL25 en FL26.....	101
Figuur 5.11	Gebiedsoverzicht van het Ketelmeer en Vossemeer.....	102
Figuur 5.12	Omtrekken SWAN model IJsselmeer en SWAN-KEM, alsmede de bodemligging.	103
Figuur 5.13	Bodemligging SWAN model Ketelmeer en Vossemeer.....	103
Figuur 5.14	Locatie en hoogte van de SWAN obstakels. De Ramspolkering is als dikke zwarte lijn gemarkeerd.	104
Figuur 5.15	Toegepaste SWAN schematisatie voor IJburg. De rode lijnen geven de grenzen van het hele en het geneste rooster aan. De rode punten zijn de uitvoerlocaties.	106
Figuur 5.16	Bodemligging t.o.v. NAP van het SWAN model voor de Hollandse kust zoals gebruikt voor de productieberekeningen van de golfparameters in HR-2006 (RWS-RIKZ, 2006).	108
Figuur 5.17	Bodemligging t.o.v. NAP van het Waddenzee SWAN model	110
Figuur 5.18	Omtrekken van de SWAN rekenroosters voor de Waddenzee zoals gebruikt voor de productieberekeningen van de golfparameters WTI-2011.	111
Figuur 5.19	Bodemligging t.o.v. NAP van het SWAN model voor de Westerschelde zoals gebruikt voor de productieberekeningen van de golfparameters in WTI-2011 (Groeneweg, 2010).....	113
Figuur 5.20	Omtrek van het rekenrooster van het SWAN model voor de Westerschelde zoals gebruikt voor de productieberekeningen van de golfparameters in WTI-2011 (Deltares, 2010h).....	113
Figuur 6.1	Resultaten (werklijn en 95%-betrouwbaarheidsinterval) van GRADE voor de Rijn bij Lobith, rekening houdend met overstromingen in bovenstroomse delen van het stroomgebied en inzet van noodmaatregelen (Bron: Deltares, 2015j).	116
Figuur 6.2	Vergelijking werklijn GRADE met werklijn HR-2006 voor de Rijn bij Lobith, inclusief 95%-betrouwbaarheidsintervallen.....	119
Figuur 6.3	Werklijn Maas bij Borgharen in WBI-2017, gebaseerd op GRADE, inclusief 95% betrouwbaarheidsinterval.	120
Figuur 6.4	Vergelijking werklijn GRADE en statistische extrapolatiemethode voor de Maas bij Borgharen, inclusief onzekerheidsbanden.	121

Figuur 6.5	Relatie IJsselafvoer bij Olst en afvoer van de Rijn bij Lobith zoals volgt uit de productieberekeningen (paragraaf 4.2).	123
Figuur 6.6	Werklijn IJssel bij Olst inclusief het bijbehorende 95%-betrouwbaarheidsinterval.	124
Figuur 6.7	Vergelijking van de werklijn van GRADE en de werklijn uit WTI-2011 van de IJssel bij Olst.	125
Figuur 6.8	Relatie tussen afvoer van de Maas bij Borgharen en die bij Lith.	126
Figuur 6.9	Werklijn Maas bij Lith, inclusief het bijbehorende 95%-betrouwbaarheidsinterval.	128
Figuur 6.10	Werklijn Maas bij Lith volgend uit GRADE samen met de werklijn uit HR-2006.	128
Figuur 6.11	GRADE werklijnen van de Maas bij Borgharen (rood) en bij Lith (blauw).	129
Figuur 6.12	Werklijn Overijsselse Vecht bij Dalfsen in WBI-2017 (blauwe lijn) en uit HR-2006 (rode lijn)	131
Figuur 6.13	Grafische weergave van de windstations gebruikt voor de afleiding van de nieuwe windstatistiek (Caires, 2009).	133
Figuur 6.14	Gebruikte windstations voor het afleiden van de nieuwe windstatistiek, inclusief meetperiode. Rood = KNMI (1983) en groen = Deltares/KNMI (Caires, 2009).	134
Figuur 6.15	Potentiële wind met een herhalingsijd van 10.000 jaar voor verschillende windstations (Caires, 2009).	135
Figuur 6.16	Relatie windsnelheid en herhalingsijd (doorgetrokken lijn) voor de omnidirectionele situatie voor het extreme bereik voor station Schiphol, inclusief 95%-betrouwbaarheidsinterval, omni-directioneel	137
Figuur 6.17	Kansverdeling van de windrichting voor 5 windstations die gebruikt worden voor de kustgebieden, sectoren van 30 graden.	139
Figuur 6.18	Vergelijking van de kansverdeling op windrichting (sectoren van 30 graden) voor Schiphol.	139
Figuur 6.19	Windstatistiek Schiphol voor het hele bereik voor 2 windrichtingen op basis van de exponentiële verdeling (blauwe punten voor hoog bereik) en via turven (laag bereik, groene punten): windrichting 202,5 graden (links) en 360 graden (rechts).	142
Figuur 6.20	Vergelijking drag relaties op basis van (Wu, 1982) (zwarte lijn), afgekapte Wu bij windsnelheid van 30 m/s (blauwe lijn), de Zijlema et al (2012) formulering (rode lijn) en de aanpassing van Khandehar et al (1993) formulering (zwart gestreepte lijn).	145
Figuur 6.21	Relatie windsnelheid en overschrijdingskans voor station Schiphol, 16 richtingssectoren, periode van 12 uur: met winddrag correctie (blauw) en zonder (rood).	147
Figuur 6.22	Werklijn IJsselmeerpeil WTI-2011	148
Figuur 6.23	Werklijn Markermeerpeil, inclusief 95%-betrouwbaarheidsinterval.	149

Figuur 6.24	Resultaten drie studies: 1985 reproductie (BP), actualisatie 2007 en actualisatie 2012 met bijbehorende 95% betrouwbaarheidsintervallen (Eilander, 2014b).	152
Figuur 6.25	Ruimtelijke verdeling toeslagen kustgebieden.....	153
Figuur 6.26	Het principe achter de beschrijving van de wind-waterstandstatistiek in grafische vorm.....	159
Figuur 6.27	Benadering $Kr(u)$ door kwadratische functie voor windrichting WNW, gefit op de berekende waarden uit Hydra-NL.....	162
Figuur 6.28	Voorbeeld van waterstand inclusief seiches en definitie netto seiches effect.	163
Figuur 6.29	Schematische weergave van de conditionele kansverdeling van NSE gegeven de zeewaterstand h	163
Figuur 6.30	Waterstand (met en zonder NSE) en NSE bij ROZ als functie van terugkeertijd.....	164
Figuur 6.31	Steunpunten golfstatistiek. De oranje symbolen geven een steunpunt aan waar een interpolatie van de waarden van de twee nabijgelegen steunpunten plaatsvindt.....	166
Figuur 6.32	Relaties tussen zeewaterstand en golfhoogte voor 6 steunpunten (Deltares, 2014f)).	167
Figuur 6.33	Relaties golfhoogte en golfperiode voor 5 steunpunten (Deltares, 2014f)).	168
Figuur 7.1	Werklijn (blauw) en uit-geïntegreerde werklijn (inclusief statistische onzekerheid = rode lijn) van de Rijn bij Lobith.....	173
Figuur 7.2	Vergelijking werklijn HR-2006 (paars) met werklijnen van GRADE met en zonder onzekerheid voor station Lobith (blauw en rood).....	173
Figuur 7.3	Werklijnen Maas bij Borgharen: zonder onzekerheden (zwart) en met onzekerheden (groen gestippeld). Deze laatste is berekend met numerieke integratie.....	175
Figuur 7.4	Vergelijking van werklijn HR-2006 met werklijnen van GRADE met en zonder onzekerheid voor station Borgharen, inclusief 95%-betrouwbaarheidsinterval.....	175
Figuur 7.5	Werklijnen Maas bij Lith: zonder onzekerheid (blauw) en met onzekerheid (rood), inclusief 95%-betrouwbaarheidsbanden (blauw gestippeld) bij Lith....	177
Figuur 7.6	Werklijn HR-2006/WTI-2011 en werklijn van GRADE met en zonder statistische onzekerheid voor station Lith.....	177
Figuur 7.7	Werklijn (groen) en uit-geïntegreerde werklijn (paars) van de IJssel bij Olst..	179
Figuur 7.8	Werklijn HR-2006/WTI-2011 en werklijnen van GRADE (met en zonder statistische onzekerheid) bij Olst.....	179
Figuur 7.9	Werklijnen Vecht bij Dalfsen: zonder statistische onzekerheid (blauw) en met statistische onzekerheid (rood). Gestreepte paarse lijnen beschrijven het 95%-betrouwbaarheidsinterval.....	181
Figuur 7.10	Werklijnen Vecht bij Dalfsen met (blauwe lijn) en zonder statistische onzekerheid (groene lijn), inclusief de werklijn uit HR-2006 (rode lijn).....	181
Figuur 7.11	Werklijn (blauw) en uit-geïntegreerde werklijn (rood) van de windsnelheid bij Schiphol, omni-directioneel.....	183

Figuur 7.12	Werklijn (blauw) en uit-geïntegreerde werklijn (rood) van het IJsselmeerpeil, inclusief het 95%-betrouwbaarheidsinterval.....	185
Figuur 7.13	Werklijn (blauw) en uit-geïntegreerde werklijn (rood) van het Markermeerpeil, inclusief het 95%-betrouwbaarheidsinterval.....	186
Figuur 7.14	Werklijn (zwart) en uit geïntegreerde werklijn (groen) van de omni-directionele zeewaterstand bij Hoek van Holland.	187
Figuur 8.1	Illustratie van onzekerheid in waterstand (als functie van afvoer). In de linker figuur is een 95% betrouwbaarheidsband van 1 m aangehouden: 0,5 m hoger en 0,5 m lager voor het hele bereik.	192
Figuur 8.2	Uitvoerlocaties in het Markermeer, uitgesplitst naar het model waarmee ze zijn bepaald (blauw: IJburg-SWAN; groen: Eem-Breschneider; rood: overig-HISWA).	194
Figuur 8.3	Deelgebieden van Benedenrivieren (regio's 3, 4 en 17): zee-, faalkans-, afvoer-, bergings- en overgangsgebied.	197
Figuur 8.4	Deelgebieden Vechtdelta en bijbehorende modelonzekerheid in lokale waterstand.	200
Figuur 8.5	Modelonzekerheid (in de vorm van spreiding) voor de locaties langs het IJsselmeer (inclusief Ketelmeer en Vossemeer).	202
Figuur 8.6	Frequentielijnen locatie Eemdal in de Eem (rood) en locatie Nijkerkersluis in Nijkerkernauw.	203
Figuur 8.7	Modelonzekerheid Locaties Markermeer.	204
Figuur 9.1	Modellerings afvoeren door trapezia, basisduur 30 dagen.....	210
Figuur 9.2	Schematische afbeelding FBC voor afvoeren.....	211
Figuur 9.3	Selectie van testlocaties over alle watersystemen.....	212
Figuur 9.4	Ruimtelijk overzicht van verschillende instellingen uit Tabel 9.2 in het Bergingsgebied (blauw), Overgangsgebied (groen), Faalkansgedomineerd gebied (zwart), Afvoergedomineerd deel van de Bergsche Maas (lichtblauw) en Afvoergedomineerd delen van de Waal en Lek (rood). In de figuur is ook de overlap tussen de watersystemen meegenomen, in de praktijk ligt een deel van de weergegeven punten in de Bovenrijn.	214
Figuur 9.5	Ruimtelijk overzicht van wind-gedomineerde (blauw) en meerpeil-gedomineerde (rood) locaties.....	216
Figuur 9.6	Ruimtelijk overzicht van verschillende instellingen uit Tabel 9.4 in de IJsseldelta (blauw), Zwarte Water (rood) en Zwarte Meer en Vecht (zwart). In de figuur is ook de overlap tussen de watersystemen meegenomen, in de praktijk ligt een deel van de weergegeven punten in de Bovenrijn danwel het IJsselmeer.	218
Figuur 10.1	Faalmechanismen uit Bijlage III Sterkte en Veiligheid.	222
Figuur 10.2	Schematische weergave trapezium voor waterstandsverloop Rijn en Maas...223	223
Figuur 10.3	Gebiedsindeling Benedenrivieren voor het bepalen van de waterstandsverlopen.....	225
Figuur 10.4	Afvoergolfvormen IJssel bij Olst: rood = afvoergolfvorm WTI-2011 (en HR2006) en blauw = afvoergolfvorm die uit GRADE volgt.	226

Figuur 10.5	Locaties IJsseldelta	226
Figuur 10.6	Waterstandsverloop deelgebied 1 (bovenstrooms deel) van de IJsseldelta. ..	227
Figuur 10.7	Gebiedsindeling van de Vechtdelta voor het afleiden van de waterstandsverlopen	228
Figuur 10.8	Standaard (gemiddelde) vorm van de Overijsselse Vecht bij Dalfsen.....	229
Figuur 10.9	Waterstandsverloop deelgebied A van de Vechtdelta (Deltares, 2011).....	229
Figuur 10.10	Voorbeeld waterstandsverloop meren voor een waterstand van 2,06 m+NAP, bestaande uit een stationair meerpeil op het niveau van 0,3 m+NAP en stormopzet van 40 uur in de basis en 2 uur in de top.....	231
Figuur 10.11	Waterstandsverloop station IJmuiden, bestaande uit een stormopzetverloop (van 44 uur in de basis en topduur van 2 uur), gemiddelde getij en faseverschil van 2,5 uur.....	232
Figuur 10.12	Uitvoerlocaties IJsselmeer, waarvoor waterstandsverlopen beschikbaar zijn en gevisualiseerd kunnen worden.....	233
Figuur 10.13	Waterstandsverloop locatie met nummer 700055 in het IJsselmeer.....	234
Figuur 10.14	Waterstandsverloop locatie 1200036 (IJmuiden).....	234

Summary

One of the goals of the WBI-2017 project is to provide the Hydraulic Load information that is required for the fourth safety assessment for the Dutch sea and flood defences. The Hydraulic Loads consist of a local water level and wave conditions (height, period and direction) for a given return period. For the safety assessment, this information is required for all primary water defences in The Netherlands. The Hydraulic Loads are computed using the new probabilistic model Hydra-Ring, which is part of the WBI software suite.

An important new aspect of WBI-2017 compared to former versions (e.g. HR-2006) is the use of normative *flooding probabilities* of flood prone areas instead of *exceedance probabilities* of water levels or wave conditions at a flood defence. Also, the new methodology takes explicit account of *knowledge uncertainties* (statistical uncertainty and model uncertainty). These uncertainties are treated as additional random variables in the probabilistic calculations of Hydra-Ring.

Moreover, the *probability distributions* of some random variables have been updated. This concerns the Rhine discharge at Lobith and the Meuse discharge at Borgharen, both of which were derived using GRADE (Generator for Rainfall And Discharge Extremes). Furthermore, the wind statistics have been updated using longer and more reliable historical records. Finally, a new series of *hydraulic simulations* has been made to derive water levels at the flood defences for a given set of inputs using WAQUA models that include the Room for the River measures.

This document gives a description of the background of WBI-2017, the Hydra-Ring model and its results, i.e. the Hydraulic Loads. The Hydra-Ring model is elaborated in quite some detail, paying special attention to:

- different load models for the different regions within The Netherlands;
- differences between results of the WBI-2017 Hydraulic Loads and results from former safety assessment rounds.

However, since this report is the over-arching report for the technical part of WBI-2017, it does not capture all details of Hydra-Ring and the production of the Hydraulic Loads. For more details the reader is referred to specified other documents.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

De doelstelling van het project WBI-2017 is het ontwikkelen van een nieuwe methode om te beoordelen of primaire waterkeringen voldoen aan de nieuwe, op overstromingskansen gebaseerde, veiligheidsnormen.

Belangrijke hoofdcomponenten in de beoordelingsmethode zijn:

- de beoordelingssporen, gerelateerd aan de mogelijke faalmechanismen van waterkeringen
- de wettelijke normen
- de probabilistische rekenmethode
- informatie over de hydraulische belastingen
- informatie over de sterkte van de waterkering

De *invulling* van deze hoofdcomponenten is in WBI-2017 op een aantal punten wezenlijk anders dan in voorgaande edities van de beoordelingsmethode. Voor een breed overzicht hiervan wordt verwezen naar het basisrapport WBI-2017 (Deltares, 2016e).

De beoordelingssporen en de probabilistische rekenmethode zijn te beschouwen als het rekengedeelte. De wettelijke normen, hydraulische belastingen en sterkte-informatie vormen hiervan de invoer. De sterkte-informatie (dijkprofiel, samenstelling van het dijklichaam, bekleding) wordt verschaft door de waterkeringbeheerder (c.q. beoordelaar / toetsers), daarbij geholpen door schematiseringshandleidingen. De overige componenten (waaronder dus ook de hydraulische belastingen) worden geleverd door het rijk.

Voorliggend rapport gaat in op de als vierde genoemde component: de hydraulische belastingen. De behandeling van de andere componenten blijft in dit rapport beperkt tot die aspecten die van belang zijn voor het begrijpen van de uitwerking van de hydraulische belastingen.

1.2 Positionering rapportage in WBI-2017 structuur

De eerstvolgende beoordelingsronde wordt met ingang van 2017 uitgevoerd aan de hand van het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017 (hierna: WBI-2017 of WBI). Het WBI-2017 bestaat uit een ministeriële regeling (Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017) met de volgende bijlagen:

Bijlage I Procedure beoordeling veiligheid primaire waterkeringen (hierna: *Bijlage I Procedure*).

In deze bijlage staat de procedure die moet worden doorlopen voor de beoordeling en worden de rapportageverplichtingen beschreven. In deze bijlage is een begrippenlijst opgenomen met een uitleg van alle begrippen die in het WBI-2017 worden gebruikt.

Bijlage II Voorschriften bepaling hydraulische belasting primaire waterkeringen (hierna: *Bijlage II Hydraulische belastingen*).

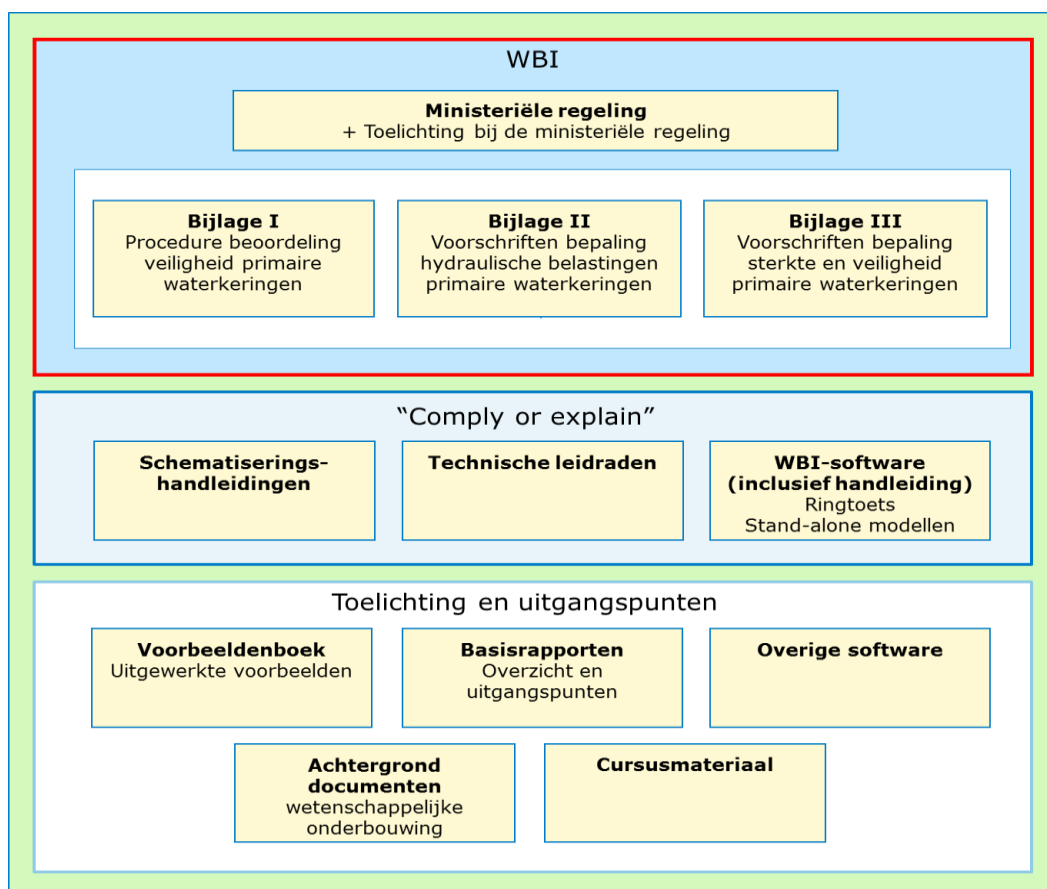
In deze bijlage wordt de methode beschreven om de hydraulische belastingen op

de primaire waterkeringen te bepalen.

Bijlage III Voorschriften bepaling sterkte en veiligheid primaire waterkeringen (hierna: *Bijlage III Sterkte en veiligheid*).

In deze bijlage staat op welke manier de primaire waterkering moet worden beoordeeld om te komen tot een oordeel over de veiligheid van de gehele kering.

Nadere uitwerking en details bij deze bijlagen worden geleverd in de vorm van rekensoftware (Ringtoets, Hydra-Ring), handleidingen, leidraden en achtergrondrapporten (zie Figuur 1.1). De voorliggende rapportage maakt deel uit van het blok 'Toelichting en uitgangspunten' en beschrijft de achtergronden van de Hydraulische Belastingen voor alle watersystemen.



Figuur 1.1 Het WBI-2017 en daaraan gerelateerde documenten.

1.3 Doelstelling

De doelstelling van onderhavig rapport is het beschrijven van de achtergronden betreffende de totstandkoming van de voor de beoordeling benodigde Hydraulische Belastingen en het samenvatten van eerder uitgebrachte rapporten en deelrapporten. De samenvatting is gericht op het tonen van:

- de samenhang in de aanpak in de vorm van de generieke 'productieketen Hydraulische Belastingen'
- de belangrijkste c.q. opvallendste verschillen in aanpak binnen WBI-2017 tussen verschillende regio's in Nederland
- de belangrijkste verschillen tussen WBI-2017 en voorgaande beoordelingsrondes.

1.4 Aanpak en scope

Bij het realiseren van het doel van dit rapport is de volgende aanpak gevolgd:

- Tekstdelen zijn overgenomen uit bestaande basisrapporten en andere bronnen, slechts geredigeerd waar dat nodig leek voor de zelfstandige leesbaarheid van het rapport;
- Er is geen nieuwe informatie toegevoegd, maar de presentatie wordt waar nodig aangepast om de generieke aspecten beter te belichten.

In het rapport ligt de focus op:

- *hydraulische* belastingen Overige (niet-hydraulische) belastingen worden besproken in WBI Bijlage III Sterkte & Veiligheid.
- achtergronden *productie* De daadwerkelijke *toepassing* van Hydraulische Belasting informatie in de beoordeling wordt behandeld in Bijlage II, Hydraulische Belastingen en de schematiseringshandleidingen.
- *hoofdlijnen, globaal* Voor details wordt doorverwezen naar onderliggende documentatie.
- *vernieuwde onderdelen* Gebieden met nieuwe productieberekeningen, nieuwe statistiek stochasten, probabilistiek, kennisonzekerheden.

Het doel van dit rapport is *niet* het borgen van de volledige reproduceerbaarheid van de Hydraulische Belastingen voor alle watersystemen. Enkele voorbeelden van onderwerpen die daarbij wel nodig zouden zijn, maar niet in dit rapport worden behandeld, zijn:

- het productieproces zelf (scripts, controles, datamanagement, structuur databases, hardware);
- details met betrekking tot rekenroosters (resolutie) en/of rekeninstellingen van de diverse rekenmodellen (zoals WAQUA, SWAN, Hydra-Ring).

Bepaalde onderdelen van de Hydraulische Belastingen vallen (vooralsnog) buiten de scope van het WBI-2017 project en worden daarom in onderhavig rapport niet behandeld of hooguit zeer summier besproken. Dit betreft:

- De Hydraulische Belastingen in de regio's Veluwerandmeer, Grevelingen, Volkerak-Zoommeer en Hollandsche IJssel en voor de Diefdijk. Deze gebieden worden in enkele overzichten wel genoemd, maar in dit rapport niet inhoudelijk behandeld.
- Hydraulische Belastingen voor primaire keringen in havens en andere (complexe) afgeschermd gebied. Het afleiden van deze Hydraulische Belastingen dient plaats te vinden in de 'Toets op maat'.
- Een (beter dan voorheen) op de diverse beoordelingssporen toegesneden beschrijving van het verloop van de Hydraulische Belasting in de tijd binnen een belastinggebeurtenis.

1.5 Doelgroep

Dit rapport is bedoeld voor:

- Gebruikers van WBI-2017 met algemene kennis van de inhoud van het WBI en belangstelling voor de totstandkoming van het WBI,

- Beheerders van WBI-2017 (RWS-WVL en Deltares),
- Ontwikkelaars van beoordelingsmethoden, ontwerpmethoden en verwante gereedschappen in het kader van de veiligheid tegen overstromingen: Nationaal Water Model, Ontwerpinstrumentarium (OI) en WBI-2023.

1.6 Proces en organisatie

Het Directoraat Generaal Ruimte en Water (DGRW) van het Ministerie van Infrastructuur en Milieu (I&M) is formeel de opdrachtgever van het project WBI-2017. Het organisatieonderdeel van Rijkswaterstaat genaamd Water, Verkeer en Leefomgeving (WVL) is gedelegeerd opdrachtgever en verantwoordelijk voor de procesbegeleiding. Deltares is verantwoordelijk voor de inhoudelijke projectleiding en uitvoering.

De kwaliteitsborging en inhoudelijke afstemming vonden plaats in de Voorbereidingsgroep (VBG) van het Expertise Netwerk Waterveiligheid (ENW), waarin leden uit verschillende ENW groepen zijn vertegenwoordigd.

Het project WBI-2017 is onderverdeeld in verschillende deelprogramma's. Een van die deelprogramma's is 'Hydraulische Belastingen'.

Het doel van het deelprogramma Hydraulische Belastingen is drieledig:

1. Uitvoeren van nieuwe productieberekeningen voor de gebieden waar programma's Ruimte voor de River en Maaswerken invloed hebben op de Hydraulische Belastingen,
2. Bepalen van de Hydraulische Belastingen voor alle primaire waterkeringen in Nederland,
3. Uitvoeren van onderzoek met als doel het realiseren van meer betrouwbare Hydraulische Belastingen in 2017 en verder.

Onderhavig rapport is binnen dit deelprogramma Hydraulische Belastingen gerealiseerd. Het rapport is samengesteld door Houcine Chbab en Hans de Waal van Deltares en van waardevolle feedback voorzien door Marcel Bottema van RWS-WVL.

1.7 Leeswijzer

Dit achtergrondrapport is als volgt ingedeeld. Hoofdstuk 2 geeft een algemene beschrijving de Hydraulische Belastingen binnen WBI-2017. Hoofdstuk 3 bevat een algemene beschrijving van de onderdelen van de HB productieketen. De onderdelen modelschematisaties en productieberekeningen waterstanden worden behandeld in hoofdstuk 4 en het onderdeel golven in hoofdstuk 5. De inherente onzekerheid (de marginale statistiek en correlaties van de basisstochasten) is onderwerp van hoofdstuk 6. In Hoofdstuk 7 komt statistische onzekerheid aan de orde. Hoofdstuk 8 behandelt modelonzekerheid (zowel onzekerheid in de berekening van de lokale waterstand als in de golfcondities). Een beschrijving van het probabilistische model Hydra-Ring en de resultaten van de Hydra-Ring berekeningen voor de Hydraulische Belastingen is te vinden in hoofdstuk 9. Hoofdstuk 10 behandelt de waterstandsverlopen. Het rapport eindigt met conclusies in hoofdstuk 11.

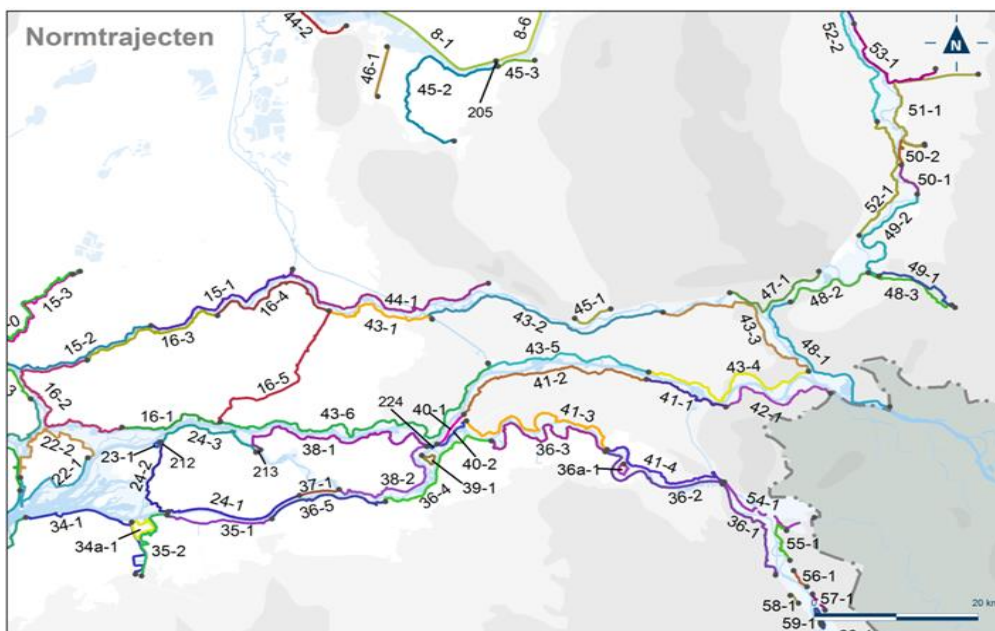
2 Hydraulische belastingen binnen WBI-2017

2.1 De probabilistische rekenmethode

2.1.1 Normen, kansen, onzekerheden

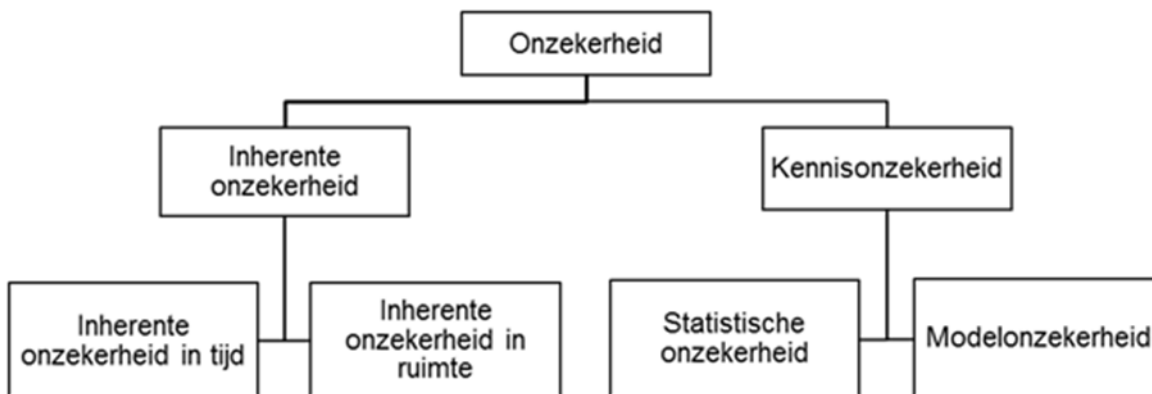
Bij de beoordeling van waterkeringen wordt in WBI-2017 uitgegaan van nieuwe veiligheidsnormen. Deze nieuwe normen zijn afgeleid uit een economische kosten-baten analyse en een beschouwing van de slachtofferrisico's, zie (Ministerie I&M, 2014). Het beschermingsniveau volgens de nieuwe normen is ingedeeld in zes klassen met een kans op een overstroming van 1 op 300 tot 1 op 100.000 per jaar.

In de nieuwe normering zijn de dijkringen uit Bijlage I en II behorende bij de Waterwet ingedeeld in dijktrajecten. Elk dijktraject heeft een eigen veiligheidsnorm. Ter illustratie worden in Figuur 2.1 de dijktrajecten langs de Rijntakken en de Maas (met uitzondering van de Limburgse Maas) weergegeven.



Figuur 2.1 Dijktrajecten Rijntakken en Brabantse Maas.

Bij de beoordeling van een dijktraject op basis van de overstromingskans moet rekening gehouden worden met alle relevante onzekerheden. Onzekerheden zijn onder te verdelen in een aantal klassen, zie Figuur 2.2 (Vrouwenvelder en Vrijling, 2001). Inherent onzekerheid, ook wel natuurlijke variabiliteit genoemd, is het gevolg van de natuurlijke fluctuaties in tijd en/of ruimte van een natuurverschijnsel zoals de variatie in ruimte en tijd van de hydraulische ruwheid van een rivierbedding en de variatie in de tijd van de rivierafvoer. Deze van nature aanwezige onzekerheid kan niet worden gereduceerd door meer onderzoek te doen maar wel worden gemodelleerd door middel van kansverdelingen van variabelen in het probabilistische model (stochasten).



Figuur 2.2 Belangrijke typen onzekerheden

Een andere vorm van onzekerheid is epistemische onzekerheid of ook wel kennisonzekerheid. Kennisonzekerheid binnen WBI komt hoofdzakelijk terug in model- en statistische onzekerheid. Modelonzekerheid ontstaat door het gebruik van vereenvoudigingen en benadering in de wiskundige modellen die fysische processen beschrijven, zoals waterbeweging, golfopwekking en golfvoortplanting. Deze onzekerheid kan in principe gereduceerd worden door betere wiskundige modellen te maken, maar in de praktijk is dit vaak niet mogelijk door gebrek aan metingen of beperkingen aan de rekentijd van het model.

Statistische onzekerheid is gerelateerd aan de onzekere schatting/keuze van de kansverdelingen die de basisstochasten moeten beschrijven, inclusief de verdelingsparameters. Dit type onzekerheid is het gevolg van een beperkt aantal gegevens of metingen. Ook deze onzekerheid kan in principe gereduceerd worden, maar in de praktijk blijkt dit vaak lastig. Er kan bijvoorbeeld elk jaar slechts 1 meetwaarde aan een reeks van jaarmaxima worden toegevoegd.

De koninklijke route voor de overstromingskansbenadering is de probabilistische benadering; deze berekent de overstromingskans en houdt evenwichtig rekening met alle onzekerheden door middel van kansverdelingen voor de onzekere variabelen. De probabilistische methode is echter nog niet voor elk beoordelingsspoor rijp genoeg om breed uit te zetten. Mede daarom is op sommige onderdelen in WBI-2017 gekozen voor een semi-probabilistische benadering. Daarin wordt voor een aantal onzekere variabelen een vaste rekenwaarde gekozen.

Een van de belangrijkste ambities voor WBI-2017 is om bij de eerste beoordeling op basis van overstromingskansen expliciet en evenwichtig rekening te houden met onzekerheden rond belastingen op- en sterkte van waterkeringen.

De woorden expliciet en evenwichtig zijn hierbij van belang:

- In voorgaande toetsronden is wel degelijk ook rekening gehouden met onzekerheden. In de meeste toetssporen is dat echter *impliciet* gedaan, door “verborgen veiligheden” of marges in te bouwen in de rekenregels, vooral aan de sterktekant. Voor de belastingen werd alleen rekening gehouden met natuurlijke variabiliteit en werden kennisonzekerheden niet in rekening gebracht. Het is daardoor waarschijnlijk dat in voorgaande toetsronden de onzekerheden aan de belastingkant in de regel zijn onderschat en de onzekerheden aan de sterktekant in de regel zijn overschat.
- Het woord 'evenwichtig' verwijst naar het *op gelijkwaardige wijze* verdisconteren van de *belangrijkste* onzekerheden.

In de probabilistische analyses, die ten grondslag liggen aan de belangrijkste beoordelingsinstrumenten van WBI-2017, worden aan alle mogelijke sterktes en belastingen kansen op voorkomen toegekend. Vervolgens wordt de kans bepaald voor de verzameling combinaties van belasting en sterkte waarbij sprake is van falen: het overschrijden van de grenstoestand (de grens tussen falen en niet-falen).

Onzekerheden en de statistische beschrijving daarvan staan aan de basis van faalkansberekeningen. Alle typen onzekerheden kunnen op gelijke wijze worden behandeld in faalkansberekeningen. De *mogelijkheid*¹ om alle onzekerheden op een consistente wijze te behandelen is een belangrijk voordeel van de overstromingskansbenadering.

De ambitie om expliciet en evenwichtig rekening te houden met onzekerheden rond belastingen op- en sterkte van waterkeringen vraagt om de systematische inzet van probabilistische rekenmethoden, de specificatie van een grenstoestandfunctie per beoordelingsspoor en de expliciete specificatie van de onzekerheden (stochasten) daarin.

In de probabilistische aanpak binnen het WBI wordt onderscheid gemaakt tussen

- probabilistisch rekenen, leidend tot een resultaat in de vorm van een *kans*, hierbij staan verschillende rekentechnieken ter beschikking;
- semi-probabilistisch rekenen, in principe leidend tot een resultaat in de vorm van een *score* (géén kans), met behulp van rekenwaarden zowel voor de sterkte als voor de belasting, op basis van een vooraf uitgevoerde kalibratie.

De nadere beschrijving van de probabilistische methode binnen WBI-2017 is gegeven in (Deltares, 2016k). In het vervolg van voorliggend rapport worden slechts enkele voor Hydraulische Belastingen belangrijke aspecten behandeld.

2.1.2 Stochasten

Veel onzekerheden zijn goed te beschrijven als een continue stochast. Voorbeelden hiervan aan de belastingenkant zijn de windsnelheid, de rivierafvoer en de zeewaterstand. Voor dergelijke stochasten geldt overigens dat er geen kans kan worden toegekend aan het optreden van een specifieke waarde (bijvoorbeeld aan het optreden van een windsnelheid van exact 25.28734... m/s), wel aan de kans op een waarde in een bepaald interval (bijvoorbeeld een windsnelheid tussen 25 en 26 m/s). In plaats daarvan wordt de kansverdeling van deze stochasten gedefinieerd als een *kansdichtheid*. Daaruit kan de kans worden afgeleid dat de waarde van de stochast in een bepaald interval ligt of een bepaalde waarde overschrijdt.

Sommige vormen van onzekerheid zijn echter lastig te verwerken als continue stochast. In dergelijke gevallen is er voor gekozen de onzekerheid te beschrijven als discrete stochast met een eindig aantal mogelijke realisaties. Aan elk van deze realisaties wordt een kans toegekend en de som van deze kansen is gelijk aan 1. Voorbeelden aan de belastingenkant van onzekerheden die als discrete stochast worden beschreven zijn de windrichting (gedefinieerd als discrete windsectoren) en het functioneren (c.q. falen) van een stormvloedkering (open of dicht).

¹ In WBI 2017 is overigens nog geen sprake van volledige consistentie in de verwerking van onzekerheden.

2.1.3 Kansen aggregeren

In de rekenmethode wordt eerst per realisatie van de discrete stochasten een probabilistische berekening gemaakt op basis van alle continue stochasten. Vervolgens worden de berekende faalkansen samengesteld tot één faalkans, rekening houdend met de kans op de betreffende realisaties van de discrete stochasten.

In de probabilistische rekenmethode is sprake van nog meer vormen van aggregatie, namelijk van:

- de kans per 12-uurs of getijperiode naar een kans per jaar
- de kans per dijkvak naar de kans per traject
- de faalkansbijdragen uit verschillende beoordelingsporen (mechanismen) naar een totale faalkans.

Binnen de context van Hydraulische Belastingen is hiervan alleen de eerstgenoemde aggregatie aan de orde. Deze 'opschaling naar een jaar' wordt behandeld in paragraaf 9.1.6 onder de kop 'tijdsintegratie'.

In de rekenmethode wordt als volgt omgegaan met het aspect tijd:

- De overstromingskans per jaar wordt gebaseerd op de overstromingskans in het winterhalfjaar; de bijdrage van het zomerhalfjaar aan de jaarlijkse kans op een overstroming wordt verwaarloosd.
- Binnen het winterhalfjaar wordt de statistiek van de stochasten als homogeen (stationair) beschouwd.
- Belasting-gebeurtenissen ('events') kunnen verschillende tijdschalen hebben, namelijk:
 - een 12-uurs danwel een getijperiode ('snel') of
 - 1 danwel 2 maanden² ('traag').
- Stochasten met betrekking tot (sterkte en) kennisonzekerheden worden verondersteld niet te variëren binnen de periode van 1 jaar.

2.1.4 Grenstoestandsfuncties voor toetssporen

Bij ieder toetsspoor voor een waterkering hoort een grenstoestandsfunctie. De grenstoestandsfunctie geeft de grens aan tussen falen en niet-falen. Het is de plaats in de berekening waar - per toetsspoor - de beschrijving van de relevante sterktekenmerken en de beschrijving van de relevante belastingkenmerken samenkomen. Als de belasting groter is dan de sterkte treedt falen op en vice versa.

Bij de beschrijving van de toetssporen komen gewoonlijk diverse kenmerken van de waterkering aan de orde, die heel specifiek zijn voor het beschouwde toetsspoor en daardoor per toetsspoor verschillen. De in het toetsspoor benodigde belastingkenmerken zijn daarbij doorgaans beknopt beschreven en meer generiek van aard. Mede daarom wordt de beschrijving van de toetssporen gewoonlijk behandeld als onderdeel van de beschrijving van de sterkte van de waterkering en wordt de belasting apart van de sterkte en de toetssporen behandeld. Deze 'knip' tussen belastingen en sterkte in de beschrijving van de toetssporen is ook zichtbaar in de scheiding tussen Bijlage II Hydraulische belastingen en Bijlage III Sterkte en veiligheid.

² Preciezer: 30 danwel 60 dagen.

2.1.5 Grenstoestandsfuncties voor rekenwaarden voor de Hydraulische Belastingen

Zoals in Paragraaf 2.1.1 aangegeven wordt voor sommige toetsporen in WBI-2017 gekozen voor een semi-probabilistische benadering. Daarin wordt voor een aantal onzekere variabelen een vaste rekenwaarde gekozen. Daarbij gaat het specifiek om de volgende belastingparameters:

- waterstand
- golfhoogte
- hydraulisch belastingniveau, een vereenvoudigde maat voor de 'benodigde kruinhoogte'
- golfcondities bij gegeven waterstandsniveaus, voor de beoordeling van bekledingen.

Voor de bepaling van de rekenwaarden voor de Hydraulische Belastingen wordt gebruik gemaakt van speciale grenstoestandsfuncties. Met deze grenstoestandsfuncties is de probabilistische methode niet meer gericht op de statistiek van 'falen', maar op de statistiek van Hydraulische Belasting parameters. Zo wordt voor bijvoorbeeld de kritieke waterstand bepaald die wordt overschreden voor de beschouwde overschrijdingsfrequentie.

Rekenwaarden voor de eenvoudige toets en gedetailleerde beoordeling per vak 'semi-probabilistisch'

Rekenwaarden zijn noodzakelijk in een semi-probabilistische benadering, welke relevant is voor een eenvoudige beoordeling (is een toetspoot relevant om te beschouwen?) en een gedetailleerde beoordeling op vakniveau. Bij de kalibratie van de semi-probabilistische rekenmethode in de gedetailleerde beoordeling per vak is gebleken dat voor bijna alle toetsporen een bevredigende kalibratie gevonden kon worden voor de rekenwaarden aan de sterkte-kant als de rekenwaarde voor de belastingen eenvoudigweg gekozen wordt als de waarde met een overschrijdingskans gelijk aan de trajectnorm. Hierop zijn twee uitzonderingen: Graserosie buitentalud (GEBU) en Duinafslag (DA). Daar bleek het noodzakelijk om bij de keuze van de rekenwaarde van de belasting rekening te houden met de faalkansbegroting (de bijdragen aan de kans op falen) voor het betreffende toetspoot en met het lengte-effect (door ruimtelijke variatie van de sterkte heeft een langer dijktraject een grotere kans op falen).

Rekenwaarde voor de hydraulische belasting op dijkbekledingen op het buitentalud en binnentalud

Bij grenstoestandsfuncties (toetsporen) waar meer dan één belastingparameter een rol speelt is het lastig om een rekenwaarde voor de belasting te vinden, omdat de combinatie van parameter-waarden een bepaalde overschrijdingskans moet hebben. Voor dergelijke gevallen verdient de probabilistische aanpak de voorkeur. Dit is bijvoorbeeld van toepassing voor de toetsporen Grasbekleding erosie kruin en binnentalud (GEKB) en Sterkte en stabiliteit puntconstructies (STkwp) van kunstwerken.

Voor diverse bekledingen-toetsporen zou dit ook gelden, maar daar wordt de probabilistische rekenmethode nog niet voldoende geschikt geacht voor de beoordeling. In deze gevallen is dus wel een 'semi-probabilistische' rekenwaarde voor de belasting nodig in gedetailleerde toets per vak. Daar komt bij dat de maatgevende belastingen voor de bekledingen niet alleen bepaald worden door topwaarden van de waterstand, maar dat bovendien de belastingduur (dus het verloop van de belasting in de tijd binnen een belasting-event) een belangrijke rol speelt. Om de vereiste informatie te genereren zijn diverse pragmatische keuzes gemaakt. Deze methode wordt wel aangeduid als de 'Q-variant' en is

gebaseerd op een tijdelijke, regionale oplossing uit 1999. Een beschrijving van de methode is gegeven in (Van Nieuwenhuijzen et al., 2010) en de wijze waarop de methode in WBI-2017 is geïmplementeerd is beschreven in (Van Balen, 2016).

2.2 Basiskenmerken van de hydraulische belastingen

2.2.1 Parameters met betrekking tot de hydraulische belasting

De hydraulische belastingen bestaan primair uit waterstanden en golfcondities (hoogte, periode en richting) nabij de beschouwde waterkering³. De betreffende parameters zijn:

- waterstand (m+NAP)
- significante golfhoogte H_s (m) en H_{m0} (m) (deze worden als gelijkwaardig beschouwd).
- piekperiode T_p (s)
- spectraal gewogen periode $T_{m-1,0}$ (s)
- gemiddelde golfrichting

Deze belastingparameters kennen een natuurlijke variabiliteit: er is sprake van inherente onzekerheid. Het omgaan met de inherente onzekerheid rond de hydraulische belastingen vormt een belangrijk onderdeel van de probabilistische rekenmethode binnen het WBI: het is nodig de inherente onzekerheid rond de lokale waterstanden en golfcondities statistisch te kwantificeren.

In overeenstemming met de aanpak in voorgaande WTI edities wordt in generieke zin een hoge belasting primair geassocieerd met hoge waterstanden en/of hoge golven. Bij het kwantificeren van de statistiek gaat het dan specifiek om de waarden van de belastingparameters bij zeer kleine overschrijdingskansen per jaar. De focus op *overschrijdingskansen* impliceert dat in feite alleen *topwaarden* van de belastingparameters voor de veiligheidsbeschouwing van belang zijn, zowel wanneer een vaste periode van een jaar wordt beschouwd als wanneer specifieke belastinggebeurtenissen ('events') worden beschouwd.

Naast de topwaarden van de hydraulische belastingen is voor diverse toetsporen echter óók informatie nodig over:

- het verloop van de hydraulische belasting in de tijd, binnen een 'maatgevend' belasting-event;
- dagelijkse belastingomstandigheden, zoals gemiddeld laag water (GLW).

In aansluiting op de aanpak in voorgaande WTI edities is de beschrijving van de variatie van de hydraulische belasting parameters in de tijd binnen een event pragmatisch ingevuld: er is gekozen voor een (per regio verschillende) representatieve waterstandsverlooptlijn, gebaseerd op de invulling in WTI 2011 en HR2006. Hierop wordt verder ingegaan in hoofdstuk 10. De onzekerheid rond het verloop van de belasting in de tijd wordt dus niet expliciet gemodelleerd.

³ Het hydraulische belastingniveau (HBN) en de golfcondities voor bekledingen zijn in feite speciale combinaties van deze primaire parameters.

Karakteristieke waarden voor dagelijkse omstandigheden met betrekking tot lokale waterstanden zijn afgeleid uit de 'waternormalen', zoals die in voorgaande toetsronden konden worden verkregen via de HelpdeskWater.

Bij de bepaling van de Hydraulische Belastingen - en dus ook in dit rapport - wordt de aandacht vooral gericht op de wijze waarop de statistiek van de lokale waterstanden en golfcondities wordt gekwantificeerd.

Deze kwantificering op zichzelf is voldoende voor de rekenmethode in de toetsen waarin sprake is van "probabilistische berekeningen": de gedetailleerde toets per vak 'probabilistisch' en gedetailleerde toets per traject. Voor de eenvoudige toets en de gedetailleerde toets per vak 'semi-probabilistisch' moeten aanvullend *rekenwaarden* voor de lokale waterstanden en golfcondities worden bepaald, zie paragraaf 2.1.5.

2.2.2 Uitvoerlocaties

De kenmerken van de hydraulische belastingen zijn bepaald op een groot aantal zogenaamde 'uitvoerlocaties' die op enige afstand (orde 50 à 200 m) van de teen van de waterkering liggen. Alleen in het geval van duinwaterkeringen liggen de uitvoerlocaties op grotere afstand, namelijk om en nabij de NAP-20m contourlijn.

In de beoordeling per vak en toetsspoor wordt altijd uitgegaan van (de hydraulische belastinggegevens op) één door de toetser te selecteren uitvoerlocatie. Er wordt dus niet geïnterpoleerd tussen de gegevens van twee of meer uitvoerlocaties.

Voor de uitvoerlocaties geldt dat in principe de WTI 2011 set van uitvoerlocaties gehandhaafd is, met uitzondering van de locaties waar de dijkkringlijn is veranderd. Voor de specificatie van nieuwe locaties is op hoofdlijnen dezelfde procedure gevolgd als voor WTI 2011. Wel zijn de nieuwe uitvoerlocaties in het algemeen iets dichter bij de waterkering gekozen, zodat ook in meer gevallen de effecten van een dam en/of oplopend voorland op de golfcondities in rekening gebracht zijn.

Naast de locaties nabij de waterkering zijn in het geval van rivieren ook uitvoerlocaties in de as van de rivier gespecificeerd. Er wordt dan ook wel gesproken van 'oeverlocaties' respectievelijk 'aslocaties'. Aslocaties spelen in de beoordeling van de waterkeringen geen rol, maar met name de (statistiek van de) *waterstand* op aslocaties wordt gebruikt voor beleidsanalyses. Op aslocaties worden geen golfcondities bepaald.

Zoals al in paragraaf 1.4 genoemd zijn geen uitvoerlocaties gespecificeerd nabij de primaire waterkeringen in havens en andere (complexe) afgeschermd gebied.

Voor de meeste toetssporen (m.u.v. duinafslag) zijn de Hydraulische Belastingen nodig bij de teen van de waterkering. Dit betekent dat een transformatie nodig is van de uitvoerlocatie (oeverlocatie) naar de teen van de waterkering. Deze transformatie is met name relevant voor de golfcondities. Zij vindt plaats binnen het probabilistisch model, op basis van informatie van de toetser over een eventuele dam of oplopende bodem in het traject tussen de uitvoerlocatie en de teen van de waterkering. Zie hiervoor verder paragraaf 2.2.3.3 en 3.3.3.

2.2.3 Rol van de toetsers

2.2.3.1 Koppeling van uitvoerlocatie aan keringvak

Per vak (dus ook per toetsspoor) kiest de toetsers een uitvoerlocatie waarvan de hydraulische belasting informatie wordt gebruikt. Doorgaans is dit de uitvoerlocatie die het dichtst bij het beschouwde vak ligt. Zie ook de Schematiseringshandleiding hydraulische condities bij de dijkteen.

2.2.3.2 Hydraulische condities op uitvoerlocaties

De informatie over hydraulische belastingen op de uitvoerlocaties wordt vooraf bepaald en in de vorm van databases geleverd bij het WBI. De toetsers heeft op deze informatie geen invloed in de eenvoudige toets en de gedetailleerde toets. Dit is een aanscherping ten opzichte van de voorgaande WBI edities, waar de toetsers in sommige watersystemen de golfcondities op de uitvoerlocaties kon beïnvloeden door de strijklengtes en bodemniveaus aan te passen die gebruikt werden in de golfgroeiromme van Bretschneider.

2.2.3.3 Transformatie van uitvoerlocatie naar de teen van de waterkering

Bij de vertaling van de hydraulische belastingen van de uitvoerlocatie naar de teen van de waterkering kunnen de golfcondities (m.n. de hoogte en richting) veranderingen ondergaan onder invloed van lokale omstandigheden, bestaande uit een dam en/of een ondiep voorland. De toetsers kan dergelijke informatie invoeren in de schematisatie van het profiel van de waterkering (dijk of kunstwerk)⁴ en daarmee de hydraulische condities bij de teen beïnvloeden. Als de toetsers niets invult, dan worden de hydraulische condities van de uitvoerlocatie ongewijzigd toegepast bij de teen. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 2.3. In Bijlage II Hydraulische belastingen wordt voorgeschreven om dit toe te passen.

Er is nog geen formele rekenmethode beschikbaar om de invloed van vegetatie tussen de uitvoerlocatie en de teen van de waterkering te verdisconteren. Nieuwe onderzoeksresultaten kunnen in de toets op maat gebruikt worden.

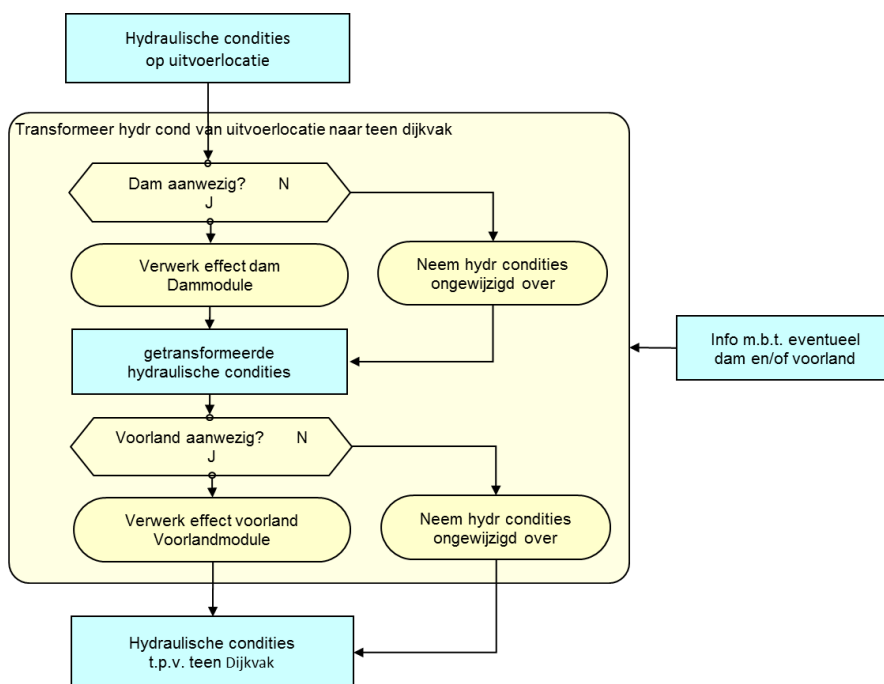
2.3 Omgaan met inherente onzekerheid rond lokale hydraulische belastingen

2.3.1 Inleiding

Er is geen (meet-)informatie beschikbaar over de lokale waterstanden en golven bij alle waterkeringen, waaruit de statistiek zou kunnen worden afgeleid. In de praktijk wordt daarom die statistiek afgeleid uit:

- de *statistiek* van de belangrijkste *bronnen*, of oorzaken van hoge lokale Hydraulische Belastingen (bedreigingen)
- de *fysische relatie* tussen die bronnen en de lokale Hydraulische Belastingen.

⁴ Bij duinen hoort een dergelijke transformatie in de toets op maat. Voor de Waddenzee is dit in WTI-2011 uitgewerkt.



Figuur 2.3 Stroomschema voor de transformatie van de hydraulische condities bij de uitvoerlocatie naar de dijkteen.

Voorbeelden van bronnen zijn (hoge) afvoeren, windsnelheden en zeewaterstanden. De bronnen voor hoge lokale hydraulische belastingen worden verder 'basisstochasten' genoemd. Deze parameters zijn gekoppeld aan een (referentie-)locatie of station. Voorbeelden van basisstochasten zijn de rivierafvoer te Lobith en de wind bij Schiphol.

2.3.2 Watersystemen: gebieden met verschillende bronnen voor hoge hydraulische belasting

De wateren die een bedreiging vormen voor de primaire waterkeringen worden onderverdeeld in watersystemen⁵. Een watersysteem is een gebied waar de hydraulische belastingen bepaald worden door een *specifieke combinatie van basisstochasten*. In Bijlage A wordt een overzicht gegeven van de watersystemen en hun basisstochastcombinaties. Figuur 2.4 geeft een grafische weergave van de indeling van de primaire waterkeringen naar de verschillende watersysteem. Alleen de eerste 18 watersystemen, ook regio's genoemd, in Figuur 2.4 zullen worden behandeld in dit rapport. Deze 18 regio's (zie ook Tabel 2.1) zijn geïmplementeerd in Hydra-Ring. De overige regio's uit Figuur 2.4 hebben betrekking op de voormalige primaire keringen van type C (C-keringen); de implementatie in Hydra-Ring van deze regio's is nog gaande.

⁵ In het probabilistisch model Hydra-Ring wordt een watersysteem een 'regio' genoemd.

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	18. Limburgse Maas



Figuur 2.4 Overzichtskartaal watersystemen. Bron: Min. I&M (2016).

In het kader van WBI-2017 heeft een heroverweging plaatsgevonden van de selectie van basisstochasten (en de indeling in watersystemen), maar dit heeft niet geleid tot wezenlijke aanpassing ten opzichte van voorgaande WTI edities. Voor een nadere toelichting op de afwegingen ten aanzien van de gekozen stochasten wordt verwezen naar (Deltares, 2013a).

Er zijn vijf basisstochasttypes die in verschillende combinaties relevant zijn voor de verschillende watersystemen, namelijk:

- wind (snelheid en richting)
- rivierafvoer
- zeewaterstand
- meerpeil
- toestand van de stormvloedkering

Elk basisstochasttype heeft een vrij specifieke definitie, die samenhangt met de focus op topwaarden. Hier kan verwarring met dagelijks taalgebruik op de loer liggen. Zo is bijvoorbeeld de *stochast* 'zeewaterstand' gedefinieerd als het maximum van de waterstand over een getijperiode. Dat is iets anders dan de 'zeewaterstand' in dagelijks taalgebruik.

Uit Bijlage A blijkt ook dat er watersystemen zijn met eenzelfde *combinatie* van basisstochasttypes, bijvoorbeeld de combinatie van Wind en Meerpeil. Deze watersystemen worden beschouwd als hetzelfde watersysteemtype, zie Tabel 2.2.

Basisstochasttype	Watersysteemtype						
	Bovenrivieren	Benedenrivieren	IJssel- en Vechtdelta	Meren	Kust - harde keringen	Oosterschelde	Duinen
Wind (richting en snelheid)	x	x	x	x	x	x	
Afvoer	x	x	x				
Zeewaterstand		x			x	x	x
Meerpeil			x	x			
Toestand Stormvloedkering(en)		x	x			x	

Tabel 2.2 Watersysteemtypes en hun stochasttypes⁶.

Ieder watersysteemtype heeft een specifieke combinatie van basisstochasttypes en daarmee samenhangend een eigen type events (definitie van bepalende hoogwatergebeurtenissen) en een eigen belastingmodel in de probabilistische modellering⁷.

⁶ Bij waterkeringen in open verbinding met de zee worden de lokale golfcondities mede bepaald door de golfcondities aan een open rand van het water. In de meeste gevallen wordt echter verondersteld dat deze golfcondities volledig gecorreleerd zijn aan de stochast wind. Alleen voor duinwaterkeringen worden in plaats van de wind juist de golven op de gebiedsrand als (bron achter de) hydraulische belastingen beschouwd. In onderhavig rapport worden deze golven verder niet als basisstochast behandeld.

Overigens wijkt in voorliggend rapport de naamgeving van de watersysteemtypes enigszins af van de naamgeving die (onder de motorkap) in het instrument voor WTI-2011 is gehanteerd, de relatie tussen de namen is gegeven in Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Relatie tussen de namen van watersysteemtypes in voorliggend rapport en het WTI-2011 rekenmodel. SVK staat voor "stormvloedkering".

Naam in onderhavig rapport	Naam in WTI2011 rekenmodel
Bovenrivieren	Rivier
Benedenrivieren	Rivier_naar_zee_metSVK
IJssel- en Vechtdelta	Rivier_naar_meer_metSVK
Meren	Meer
Kust - harde keringen	Zee
Oosterschelde	Estuarium_metSVK
Duinen	-

Bij de behandeling van de watersystemen in voorliggend rapport zal zo veel mogelijk de volgorde worden aangehouden zoals in Bijlage A, aansluitend op de volgorde van de watersysteemtypes zoals ook weergegeven in Tabel 2.3.

2.3.3 De basisstochasten

2.3.3.1 Wind

Wind is de primaire opwekkende kracht achter golven en daarom is de wind in alle watersystemen van belang. Alleen bij de watersystemen die zijn gerelateerd aan het toetspoot 'duinafslag' wordt niet de wind maar de statistiek van de zeewaterstand en daarvan via een deterministische relatie afgeleide golven gebruikt als stochast. In veel watersystemen is wind ook een belangrijke bron voor hoge waterstanden.

De stochast wind is een snelle stochast, dat wil zeggen een stochast waarvan de waarde relatief snel fluctueert in de tijd. De stochast bestaat uit twee componenten: de windrichting en de windsnelheid.

Windrichting

De windrichting wordt behandeld als een discrete stochast: de stochast heeft in de rekenmethode een beperkt aantal mogelijke realisaties. In de meeste watersystemen wordt uitgegaan van de 16 discrete windrichtingen: 22.5, 45.0, ..., 360.0 graden ten opzichte van Noord, zie ook Tabel 2.4 voor de relatie met de benaming van deze richtingen. Elders wordt gewerkt met 12 windrichtingen: 30, 60, ..., 360 graden ten opzichte van Noord.

⁷ In het probabilistisch model Hydra-Ring wordt de term 'watersysteemtype' niet gebruikt, maar wordt wel het daarmee samenhangende onderscheid in 'belastingmodellen' gemaakt.

Tabel 2.4 Benaming van windrichtingen.

Windrichting	
Naam	[°N]
NNO	22.5
NO	45.0
ONO	67.5
O	90.0
OZO	112.5
ZO	135.0
ZZO	157.5
Z	180.0
ZZW	202.5
ZW	225.0
WZW	247.5
W	270.0
WNW	292.5
NW	315.0
NNW	337.5
N	360.0

Elk van deze windrichting-realiserings *vertegenwoordigt* de windrichtingsector rond de betreffende windrichting. De kans op voorkomen van elk van deze realisaties wordt gespecificeerd in een tabel.

Windsnelheid

De windsnelheid is een continue en snelle stochast. De (windrichtingsafhankelijke) overschrijdingskansen van de windsnelheid worden gespecificeerd voor een referentie locatie. Doorgaans is dit een KNMI meetstation, voor veel watersystemen wordt de statistiek gebruikt die is afgeleid voor KNMI meetstation Schiphol. De stochast windsnelheid betreft een zogenaamde 'potentiële windsnelheid' U_p . Deze is gedefinieerd als uurgemiddelde windsnelheid op 10 meter hoogte boven homogeen open terrein met een ruwheidslengte van 0.03 m, zie (de Waal, 2003). De ruwe gemeten wind op het meetstation is daartoe door het KNMI vertaald naar de standaard meethoogte van 10 m, en gecorrigeerd voor nabije beschuttingseffecten in grofweg de eerste kilometer (maar niet voor de grootschaliger landschapsruwheid).

2.3.3.2 Zeewaterstand

Zeewaterstand is een snelle stochast. Het is nodig onderscheid te maken tussen de 'zeewaterstand op de gebiedsrand' en de 'zeewaterstand lokaal'.

Zeewaterstand op gebiedsrand

In Hydra-Ring wordt de stochast 'zeewaterstand op gebiedsrand' gebruikt voor de watersystemen Benedenrivieren en Oosterschelde.

De statistiek van de stochast zeewaterstand is in WBI-2017 gegeven in de vorm van een kansverdeling van de zeewaterstand bij gegeven windrichting. De kansverdelingen hebben betrekking op de maximale waterstanden gedurende een getijperiode.

Zeewaterstand lokaal

In de watersystemen van het watersysteemtype Zee wordt de statistiek van de lokale waterstand *niet* bepaald door de in paragraaf 2.3.1 genoemde combinatie van

- de *statistiek* van een basisstochast 'zeewaterstand op referentielocatie X' en
- de *fysische relatie* tussen deze basisstochast enerzijds en de lokale waterstand anderzijds.

In plaats daarvan wordt in het watersysteemtype Zee de statistiek van de lokale waterstand bepaald uit:

- triangulaire interpolatie van de *statistiek* van drie basisstochasten 'zeewaterstand op referentielocatie X', namelijk op referentielocaties X_1 , X_2 en X_3 .

In vergelijking met andere watersystemen is dit watersysteemtype een enigszins vreemde eend in de bijt, door het interpoleren van statistiek in plaats van gebruik maken van een fysische relatie.

2.3.3.3 Rivierafvoeren

Rivierafvoer is een trage stochast. De statistische informatie voor de afvoer stochasten bestaat uit overschrijdingsfrequenties en topduren.

De Maas wordt in twee watersystemen opgedeeld, met de scheiding ongeveer bij Boxmeer. Voor het bovenstroomse deel wordt de statistische informatie gebruikt van locatie Borgharen en voor het benedenstroomse deel die van locatie Lith. Achtergrond hiervan is het feit dat in het traject bovenstrooms van Boxmeer de topvervlakking van de afvoergolf van belang is: in het traject tussen Borgharen en Boxmeer wordt de afvoergolfvorm geleidelijk vlakker en breder. De golfvorm verandert benedenstrooms van Boxmeer veel minder.

2.3.3.4 Meerpeil

Het meerpeil is de ruimtelijk gemiddelde waterstand in een meer en is daarmee een maat voor het volume water in het beschouwde meer. Het meerpeil is veelal een afgeleide van de combinatie van peilbeheer, aanvoer van water (uit bijvoorbeeld rivierafvoer en/of gemalen) en de mogelijkheden om water af te voeren (doorgaans beïnvloed door wind en zeewaterstand).

Het meerpeil is een trage stochast. Daarmee speelt de duur ook een rol.

De stochast IJsselmeerpeil is gerelateerd aan de afvoerstochasten de IJssel bij Olst en de Overijsselse Vecht bij Dalfsen, zowel in termen van statistische correlatie als in termen van schematisatie van het faseverschil tussen de twee golfvormen in het probabilistisch model. Deze correlatie is alleen relevant voor de watersystemen IJsseldelta en Vechtdelta, niet voor het IJsselmeer zelf.

2.3.3.5 Stormvloedkering

De toestand van de stormvloedkering is een snelle stochast. In Hydra-Ring worden de Europoortkering (dat is de combinatie van Maeslantkering en Hartelkering), de Ramspol kering en de Oosterschelde stormvloedkering behandeld als stochast Stormvloedkering.

Het is nadrukkelijk niet nodig om elke stormvloedkering als een stochast te behandelen, dat is alleen nodig als gemeend wordt dat de *onzekerheid over het functioneren* van de stormvloedkering in rekening gebracht moet worden.

De stochast stormvloedkering is een discrete stochast: het aantal mogelijke realisaties is beperkt. In de Hydra-Ring beschrijving van de watersystemen benedenrivieren en Vechtdelta is een stochast Stormvloedkering beschikbaar met twee mogelijke realisaties: 'open' of 'gesloten (conform sluitprocedure)'. Voor de Oosterschelde stormvloedkering wordt rekening gehouden met meer mogelijke realisaties, vanwege de mogelijkheid van gedeeltelijk falen (van een deel van de schuiven) van deze kering.

De beschrijving van de statistiek van de stormvloedkering is vrij specifiek afgestemd op de momenteel aanwezige keringen en hun aansturing.

2.3.4 De fysische relatie tussen basisstochasten en lokale hydraulische belastingen

2.3.4.1 Productieberekeningen en databases fysica

Binnen de probabilistische modellering is een relatie nodig tussen de basisstochasten enerzijds en de lokale hydraulische belastingen anderzijds. Voor deze relatie zijn berekeningen nodig die zeer veel rekentijd vergen. Daarom wordt in de WBI praktijk de fysische relatie eenmalig vooraf bepaald in een proces dat vaak wordt aangeduid met 'productieberekeningen (fysica)'. De resultaten hiervan worden in 'tabelvorm' aangeboden aan het probabilistisch model.

De tabel is in feite een database met resultaten van modelsimulaties. Deze bevat voor een groot aantal uitvoerlocaties per combinatie van waarden voor de basisstochasten de lokale waterstanden en golfcondities die betrekking hebben op de lokale *topwaarden* binnen het betreffende belasting-event (hoogwatergebeurtenis). Elk belasting-event wordt dus gekarakteriseerd door een specifieke realisatie van de combinatie van stochasten van het watersysteem. Voor elk van deze combinaties (events) wordt met een hydrodynamisch model berekend wat de topwaarde is van de waterstand en golfparameters op de uitvoerlocaties.

2.3.4.2 Gedrag watersysteem

Bij de bepaling van de fysische relatie tussen de basisstochasten en de lokale hydraulische belastingen worden enkele algemene uitgangspunten gehanteerd. De belangrijkste daarvan worden hieronder behandeld. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de begrippen dijkkring en dijkkringgebied, omdat deze begrippen in de waterveiligheid nog steeds goed bruikbaar zijn in conceptuele zin; alleen in juridische zin hebben deze begrippen geen betekenis meer.

Onfeilbare dijkkringgebiedbeschermende keringen

Er wordt van uitgegaan dat al het water binnen het watersysteem blijft; er vindt géén overstroming van een dijkkringgebied vanuit het watersysteem plaats. Dit betekent dat - bij de betreffende berekeningen - impliciet wordt aangenomen dat de dijkkringgebiedbeschermende waterkeringen oneindig hoog en sterk zijn.

Hiermee hangt samen het uitgangspunt dat de feitelijke kenmerken van de kering (zoals keringtype, profiel, ruwheid, hoogte) geen invloed hebben op de fysische relatie tussen basisstochasten en lokale hydraulische belasting.

Merk op dat dit uitgangspunt wel ruimte laat voor het rekening houden met het effect van een overstroming die *buiten* het beschouwde watersysteem plaatsvindt. Maar daar moet dan wel expliciet toe besloten worden. Twee concrete gevallen waar dit wordt toegepast zijn:

- Het effect van overstromingen van de Maaskades in het bovenstroomse deel van de Maas wordt meegenomen bij het beschrijven van de afvoerstochast voor het benedenstroomse deel van de Maas (benedenstrooms van Boxmeer).
- Het effect van overstromingen in het buiten Nederland gelegen bovenstroomse gebied van de bovenrivieren wordt meegenomen bij het beschrijven van de afvoerstochast aan de bovenstroomse rand (op de landsgrens) van het watersysteem.

Varianten van feilbaarheid bij dijkkringverbindende keringen

Bij dijkkringverbindende keringen is de aanpak iets meer gedifferentieerd. Bij elke dijkkringverbindende kering wordt één van de volgende drie aanpakken gevolgd:

- 1 De kering wordt oneindig hoog en sterk verondersteld en vormt daarmee - net als dijkkringgebiedbeschermende keringen - een buitenrand van het watersysteem. Voorbeelden hiervan zijn de Afsluitdijk en de Houtribdijk.
- 2 De kering wordt oneindig sterk verondersteld, maar omdat de overstroombaarheid een relevante karakteristiek wordt geacht, wordt de correcte hoogte van de kering in de waterstandsmodellering in rekening gebracht. Een voorbeeld hiervan is de dijk Ramspol-IJsselmuiden.
- 3 De kering wordt zowel eindig hoog als eindig sterk (i.c. feilbaar) verondersteld. Deze aanpak wordt alleen toegepast bij enkele stormvloedkeringen, dat wil zeggen een beweegbaar deel van een dijkkringverbindende kering. Voorbeelden hiervan zijn de Balgstuw Ramspol, de Europoort kering en de Oosterschelde stormvloedkering.

2.3.4.3 Nieuwe berekeningen voor WBI-2017

Herberekening van de fysische relatie tussen de basisstochasten en de lokale hydraulische belastingen heeft alleen plaatsgevonden voor de rivieren. Voor de overige systemen is gebruik gemaakt van de rekenresultaten van WTI 2011 of ouder.

Modellen

De kenmerken van de binnen WBI gebruikte rekenmodellen voor wind, waterstanden en golven staan beschreven in paragraaf 3.3.3.

Gebiedschematisaties

In de rekenmodellen worden gebiedschematisaties gebruikt. Algemene uitgangspunten bij deze gebiedschematisaties zijn:

- De begrenzing van het watersysteem sluit aan op de lijn die de ligging van de primaire waterkeringen aangeeft (de dijkkringlijn).
- De schematisatie is zoveel mogelijk representatief voor de verwachte toestand op de peildatum van de betreffende beoordelingsronde (meestal aan het eind van de beoordelingsperiode).

Voor de gebiedschematisaties ten behoeve van de nieuwe berekeningen in het rivierengebied geldt:

- De bodemligging is gebaseerd op de meest recente beschikbare bodeminformatie.
- Voor vegetatie is het beeld van 1997 gebruikt. Dat vegetatiebeeld legt het beste de gewenste situatie van na het project Stroomlijn vast.

Nadere details van de gebiedschematisaties worden gegeven in hoofdstuk 4 en 5.

2.3.5 Statistiek basisstochasten

Uit de gehanteerde veronderstelling dat geen sprake is van forse normverzwaring volgt dat de herberekening van de statistiek van de basisstochasten beperkt is tot een update op basis van nieuwe inzichten en verlengde meetreeksen. Er heeft geen studie plaatsgevonden naar een uitbreiding van de statistiek naar nog kleinere overschrijdingskansen dan die in voorgaande WBI edities zijn beschouwd.

Uit de gehanteerde veronderstelling dat elk afzonderlijk dijktraject vanuit één watersysteem wordt bedreigd volgt dat geen rekening gehouden wordt met eventuele correlaties tussen stochasten van verschillende watersystemen.

Dit neemt niet weg dat er een tweetal aanpassingen hebben plaatsgevonden. De statistiek van de rivierafvoer bij Lobith en Borgharen is bepaald aan de hand van GRADE⁸, zie (Deltares, 2014i). Daarmee zijn, op basis van 30 jaar data, klimaatreeksen met neerslag van 50.000 jaar bepaald, die vervolgens zijn vertaald in afvoerreksen. Daarnaast is de windstatistiek aangepast. Dit laatste had vooral te maken met het feit dat met de vigerende windstatistiek geen statistische onzekerheden beschikbaar waren.

Naast marginale statistieken worden correlaties tussen basisstochasten onderling in rekening gebracht. Dit betreft de correlatie tussen meerpeil en rivierafvoer (van de Vecht en de IJssel), correlatie tussen IJssel- en Vechtafvoer, correlatie tussen Rijn- en Maasafvoer en de correlatie tussen wind en zeewaterstand.

Enkele opvallende kenmerken betreffende de statistische verdelingen van de verschillende basisstochasten in WBI-2017 zijn:

- Rijn- en Maasafvoer: Voor de bepaling van de statistiek van de Rijn- en de Maasafvoer is overgestapt van de extrapolatie van metingen naar gebruik van GRADE resultaten.

⁸ *Generator of Rainfall And Discharge Extremes.*

Dit heeft alleen voor de Rijnafvoerstatistiek geleid tot een forse afvlakking van de werklijn, als gevolg van het meenemen van overstromingen in Duitsland en noodmaatregelen om die overstromingen te beperken. Deze overstap is ook voor de Maas gemaakt, maar heeft niet tot dergelijk gedrag van de werklijn geleid.

- Vechtafvoer: De statistiek van de Vecht bij Dalfsen is geactualiseerd, hierbij zijn overstromingen in bovenstroomse delen van de Vecht en zijleidingen beschouwd. Het beschouwen van deze overstromingen heeft geleid tot een afvlakking van de werklijn voor herhalingstijden vanaf 100 jaar.
- Zeewaterstand: Het verlengen van de meetreeks heeft een te verwaarlozen effect op de verwachtingswaarde van de zeewaterstand.
- Meerpeilstatistiek: Het verlengen van de meetreeks heeft geen effect op de werklijnen voor Markermeer en IJsselmeer.
- Windstatistiek: De windstatistiek is geactualiseerd gebruik makend van langere en betrouwbaardere meetreeksen. Actualisatie van de windstatistiek heeft geleid tot actualisatie van de wind-waterstandsstatistiek.

2.4 Kennisonzekerheden

2.4.1 Statistische onzekerheid

Met de statistische onzekerheid rond de hydraulische belastingen wordt de onzekerheid in de beschrijving van de statistiek van de basisstochasten bedoeld.

Statistische onzekerheden zijn doorgaans het gevolg van de eindigheid van de beschikbare meetreeks met betrekking tot de beschouwde basisstochast. De statistiek die is afgeleid op basis van deze meetreeks is sterk afhankelijk van de vaak beperkte verzameling hoogwatergebeurtenissen die in die tijd wel/niet zijn waargenomen. De factor toeval speelt hier dus een rol en dat uit zich in een (statistische) onzekerheid in de afgeleide statistiek.

In sommige gevallen wordt de statistiek van een basisstochast echter niet (rechtstreeks) afgeleid van een werkelijke meetreeks, maar wordt een model gebruikt voor het genereren van een synthetische 'meet'-reeks. Dit is bijvoorbeeld het geval bij het gebruik van het model GRADE voor de bepaling van de afvoerstatistiek en de onzekerheid in die afvoerstatistiek. In dat geval wordt de onzekerheid in de statistiek niet meer zozeer bepaald door de eindigheid van meetreeks (die reeks is immers relatief eenvoudig te verlengen), maar door onzekerheid rond de representativiteit van het *model*. In dat geval *zou* daarom gesproken kunnen worden van modelonzekerheid. Echter, in de WBI context scharen we deze vorm van onzekerheid onder de statistische onzekerheid, omdat sprake is van onzekerheid in de beschrijving van de statistiek van de basisstochasten.

In de voorgaande WBI edities werden alleen inherente onzekerheden in de basisstochasten beschouwd en kon worden volstaan met alleen de verwachtingswaarde van de basisstochasten. In WBI-2017 is ook de betrouwbaarheidsband afgeleid voor de basisstochasten, zodat statistische onzekerheid kan worden meegenomen⁹.

De belangrijkste bevindingen zijn:

⁹ Deze betrouwbaarheidsbanden zijn in vorige WBI-edities ook afgeleid, maar daar is destijds verder niets mee gedaan.

- Rijn- en Maasafvoer: De overstap op het gebruik van GRADE resultaten heeft alleen voor de Rijnafvoerstatistiek geleid tot relatief smalle onzekerheidsbanden in vergelijking met voorgaande toetsronden (Deltares, 2014i).
- Zeewaterstand: De onzekerheidsbanden uit het basispeilenonderzoek (Dillingh et al, 1993) zijn fors. In deze onzekerheid is geen rekening gehouden met fysische begrenzingen. Er zijn gegronde redenen om aan te nemen dat de onzekerheden in werkelijkheid kleiner zijn en dat is bevestigd middels een analyse van een synthetische reeks van 3500 jaar windsnelheden en de daaruit resulterende reeksen van zeewaterstanden (Van den Brink, 2015). De uitkomsten van die analyse zijn gebruikt om nieuwe, smallere, onzekerheidsbanden af te leiden.
- Meerpeilstatistiek: De onzekerheidsbanden rond de meerpeilstatistiek zijn gebaseerd op de statistische verdeling en zijn beperkt in omvang.
- Windstatistiek: De onzekerheidsbanden in de windstatistiek zijn smal (Caires, 2009).

2.4.2 Modelonzekerheid

Met de modelonzekerheid rond de hydraulische belastingen wordt de onzekerheid in de fysische relatie tussen de basisstochasten en de lokale hydraulische belastingparameters bedoeld.

De modelonzekerheden zijn als extra stochasten in de probabilistische modellering opgenomen, zie (Deltares, 2016k) en (van Balen, 2016). Enkele belangrijke kenmerken hierbij zijn:

- De modelonzekerheid in lokale waterstand is per watersysteem gekwantificeerd. Hierbij is rekening gehouden met de hydraulische eigenschappen van watersystemen. Modelonzekerheid in de lokale waterstand is uitgedrukt in een standaarddeviatie¹⁰. Een belangrijk uitgangspunt hierbij is dat deze standaarddeviatie onafhankelijk is van de terugkeertijd maar wel afhankelijk van de locatie. Voor de in WBI-2017 gehanteerde modelonzekerheid in de lokale waterstand wordt verwezen naar paragraaf 8.3.
- De modelonzekerheden in de golfcondities zijn in alle gebieden uitgedrukt in termen van relatieve bias en relatieve standaardafwijking. Voor de in WBI-2017 gehanteerde modelonzekerheid in de lokale golfhoogte en de golfperiodematen wordt verwezen naar paragraaf 8.4.

2.5 Actualisatie van hydraulische belastingen in WBI-2017

Hieronder volgt een volledig overzicht van de veranderingen in WBI-2017 ten opzichte van WTI-2011 en/of HR-2006.

Aanpassing van de fysische relatie tussen basisstochasten en lokale hydraulische belastingen heeft alleen plaatsgevonden voor het rivierengebied en betreft (zie ook Hoofdstuk 4 en 5):

¹⁰ Strikt genomen is ook de bias beschouwd, maar die is in de huidige praktijk overal 0 m.

- Modelschematisaties voor de productieberekeningen van waterstanden zijn voor het hele rivierengebied (Rijntakken, Maas, Vecht- en IJsseldelta, Benedenrivieren) geactualiseerd. Hierin zijn alle Ruimte voor de Ruimte maatregelen en Maaswerken opgenomen. De afvoerverdeling bij de splitsingspunten is aangepast.
- Modelschematisaties voor de productieberekeningen van de golfparameters in het rivierengebied zijn geactualiseerd. In gebieden waar SWAN wordt ingezet zijn obstakels voor golfdoordringing toegevoegd aan de schematisatie en het gebied rondom de Biesbosch is aangepast.
- Er zijn nieuwe productieberekeningen van waterstanden gemaakt voor het gebied van de Rijntakken, de Maas, de Vecht- en IJsseldelta en de Benedenrivieren. Het Ketelmeer en het Vossemeer zijn in verband met mogelijke effecten van Ruimte voor Riviermaatregel IJsseldelta-Zuid (Bypass Kampen samen met zomerbedverdieping beneden-IJssel) ook toegevoegd aan regio 5 (IJsseldelta).
- In de productieberekeningen voor het Benedenrivierengebied is uitgegaan van een volledige correlatie tussen de afvoer van de Rijn bij Lobith en de afvoer van de Maas bij Borgharen in plaats van de zogenoemde 50%-lijnen gebruikt in WTI-2011.
- Voor alle rivierenregio's zijn de golfparameters geactualiseerd door middel van nieuwe SWAN berekeningen dan wel Bretschneider berekeningen. De voor deze laatste benodigde gemiddelde waterdieptes en effectieve strijklengtes zijn geactualiseerd, daarbij gebruik makend van de geactualiseerde modelschematisaties.

Aanpassingen van de statistiek met betrekking tot de inherente onzekerheid betreffen (in potentie) ook de overige watersystemen. Hierbij gaat het om de volgende aanpassingen (zie ook Hoofdstuk 6):

- Het Rijkcoort-Weibull model voor de windstatistiek is vervangen door de nieuwe windstatistiek afgeleid in 2009 door Deltares in samenwerking met het KNMI (Caires, 2009).
- De afvoerstatistiek van de Rijn bij Lobith en van de Maas bij Borgharen is bepaald met GRADE in plaats van statistische extrapolaties op basis van meetgegevens (Deltares, 2014j; Deltares, 2014i). Op basis van de statistiek van GRADE bij Lobith en Borgharen is de afvoerstatistiek van de IJssel bij Olst en van de Maas bij Lith bepaald.
- De wind-waterstandstatistiek voor de kustregio's is geactualiseerd; er zijn nieuwe zogenoemde s-waarden afgeleid op basis van de nieuwe windstatistiek.
- De faalkans van de Ramspolkering is aangepast van 1/286 naar 1/100 per sluitvraag.

Nieuw in WBI-2017 ten opzichte van WTI-2011 en HR-2006 is het meenemen van kennisonzekerheid in de probabilistische berekening. In WBI-2017 is de statistische onzekerheid in de kansverdelingen van de basisstochasten expliciet meegenomen. Statistische onzekerheid komt aan de orde in Hoofdstuk 7. Daarnaast is modelonzekerheid in lokale waterstanden en golfparameters gekwantificeerd, zie Hoofdstuk 8.

Al deze onzekerheden zijn in een nieuw probabilistisch model verdisconteerd, zie Hoofdstuk 9.

3 Productieketen Hydraulische Belastingen

3.1 Inleiding

Bij de productie van de HB kunnen de volgende hoofdonderdelen worden onderscheiden:

- 1) Voorbereiding, specificatie stochasten, watersystemen, parameters, uitvoerlocaties
- 2) Fysische relatie tussen hydraulische belastingen en basisstochasten: productieberekeningen fysica (waterstanden, golven)
- 3) Statistiek basisstochasten en kennisonzekerheid-stochasten
- 4) Statistiek HB: probabilistische berekeningen

Hieronder worden deze hoofdonderdelen nadere toegelicht en wordt aangegeven hoe en waar verdere uitwerking in dit rapport wordt gegeven.

Hoofdonderdeel voorbereiding

In het onderdeel 'voorbereiding' worden enkele basiselementen gespecificeerd. Denk hierbij aan de specificatie van:

- de stochasten, basisstochasten en - daaruit volgend - de onderscheiden watersystemen
- de parameters met betrekking tot de hydraulische belastingen
- de uitvoerlocaties

Dit onderdeel is in feite reeds behandeld in Hoofdstuk 2.

Hierbij zij opgemerkt dat deze voorbereiding niet geheel onafhankelijk van de andere hoofdonderdelen kan worden uitgewerkt. Bijvoorbeeld de specificatie van de uitvoerlocaties is mede afhankelijk van de te gebruiken resolutie in de modellen in het hoofdonderdeel productieberekeningen fysica. Voor een goede selectie van stochasten zijn ook vaak verkennende modelberekeningen noodzakelijk. Daarom is in de praktijk doorgaans sprake van wisselwerking tussen de invulling van de verschillende hoofdonderdelen.

Hoofdonderdeel productieberekeningen fysica

Het onderdeel 'productieberekeningen' heeft betrekking op het genereren van (lokale) waterstanden en golfcondities op een groot aantal uitvoerlocaties voor veel combinaties van waarden van de basisstochasten, en opslaan van deze gegevens in verschillende databases.

Als voorbereiding op de daadwerkelijke productieberekeningen worden in dit hoofdonderdeel de modellen gekalibreerd/gevalideerd en geschikt gemaakt voor productieberekeningen. Het betreft hier twee soorten modellen: waterbewegingsmodellen en golfvoorspellingsmodellen (opwekking en voortplanting). Rijkswaterstaat zet dezelfde modellen en modelschematisaties vaak in ten behoeve het uitvoeren van haar primaire processen, zoals vergunningverlening en handhaving, operationeel waterbeheer, planvorming / beleidsvragen en beoordeling-, ontwerp- en risicoberekeningen.

De stappen bij dit hoofdonderdeel worden nader uitgewerkt in paragraaf 3.2. Algemene kenmerken van de hierbij gebruikte modellen - inclusief de beschrijving van de wind als invoer - worden besproken in paragraaf 3.3. Algemene kenmerken van de watersystemen worden gegeven in paragraaf 3.4.

Details met betrekking tot modelschematisaties en productieberekeningen voor de diverse watersystemen volgen in Hoofdstuk 4 (waterstanden) en Hoofdstuk 5 (golfcondities).

Naast waterstanden en golven zijn in een enkel geval nog berekeningen nodig van seiches (regio 17). Ook hiertoe worden modellen opgezet en gekalibreerd/gevalideerd.

Hoofdonderdeel statistiek

Het onderdeel 'statistiek' heeft betrekking op de statistische beschrijvingen en modellering van de inherente onzekerheden (basisstochasten), de statistische onzekerheden en de modelonzekerheden.

De meeste aandacht gaat daarbij uit naar de bepaling van de extreme waardenstatistiek van de basisstochasten, inclusief hun verloop in de tijd en onderlinge samenhang of correlaties. Dit onderwerp wordt behandeld in hoofdstuk 6.

De extreme waardenstatistiek is behept met onzekerheden die het gevolg zijn van de beperkte meetreeksduur. In WBI-2017 wordt rekening gehouden met de statistische onzekerheid van de basisstochasten. Statistische onzekerheid wordt behandeld in hoofdstuk 7.

Waterstanden en golfcondities die uit het hoofdonderdeel productieberekeningen fysica volgen, zijn in principe behept met onzekerheden, de zogenoemde modelonzekerheid. WBI-2017 houdt rekening met dit type onzekerheid. Deze onzekerheid wordt niet betrokken in de productieberekeningen maar wordt achteraf - in het probabilistisch model - verwerkt in de berekende waarden. De modelonzekerheid wordt behandeld in hoofdstuk 8.

Hoofdonderdeel probabilistische berekeningen

Het onderdeel 'probabilistische berekeningen' heeft betrekking op de (gezamenlijke) kansberekeningen waarbij overschrijdingskansen van verschillende basisstochastwaarden met elkaar worden gekoppeld rekening houdend met hun tijdsverlopen en onderlinge samenhang. Binnen WBI worden deze kansberekeningen uitgevoerd met Hydra-Ring, zie verder Hoofdstuk 9.

3.2 Productieketen berekeningen fysica

3.2.1 Basisgedachten bij 'Fysische relatie tussen Basisstochastwaardecombinaties en Lokale hydraulische belastingparameters'

Binnen HydraRing zijn voor iedere 'willekeurige' locatie langs de primaire waterkeringen in Nederland en iedere 'willekeurige' basisstochastwaardecombinatie de bijbehorende waarden van de lokale hydraulische belastingparameters nodig.

De bepaling van de betreffende fysische relatie is een zeer rekenintensief proces. De betreffende fysische relatie wordt daarom vóóraf (buiten Hydra-Ring) bepaald en in een (veeldimensionale) tabelvorm aan Hydra-Ring aangeboden. De dimensies van de tabel bestaan uit de uitvoerlocatie en de basisstochasten.

Hydra-Ring maakt langs de dimensies van de continue basisstochasten gebruik van eenvoudige interpolatie (en indien nodig extrapolatie) in deze tabel. Voorbeelden van continue basisstochasten zijn 'windsnelheid', 'zeewaterstand', 'afvoer', 'meerpeil'.

In de dimensies van de 'uitvoerlocatie' en de discrete basisstochasten ('windrichting' en 'toestand stormvloedkering') wordt alleen gebruik gemaakt van de HB informatie bij een (representatief geachte¹¹) in de tabel beschikbare discrete waarde. In deze dimensies wordt dus géén gebruik gemaakt van interpolatie.

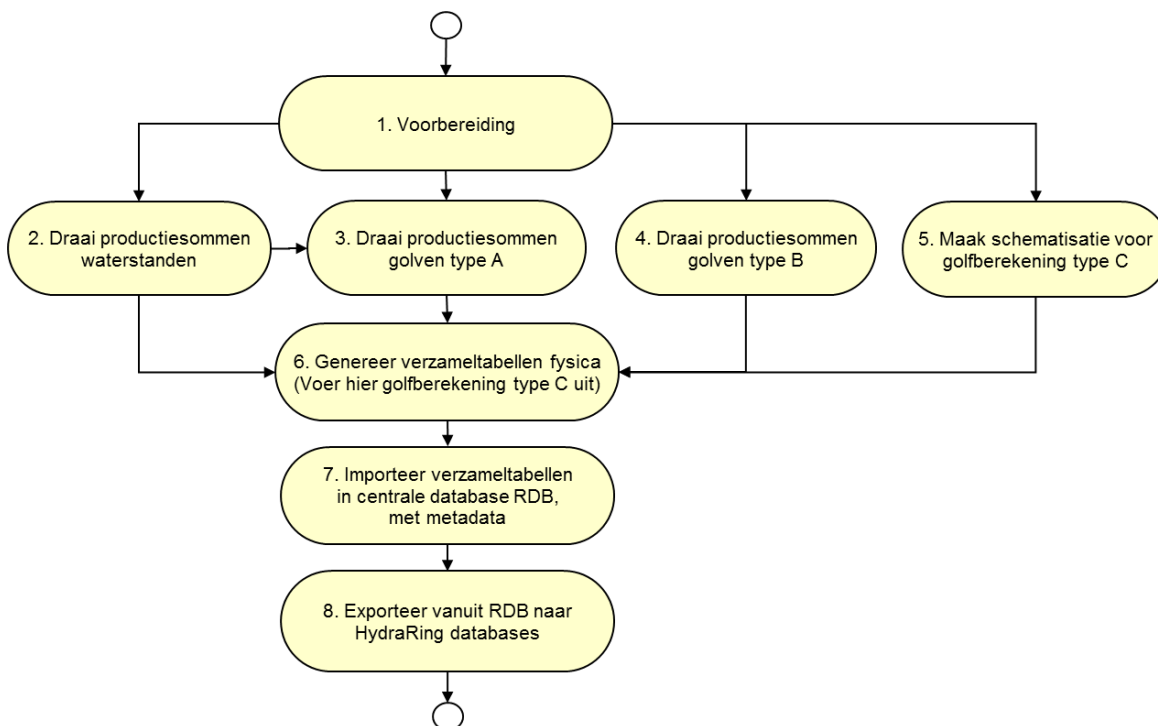
De methode voor inter- en extrapolatie in HydraRing langs de dimensies van de continue basisstochasten is bewust eenvoudig gehouden: deze bevat géén fysische regels. De relevante fysica moet in de tabel aanwezig zijn.

De tabel (verzameling locaties en stochastwaardecombinaties) moet voldoende gevuld zijn: de discretisatie moet goed gekozen zijn en bij alle waardecombinaties moet betrouwbare hydraulische belasting informatie beschikbaar zijn.

3.2.2 Overzicht processtappen

Figuur 3.1 geeft de processtappen weer bij de totstandkoming van de hydraulische belastinginformatie en het gebruik daarvan voorafgaand aan de oplevering van de WBI2017 producten.

Hierin zijn bewust niet de tussenproducten (data) weergegeven. Reden hiervoor is dat de clustering wat betreft watersystemen, locaties en events per stap anders kan zijn en dat is lastig in het totaaloverzicht onder te brengen. In de nadere uitwerking in paragraaf 3.2.3 worden de data-tussenproducten wel benoemd.



Figuur 3.1 Processchema op hoofdlijnen voor HB data generatie .

¹¹ De representatieve locatie wordt door de toetsers gekozen uit de beschikbare locaties.

Zoals in het processchema is weergegeven is het noodzakelijk om onderscheid te maken tussen drie typen golfberekeningen:

- type A: 2D golfmodel (SWAN / HISWA) met ruimtelijk variabel veld van waterstand en eventueel stroming
- type B: 2D golfmodel (SWAN / HISWA) met vlakke waterstand, zonder stroming
- type C: eenvoudig golfmodel (Bretschneider), vlakke waterstand, zonder stroming

3.2.3 Nadere uitwerking in pseudo code per processtap

Een nadere uitwerking van de stappen uit Figuur 3.1 wordt hieronder gegeven. De (voorlopige selectie van) belangrijkste stappen zijn hierin ge-highlight. De regelnummering kan later in dit rapport gebruikt worden in verwijzingen, bijvoorbeeld in de vorm S1r5: Stap 1 regel 5.

Enkele belangrijke termen die hieronder gebruikt worden zijn:

watersysteem	impliceert:	regionale selectie van basisstochasten
event	impliceert:	combinatie van basisstochastwaarden; hoogwatergebeurtenis
golf-hulp-event	impliceert:	combinatie van de basisstochastwaarden windrichting en windsnelheid, plus waterstand (horizontaal), stationair
OnzA	betekent:	prob berekening incl kennisonzekerheid (zowel statistische als model-onzekerheid)
OnzB	betekent:	prob berekening incl statistische, maar excl model-onzekerheid
OnzC	betekent:	prob berekening excl kennisonzekerheid (zowel statistische als model-onzekerheid)

<p>S1 Voorbereiding</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 [Specificeer de] te gebruiken parameters 2 [Specificeer de] watersystemen 3 [Doe] voor ieder watersysteem: 4 [Specificeer de] verzameling events 5 [Als golfmodel type B dan]: 6 [Specificeer de] golf-hulp-events 7 [Eindals golfmodel type B] 8 [Specificeer de] uitvoerlocaties 9 [Specificeer de] deelverzamelingen uitvoerlocaties 10 [Einddoe] voor ieder watersysteem
--

<p>S2 Draai productiesommen waterstanden</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 [Doe] voor ieder watersysteem: 2 [Doe] voor ieder event: 3 [Specificeer de] randvoorwaarden / modelaansturing 4 [Bereken] voor alle uitvoerlocaties het verloop van de waterstand in de tijd (1 berekening) 5 [Einddoe] voor ieder event 6 [Einddoe] voor ieder watersysteem

S3**Draai productiesommen golven, golfberekening Type A**

- 1 [Doe] voor ieder watersysteem met golfberekening Type A
- 2 [Doe] voor ieder event:
- 3 [Specificeer de] randvoorwaarden / modelaansturing
- 4 [Bereken] voor alle uitvoerlocaties de golfcondities (1 berekening)
- 5 [Einddoe] voor ieder event
- 6 [Einddoe] voor ieder watersysteem

S4**Draai productiesommen golven, golfberekening Type B**

- 1 [Doe] voor ieder watersysteem met golfberekening Type B
- 2 [Doe] voor ieder golf-hulp-event:
- 3 [Specificeer de] randvoorwaarden / modelaansturing
- 4 [Bereken] voor alle uitvoerlocaties de golfcondities (1 berekening)
- 5 [Einddoe] voor ieder event
- 6 [Einddoe] voor ieder watersysteem

S5**Maak schematisatie voor golfberekening type C (Bretschneider)**

- 1 [Doe] voor ieder watersysteem:
- 2 [Doe] voor iedere oeverlocatie:
- 3 [Doe] voor iedere windrichting:
- 4 [Bepaal het] representatieve bodemniveau
- 5 [Bepaal de] effectieve strijklengte
- 6 [Einddoe] voor iedere windrichting
- 7 [Einddoe] voor iedere oeverlocatie
- 8 [Einddoe] voor ieder watersysteem

S6 Genereer verzameltabellen fysica

- 1 [Doe] voor ieder watersysteem:
- 2 [Doe] voor ieder event:
- 3 [Doe] voor iedere uitvoerlocatie:
- 4 [Bepaal de] maatgevende waterstand
- 5 [Bepaal de] bijbehorende golfcondities (voer hier evt golfberekening type C uit)
- 6 [Einddoe] voor iedere uitvoerlocatie
- 7 [Einddoe] voor ieder event
- 8 [Doe] voor iedere uitvoerlocatie:
- 9 [Zorg voor een] events-matrix zonder gaten
- 10 [Einddoe] voor iedere uitvoerlocatie
- 11 [Selecteer de] uitvoerlocaties met voor Hydra-Ring voldoende bruikbare data
- 12 [Voeg deze info toe aan de] verzameltabel (voor dit watersysteem)
- 13 [Einddoe] voor ieder watersysteem

S7 Importeer verzameltabellen in RDB

- 1 [Doe] voor ieder watersysteem:
- 2 [Importeer de] verzameltabel in de RDB
- 3 [Einddoe] voor ieder watersysteem

S8**Exporteer vanuit RDB naar HydraRing**

- 1 [Doe] voor iedere deelverzameling uitvoerlocaties:
- 2 [Genereer een] Hydra-Ring HRD database-bestand (sqlite format)
- 3 [Einddoe] voor iedere deelverzameling uitvoerlocaties

3.3 Modellen fysica**3.3.1 Wind**

Voor de aansturing van de modellen voor waterstanden en golven is het nodig dat de waarde van de stochast wind (windrichting en topwaarde van de potentiële windsnelheid op de gekozen referentielocatie) wordt vertaald naar een wind-event: een windveld in ruimte en tijd op 10 m hoogte boven het open water van het beschouwde watersysteem. Deze vertaling wordt hier het 'windmodel' genoemd.

Belangrijke onderdelen hierbij zijn:

- de transformatie van potentiële windsnelheid (op het referentiestation) naar open water wind (boven het watersysteem): de open-water-transformatie
- de variatie van de windsnelheid in de tijd binnen een belastingevent
- de variatie van de windrichting in de tijd binnen een belastingevent
- de eventuele variatie van de windsnelheid en -richting in de ruimte.

Bij de open water transformatie wordt in het algemeen gebruik gemaakt van de relatie zoals gegeven in Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Veelgebruikte relatie tussen potentiële windsnelheid U_p en open water windsnelheid $U_{10,ow}$.

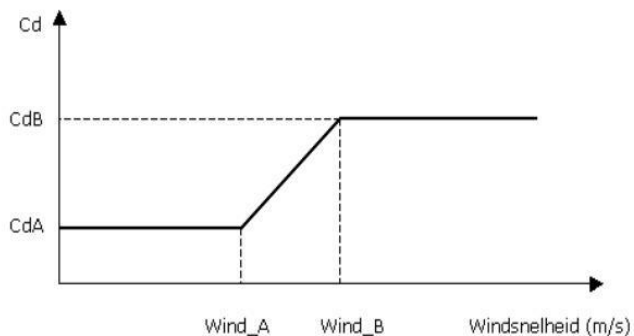
U_p	$U_{10,ow}$	U_p	$U_{10,ow}$	U_p	$U_{10,ow}$	U_p	$U_{10,ow}$	U_p	$U_{10,ow}$
m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
0.0	0.0								
1.0	1.1	11.0	12.2	21.0	22.6	31.0	32.7	41.0	42.3
2.0	2.3	12.0	13.3	22.0	23.7	32.0	33.6	42.0	43.3
3.0	3.4	13.0	14.3	23.0	24.7	33.0	34.6	43.0	44.3
4.0	4.5	14.0	15.4	24.0	25.7	34.0	35.6	44.0	45.2
5.0	5.6	15.0	16.4	25.0	26.7	35.0	36.6	45.0	46.1
6.0	6.7	16.0	17.5	26.0	27.7	36.0	37.5	46.0	47.1
7.0	7.9	17.0	18.5	27.0	28.7	37.0	38.5	47.0	48.0
8.0	9.0	18.0	19.6	28.0	29.7	38.0	39.5	48.0	49.0
9.0	10.1	19.0	20.6	29.0	30.7	39.0	40.4	49.0	49.9
10.0	11.1	20.0	21.6	30.0	31.7	40.0	41.4	50.0	50.8

Bij de open-water-transformatie speelt de modellering van de winddrag (windschuifspanningscoëfficiënt) een rol. Het is daarbij tevens van belang deze winddrag-modellering consequent door te voeren in de modellering van de waterstanden en de golven, zie (De Waal, 2003).

In het verleden zijn ten aanzien van de windmodellering ten behoeve van het WTI keuzes gemaakt die per watersysteem verschillen, zie (Deltares, 2010c). Voor de watersystemen waarvoor ten behoeve van WTI-2011 en/of WBI-2017 nieuwe productieberekeningen fysica

zijn gemaakt is getracht hierin meer uniformiteit te bewerkstelligen, op basis van (Deltares, 2010d) en (Deltares, 2010c).

Een veelgebruikte modellering wordt bepaald door 4 parameters (Wind_A, Wind_B, CdA en CdB) en is schematisch gegeven in Figuur 3.2.



Figuur 3.2 Windschuifspanningscoëfficiënten zoals gebruikt voor de productieberekeningen.

In de productieberekeningen voor WBI-2017 werd daarbij windsnelheid Wind_B zo hoog gekozen dat de afkapping van Cd buiten het WBI-2017 toepassingsbereik van de windsnelheid viel. Echter, inmiddels ligt momenteel een voorstel ter tafel om de formulering van de winddrag aan te passen aan nieuwe inzichten, waarbij windsnelheid Wind_B wel binnen het toepassingsgebied komt te liggen. In de wetenschappelijke wereld is er op dit moment consensus dat de winddrag niet verder toeneemt bij windsnelheden boven de 30 m/s. In principe zou dit moeten worden verwerkt in de modellen voor zowel wind, als voor de waterstand als voor de golven bij de bepaling van de fysische relatie tussen de basisstochasten en de lokale Hydraulische Belastingen. Omdat dit praktisch niet tijdig haalbaar bleek, is binnen WBI-2017 besloten om de nieuwe inzichten met betrekking tot de winddrag conform het voorstel van Van Vledder (2015) slechts beperkt en dan nog benaderend (in de vorm van een work-around) te verwerken in de WBI-2017, namelijk:

- alléén in het IJsselmeergebied (IJsselmeer en Markermeer) en de Oosterschelde (omdat dat het gebied is waar de nieuwe inzichten in de winddrag het grootste effect hebben)¹²;
- door middel van aanpassing van de windstatistiek (in plaats van aanpassing van de fysische relatie tussen de basisstochasten en de lokale hydraulische belastingen), zie paragraaf 6.3.6.

3.3.2 Waterstandsmodellen

In WBI kader worden met waterstandsmodellen niet-stationaire berekeningen uitgevoerd en worden de modellen dus gevoed met tijdsafhankelijke invoer.

¹² Ook voor de kustgebieden kunnen deze inzichten relevant zijn, maar daar kunnen ze nog niet in de huidige rekenmethode voor de bepaling van de statistiek van waterstanden worden verwerkt, omdat daarbij geen gebruik wordt gemaakt van een fysische relatie maar van triangulaire interpolatie van statistiek.

WAQUA

Het WAQUA model (www.helpdeskwater.nl/waqua) is een 2D hydrodynamisch model van Rijkswaterstaat voor de berekening van waterstanden, stroomsnelheden en het transport van in water opgeloste stoffen (RWS, 1994). De meeste waterstandsberekeningen binnen WBI worden met WAQUA uitgevoerd.

Bij de berekening van de waterstanden voor WBI wordt geen rekening gehouden met de invloed van:

- (de variatie in ruimte en tijd in) luchtdruk
- golfenergie-transport (wave setup)

Delft2D

De inhoud en mogelijkheden van het rekenmodel Delft2D vertonen veel overeenkomsten met het model WAQUA. Delft2D is in WBI kader alleen gebruikt voor de bepaling van de waterstanden in het Markermeer, zie paragraaf 4.6.2.

Triangulaire interpolatie

Bij waterstandsmodellering op basis van triangulaire interpolatie wordt aangenomen dat alle waterstanden in een bepaald gebied liggen in een recht vlak door de beschikbare waterstanden in drie steunpunten. Binnen een watersysteem zijn één of meer deelgebieden onderscheiden met elk een eigen combinatie van drie steunpunten. Iedere uitvoerlocatie in een watersysteem valt in één van deze deelgebieden.

Hoewel het gangbaar is te spreken van triangulaire interpolatie, is in de praktijk in veel gevallen sprake van extrapolatie: veel uitvoerlocaties waar de waterstand moet worden bepaald liggen buiten de driehoek die wordt opgespannen door de drie steunpunten.

Bij de bepaling van de waterstanden binnen de HB wordt triangulaire interpolatie op twee manieren toegepast, namelijk:

- 1 voor het afleiden van de waterstand *statistiek*¹³ op de uitvoerlocatie, uit de (uit de lokale meetgegevens afgeleide) marginale waterstandstatistiek op de drie steunpunten
- 2 voor het afleiden van de *fysische relatie* tussen de basisstochastwaarden en de waterstand op de uitvoerlocatie, uit de (met het 1D waterstandsmodel IMPLIC berekende) fysische relatie tussen de basisstochastwaarden en de waterstand op de steunpunten.

Hoewel het enigszins verwarrend is, is het gangbaar in het eerste geval te spreken van 'waterstanden bepaald met triangulaire interpolatie' en in het tweede geval van 'waterstanden bepaald met IMPLIC'. In aansluiting op deze naamgeving wordt de tweede methode verder besproken onder de tussenkop 'IMPLIC', later in deze paragraaf.

De eerstgenoemde methode wordt toegepast voor de harde keringen in kustgebieden, de tweede voor de Oosterschelde.

Waterstanden op de uitvoerlocaties langs de kustgebieden worden verkregen door middel van een triangulaire interpolatie procedure (RWS-RIKZ, 2007) en (Diermanse et al, 2016).

¹³ De relatie tussen waterstand en overschrijdingskans.

Hierbij wordt elke van de zes kustregio's onderverdeeld in 1 of meerdere (sub)regio's. Binnen elke sub-regio worden lokale waterstanden bepaald op basis van triangulaire interpolatie tussen drie zgn. "steunpunten", waarvoor marginale waterstandsstatistieken beschikbaar zijn.

De keuze van de drie steunpunten is afhankelijk van de locatie waarvoor de waterstand bepaald dient te worden.

Dit principe wordt toegepast op alle kustregio's met uitzondering van de regio 14 (de Oosterschelde), waar geïnterpoleerd wordt op basis van berekende waterstanden met het model IMPLIC. Dit laatste is gedaan om rekening te houden met effecten van het sluiten van de Oosterscheldekering.

IMPLIC

IMPLIC is een 1D waterbewegingsmodel dat wordt gebruikt door het Hydro Meteo Centrum Zeeland (HMCZ) voor onderzoek en operationeel waterbeheer in de Oosterschelde. Tevens is IMPLIC onderdeel van het Beslis- en SimulatieSysteem (BSS) van de StormVloedKering Oosterschelde (SVKO) (RWS Zeeland, 2010). Het model wordt binnen WBI kader alleen toegepast voor de Oosterschelde. Met IMPLIC wordt daar de fysische relatie bepaald tussen de waterstand op een aantal steunpunten en de basisstochasten. Deze berekeningen vinden vooraf plaats (buiten HydraRing). De waterstanden op de uitvoerlocaties nabij de waterkering worden hieruit vervolgens - binnen HydraRing - bepaald door middel van triangulaire interpolatie.

3.3.3 Golfmodellen

In WBI kader worden met golfmodellen stationaire berekeningen uitgevoerd en worden de modellen dus gevoed met (quasi-) statische invoer. De invloed van eventuele vegetatie wordt niet meegenomen.

SWAN

SWAN (www.swan.tudelft.nl) is een volledig spectraal 2D golfmodel. Het is een state of the art model in zijn klasse en bevat vrijwel alle voor de HB bepaling relevante golfprocessen.

HISWA

HISWA is een voorganger van SWAN. Het is eveneens een 2D model, maar werkt met een geparametriseerd spectrum. De golfgegevens voor een deel van het Markermeer zijn nog afkomstig uit berekeningen met HISWA, maar tegenwoordig wordt HISWA niet meer gebruikt.

Bretschneider

Het 'model' Bretschneider bestaat uit twee golfgroeiformules (TAW, 1989) en kan beschouwd worden als een puntmodel (dus nog eenvoudiger dan 1D). In feite bevat dit model alleen het golfproces 'golfgroei door wind', met de drie parameters waterdiepte, strijklengte en windsnelheid als enige benodigde invoer.

Het is een zeer eenvoudig model, met significante beperkingen. Alleen voor de Bovenrivieren en zeer smalle wateren in het Benedenrivierengebied, Vecht- en IJsseldelta en Eemvallei wordt Bretschneider nog geaccepteerd en toegepast, zie bijvoorbeeld (Deltares, 2015h).

De dam- en voorlandmodule 'DaF module'

De DaF module is een 1D golfmodel (Kramer, 2016). Het bevat de golfprocessen transmissie (over een dam), breking, bodemwrijving, shoaling en (het richtingsverandering-deel van) refractie. De DaF module bepaalt de verandering van de golfhoogte en de golfrichting; de golfperiode blijft ongewijzigd (net als de waterstand).

De DaF module wordt binnen WBI niet gebruikt bij de productieberekeningen fysica, maar binnen Hydra-Ring, bij de transformatie van de HB van de uitvoerlocatie naar de teen van de waterkering.

3.4 Korte beschrijving watersystemen (regio's)

3.4.1 Bovenrivieren (regio's 1, 2 en 18)

Het gebied van de Bovenrivieren wordt gedefinieerd als het gebied van de Rijn(takken) (regio 1) en de Maas (regio 2) waar waterstanden geen invloed ondervinden van getij/stormopzet vanuit de zee of stormopzet vanuit het IJsselmeer. Aan de oostzijde ligt de begrenzing van het bovenrivierengebied bij de grens met Duitsland (Lobith) en België (Borgharen). Benedenstrooms ligt de grens¹⁴ bij Olst (IJssel), Hagestein (Lek), Gorinchem (Waal) en Heusden (Maas).

Het belastingmodel voor regio 18, de Limburgse Maas is identiek aan dat voor regio 2; dit geldt ook voor de basisstochasten. De indeling van de Maas in 2 regio's heeft te maken met de aanwezigheid van de kades en de mogelijkheid dat deze kunnen overstromen. In de productieberekeningen fysica zijn om die reden twee situaties beschouwd: de situatie waarbij de kades overstromen en de situatie zonder overstromen van de kades. In dit laatste geval worden de kades oneindig hoog beschouwd. De laatste situatie is beschouwd voor de Limburgse Maas voor de Bepaling van de Hydraulische Belastingen. Voor de Brabantse Maas wordt uitgegaan van overstroombare kades bij de bepaling.

De waterstanden in het bovenrivierengebied worden hoofdzakelijk bepaald door de rivierafvoeren. De wind speelt een ondergeschikte rol. Ook is de rol van golven in dit gebied relatief klein in verband met korte strijklengtes.

3.4.2 Benedenrivieren (regio's 3, 4 en 17)

Het Benedenrivierengebied (ook wel Rijn- en Maasmonding, RMM) bestaat uit dat deel van de benedenstroomse takken van de Rijn en de Maas waar tijdens grote afvoergolven de waterstanden invloed ondervinden van het getij en de stormopzet vanuit de Noordzee. Daarnaast spelen de Europoortkeringen (Maeslant- en Hartelkering) een rol. Aan de westzijde wordt het gebied van de Benedenrivieren begrensd bij de Maasmond en de Haringvlietdam. Aan de oostzijde ligt de begrenzing ongeveer bij Hagestein op de Lek, bij Gorinchem op de Boven Merwede / Waal en bij Heusden op de Maas.

In het Benedenrivierengebied bevinden zich vijf bedienbare kunstwerken die onderdeel vormen van de primaire kering en bijdragen aan de veiligheid tegen overstroming. Vier van deze keringen, de Maeslantkering, de Hartelkering en de keringen in de Hollandse IJssel en

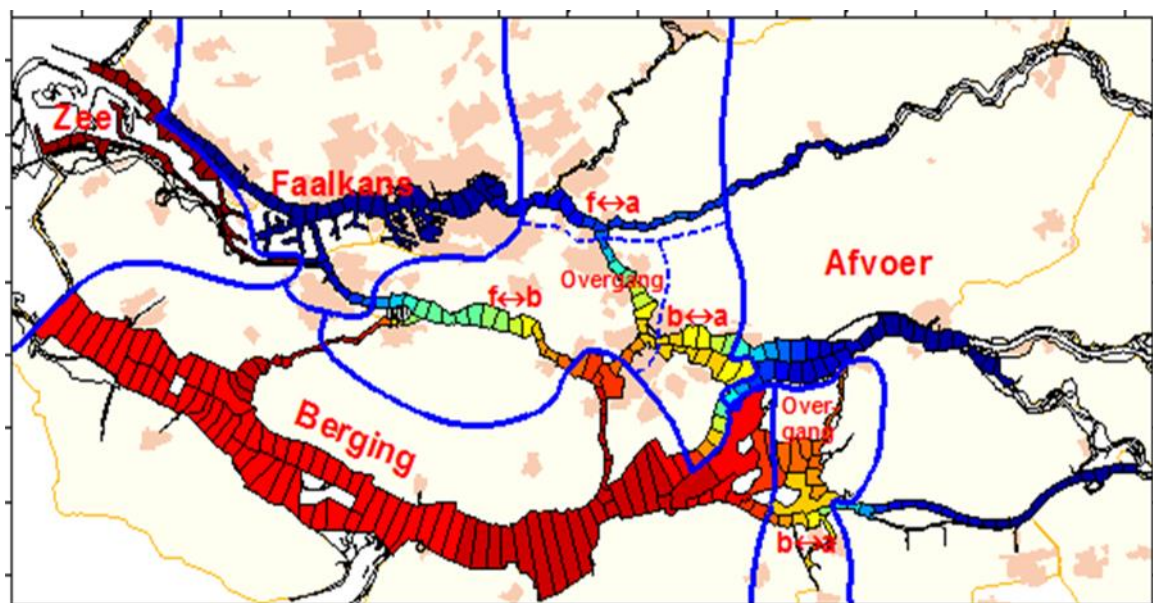
¹⁴ Dit is een indicatie van de grenzen, door veranderingen in WBI-2017 ten opzichte van WTI-2011/HR-2006 zoals statistiek en nieuwe veiligheidsnormen kunnen deze grenzen schuiven.

het Heusdensch kanaal (ook de Kromme Nolkering genoemd) bevinden zich onder normale hydraulische omstandigheden in open toestand. De sluitprocedure van deze 4 kunstwerken is afhankelijk van de (lokale) omstandigheden en verschilt per kering. De vijfde kering in het gebied, de Haringvlietsluizen, opent en sluit ook tijdens normale omstandigheden. Tijdens hoogwater geldt een speciaal sluitregime.

Het Benedenrivierengebied kan aan de hand van de dominantie bedreiging in vijf deelgebieden worden ingedeeld:

- 1) het zeegebied waar de invloed van de zee (getij en stormvloed) dominant is. De stormvloed en de windgolven (lokaal opgewekt en doordringing van golven op zee) een belangrijke rol spelen in het zeegebied.
- 2) Het faalkansgebied waar hoge stormvloed in combinatie van het falen van de sluiting de stormvloedkeringen bepalend zijn voor de Hydraulische Belastingen.
- 3) Het bergingsgebied waar de maatgevende situatie een middelbare afvoer (van ca. 10.000 m³/s) is die samenvalt met een middelbare storm die de afvoer vanuit Rijn en Maas naar zee enige tijd stremt. In dit deelgebied speelt de duur van de storm een belangrijke rol.
- 4) Het afvoergebied waar hoofdzakelijk de invloed van de rivierafvoer van belang is.
- 5) Overgangsgebieden waar sprake is van combinaties van bovengenoemde bedreigingen in wisselende samenstelling. Er wordt onderscheid gemaakt in een
 - a) overgang van faalkansgebied naar afvoergebied (f-a),
 - b) overgang van faalkansgebied naar bergingsgebied (f-b) en
 - c) overgang van bergingsgebied naar afvoergebied (b-a).

Figuur 3.3 geeft een overzicht van de deelgebieden van het Benedenrivierengebied.



Figuur 3.3 Deelgebieden van het Benedenrivierengebied: zee-, faalkans-, bergings-, afvoer- en overgangsgebieden.

Onderdeel van het Zeegebied vormt het Europoortgebied (regio 17). Dit is het gebied aan de zeezijde van de Europoortkering: de Maeslant- en Hartelkering. In het Europoortgebied kunnen seiches optreden. Dit zijn staande golven in een (half)gesloten bekken, die tot een kortstondige verhoging van de waterstand kunnen leiden. In het Europoortgebied zijn de golven complexer en belangrijker dan elders in het Benedenrivierengebied. Naast lokale

golfgroei speelt de golfindringing vanuit de Noordzee een belangrijke rol. De havenkades zorgen voor reflectie en/of dissipatie van golven.

Het belastingmodel voor regio 17 (Europoort) is in WBI-2017 gelijk aan dat voor regio 3 (Benedenrivieren Rijn). Dit is onveranderd ten opzichte van WTI-2011. De situatie met gesloten Europoortkering is maatgevend. De kans op falen van de kering is klein en het effect van een geopende kering op de waterstanden aan de zeezijde van de kering is minimaal. De bijdrage van deze situaties aan de maatgevende omstandigheden in regio 17 is daarom verwaarloosbaar en de kering hoeft in principe niet als stochast meegenomen te worden. Echter om praktische redenen (productieberekeningen e.d.) is het Europoortgebied toegevoegd aan het Benedenrivierengebied, waar de Europoortkering wel als stochast wordt beschouwd. Een falende kering heeft een groot effect op de waterstanden aan de binnenzijde en deze situatie (hoe klein de kans hierop ook is) moet beschouwd worden in de probabilistische berekening. Daarnaast geldt dat seiches en golfdoordringing vanuit de Noordzee een rol spelen in regio 17. Seiches worden als toeslagen op de waterstand meegenomen; golfdoordringing zit verwerkt in de golfberekeningen (paragraaf 5.3.3).

3.4.3 IJssel- en Vechtdelta (regio 5, 6)

De IJsseldelta (regio 5) wordt volgens de indeling in WTI-2011 beschouwd als het deel van de IJssel vanaf net ten zuiden van Zwolle (km 974) tot aan het Ketelmeer (km 1002). Een belangrijke recente verandering in dit systeem is de aanleg van de Bypass Kampen (Reevediep).

De Vechtdelta (regio 6) bestaat uit het gebied van de Overijsselse Vecht vanaf Ommen (km 36) tot en met de Ramspolkering in het Zwarte Meer (inclusief het Zwarte Water tot de Keersluis Zwolle en het Zwolle-IJsselkanaal tot de Spooldersluis, maar exclusief het water achter de Kadoelersluis, zoals het Kadoelermeer en Vollenhovermeer). De buitendijkse polders langs het Zwarte Meer (bv. Kampereiland) en de waterlopen die deze polders doorsnijden, maken ook deel uit van de Vechtdelta. In het bovenstroomse deel van de Vechtdelta is voornamelijk de afvoer van de Overijsselse Vecht bepalend voor hoge waterstanden. De wind heeft op de Vecht een beperkte invloed op de waterstand omdat er geen nabijgelegen grote wateroppervlakken zijn. Dit verandert echter verder benedenstrooms op het Zwarte Water en het Zwarte Meer. Hier gaat het systeem van de Vechtdelta geleidelijk over van een afvoer-gedomineerd naar een wind-gedomineerd gebied. Het Zwarte Meer is bij geopende Ramspolkering een wind-gedomineerd deelsysteem. Echter, het functioneren van de Ramspolkering beperkt de invloed van de wind, waardoor de afvoer van de Vecht toch ook hier bepalend(er) is voor de hoogte van de optredende waterstanden. In het systeem van de Vechtdelta bevinden zich twee keersluizen: de Ramspolkering, welke bij een stormsituatie uit westelijke richting hoge waterstanden door opstuwing vanuit het IJsselmeer/Ketelmeer op het Zwarte Meer moet voorkomen, en de keersluis bij Zwolle. Deze kering heeft als functie om bij hoge waterstanden op het Zwarte Water en de Vecht de binnenstad van Zwolle en het Sallandse achterland te beschermen.

De golven in dit watersysteem worden lokaal door wind opgewekt.

3.4.4 Meren (regio's 7 en 8)

Het deelgebied meren omvat alle buitenwateren van het IJsselmeergebied. Het IJsselmeer (regio 7) staat in open verbinding met het Ketelmeer en Vossemeer. Deze twee meren maken

dan ook onderdeel uit van het watersysteem IJsselmeer. De grens van het IJsselmeer ligt bij de Ramspolkering en Roggebotsluis.

Het Markermeer (regio 8) is ontstaan door de aanleg van de Houtribdijk. Het Markermeer staat in open verbinding met het Gooi- en Eemmeer en gaat daar over in het Nijkerkernauw. Ook de Eem maakt onderdeel uit van het Markermeer. De bovengrens ligt bij Amersfoort.

De waterstanden in de meren worden bepaald door het meerpeil en - vooral - de wind. Door de grote oppervlakte en de relatief geringe diepte is de scheefstand van het wateroppervlak onder invloed van wind relatief groot.

De golven worden lokaal opgewekt door de wind. De grote strijklengte, vrij vlakke bodem en en relatief geringe diepte zorgen er voor dat bij (zeer) harde wind sprake is van het bereiken van een golfgroeilimiet. Over deze limiet zijn weinig goede meetgegevens beschikbaar.

3.4.5 Kustgebieden - harde keringen (regio's 9, 10, 11, 12, 13 en 15)

Waddenzee (regio 9, 10)

De Waddenzee is de binnenzee tussen de Waddeneilanden en de Noordzee aan de ene kant, en het vasteland van Nederland aan de andere kant. Het gebied strekt zich uit tussen Den Helder en de Eems-Dollard bij de grens met Duitsland.

Hollandse Kust (regio 11, 12, 13): het deelgebied Hollandse kust, ook wel de gesloten kust genoemd, is ca 120 km lang en strekt zich uit van Den Helder tot Hoek van Holland.

Westerschelde (regio 15): het deelgebied Westerschelde omvat het Westerschelde estuarium in Zeeland met Zuid-Beveland aan de noordzijde en Zeeuws-Vlaanderen aan de zuidzijde.

Hoge waterstanden in dit gebied worden voornamelijk bepaald door getij en stormopzet. Daarnaast spelen windgolven een belangrijke rol. In tegenstelling tot de meeste andere watersystemen hebben deze kustgebieden een open gebiedsrand: de golven worden dus niet alleen lokaal (binnen het watersysteem) opgewekt, maar hebben al waarden op de gebiedsrand. Op het traject van deze rand naar de waterkering ondervinden deze golven de invloed van bodem en wind. In de Waddenzee zijn de openingen relatief klein en zijn de lokaal opgewekte golven dominant, maar de doordringing van lange golven tussen de eilanden door is hierbij niet te verwaarlozen.

3.4.6 Oosterschelde (regio 14)

Het watersysteem Oosterschelde is het gebied dat omgeven wordt door de schiereilanden Schouwen-Duiveland, Tholen, Zuid-Beveland en Noord-Beveland en door de Oosterscheldekering, Oesterdam en Philipsdam. Sinds de ingebruikname van de Oosterscheldekering in 1986 kan de Oosterschelde volledig van zee worden afgesloten.

De waterstanden in de Oosterschelde zijn afhankelijk van een groot aantal factoren, waaronder het getij, de stormopzet, lokale scheefstand en het functioneren van de stormvloedkering.

De golfcondities worden bij gesloten stormvloedkering lokaal door wind opgewekt. Bij geopende kering is bovendien sprake van golven die vanaf de gebiedsrand, door de geopende kering het watersysteem binnenkomen.

3.4.7 Duinen (regio 16)

Het faalmechanisme duinafslag is één van de faalmechanismen waarvoor binnen het WBI-2017 beoordelingsmethoden zijn beschreven. De duinen langs de hele kust zijn ingedeeld in één regio: regio 16. Dit 'watersysteem' is daarmee bepaald door het beschouwde *faalmechanisme / toetsspoor* (c.q. keringtype 'duinen') en de daarvoor gedefinieerde stochasten. Hiermee wijkt deze regio af van de overige watersystemen.

Het belastingmodel voor duinen levert de randvoorwaarden voor het duinafslagmodel DUROS+. Dit model is beschreven in het Technisch Rapport Duinafslag 2006, TRDA2006 (ENW, 2007). Het gebruik van het model DUROS+ is in een aantal opzichten bepalend voor de manier waarop de Hydraulische Belastingen (HB) voor duinen worden afgeleid. Het betreft hierbij de waterstand en golven bij verschillende herhalingstijden.

De golfhoogte H_s en de golfperiode T_p voor regio 16 worden basisstochasten genoemd, maar ze zijn niet onafhankelijk (en vormen ook niet de basis voor productieberekeningen fysica). De golfhoogte voor deze regio (duinen) is namelijk gekoppeld aan de zeewaterstand (volledig afhankelijk) en de golfperiode is gekoppeld aan de golfhoogte, zie verder paragraaf 6.8 en 7.8.

4 Productieberekeningen fysica: waterstanden

4.1 Inleiding

Voor de probabilistische berekeningen met Hydra-Ring zijn hydraulische belastingen (waterstanden en golfcondities) aan de teen van de waterkering nodig. Zoals in het vorige hoofdstuk beschreven moeten deze belastingen berekend worden voor alle uitvoerlocaties en voor een groot aantal basisstochastcombinaties. Dit hoofdstuk beschrijft de methode van vertalen van basisstochastwaarden naar hydraulische belastingen op de uitvoerlocaties nabij de waterkering. De wijze van vertalen hangt af van het watersysteem.

Voor de kustgebieden zijn de lokale waterstanden in WBI-2017 aangehouden zoals bepaald in WTI-2011 en HR-2006. Hetzelfde geldt voor de meren (IJsselmeer en Markermeer): de waterstanden in het IJsselmeer en Markermeer zijn niet opnieuw berekend maar overgenomen uit WTI-2011/HR-2006. In verband met Ruimte voor de Rivier maatregelen zijn in WBI-2017 wel nieuwe berekeningen uitgevoerd voor het rivierengebied: de regio's 1 t/m 6.

De volgende paragrafen beschrijven de wijze waarop de waterstanden bij de teen van de waterkering bepaald zijn in WBI-2017. Achtereenvolgens komen aan de orde:

- Bovenrivieren: Rijntakken (Paragraaf 4.2)
- Bovenrivieren: Maas (Paragraaf 4.3)
- Benedenrivieren (Paragraaf 4.4)
- Vecht- en IJsseldelta (Paragraaf 4.5)
- Meren: IJsselmeer en Markermeer (Paragraaf 4.6)
- Kustgebieden - harde keringen (Paragraaf 4.7)
- Oosterschelde (Paragraaf 4.8)
- Duinen (Paragraaf 4.9)

4.2 Waterstanden Bovenrivieren: Rijntakken (regio 1)

4.2.1 Inleiding

Voor het WBI-2017 project zijn in verband met Ruimte voor de Riviermaatregelen productieberekeningen gemaakt voor het gebied van de Rijntakken. Hieronder beschrijven we de hiertoe gebruikte modelschematisatie (Paragraaf 4.2.2), specifieke nieuwe elementen van de schematisatie en Ruimte voor de Riviermaatregelen (Paragraaf 4.2.3), randvoorwaarden en productieberekeningen (Paragraaf 4.2.4) en uitvoerlocaties en controle berekeningen (Paragraaf 4.2.5).

4.2.2 Modelschematisatie en rekenrooster

De schematisatie van het WAQUA-Rijntakken model omvat de volgende riviertakken:

- De Boven-Rijn van Lobith tot de Pannerdensch Kop (km 854 t/m 867),
- De Waal van de Pannerdensch Kop tot Werkendam (km 868 t/m 960),
- Het Pannerdensch Kanaal tussen de Pannerdensch Kop en IJsselkop (km 868 t/m 878),
- De Neder-Rijn/Lek van de IJsselkop tot Krimpen a/d Lek (km 878 t/m 988),

- De IJssel van de IJsselkop tot de monding in het Ketelmeer(km 878 t/m 1006).

Een overzichtskarta van het Rijntakken-model is weergegeven in Figuur 4.1. De uitgangspunten met betrekking tot de modelschematisatie van het Rijntakken-model, zoals bodemgeometrie (Figuur 4.2) en vegetatie, maar ook de meegenomen Ruimte voor de Rivier maatregelen, geplande maatregelen waarvoor vergunningen zijn verstrekt en dergelijke, zijn vastgesteld in (Deltares, 2013a) en (Deltares, 2014a). Het rekenrooster van het WAQUA Rijntakken-model bestaat uit 794x4666 roostercellen. Details met betrekking tot modelschematisatie en rekenrooster zijn te vinden in (Driesen, 2014).



Figuur 4.1 Overzicht Rijntakken-modelschematisatie.

4.2.3 Specifieke elementen en Ruimte voor de Riviermaatregelen

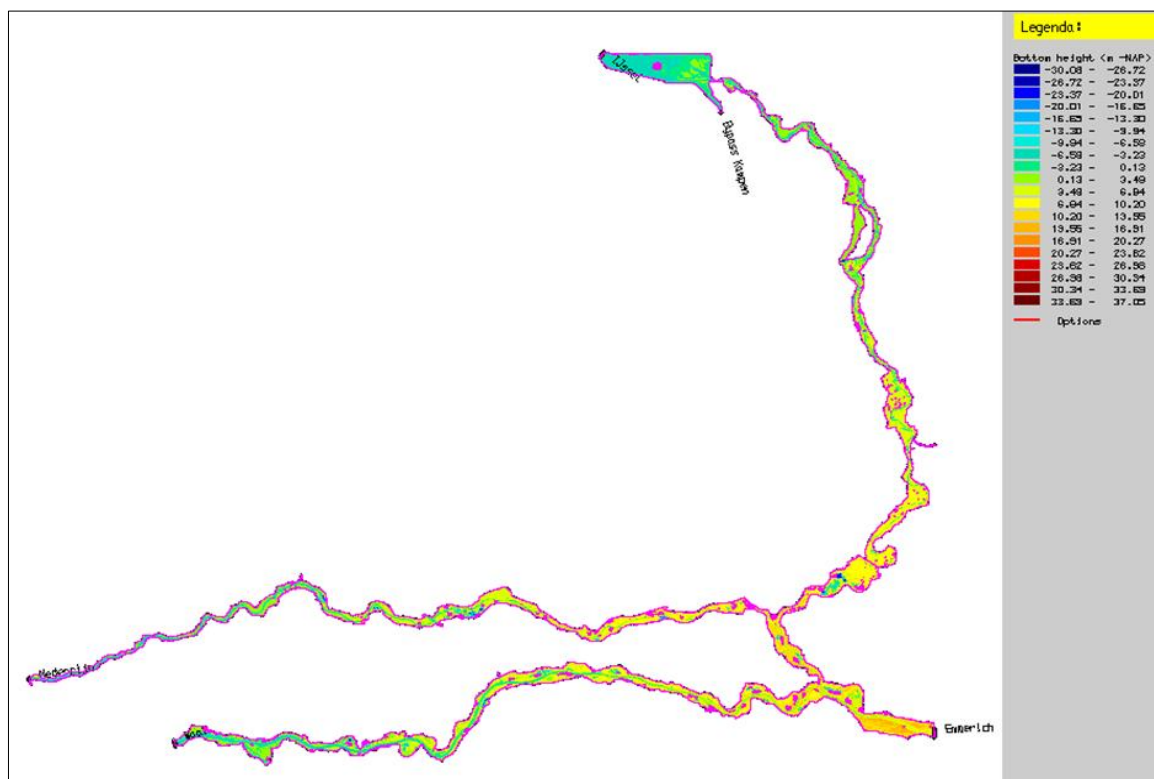
In de Nederrijn/Lek bevinden zich drie stuwen:

- Driel bij km 891,6
- Amerongen bij km 922,4
- Hagestein bij km 946,8

De stuwen worden in het Rijntakken-model automatisch aangestuurd volgens het vigerende stuwprogramma van de Rijntakken (Deltares, 2016a).

Het WAQUA Rijntakken-model bevat twee regelwerken om de afvoerverdeling over de Rijntakken te kunnen regelen, zie Figuur 4.1:

- De Pannerdensche Overlaat bij de Pannerdensche Kop
- De Hondsbroeksche Pleij bij de IJsselkop



Figuur 4.2 Bodemligging WAQUA-Rijntakken.

De Pannerdensche Overlaat heeft een vaste drempelhoogte van 14 m+NAP totdat de Waalafvoer groter wordt 10.000 m³/s. Bij hogere debieten wordt actief gestuurd op een maximale afvoer van 10.165 m³/s door de Waal.

De Hondsbroeksche Pleij is ingesteld om de Neder-Rijn/Lek te ontzien, dat wil zeggen: zo lang mogelijk de afvoer naar de Neder-Rijn/Lek maximaliseren op 3.380 m³/s.

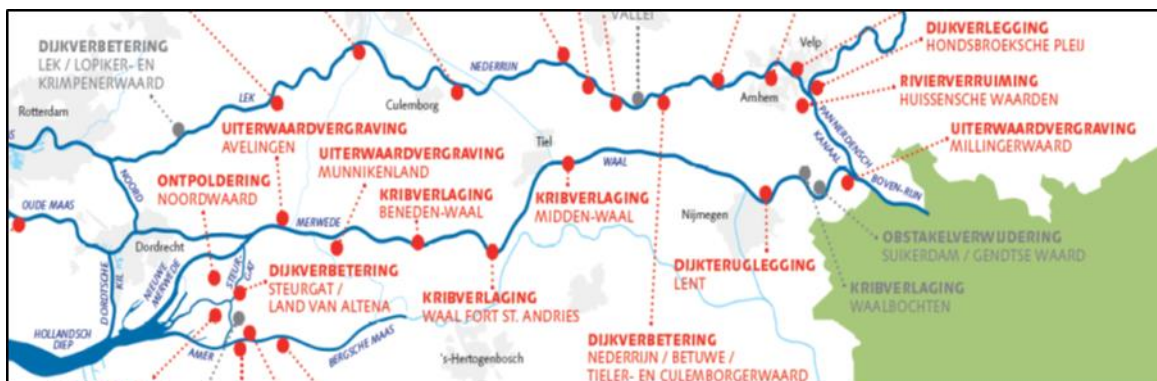
Eén van de uitgangspunten van het WBI-2017 project is dat Ruimte voor de Riviermaatregelen meegenomen worden in de berekeningen van Hydraulische Belastingen. Langs de Rijn, IJssel, Waal, Lek en Nederrijn zijn of worden diverse projecten uitgevoerd om het water vrijer te laten stromen en daarmee de kans op overstromingen te verkleinen. Deze projecten zijn opgenomen in de schematisatie van het WAQUA-Rijntakken model (Deltares, 2014a) en (RWS, 2001). Figuur 4.3 en Figuur 4.4 tonen de Ruimte voor de Riviermaatregelen voor de Rijntakken. We beschrijven hieronder de belangrijkste maatregelen.

Dijkteruglegging Lent

Tussen Nijmegen en Lent maakt de Waal een scherpe bocht. Het winterbed van de rivier is hier erg smal. Het project Ruimte voor de Waal heeft dit probleem opgelost. De dijk bij Lent is 350 m landinwaarts verplaatst. In de hierdoor verbrede uiterwaarden is een nevengeul gegraven die helpt om het rivierwater bij extreme waterstanden af te voeren.

Kribverlaging (Middel-Waal, Waal Fort st. Andries en Beneden-Waal)

Tussen Middel-Waal en Beneden-Waal zijn kribverlagingen doorgevoerd.



Figuur 4.3 Overzicht Ruimte voor de Riviermaatregelen langs de Neder-Rijn/Lek en de Waal (al deze maatregelen zijn meegenomen in WAQUA schematisatie).

Uiterwaardvergravingen (Bolwerksplas, Keizerswaard, Scheller en Oldeneler Buitenwaarden)
Langs de IJssel vonden er uiterwaardvergravingen plaats bij Cortenoever, Bolwerksplas, Keizerswaard en Voorsterklei.

Hoogwatergeul Veessen-Wapenveld

Deze maatregel betreft de aanleg van twee nieuwe dijken tussen Veessen en Wapenveld; hierdoor wordt een 8 km lange hoogwatergeul gecreëerd. De breedte varieert tussen 550 en 1.500 m. Aan de bovenstroomse zijde bij Veessen krijgt de geul een inlaat, bij Wapenveld een uitlaat. De inlaat gaat alleen open (de deuren klappen open) als het waterpeil van de IJssel een hoogte van 5,65 m+NAP heeft bereikt. Het water in de geul gaat dan mee stromen met de IJssel.

Bypass Kampen (ook wel bekend als Reevediep)

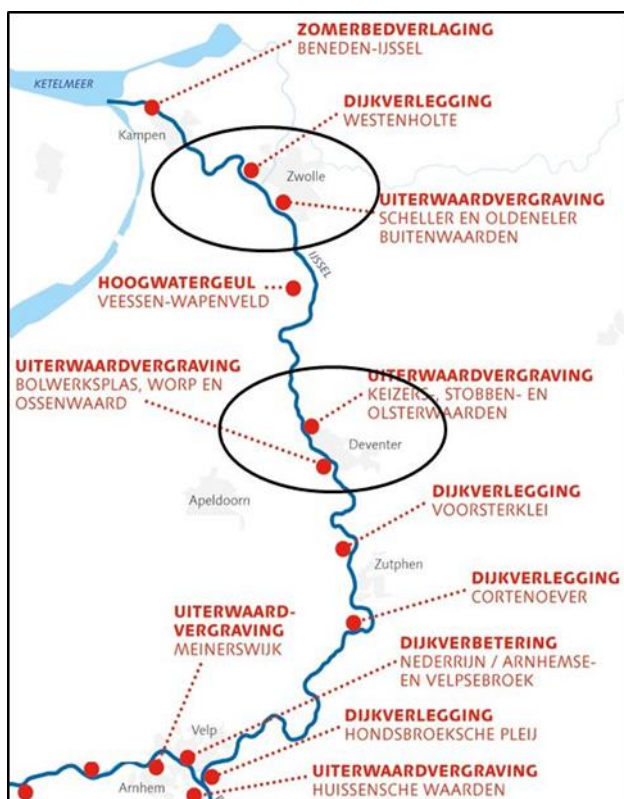
In het model van de Rijntakken is conform de eerste fase¹⁵ van de maatregel Bypass Kampen als onttrekking/lozing opgenomen. De onttrekking vindt plaats ter hoogte van km 992 en de lozing vindt plaats bij de Roggebotsluis in het Vossemeer. De onttrekking bedraagt 340 m³/s en is onafhankelijk van de afvoerhoogte bij Lobith (Deltares, 2016a).

4.2.4 Randvoorwaarden en productieberekeningen

4.2.4.1 Bovenrand en lateralen

In de productieberekeningen voor de Rijntakken is alleen de afvoer van de Rijn gevarieerd. De berekeningen zijn uitgevoerd zonder wind. De gebruikte versie van de WAQUA modelschematisatie is 'rijn-hr2017-v2'. Tabel 4.1 toont een overzicht van de beschouwde piekafvoeren van de Rijn bij Lobith.

¹⁵ Er is inmiddels besloten om ook de tweede fase van Bypass Kampen uit voeren (besluit Minister I&M, d.d. oktober 2015).

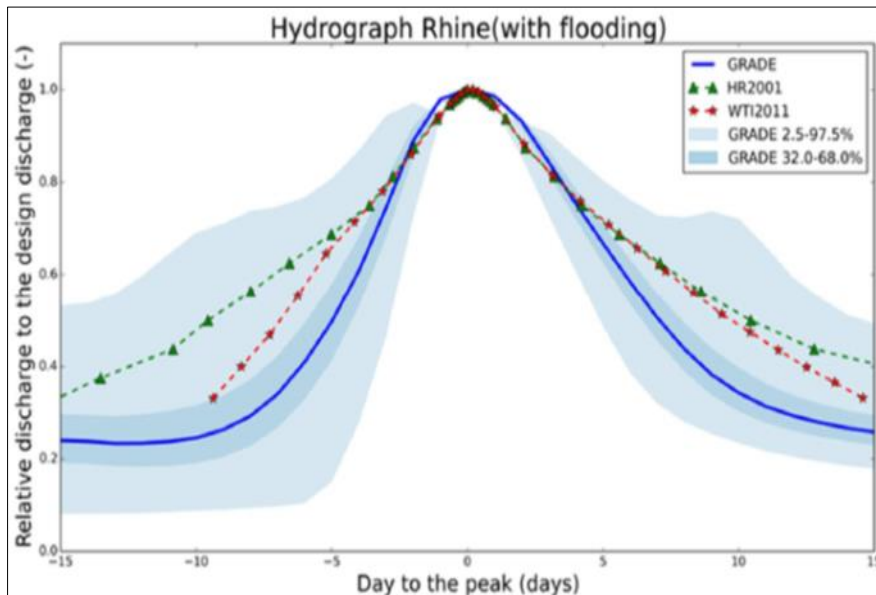


Figuur 4.4 Overzicht van Ruimte voor de Riviermaatregelen langs de IJssel (allen meegenomen in schematisatie).

Tabel 4.1 Piekwaardes afvoergolven van de Rijn bij Lobith die doorgerekend zijn met het WAQUARijntakken-model.

Afvoer
Rijn Lobith
[m ³ /s]
6000
8000
10000
13000
16000
16500
17000
18000
20000
22000
24000
11

De Rijnafoeren uit Tabel 4.1 zijn met een standaard (gemiddelde) afvoergolfvorm doorgerekend. Deze gemiddelde golfvorm is weergegeven in Figuur 4.5 (blauwe lijn). De productieberekeningen voor de Rijntakken bestaan feitelijk uit 11 WAQUA berekeningen. Conform de gestelde uitgangspunten voor de productieberekeningen WBI-2017 is gerekend met afvoergolven uit GRADE waarbij rekening is gehouden met overstromingen in Duitsland in combinatie met noodmaatregelen om die overstromingen te beperken (Deltares, 2014d).



Figuur 4.5 Afvoergolfvorm van de Rijn volgend uit GRADE (Chbab en Eilander, 2016).

De afvoerstatistiek van GRADE voor de Rijn bij Lobith komt uitgebreid aan de orde in Hoofdstuk 7 van dit rapport.

De piekafvoeren en GRADE afvoergolfvormen zijn omgezet naar afvoerrandvoorwaarden bij Emmerich. De bijbehorende lateralen langs de Rijntakken zijn hieraan gerelateerd. Voor de details van dit proces wordt verwezen naar Bijlage B van (Deltares, 2016a).

4.2.4.2 Benedenrand (Qh relaties)

Naast een bovenrand zijn er benedenranden op de verschillende riviertakken nodig voor de productieberekeningen. De gebruikte benedenranden bestaan uit Qh-relaties; deze relaties zijn beschreven in Tabel 4.2. Voor meer details zie (Deltares, 2015b).

Tabel 4.2 Qh-relaties op de benedenranden van het Rijntakken-model.

Werkendam (Waal)		Krimpen a/d Lek (lek)		Ketelbrug (IJssel)	
Afvoer [m ³ /s]	Waterstand [m+NAP]	Afvoer [m ³ /s]	Waterstand [m+NAP]	Afvoer [m ³ /s]	Waterstand [m+NAP]
550	1,030	25	1,227	25	-0,025
1.401	1,330	309	1,387	200	0,067
2.697	1,768	753	1,556	400	0,171
3.997	2,276	1.163	1,750	700	0,328
5.296	2,679	1.579	1,932	1.100	0,538
6.473	3,059	2.086	2,108	1.500	0,747
8.285	3,623	2.758	2,319	2.000	1,009
10.165	4,244	3.388	2,527	2.500	1,251
11.435	4,631	3.812	2,688	3.000	1,462
15.400	5,765	6.600	3,748	5.000	2,282
17.000	6,222	8.000	4,280	6.000	2,692

4.2.5 Uitvoerlocaties en controle productieberekeningen

In het rivierengebied zijn twee soorten uitvoerlocaties te onderscheiden: as-locaties (locaties in het midden van de rivier) en oever-locaties (locaties die nabij de waterkering liggen).

De as-locaties worden gedefinieerd om de kilometer op de rivieras en zijn vrijwel onveranderd ten opzichte van HR-2006 en concept HR2011. In WBI-2017 zijn overal langs de Rijntakken de Baseline rivierkilometerpunten gebruikt om de as-locaties te definiëren (Deltares, 2013a).

De oever-locaties zijn in WBI-2017 opnieuw gedefinieerd. Als uitgangspunt hiervoor is de nieuwe dijkkringlijn 4.0 van RWS gebruikt. Eventueel is deze aangepast op die locaties waar in verband met mee te nemen Ruimte voor de Riviermaatregelen dijkverleggingen gepland zijn. Voor het definiëren van uitvoerlocaties zijn dezelfde criteria toegepast als in het Benedenrivierengebied en IJssel- en Vechtdelta in WTI-2011, zie (Deltares, 2012a en Deltares, 2012b). Deze criteria zijn:

- De uitvoerlocaties liggen zo dicht mogelijk bij de dijk, maar in ieder geval niet in de eerste roostercel uit de rand,
- Hooggelegen gebieden, zoals uiterwaarden, zijn niet ontweken tenzij het hoge gronden (hooggelegen gebieden die als primaire waterkering dienen) betreft,
- De uitvoerlocaties zijn gedefinieerd met onderlinge afstand van ca. 100 m in de richting langs de dijk,
- Punten zijn verlegd of extra aangemaakt als hieraan behoefte is (bijvoorbeeld in bebouwde buitendijkse gebieden).

De uitvoerlocaties zijn op een vaste afstand uit de dijkkringlijn gelegd, zodanig dat er minimaal één actieve roostercel van zowel het WAQUA model als het SWAN model tussen het uitvoerpunt en de rand van het model ligt. Aangezien de roosterresolutie van beide modellen niet uniform is, is ook de gehanteerde afstand niet uniform. De gehanteerde afstand vanuit de dijkkringlijn varieert grofweg tussen de 30 en 60 m.

Naast de basisset van uitvoerlocaties is er een extra set oever-locaties, de natte set, gedefinieerd die de hooggelegen gebieden vermijdt. Tijdens de productieberekening kan het namelijk voorkomen dat voor bepaalde punten uit de basisset geen waterstanden worden uitgerekend omdat deze punten droogvallen. De punten van de natte set worden zo gekozen

dat er altijd een waterstand beschikbaar is; zie voor meer details met betrekking tot de extra set oever-locaties (Deltares, 2013a).

De resultaten van de productieberekeningen zijn uitgebreid gecontroleerd voor alle locaties op fysieke consistentie en onrealistische schommelingen in waterstanden. Daaruit blijkt dat het verloop van de waterstanden langs de Rijntakken conform verwachting is: met toenemende waterstanden bij toenemende afvoeren bij Lobith. Ook blijkt dat het aantal droge punten consistent verloopt met de afvoer(toename); details met betrekking tot de uitgevoerde controles zijn te vinden in (Deltares, 2016a).

4.3 Waterstanden Bovenrivieren: Maas (regio's 2 en 18)

4.3.1 Inleiding

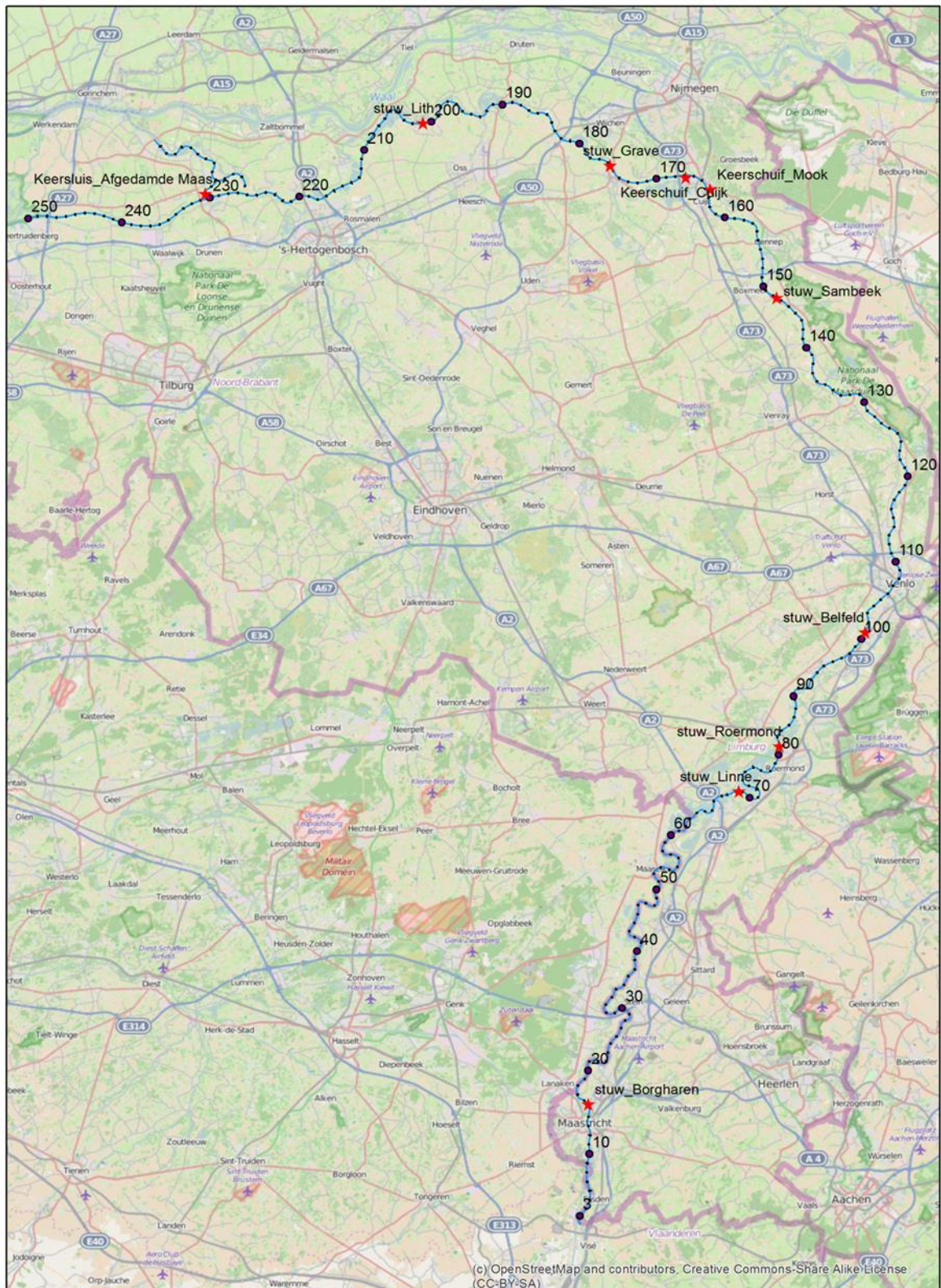
Voor de Maas zijn evenals de Rijn nieuwe productieberekeningen gemaakt in het WBI-2017 project. De reden hiervoor zijn de verwachte effecten van de Maaswerken. Hieronder beschrijven we de voor de productieberekeningen gebruikte modelschematisatie en rekenrooster (Paragraaf 4.3.2), specifieke elementen van het model en Maaswerken (Paragraaf 4.3.3), randvoorwaarden en productieberekeningen (Paragraaf 4.3.4) en uitvoerlocaties en controle berekeningen (Paragraaf 4.3.5).

4.3.2 Modelschematisatie en rekenrooster

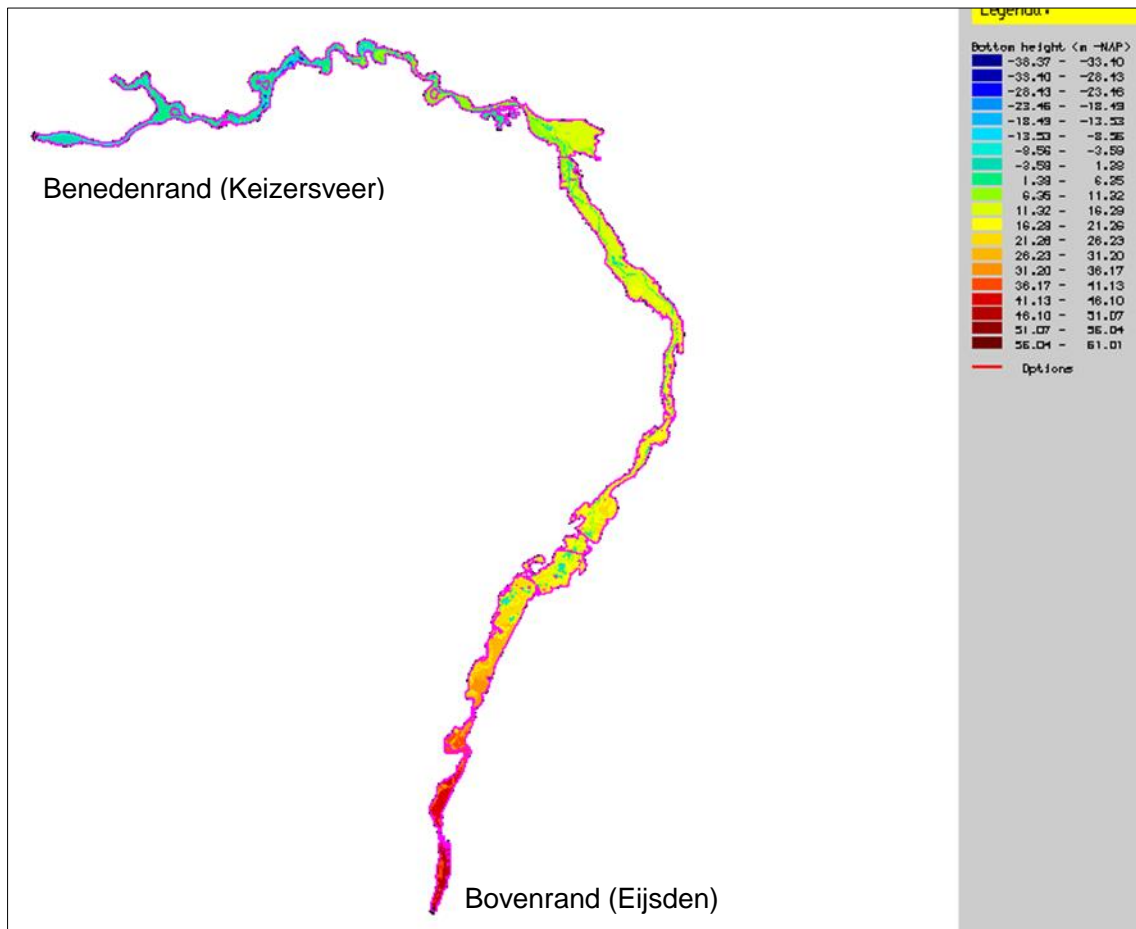
Het studiegebied voor de productieberekeningen voor de Maas omvat:

- De Maas van km 2 t/m 230,
- De Bergsche Maas van km 231 t/m 250,
- De Afgedamde Maas,
- Het Heusdensch Kanaal (tussen Maas en Afgedamde Maas, in dit kanaal bevindt zich de keersluis Heusdensch Kering ofwel Kromme Nol).

Een overzichtskaart van het Maasmodel, inclusief de ligging van de stuwen, is weergegeven in Figuur 4.6. Figuur 4.7 geeft de bodemligging en de locaties van de open randen. De bovenrand van het Maasmodel ligt bij Eijsden en de benedenrand bij Keizersveer. Het rekenrooster van het Maasmodel bestaat uit 187x6001 roostercellen (*maas40m_5-v3.rgf*), zie (Deltares, 2016c).



Figuur 4.6 Overzicht Maasmodel



Figuur 4.7 Bodemligging en locaties open randen Maasmodel

4.3.3 Specifieke elementen en Maaswerken

In het gebied van de Maas bevinden zich een aantal stuwen en bedienbare keringen die de waterstanden op de Maas sterk beïnvloeden; het betreft:

- Borgharen bij km 15
- Linne bij km 68
- Roermond bij km 80 (niet in bedrijf vanaf $Q = 1300 \text{ m}^3/\text{s}$)
- Belfeld bij km 100 (niet in bedrijf vanaf $Q = 1300 \text{ m}^3/\text{s}$)
- Sambeek bij km 146
- Grave bij km 175
- Lith bij km 200
- Kering Mook bij km 164
- Kering Cuijk bij km 167
- Kering Afgedamde Maas bij km 230

De stuwen zijn opgenomen in de modelschematisatie en worden automatisch aangestuurd (Deltares, 2016c). De keringen bij Mook en Cuijk sluiten zodra de waterstand in het controlepunt hoger wordt dan $8,30 \text{ m+NAP}$. De kering van de Afgedamde Maas sluit zodra de waterstand in het controlepunt hoger wordt dan $3,49 \text{ m+NAP}$; zie (Deltares, 2016c) voor meer details.

In het gebied van de Limburgse Maas liggen veel kades met een beperkte hoogte; onder extreme omstandigheden kunnen deze kades overstromen. In de modelschematisatie zijn twee situaties beschouwd: een situatie waarbij de kades de werkelijke hoogte toegekend krijgen (overstroombare Maaskades) en een situatie waarbij de kades oneindig hoog zijn verondersteld (niet-overstroombare Maaskades). Beide situaties zijn doorgerekend omdat ten behoeve van de Hydraulische Belastingen voor het bovenstroomse deel van de Maas de kades meegenomen moeten worden als niet-overstroombaar. Voor het benedenstroomse deel van de Maas dienen de Maaskades echter als overstroombaar te worden meegenomen (Deltares, 2013a).

Een belangrijk uitgangspunt van het WBI-2017 project is dat Ruimte voor de Riviermaatregelen en Maaswerken meegenomen moeten worden in de modelschematisaties. Langs de Maas zijn of worden in het kader van Maaswerken diverse projecten uitgevoerd om het water vrijer te laten stromen en daarmee de kans op overstromingen te verkleinen. Deze projecten zijn opgenomen in de schematisatie van de Maas.

De Maaswerken bestaan globaal uit de deelprojecten Zandmaas en Grensmaas. In het kader van hoogwaterbescherming wordt in Zandmaas pakket I ('trace besluit Zandmaas') gewerkt aan rivierverdieping en -verbreding, hoogwatergeulen, retentiebekkens en de ophoging van kades. Zandmaas pakket II is een vervolg op Zandmaas pakket I en richt zich op natuurontwikkeling gecombineerd met hoogwaterbescherming. Het Grensmaasproject voorziet in de realisatie van circa 1.250 ha nieuw natuurgebied langs de Grensmaas. Kern van het plan is rivierverruiming over een lengte van ongeveer 40 km tussen Maastricht en Roosteren. Zie Deltares (2014a) voor een overzicht van de maatregelen. Aan Vlaamse zijde van de Grensmaas wordt gewerkt aan de realisatie van meer natuur, vaak in combinatie met andere functies als hoogwaterbestrijding. De werkzaamheden zijn afgerond in 2013. Al deze maatregelen zijn meegenomen in de modelschematisatie voor WTI-2017 (Deltares, 2013a).

4.3.4 Randvoorwaarden en productieberekeningen

In de productieberekeningen voor de Maas is alleen de afvoer van de Maas bij Borgharen gevarieerd, de wind bij Deelen niet. De productieberekeningen zijn uitgevoerd voor twee situaties: de situatie met overstroombare Maaskades en de situatie met niet-overstroombare Maaskades. De gebruikte versie van WAQUA schematisatie is 'maas-hr2017_5-v2' voor de situatie overstroombare Maaskades en 'maas-hr2017_mknov_5-v2' voor niet-overstroombare Maaskades. Tabel 4.3 toont een overzicht van de beschouwde afvoergolven van de Maas bij Borgharen. De waarden uit de tabel zijn piekafvoeren.

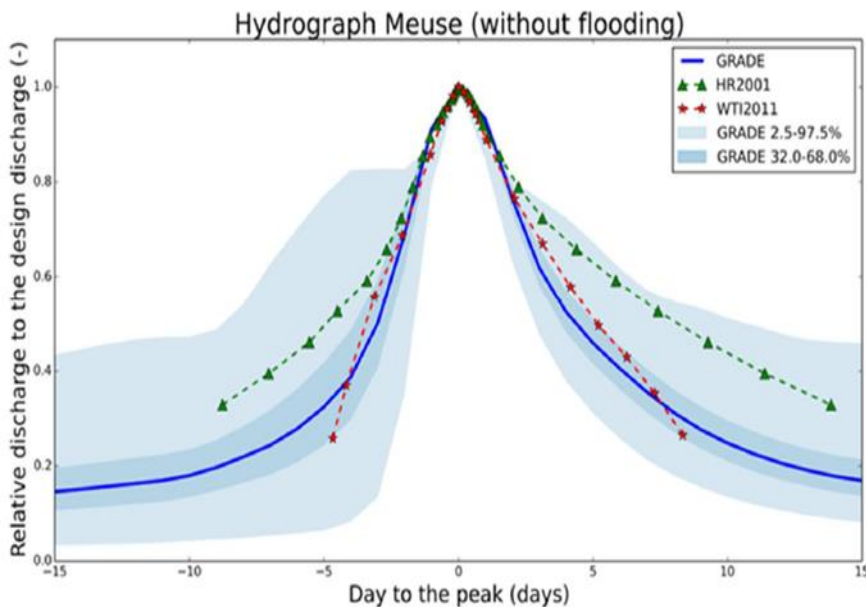
De Maasafvoeren uit Tabel 4.3 zijn met een standaard (gemiddelde) afvoergolfvorm doorgerekend. Deze gemiddelde golfvorm is weergegeven in Figuur 4.8 (blauwe lijn). De productieberekeningen voor de Maas bestaan feitelijk uit 12 WAQUA berekeningen. Conform de gestelde uitgangspunten voor de productieberekeningen WBI-2017 is gerekend met afvoergolven uit GRADE waarbij geen rekening is gehouden met overstromingen bovenstrooms van Borgharen (België), zie (Deltares, 2013a).

De afvoerstatistiek van GRADE voor de Maas bij Borgharen komt uitgebreid aan de orde in Hoofdstuk 7 van dit rapport.

De piekafvoer en de afvoergolfvorm worden omgezet naar afvoerrandvoorwaarden bij Eijsden. De laterale toestromingen langs de Maas zijn hieraan gerelateerd. Voor de details van dit proces wordt verwezen naar Bijlage B van (Deltares, 2016c).

Tabel 4.3 Piekwaardes afvoergolven van de Maas bij Borgharen die doorgerekend zijn met het WAQUA Maas-model.

Afvoer Maas Borgharen [m ³ /s]
1300
2260
3275
3394
3800
3950
4000
4600
5000
5500
6000
6500
12



Figuur 4.8 Gemiddelde (standaard) afvoergolfvorm van de Maas bij Borgharen (Deltares, 2016c).

Op de benedenrand van het WAQUA-model (Keizersveer) is gebruik gemaakt van een Qh-relatie zoals beschreven in Deltares (2015b). Deze relatie is weergegeven in Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Qh-relatie op de benedenrand van de Maas bij Keizersveer

Afvoer Keizersveer (m ³ /s)	Waterstand Keizersveer (m+NAP)
19	0,818
351	1,082
905	1,275
1.448	1,607
1.987	1,936
2.528	2,235
3.342	2,721
3.832	2,990
4.713	3,446
5.500	3,853
6.500	4,370

4.3.5 Uitvoerlocaties en controle berekeningen

Analoog aan de Rijn (Paragraaf 4.2) zijn voor de Maas twee typen uitvoerlocaties gedefinieerd en opgenomen in de schematisatie van WAQUA-Maas: de aslocaties en oeverlocaties. Voor het definiëren van uitvoerlocaties voor het gebied van de Maas zijn dezelfde criteria gehanteerd als voor de Rijn (Paragraaf 4.2.5). De afstand tussen uitvoerlocaties en de dijkkringlijn varieert grofweg tussen 30 en 60 m.

De aslocaties worden gedefinieerd om de kilometer op de as van de rivier en zijn nauwelijks veranderd ten opzichte van HR-2006 (kleine afrondingsfouten). In WBI-2017 zijn overal langs de Maas de Baseline rivierkilometerpunten gebruikt om de as-locaties te definiëren (Deltares, 2013a).

De oeverlocaties voor de Maas zijn in WBI-2017 opnieuw gedefinieerd. Als uitgangspunt hiervoor is de nieuwe dijkkringlijn 4.0 van RWS gebruikt. Voor het definiëren van de oeverlocaties zijn verder dezelfde criteria gehanteerd als voor de Rijn, zie paragraaf 4.2.5.

De resultaten van de productieberekeningen zijn uitgebreid gecontroleerd voor alle locaties op fysische consistentie. Daaruit blijkt dat het verloop van de waterstanden langs de Maas conform verwachting is: met toenemende waterstanden bij toenemende afvoeren bij Borgharen en geen onrealistische schommelingen in de waterstanden. Ook blijkt dat het aantal droge punten consistent verloopt met de afvoer(toename); details met betrekking tot de uitgevoerde controles zijn te vinden in (Deltares, 2016c).

4.4 Waterstanden Benedenrivieren (regio's 3, 4 en 17)

4.4.1 Inleiding

Voor het Benedenrivierengebied, waaronder ook het RMM gebied, zijn in het WBI-2017 project, evenals voor de Rijn en de Maas, nieuwe productieberekeningen van waterstanden gemaakt. De redenen voor de nieuwe productieberekeningen zijn: 1) invoering van een nieuwe afvoerstatistiek van zowel de Rijn als de Maas, 2) aanpassing van de correlatie

tussen de Rijn- en Maasafvoer en 3) Ruimte voor de riviermaatregelen (vooral de inzet van Volkerak-Zoommeer voor waterberging. In de volgende paragrafen beschrijven we de voor deze productieberekeningen gebruikte modelschematisatie en rekenrooster (Paragraaf 4.4.2), specifieke elementen en Ruimte voor de Riviermaatregelen (Paragraaf 4.4.3) aangevuld met het keringscript (Paragraaf 4.4.4), randvoorwaarden en productieberekeningen (Paragraaf 4.4.5) en uitvoerlocaties en controle berekeningen (Paragraaf 4.4.6).

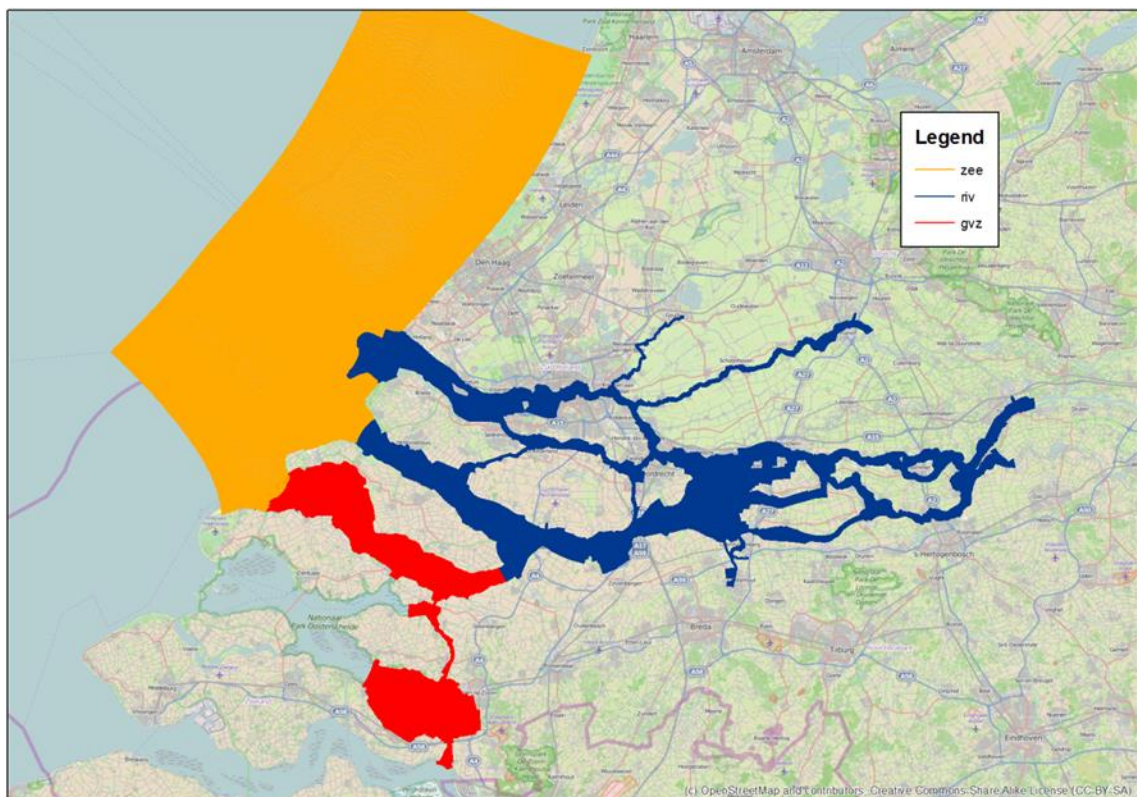
4.4.2 Studiegebied, modelschematisatie en rekenrooster

Het studiegebied van het Benedenrivierengebied omvat de volgende watersystemen en rivierentakken:

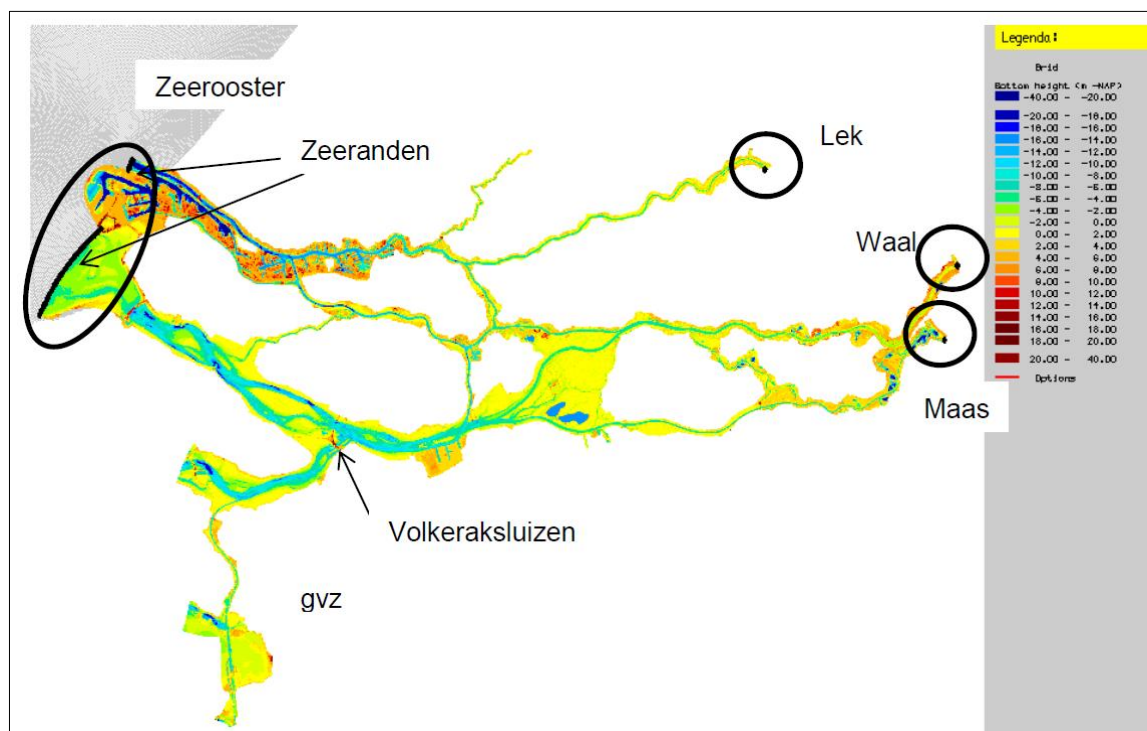
- De Waal (vanaf Tiel), de Boven Merwede, de Beneden Merwede, de Nieuwe Merwede, de Noord, de Oude Maas, Dordsche Kil, Spui,
- De Lek (vanaf Hagestein), de Hollandsche IJssel, de Nieuwe Maas en de Nieuwe Waterweg,
- De Maas (vanaf Lith), de Bergsche Maas, de Afgedamde Maas, de Amer, Hollandsch Diep en Haringvliet,
- Het zeegebied van de Zuidelijke Noordzee,
- De Grevelingen en het Volkerak-Zoommeer.

Het modelrooster is opgesplitst in drie domeinen: domein 1 voor het zeegebied (zee), domein 2 voor het Grevelingen-Volkerak-Zoommeer (gvz) en domein 3 voor het rivierengebied (riv) (Figuur 4.9). Het rekenrooster voor het zeedomein bestaat uit 419x133 roostercellen, en ligt langs de kust tussen Schouwen-Duiveland en Zandvoort. Slechts een klein deel van het zeedomein wordt gebruikt in de berekeningen, zodanig dat de locatie van de benedenrand overeenkomt met WTI-2011 en HR-2006. Het rivierdomein is aanzienlijk groter, en bestaat uit 1080x3023 roostercellen. Het Grevelingen-Volkerak-Zoommeer bevat 637x1056 cellen. Het Grevelingen-Volkerak-Zoommeer bevat geen uitvoerpunten. Het wordt gemodelleerd vanwege haar functie als waterbergingsgebied (Deltares, 2014c). De roosters zijn door middel van domeindecompositie gekoppeld tot één verkleind model voor de Benedenrivieren en het RMM gebied.

Figuur 4.10 toont de bodemligging zoals die in het verkleinde WAQUA-RMM model is opgenomen. De Grevelingen speelt in de waterbeweging wat betreft hoogwatergebeurtenissen in het Benedenrivierengebied geen rol. Het zee-domein maakt ook geen onderdeel uit het verkleinde WAQUA-RMM. Het weglaten van het zeedeelde is nodig om conform WTI-2011 een benedenrand bij Maasmond op kunnen te leggen. Alle Ruimte voor de Riviermaatregelen met een status MIRT3 (Meerjarenprogramma Infrastructuur, Ruimte en Transport) of vergelijkbare status zijn conform (Deltares, 2013a) opgenomen in de schematisatie van WAQUA-RMM, zie Bijlage B.



Figuur 4.9 Overzicht modelschematisatie Benedenrivieren in 3 modeldomeinen.



Figuur 4.10 Bodemligging van verkleinde WAQUA-RMM model

4.4.3 Specifieke elementen en Ruimte voor de Riviermaatregelen

In de Benedenrivieren bevindt zich een vijftal bedienbare stormvloedkeringen die van belang zijn voor de waterveiligheid (Figuur 4.11):

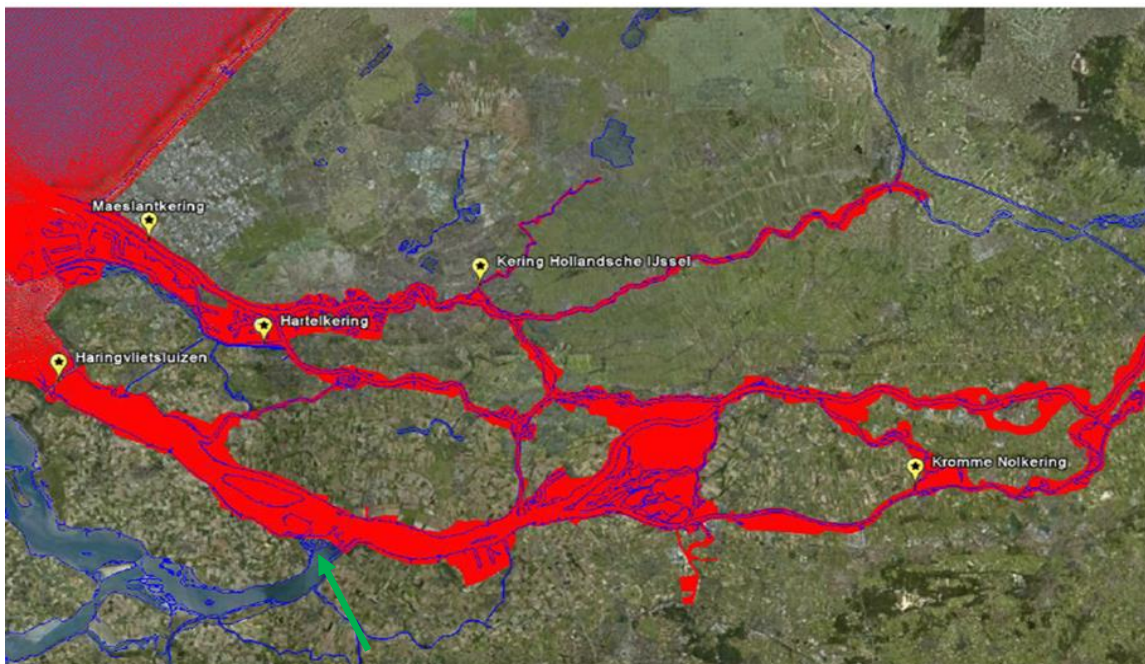
1. Maeslantkering (MLK)
2. Hartelkering (HaK)
3. Haringvlietsluizen
4. Hollandsche IJsselkering
5. Keersluis Heusdensch Kanaal (ook Kromme Nolkering genoemd).

De Maeslant- en Hartelkering kunnen falen, de faalkans van deze twee stormvloedkeringen worden behandeld in Paragraaf 6.6.1. Van de andere drie stormvloedkeringen is aangenomen dat zij niet falen. De faalkans van deze stormvloedkeringen is gelijk gesteld aan nul. Deze aanpak is WBI-2017 onveranderd ten opzichte van WTI-2011. De bediening van de Maeslantkering en Hartelkering vindt niet plaats op basis van actuele, maar op basis van verwachte waterstanden. Het simuleren van deze bediening op basis van toekomstige waterstanden vraagt om een iteratief proces: het Keringenscript. Het Keringenscript (zie paragraaf 4.6.4) stuurt een serie opeenvolgende WAQUA-berekeningen (iteraties) aan, waarbij op basis van elke iteratie de stuurfiles voor de stormvloedkeringen (Maeslantkering en Hartelkering) voor de volgende iteratie in de reeks wordt aangemaakt. De overige stormvloedkeringen worden aangestuurd op basis van een voor-gedefinieerde sturingsmethodiek en actuele waterstanden.

De hierboven beschreven keringen waren ook opgenomen in de RMM-modelschematisatie van WTI-2011. Een toevoeging voor WBI-2017 ten opzichte van WTI-2011 is het effect van de waterberging in het Volkerak-Zoommeer. Wanneer de waterstand in het Haringvliet/Hollandsdiep te hoog wordt, en de MLK gesloten is, wordt waterberging op het Volkerak-Zoommeer ingezet. In Deltares (2010g) is per kering een uitgebreide beschrijving van het werkelijke functioneren en het functioneren in het model WAQUA-RMM opgenomen. In het Keringenscript is ook de inzet van het Volkerak-Zoommeer opgenomen.

Maeslantkering

De Maeslantkering (MLK) ligt in de Nieuwe Waterweg ter plaatse van kmr 1026.03. de constructie bestaat uit twee drijvende, halfronde, waterkerende deuren. Onder normale hydraulische omstandigheden is de kering open; alleen onder extreme omstandigheden gaat de kering dicht. Bij normale weeromstandigheden staan de deuren geparkeerd in afsluitbare dokken in de oevers. Bij stormvloed worden de deuren na het invaren afgezonken. In de bodem van de rivier ligt op -17,0 m+NAP een drempel, waarop de deuren neergezet worden. De bovenzijde van de geheel afgezonken deuren bevindt zich op 5,0 m+NAP, waardoor bij zeer extreme stormvloeden water over de deuren kan storten. Bovendien is er ook in gesloten toestand nog een lekopening tussen, naast en onder de deuren van in totaal 100 m². Nadere details met betrekking tot de besturing van de Maeslantkering wordt verwezen naar (Rozemuller, 2006).



Figuur 4.11 Overzicht van de locaties van de vijf keringen in het WAQUA RMM-model (Deltares, 2010g) zoals deze zijn toegepast in WTI-2011. Bij de groene pijl liggen de Volkeraksluizen, waarmee de waterberging in het Volkerak-Zoommeer kan worden ingezet (in de figuur ontbreekt het Volkerak-Zoommeer).

Er wordt onderscheid gemaakt tussen het sluitcriterium en het sluitpeil. Het sluitcriterium van de Maeslantkering is een verwachte waterstand van 3,00 m+NAP bij Rotterdam en/of van 2,90 m+NAP bij Dordrecht. Het sluitpeil is afhankelijk van het afvoerniveau van de Rijn bij Lobith. Bij afvoeren lager dan 6.000 m³/s van de Rijn te Lobith start de sluitoperatie bij overschrijding van een waterstandsniveau van 2,00 m+NAP ter plaatse van de kering en bij hogere afvoerniveaus start de sluitoperatie bij de stroomkentering van eb naar vloed ter plaatse van de kering. Dit is het moment waarop het zeewater het Benedenrivierengebied gaat binnenstromen.

Vanaf het sluitmoment begint de sluitoperatie. Eerst wordt de kering op een kier na afgezonken. Vervolgens wordt een sedimentstop ingelast, om het sediment van de drempel op de bodem te verwijderen. Daarna wordt de kering geheel gesloten. Als de waterstand aan de binnenzijde van de kering vervolgens hoger wordt dan de waterstand aan de buitenzijde opent de kering, en gaat de kering over in de drijvende toestand. Op deze manier wordt water gespuid van de binnen- naar de buitenzijde van de kering. Afhankelijk van de voorspelling of de waterstand bij Rotterdam en/of Dordrecht opnieuw het sluitcriterium gaat overschrijden in de eerstvolgende 24 uur wordt de kering opnieuw gesloten of geheel geopend.

De sluit- en openprocedures in het prototype zijn geautomatiseerd in een Beslissingsondersteunend Systeem (BOS). Ze zijn voor de WAQUA-berekeningen zo goed mogelijk overgenomen in het Keringenscript (paragraaf 4.4.4). Uitzondering hierop is de sedimentstop. Dit onderdeel van de procedure wordt overgeslagen om rekentijd te besparen. Uit controles uitgevoerd voor WTI-2011 (Vuik et al, 2011b) bleek dat de invloed hiervan op de maximale waterstanden verwaarloosbaar is.

Hartelkering

De Hartelkering ligt in het Hartelkanaal, 40 m ten westen van de Hartelbrug en circa 1.900 m ten westen van de splitsing met de Oude Maas. De kering bestaat uit twee ellipsvormige,

stalen hefschuiven, die bij stormvloed het Hartelkanaal afsluiten. De hefschuiven sluiten twee openingen van verschillende breedte af, namelijk 95,5 m en 46,8 m. Bij normale weersomstandigheden bevinden de onderzijde van de schuiven zich op 13,50 m+NAP. Bij stormvloed worden de hefschuiven naar beneden bewogen. De bodem van het kanaal ligt op -6,50 m t.o.v. NAP, waarop de schuiven nagenoeg terecht komen. De bovenzijde van de geheel neergelaten schuiven bevindt zich dan op 3,00 m+NAP, waardoor bij vrij extreme stormvloeden water over de schuiven kan storten. Bovendien is er ook in gesloten toestand een lekopening naast en onder de schuiven van in totaal 47 m². Voor nadere details met betrekking tot de besturing van de kering wordt verwezen naar (Roze Muller, 2006). Het sluitcriterium en de criteria voor de peil- of kenteringsluiting zijn gelijk aan die voor de Maeslantkering. De sluitprocedure is eenvoudiger dan voor de Maeslantkering. Na een periode gesloten te zijn, gaat de kering over in geopende toestand bij een hogere waterstand aan de binnenzijde dan aan de buitenzijde. Op basis van de voorspelde waterstanden wordt beslist of de kering open blijft of opnieuw sluit.

In WTI-2011 werd, om in WAQUA gelijktijdig een lekopening aan de onderzijde te creëren en overslag aan de bovenzijde van de kering mogelijk te maken, de kering geschematiseerd als een dubbele barrier met beweegbare drempel en gate. Op basis van testberekeningen van RHDHV (2014) is besloten om alleen een beweegbare drempel te implementeren. Ook voor de Hartelkering vindt de aansturing plaats met behulp van het Keringenscript.

Haringvlietsluizen

De Haringvlietsluizen liggen in de mond van het Haringvliet en vormen met de Haringvlietdam een (verbindende) waterkering. Het beheer van de Haringvlietsluizen is vastgesteld in het Lozingsprogramma Haringvlietsluizen 1984 (kortweg LPH-'84); zie voor details (De Deugd, 2007). Het openen en sluiten van de schuiven geschiedt op gelijke waterdrukhoogten aan de binnen- en buitenzijde van het complex. In de praktijk wordt aan de binnenzijde een kleine overhoogte van de waterstand van circa 0,05 m aangehouden in verband met dichtheidsverschil tussen het zoutere buitenwater en het zoetere binnenwater. De bodem van de Haringvlietsluizen ligt op -5,5 m+NAP. Het openen en sluiten van de schuiven gaat snel en is afhankelijk van van de gewenste opening. De schuiven hebben een maximale hefhoogte van 11,50 m, die binnen 20 min bereikt kan worden. Bij volledig geopende Haringvlietsluizen bevindt de onderzijde van de deuren zich op 6,00 m+NAP. De kerende hoogte van de gesloten sluisen is 5,00 m+NAP.

De Haringvlietsluizen zijn in de WAQUA modelschematisatie gemodelleerd als een dubbele barrier, om ervoor te zorgen dat er gelijktijdig een lekopening aan de onderzijde en overslag aan de bovenzijde van de kering plaats kan vinden. De maximale hefhoogte is in het WAQUA model gezet op 5,00 m+NAP omdat dit ruim boven de maximale waterstanden aan de binnenzijde van de sluisen is. In WAQUA sluiten de deuren conform werkelijkheid in maximaal 20 min (van -5,5 m naar 5,00 m+NAP). In het WAQUA model wordt er geen rekening mee gehouden dat bij extreme stormvloeden (> 5,00 m+NAP) water over de bovenzijde van de gesloten schuiven kan storten. Deze aanpak is onveranderd ten opzichte van WTI-2011. Nadere details met betrekking tot de implementatie van de Haringvlietsluizen in WAQUA zijn te vinden in (Deltares, 2010g).

In de modellering voor WTI-2011 is aangenomen dat de Haringvlietsluizen niet kunnen falen, de faalkans is gelijk aan nul gesteld. Deze aanpak is gehandhaafd in WBI-2017. In de toekomst zal worden uitgegaan van de wettelijke normering die uitgaat van een maximaal toelaatbare faalkans; deze is afhankelijk van de faalsituatie (mail WVL, d.d. 26 mei 2015).

Hollandse IJsselkering

De stormvloedkering Hollandse IJssel ligt bij Krimpen aan de IJssel, nabij de monding van de Hollandse IJssel. De kering sluit wanneer de waterstand ter plaatse van de kering hoger komt

dan 2,25 m+NAP. De kering gaat weer open op het moment dat de waterstanden aan de binnen- en buitenzijde weer nagenoeg aan elkaar gelijk zijn.

In WAQUA is slechts een van de twee stuwdeuren gemodelleerd. De sluis is gemodelleerd als een permanent gesloten kunstwerk met een kerende hoogte van 5,00 m+NAP. De stuw heeft in WAQUA een oneindige kerende hoogte; nadere details met betrekking tot de schematisatie van de Hollandse IJssel in WAQUA zijn te vinden in (Deltares, 2010g). De trigger voor het sluiten ligt in het model bij 2,25 m+NAP lokale waterstand nabij de stormvloedkering. In werkelijkheid is de aansturing van de kering Hollandse IJssel veel complexer en gebaseerd op afspraken tussen Rijkswaterstaat en Waterschappen, die zijn vastgelegd in het Waterakkoord Hollandse IJsselkering (RWS-DZH, 1999).

In de modellering van de Hollandse IJssel in WBI-2017 is aangenomen dat de kering niet kan falen, de faalkans is gelijk gesteld aan nul. Deze aanpak is onveranderd ten opzichte van WTI-2011.

Keersluis Heusdensch Kanaal

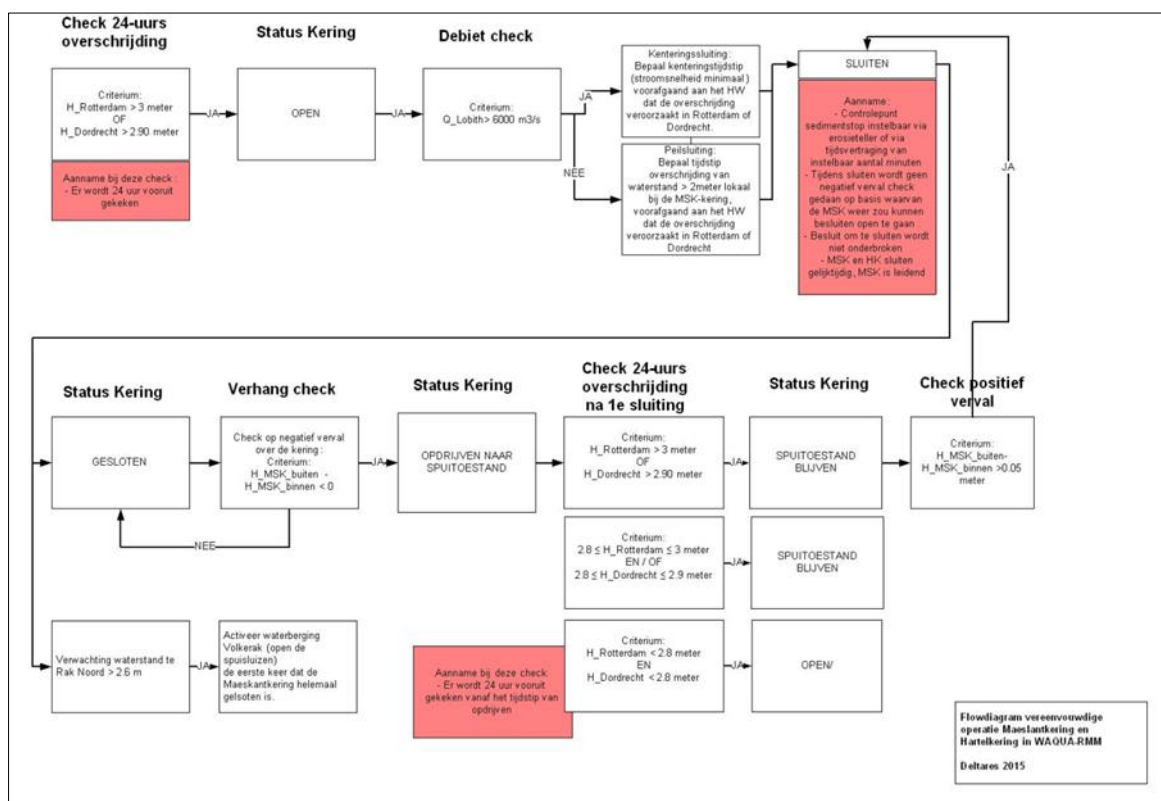
De keersluis in het Heusdensch Kanaal (ook wel Kromme Nol kering genoemd) ligt ter plaatse van kilometerraai 231, nabij het splitsingspunt Heusdensch Kanaal en Bergsche Maas. De keersluis bestaat uit een 50 m brede 10 m hoge beweegbare schuif. In geopende toestand bevindt de onderzijde van de schuif zich op 11,4 m+NAP. De drempel ligt op -4,00 m+NAP. De keersluis zal gesloten worden als op de Maas een hoge afvoergolf passeert. Dit wordt bepaald met de waterstand bij Heesbeen. Bij overschrijding van 3,49 m+NAP bij Heesbeen gaat de keersluis dicht en bij onderschrijding van die stand gaat deze weer open. Het sluiten van de keersluis duurt ongeveer één uur. Het openen duurt ook ca. één uur.

De sluitprocedure zoals hierboven beschreven is geïmplementeerd in WAQUA. In de modellering van de keersluis Heusdensch Kanaal in WBI-2017 is aangenomen dat de kering niet kan falen, de faalkans is gelijk gesteld aan nul. Deze aanpak is onveranderd ten opzichte van WTI-2011. Nadere details met betrekking tot de implementatie in WAQUA zijn te vinden in (Deltares, 2010g).

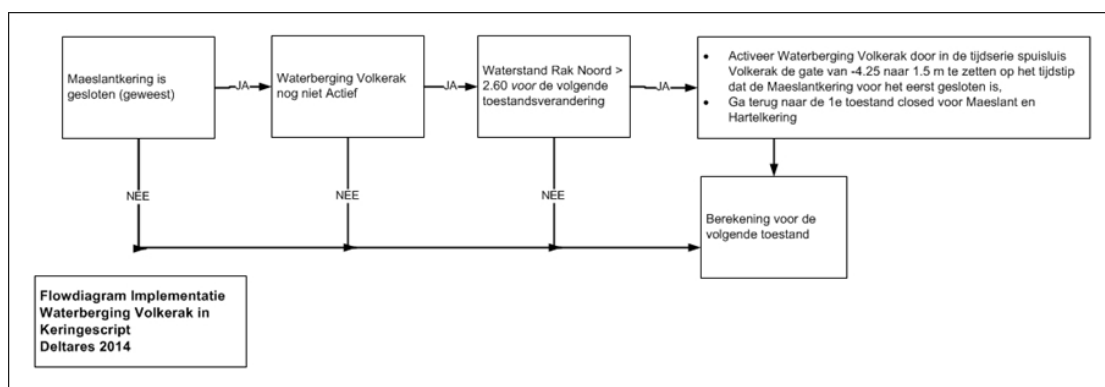
4.4.4 Keringscript

Het keringscript bepaalt op basis van de voorspelde waterstanden bij Dordrecht en Rotterdam of en wanneer de Maeslantkering en de Hartelkering dienen te sluiten, te openen en te gaan spuien. Dit proces staat beschreven in Figuur 4.12. Nadere details zijn te vinden in (Deltares, 2010g) en (Kerkhoven, 2015). Feitelijk stuurt het keringscript een serie opeenvolgende WAQUA_RMM berekeningen (tussenberekeningen of iteraties) aan, waarbij op basis van elke tussenberekening de stuurfiles voor de keringen voor de volgende tussenberekening in de reeks worden aangemaakt.

Afhankelijk van de waterstanden en afvoeren kan het Volkerak-Zoommeer worden ingezet als waterbergingsgebied. Hiervoor is in het Keringscript een algoritme opgenomen waarin bepaald wordt of de inzet noodzakelijk is. Als dit het geval is worden de Volkeraksluizen geopend. De implementatie van het algoritme "Waterberging Volkerak" is in Figuur 4.13 uitgewerkt.



Figuur 4.12 Schematische weergave van de verschillende toestanden van de keringen in opeenvolgende tussenberekeningen. De pijlen geven mogelijke toestandsveranderingen aan (Kerkhoven, 2015).



Figuur 4.13 Implementatie algoritme “Waterberging Volkerak” in het Keringenscript (Kerkhoven, 2015).

4.4.5 Randvoorwaarden en productieberekeningen

Voor de stochastcombinaties in Tabel 4.5 zijn modelberekeningen gemaakt met WAQUA-RMM. Er zijn berekeningen gemaakt voor combinaties van 16 windrichtingen, 15 afvoeren van de Rijn bij Lobith, 5 of 6 (afhankelijk van windrichting) windsnelheden, 1 of 8 zeewaterstanden (afhankelijk van windrichting) en twee beheersituaties van de stormvloedkeringen. Zoals hierboven al vermeld worden de Europoortkeringen (Maeslant- en Hartelkering) aangestuurd op basis van waterstandsvoorspellingen te Rotterdam en Dordrecht. Deze waterstandsvoorspellingen geschieden door middel van WAQUA tussenberekeningen. Voor een berekening met gesloten keringen zijn afhankelijk van het

aantal sluitingen extra tussenberekeningen (iteraties) WAQUA-RMM nodig; details met betrekking tot tussenberekeningen zijn te vinden in (Deltares, 2016h).

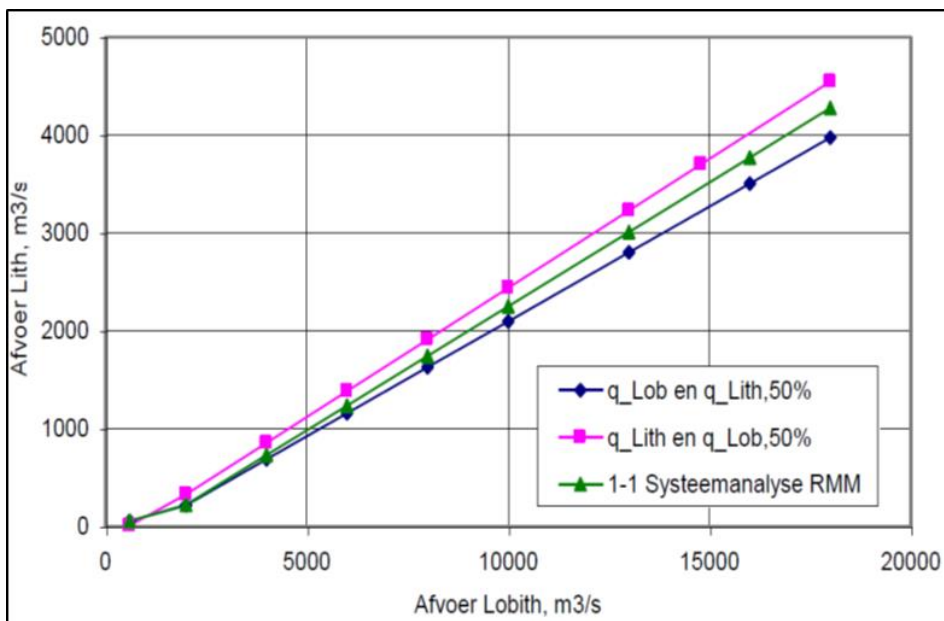
Tabel 4.5 Stochastwaardecombinaties Benedenrivieren (Deltares, 2016h).

Afvoer		Overige basisstochasten									
		Westelijke windrichtingen					Oostelijke windrichtingen				
Rijn	Maas	Zeewaterst.		Wind Schiphol		SVK	Zeewaterst.		Wind Schiphol		SVK
		[m+NAP]	[m+NAP]	snellheid U_p	richting	Europoort	[m+NAP]	[m+NAP]	snellheid U_p	richting	Europoort
[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m+NAP]	[m+NAP]	[m/s]	[°N]	[-]	[m+NAP]	[m+NAP]	[m/s]	[°N]	[-]
600	55	1.13	1.16	0	225.0	sluiting	1.33	1.36	0	22.5	open
2000	222	2.02	2.04	10	247.5	open			10	45.0	
4000	729	3.02	3.04	20	270.0				20	67.5	
6000	1235	4.02	4.04	30	292.5				30	90.0	
8000	1742	5.02	5.04	42	315.0				42	112.5	
10000	2248	6.02	6.04	46	337.5					135.0	
13000	3008	7.02	7.04		360.0					157.5	
16000	3768	8.02	8.04							180.0	
16500	3895									202.5	
17000	4022										
18000	4275										
20000	4782										
22000	5289										
24000	5769										
26000	6303										
15		8		1+5	7	2	1		1+4	9	1
				36					37		
				576					37		
						613					
										Totaal	9195

De productieberekeningen zijn uitgevoerd voor de afvoeren (van zowel de Rijn bij Lobith als de Maas bij Borgharen) gegeven in Tabel 4.5. In tegenstelling tot WTI-2011 waarbij de afvoer van de Rijn bij Lobith gekoppeld was aan de afvoer van de Maas bij Borgharen door middel van de zogenoemde 50%-lijnen (Fioole, 1999), is in WBI-2017 uitgegaan van de zogenoemde 1-1 relatie; onder de aanname van maximale correlatie tussen de afvoer van de Rijn bij Lobith en die van de Maas bij Borgharen. Deze 1-1 relatie is samen met de 50%-lijnen afgebeeld in Figuur 4.14. De keuze voor de 1-1 relatie is gemotiveerd in (Geerse, 2013). Een belangrijke consequentie van het vervangen van de 50%-lijnen door één lijn is dat het aantal benodigde productieberekeningen met WAQUA is gehalveerd in WBI-2017. Het gevolg van het gebruik van een 1-1 relatie is dat dat vooral langs de Bergsche Maas de waterstanden mogelijk enigszins onderschat worden; de onderschatting in termen van waterstanden is echter klein en bedraagt enkele centimeters (Geerse, 2013).

Aan de oostzijde van het WAQUA-RMM model bevinden zich drie bovenstroomse modelranden, zie Figuur 4.10. Deze modelranden liggen in de Waal bij Tiel, in de Maas bij de stuw te Lith en in de Lek bij de stuw te Hagestein. Het WAQUA model wordt daar aangestuurd door stationaire afvoerdebieten, in tegenstelling tot de Rijntakken en de Maas waarbij gerekend is met gemiddelde afvoergolven. Ten opzichte van WTI-2011 is deze aanpak onveranderd in WBI-2017.

De rivierafvoeren op de bovenstroomse modelranden van het RMM model zijn bepaald op basis van WBI-2017 productieberekeningen voor de Rijntakken en de Maas, Paragraaf 4.2 en Paragraaf 4.3, zie ook (Deltares, 2016a) en (Deltares, 2016c). De op deze wijze verkregen afvoeren bij Hagestein op de Lek, Tiel op de Waal en Lith op de Maas zijn weergegeven in Tabel 4.6.



Figuur 4.14 De 50%-lijnen uit WTI-2011 en de 1-1 relatie zoals gebruikt in WBI-2017 (in de figuur beschreven 1-1 Systeemanalyse RMM).

De benedenrandvoorwaarden bij Maasmond en HA10 die zijn opgelegd in de productieberekeningen met WAQUA-RMM bestaan uit waterstandsverlopen die zijn afgeleid uit een combinatie van stormopzetverloop, astronomisch getij en faseverschil tussen beide, vermeerderd met een component voor de zeespiegelstijging.

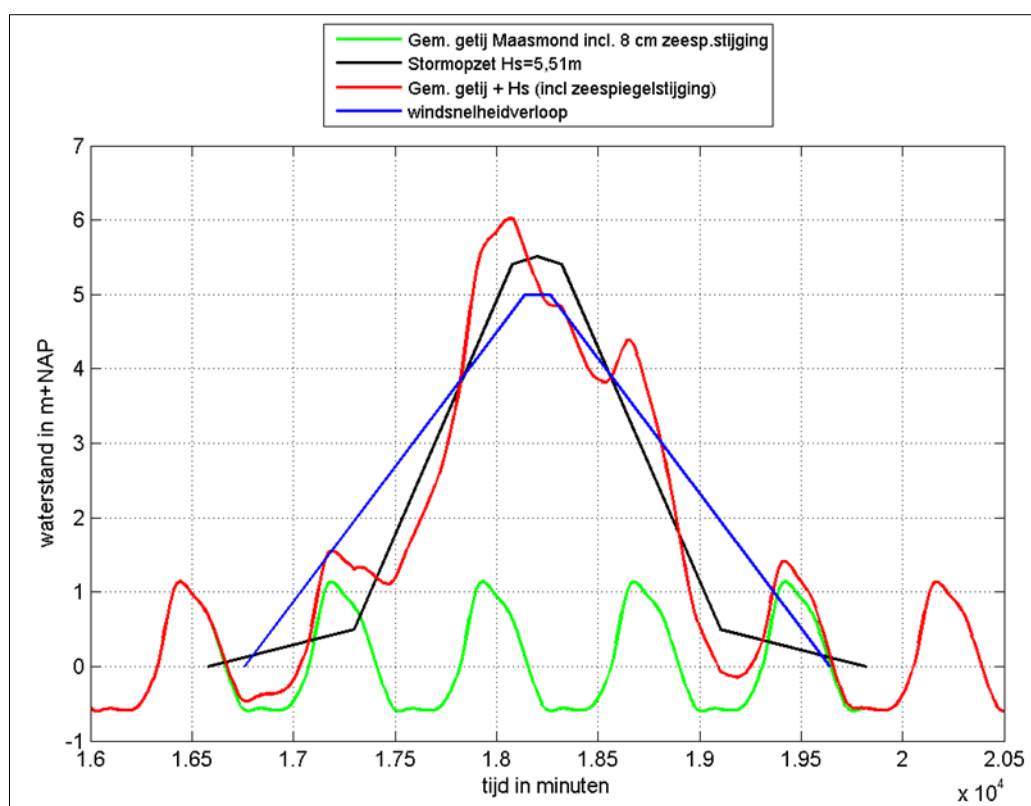
Conform WTI-2011, is een stormopzetduur van 30 uur op het niveau van 0,5 m gebruikt in WBI-2017, met flanken van 12 uur naar het niveau van 0 m. De top van het stormopzetverloop is twee uur voor de piek en twee uur erna, met een verhoging van 10 centimeter (zwarte lijn in Figuur 4.15). Het faseverschil (tijdsverschil tussen astronomisch hoogwater en rechte opzet) is constant gehouden en bedraagt -4,5 uur. Dit wil zeggen dat de top van de stormopzet 4,5 uur later optreedt dan de top van het astronomisch hoogwater. Dit is onveranderd ten opzichte van WTI-2011.

De westelijke windrichtingen worden in de productieberekeningen anders behandeld dan de oostelijke windrichtingen. De berekeningen met de oostelijke windrichtingen worden namelijk uitgevoerd voor het springtij zonder rekening te houden met een stormopzet. Het faseverschil tussen stormopzet en getij is daardoor niet relevant. De enige verandering binnen WBI-2017 voor de oostelijke windrichtingen betreft de zeespiegelstijging. Voor de WBI-2017 berekeningen is rekening gehouden met een zeespiegelstijging van 0,10 m ten opzichte van het referentiejaar 1985 (basispeilen).

Een andere stochast is de wind boven het RMM-gebied. De berekeningen zijn uitgevoerd met open water windsnelheden. Dit betekent dat de windsnelheden gegeven in Tabel 4.5 eerst zijn omgezet naar openwaterwindsnelheden volgens de methodiek zoals beschreven in (de Waal, 2003), zie Tabel 3.1. Het verloop van de windsnelheid in de tijd is trapeziumvormig en is voor het Benedenrivierengebied identiek aan het tijdsverloop van de wind voor het IJsselmeer. Dat tijdsverloop is beschreven in paragraaf 4.6.1.3.

Tabel 4.6 Opgelegde afvoeren (m^3/s) bij Hagestein (Lek), Tiel (Waal) en Lith (Maas) (Deltares, 2016h).

Stochasten		RMM randen		
Q_Lobith	Q_Borgharen	Q_Waal	Q_Lek	Q_Maas
		913.00_WA	Hagestein	Lith
600	55	550	25	55
2.000	222	1.453	235	377
4.000	729	2.737	702	884
6.000	1.235	4.062	1.045	1.284
8.000	1.742	5.324	1.413	1.708
10.000	2.248	6.513	2.045	2.134
13.000	3.008	8.376	2.732	2.918
16.000	3.768	10.168	3.350	3.620
16.500	3.895	10.272	3.390	3.693
17.000	4.022	10.554	3.480	3.755
18.000	4.275	11.110	3.684	3.978
20.000	4.782	12.174	4.113	4.469
22.000	5.289	13.175	4.539	5.041
24.000	5.769	14.173	4.978	5.570
26.000	6.303	15.155	5.443	6.145



Figuur 4.15 Relatie stormopzet, getij voor Maasmond en windverloop. De rode lijn is de waterstand die als randvoorwaarde voor de Maasmond is gebruikt in de berekeningen met WAQUA-RMM.

Naast het tijdsverloop is een ruimtelijk verloop van de wind benodigd voor de productieberekeningen. In WAQUA-RMM is een ruimtelijk uniform windveld opgelegd. Deze aanpak is WBI-2017 onveranderd ten opzichte van WTI-2011. De schuifspanning die de wind op het wateroppervlak uitoefent, is berekend met behulp van een variabele windschuifspanningscoëfficiënt C_d , zie (Bak en Vlag, 1999). De gehanteerde windschuifspanning voor het Benedenriviereengebied is identiek aan die voor het IJsselmeer; zie voor een illustratie Figuur 3.2, waarin geldt: $C_{dA} = 0,0014$, $C_{dB} = 0,0039$, $wind_A = 7,8$ m/s en $wind_B = 50,0$ m/s.

Bij de productieberekeningen is naast de windsnelheid ook gevarieerd in de windrichting. Daarbij is, net als voor WTI-2011, onderscheid gemaakt tussen wind uit het oostelijke segment en wind uit het westelijke segment. De segmenten zijn onderverdeeld in sectoren van 22,5 graden. De windrichting is tijdens de berekening met WAQUA constant. De bij de berekeningen toegepaste windrichtingen zijn gegeven in Tabel 4.5.

4.4.6 Uitvoerlocaties en controle productieberekeningen

Analoog aan de Rijn en de Maas (Paragraaf 4.2 en 4.3) zijn voor het Benedenriviereengebied nieuwe uitvoerlocaties gedefinieerd in WBI-2017. Het betreft twee typen uitvoerlocaties: as- en oeverlocaties. Beiden zijn opgenomen in de schematisatie van het WAQUA-RMM model.

De aslocaties zijn gedefinieerd om de kilometer op de as van de rivieren en zijn vrijwel onveranderd ten opzichte van HR-2006 (op kleine afrondingsfouten na). In WBI-2017 zijn overal in het Benedenriviereengebied de Baseline rivierkilometerpunten gebruikt om de aslocaties te definiëren (Deltares, 2013a).

Daarnaast zijn in WBI-2017 nieuwe oeverlocaties gedefinieerd. Als uitgangspunt hiervoor is de nieuwe dijkkringlijn 4.0 van RWS gebruikt. Voor het definiëren van de oeverlocaties zijn verder dezelfde criteria gehanteerd als voor de Rijn, zie Paragraaf 4.2.5. De afstand tussen uitvoerlocaties en de dijkkringlijn varieert grofweg tussen 30 en 60 m.

De resultaten van de productieberekeningen met WAQUA-RMM zijn uitgebreid gecontroleerd voor alle locaties op fysische consistentie. Ten opzichte van de productieberekeningen voor de Rijntakken en de Maas (maar ook voor de Vecht- en IJsseldelta, zie volgende paragraaf) zijn meer resultaten afgekeurd. Het RMM-model is een gecompliceerd WAQUA-model met drie gekoppelde deelgebieden (Paragraaf 4.4.2), gecompliceerde randvoorwaarden en een groot aantal keringen. Dit alles maakt dat het model soms last heeft van numerieke instabiliteiten. Afgekeurde resultaten liggen vooral op locaties rond de keringen in de Nieuwe Waterweg (Maeslantkering), het Calandkanaal en Hartelkanaal en bij de inlaatsluizen naar het Volkerak-Zoommeer. Voor de overige locaties zijn consistente patronen gevonden in het verloop van gemodelleerde waterstanden en sluiten van de stormvloedkeringen als functie van de verschillende stochastcombinaties. Dit leidt tot de conclusie dat de berekeningen betrouwbaar zijn en gebruikt kunnen worden voor het vullen van de relationele databases voor Hydra-Ring. Meer details met betrekking tot de uitgevoerde controles en de kwaliteit van de resultaten van de productieberekeningen met WAQUA-RMM zijn te vinden in (Deltares, 2016h).

4.5 Waterstanden IJssel- en Vechtdelta (regio's 5 en 6)

4.5.1 Inleiding

In verband met enerzijds de Ruimte voor de Riviermaatregelen en anderzijds de aangepaste afvoerstatistiek van de IJssel bij Olst zijn voor WBI-2017 nieuwe productieberekeningen gemaakt voor het gebied van de Vecht- en IJsseldelta. Deze afvoerstatistiek van de IJssel volgt uit de GRADE afvoerstatistiek van de Rijn bij Lobith (Hoofdstuk 6). In de volgende paragrafen beschrijven we de voor deze productieberekeningen gebruikte modelschematisatie en rekenrooster (Paragraaf 4.5.2), specifieke elementen en Ruimte voor de Riviermaatregelen (Paragraaf 4.5.3), randvoorwaarden en productieberekeningen (Paragraaf 4.5.4) en uitvoerlocaties en controle berekeningen (Paragraaf 4.5.5).

4.5.2 Studiegebied, modelschematisatie en rekenrooster WAQUA

Het studiegebied van de Vecht- en IJsseldelta omvat de volgende wateren:

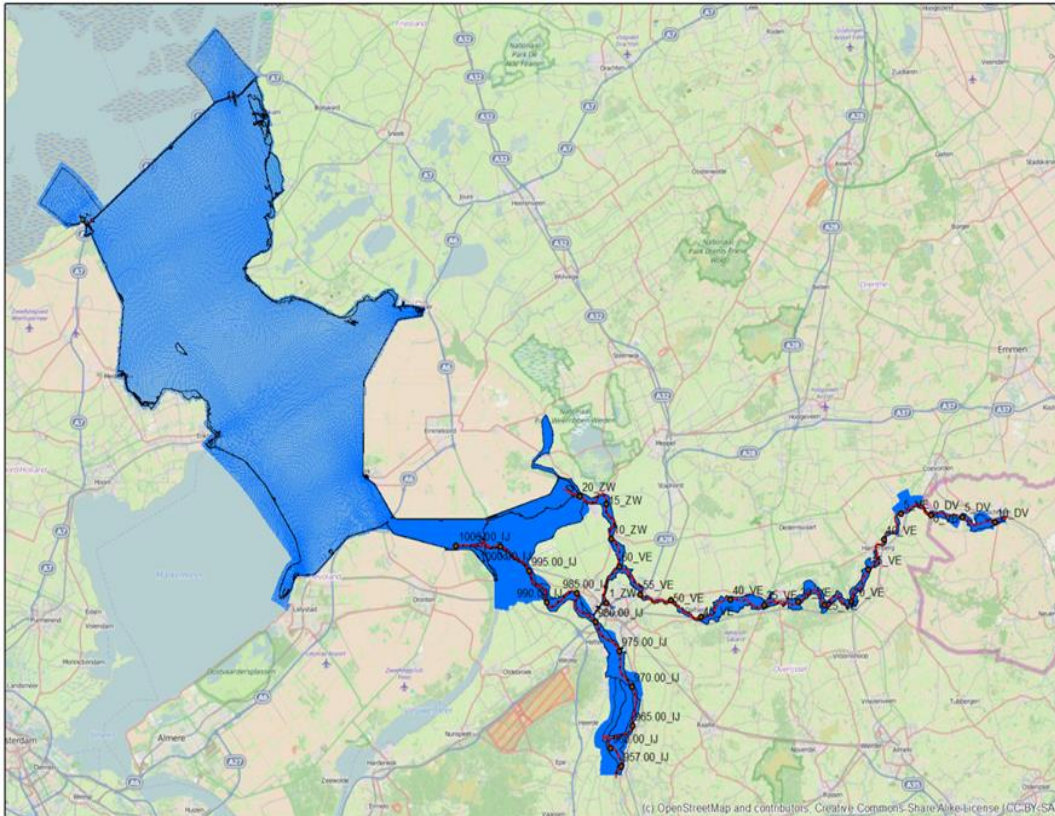
- De IJssel benedenstrooms van rivierkilometer 956 nabij Olst (km 957),
- De Overijsselse Vecht benedenstrooms van rivierkilometer 35 bij de Varsenerbrug nabij Ommen,
- Het Zwarte Water, tot de Keersluis Zwolle en het Zwolle-IJsselkanaal
- Het Zwarte Meer, inclusief de buitendijkse polders van het meer (Kampereiland) en de waterlopen die deze polders doorsnijden,
- Het Vossemeer,
- Het Ketelmeer,
- Het IJsselmeer,
- Kadoelermeer,
- Vollenhovermeer.

Er is een WAQUA-modelschematisatie opgezet waarin al deze wateren zijn opgenomen: het integrale WAQUA-IJVD model (Deltares, 2010b), zie Figuur 4.16. Zoals te zien omvat het WAQUA-IJVD model naast de gebieden van de Vecht- en IJsseldelta ook het IJsselmeer, inclusief het Ketelmeer en het Vossemeer. Kadoelermeer en Vollenhovermeer zijn opgenomen in de schematisatie van WAQUA-IJVD vanwege berging. Een geactualiseerde versie van WAQUA-IJVD is in het WBI-2017 project gebruikt voor de productieberekeningen van waterstanden.

Het rekenrooster van het IJVD-model bestaat uit 532x3732 roostercellen en is weergegeven in Figuur 4.16. De resolutie in de Vecht- en IJsseldelta is aanzienlijk hoger dan in het IJsselmeer, waar de roostercellen tot ca. 300x300 m groot zijn. De resolutie in de Vecht- en IJsseldelta varieert tussen 8x8 m in smalle delen van de rivieren tot ca. 50x50 m in de bredere delen van het gebied, zie (Deltares, 2010b).

Figuur 4.17 toont de bodemligging zoals die WAQUA-IJVD model is opgenomen. Alle Ruimte voor de Riviermaatregelen met een status MIRT3 of vergelijkbaar zijn conform (Deltares, 2013a) opgenomen in de schematisatie van WAQUA-IJVD. Alle Ruimte voor de Riviermaatregelen zijn meegenomen in de modelgeometrie (bodemligging en overlaten). Voor vegetatie geldt dat het beeld van 1997 gebruikt is. Ten aanzien van de overige maatregelen geldt dat alle maatregelen waarvoor een MIRT3 besluit (of een vergelijkbaar investeringsbesluit) is genomen en waarvoor een Baseline maatregel beschikbaar is voor 31 maart 2014, zijn meegenomen. Voor meer details ten aanzien van keuzes en uitgangspunten

betreffende modelschematisatie wordt verwezen naar (Deltares, 2013a) en betreffende bodemligging en vegetatie naar (Deltares, 2014e) en (Deltares, 2014h).



Figuur 4.16 Overzicht en deelgebieden van IJVD modelschematisatie.

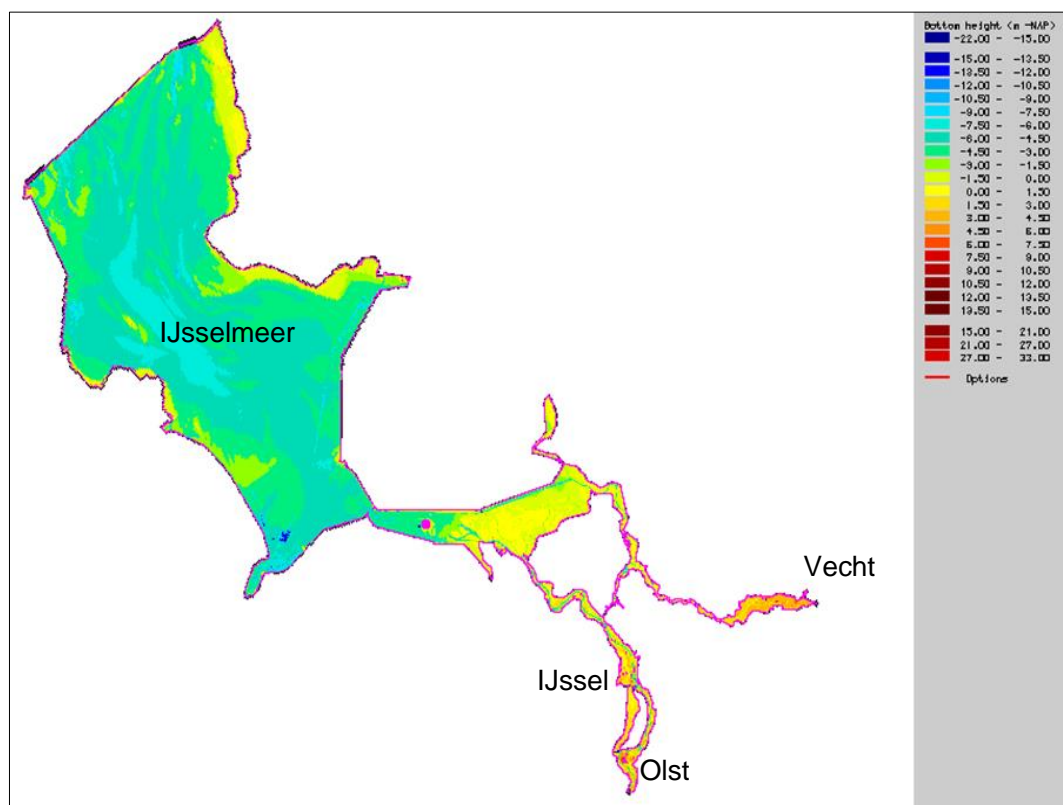
4.5.3 Specifieke elementen en Ruimte voor de rivier maatregelen

4.5.3.1 Keersluizen, stuwen en spuisluizen

In het gebied van de Vecht- en IJsseldelta bevinden zich een aantal stuwen en keersluizen. In het traject tussen de Duitse grens en het Zwarte Water bevinden zich zes stuwen: de Handrik, Hardenberg, Diffelen (bij Mariënberg), Junne (iets ten oosten van Ommen), Vilsteren en Vechterweerd. Daarnaast zijn er twee keersluizen: de keersluis bij Kadoelen en de keersluis Ramspol. Ramspol is de keersluis die het Zwarte Meer scheidt van het Ketelmeer, en daarmee de Vechtdelta van het IJsselmeergebied. Bovengenoemde sluisen en keersluizen zijn geïmplementeerd in de WAQUA-IJVD modelschematisatie inclusief bijbehorende sluitregimes.

Belangrijk voor de bepaling van de hydraulische belastingen en productieberekeningen zijn: de keersluis te Ramspol (Ramspolkering), de Kadoelersluis en de stuwen bij Vilsteren en Vechterweerd. De Ramspolkering dient ervoor om bij een stormsituatie uit westelijke richting hoge waterstanden door opstuwning vanuit het IJsselmeer/Ketelmeer op het Zwarte Meer te voorkomen. De Ramspolkering is een balgstuw die normaal gesproken op de bodem van het Zwarte Meer ligt. Wanneer het waterpeil boven 0,5 m+NAP komt en de stromingsrichting naar het oosten is gericht (van het Ketelmeer richting Zwarte Meer), wordt de balg gevuld met water en lucht zodat een barrière ontstaat met een kruinhoogte van 3,65 m+NAP. Bij weeromstandigheden met waterstanden hoger dan deze kerende hoogte van de balgstuw

kan water over de balgstuw storten. De Ramspolkering opent vervolgens weer als de waterstand aan de buitenzijde (Ketelmeer) lager wordt dan de waterstand aan de binnenzijde (Zwarte Meer). Het sluiten en openen van de Ramspolkering duren respectievelijk maximaal één en drie uur. Meer details ten aanzien van sluiten en openen van de Ramspolkering zijn te vinden (Deltares, 2012a).



Figuur 4.17 Bodemligging IJVD model.

De tweede keersluis is een klepkering bij Zwolle. Deze kering ligt tussen het oude centrum van Zwolle en de A28 en heeft als functie om bij hoge waterstanden op het Zwarte Water en de Vecht de binnenstad van Zwolle en het Sallandse achterland te beschermen. De kering treedt in werking wanneer het waterpeil boven de 1,0 m+NAP stijgt en de stroming van het Zwarte Water naar de binnenstad van Zwolle gericht is, zie voor meer details (Deltares, 2012a).

De derde keersluis in het WAQUA-IJVD model is de Kadoelerkeersluis. Deze gaat dicht als het peil in het Zwarte Meer boven de 1.0 m+NAP uitkomt. Openen en sluiten duurt beide keren een uur.

Naast de drie bovengenoemde keersluizen bevindt zich in de Overijsselse Vecht ook nog een aantal stuwen. Voor de Hydraulische Belastingen zijn de stuwen bij Vechterweerd en bij Vilsteren van belang. De overige stuwen in de Vecht liggen namelijk verder bovenstrooms en maken dus geen deel uit van het studiegebied van de Vecht- en IJsseldelta binnen WBI-2017.

Van de bovengenoemde drie keersluizen kan in de gehanteerde veiligheidsbeschouwing alleen de Ramspolkering falen. De faalkans van deze kering wordt behandeld in 6.6.1. De andere twee keersluizen kunnen in de gehanteerde veiligheidsbeschouwing niet falen; de

faalkans hiervan is in WBI-2017 gelijk gesteld aan nul. Deze aanpak is in WBI-2017 onveranderd ten opzichte van WTI-2011.

Bij de Afsluitdijk wordt water geloosd richting de Waddenzee, met behulp van spuisluisen bij Kornwerderzand (KWZ) en Den Oever (DO), zie Figuur 4.16 voor de locaties. In WAQUA-IJVD is een verhouding tussen de spuidebieten bij KWZ en DO van ongeveer 3 op 2 aangenomen (Deltares, 2016i). De in het WAQUA model benodigde verdeling van spuidebieten voor de specifieke benodigde condities wijkt enigszins af van het langjarig gemiddelde spuidebieten in de praktijk (Deltares, 2016i).

4.5.3.2 Ruimte voor de Riviermaatregelen

De belangrijke Ruimte voor de Riviermaatregelen in het gebied van de Vecht- en IJsseldelta betreffen Bypass Kampen en Veessen-Wapenveld. Vanzelfsprekend kunnen ook de Ruimte voor de Riviermaatregelen bovenstrooms van de IJssel de waterstanden in de IJsseldelta beïnvloeden. Deze maatregelen zijn beschreven in paragraaf 4.2 en zullen niet worden herhaald in deze paragraaf. Mogelijke effecten van deze maatregelen zijn verdisconteerd in de werklijn van de IJssel bij Olst. Deze is immers bepaald op basis van de resultaten van de productieberekeningen voor het gebied van de Rijntakken, paragraaf 4.2. De afvoerstatistiek komt aan de orde in Hoofdstuk 7.

Bypass Kampen

De Bypass Kampen vormt samen met de zomerbedverdieping beneden-IJssel de RvR maatregel IJsseldelta-Zuid. In WAQUA-IJVD is conform de eerste fase¹⁶ van de maatregel Bypass Kampen als onttrekking/lozing opgenomen. De onttrekking vindt plaats ter hoogte van kmr 992 en de lozing vindt plaats bij de Roggebotsluis in het Vossemeer. De onttrekking en de lozing bedragen 340 m³/s. Deze waarde is onafhankelijk van de afvoerhoogte bij Lobith (Deltares, 2016i).

Hoogwatergeul Veessen-Wapenveld

De maatregel Hoogwatergeul Veessen-Wapenveld betreft de aanleg van twee nieuwe dijken tussen Veessen en Wapenveld; hierdoor wordt een 8 km lange hoogwatergeul gecreëerd. De breedte varieert tussen 550 en 1.500 m. Aan de bovenstroomse zijde bij Veessen krijgt de geul een inlaat, bij Wapenveld een uitlaat. De inlaat gaat alleen open (de deuren klappen open) als het waterpeil van de IJssel een hoogte van 5,65 m+NAP heeft bereikt. Het water in de geul gaat dan meestromen met de IJssel. De maatregel is als nevengeul opgenomen in de WAQUA schematisatie met barrières bij zowel de inlaat als de uitlaat. De uitlaat gaat open als er water in de nevengeul staat (Deltares, 2014e).

4.5.4 Randvoorwaarden en productieberekeningen

Er zijn modelberekeningen gemaakt met WAQUA-IJVD voor de stochastcombinaties gegeven in Tabel 4.7 (Deltares, 2016i). De berekeningen zijn uitgevoerd met de WAQUA-versie *ijvd-hr2017_5-v3*. Er zijn berekeningen gemaakt voor stochastcombinaties bestaande uit 7 windrichtingen, 13 afvoeren van de IJssel bij Olst, 13 afvoeren van de Vecht bij Dalftsen, 7 windsnelheden, 6 IJsselmeerpeilen en 2 situaties (open/sluitregime) van de Ramspolkering.

¹⁶ Er is inmiddels besloten om ook de tweede fase van Bypass Kampen uit voeren (besluit Minister I&M, d.d. oktober 2015).

De IJssel- en Vechtafvoer zijn in de productieberekeningen als volledig afhankelijke stochasten beschouwd; dit is in WBI-2017 onveranderd ten opzichte van WTI-2011 (Geerse, 2006).

De productieberekeningen zijn uitgevoerd voor de afvoeren (IJssel en Vecht) gegeven in Tabel 4.7. De waarden uit deze tabel zijn piekafvoeren. De afvoer van de Vecht bij Dalfsen is voor alle beschouwde afvoeren constant terwijl de afvoer van de IJssel alleen voor afvoeren kleiner dan of gelijk aan 2.300 m³/s constant is. Vanaf een IJsselaflow van 2.300 m³/s is een afvoergolf gehanteerd, in verband met het effect van de overstromende Ramspolkering. De afvoergolven van de IJssel bij Olst volgen uit de resultaten van de productieberekeningen voor de Rijntakken uit paragraaf 4.2, zie ook Tabel 4.8.

Tabel 4.7 Stochastwaardecombinaties productieberekeningen waterstanden met WAQUA voor de IJssel- en Vechtdelta (Deltares, 2016i)

Afvoer		Meerpeil	Wind, Schiphol		SVK
IJssel	Vecht	IJsselmeer	snellheid U _p	richting	Ramspol
[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m+NAP]	[m/s]	[°N]	[-]
100	10	-0.4	0	225.0	sluitregime
500	100	-0.1	10	247.5	open
950	250	0.4	16	270.0	
1400	400	0.9	22	292.5	
1850	550	1.3	27	315.0	
2300	700	1.5	32	337.5	
2750	850		37	360.0	
2975	925		42		
3200	1000				
3400	1067				
3600	1133				
3800	1200				
4000	1267				
13		6	1+7	7	2
			50		
Totaal					7800

Voor de lateralen van de Vecht zijn voor WBI-2017 dezelfde lateralen gehanteerd als voor WTI-2011, met uitzondering van de afvoer van de Zwolse Grachten. De lateralen van de Zwolse Grachten behorende bij lage afvoer van de Vecht zijn namelijk enigszins aangepast in verband met een foutief fysisch maximum in WTI-2011 (Deltares, 2016i). Voor de IJssel zijn de lateralen overgenomen uit de productieberekeningen voor de Rijntakken. Uit deze productieberekeningen is de maximale afvoer (per simulatie) bepaald. Vervolgens zijn via interpolaties de lateralen uit het Rijntakkenmodel vertaald naar die voor IJVD. Zie voor meer details over deze procedure (Deltares, 2016i). De lateralen voor de IJssel en de Vecht zijn gegeven in Tabel 4.9.

Tabel 4.8 Relatie¹⁷ afvoer Rijn bij Lobith en afvoer IJssel bij Olst

Piekafvoer Lobith [m ³ /s]	Piekafvoer Olst [m ³ /s]
6.000	889
8.000	1.120
10.000	1.483
13.000	1.989
16.000	2.557
16.500	2.947
17.000	3.073
18.000	3.311
20.000	3.812
22.000	4.380
24.000	4.942

Tabel 4.9 Laterale toestromingen op de Vecht en de IJssel, afhankelijk van de IJsselafvoer bij Olst in m³/s
(Deltares, 2016i)

IJssel (Olst)	IJ_1	IJ_2	Wester- veld	Klooster- zijl	Streukeler- zijl	Zedemu- den	Kostver- lorenzijl	Zwolve Gracht.
100	2,2	0,1	0,0	0,0	0,0	1,7	0,1	2,0
500	10,4	0,7	0,0	2,5	12,5	16,8	0,9	25,0
950	20,6	1,1	1,0	5,0	25,0	41,9	2,3	68,0
1.400	26,4	2,4	1,0	5,0	25,0	67,0	3,7	68,0
1.850	31,5	3,6	1,0	5,0	25,0	92,2	5,1	68,0
2.300	35,8	4,4	1,0	5,0	25,0	117,0	6,5	68,0
2.750	38,0	4,9	1,0	5,0	25,0	117,0	6,5	68,0
2.975	38,2	5,0	1,0	5,0	25,0	117,0	6,5	68,0
3.200	38,3	5,2	1,0	5,0	25,0	117,0	6,5	68,0
3.400	38,1	5,4	1,0	5,0	25,0	117,0	6,5	68,0
3.600	37,7	5,6	1,0	5,0	25,0	117,0	6,5	68,0
3.800	37,3	5,8	1,0	5,0	25,0	117,0	6,5	68,0
4.000	37,4	5,9	1,0	5,0	25,0	117,0	6,5	68,0

Voor de Vecht- en IJsseldelta is het meerpeil in de productieberekeningen van waterstanden een onafhankelijke stochast. In totaal zijn zes verschillende stochastwaarden van het IJsselmeerpeil beschouwd. Het IJsselmeerpeil is in WAQUA-IJVD opgelegd door middel van de beginvoorwaarde voor de waterstand (zie Deltares, 2016i).

De berekeningen met WAQUA-IJVD zijn verder uitgevoerd met open water windsnelheden. Dit betekent dat de windsnelheden gegeven in Tabel 4.7 eerst volgens de methodiek zoals beschreven in (de Waal, 2003) omgezet zijn naar open water windsnelheden, zie Tabel 3.1.

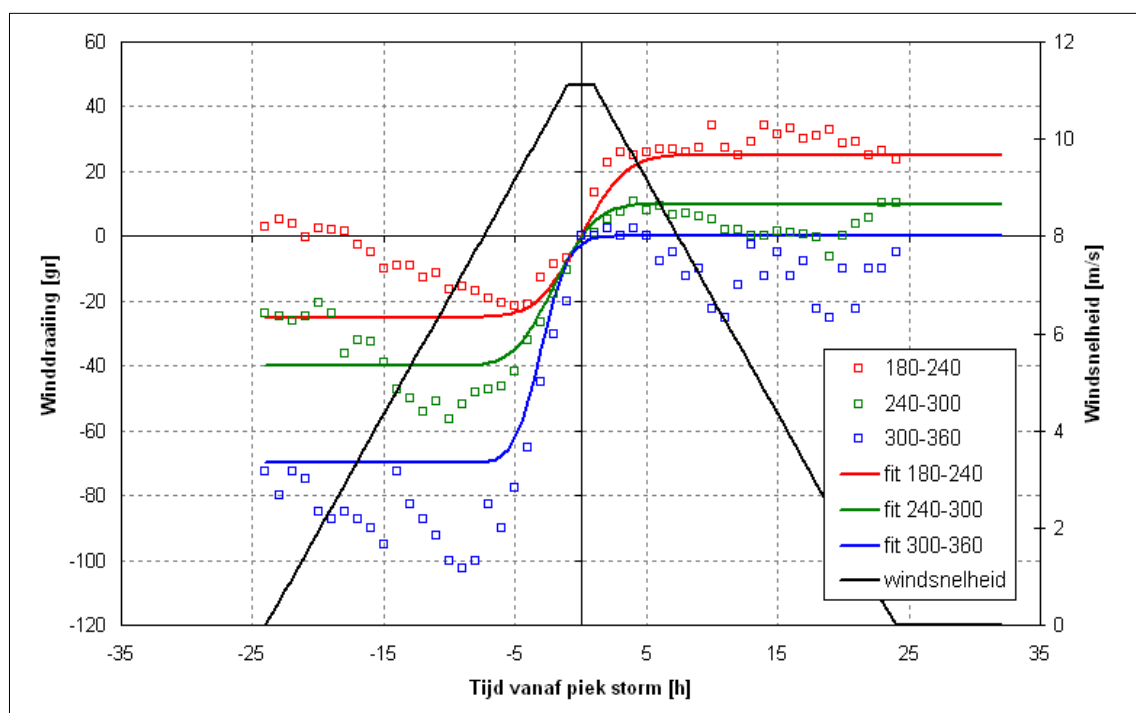
Het verloop van de windsnelheid in de tijd is trapeziumvormig en is voor het gebied van de Vecht- en IJsseldelta identiek aan het gebruikte tijdsverloop van de wind voor de productieberekeningen van het IJsselmeer. Dat tijdsverloop is afgebeeld in Figuur 4.21.

¹⁷ Deze relatie is gebruikt om de afvoerstatistiek van de IJssel bij Olst te bepalen, zie Hoofdstuk 6 van dit rapport.

In het WAQUA-IJVD model is een uniform windveld opgelegd, waarbij de (open water) windsnelheid en de windrichting in de tijd variëren. De schuifspanning die de wind op het wateroppervlak uitoefent, is berekend met behulp van een variabele windschuifspanningscoëfficiënt C_d (Bak en Vlag, 1999). De gehanteerde windschuifspanning voor de Vecht- en IJsseldelta is identiek aan die voor het Benedenrivierengebied en IJsselmeer; deze is afgebeeld in Figuur 3.2. Daarin geldt: $C_{dA} = 0,0014$, $C_{dB} = 0,0039$, $wind_A = 7,8$ m/s en $wind_B = 50,0$ m/s.

In de productieberekeningen zijn tot slot 7 windrichtingen en 8 windsnelheden beschouwd, deze zijn gegeven in Tabel 4.7. Voor de genoemde 7 windrichtingen is gevarieerd in de windsnelheid. Dit wil zeggen dat voor elke van deze 7 windrichting 7 windsnelheden zijn gesimuleerd (totaal 49 simulaties). Daarnaast is één berekening uitgevoerd met windsnelheid 0 m/s. De resultaten van deze berekening zijn gebruikt voor de oostelijke windrichtingen,; windrichting 22,5 graden t/m windrichting 202,5 graden. Dit is geoorloofd omdat de invloed van de wind op de waterstanden in de Vecht- en IJsseldelta verwaarloosd is voor deze oostelijke windrichtingen.

In de productieberekeningen met WAQUA wordt een winddraaiing in de tijd toegepast voor deze windrichtingen. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen de sectoren 180-240 graden, 240-300 graden en 300-360 graden. De winddraaiing is met de wijzers van de klok mee (ruimende wind) zoals getoond in Figuur 4.18. Details met betrekking tot de toegepaste winddraaiing zijn te vinden in (Deltares, 2010e).



Figuur 4.18 Winddraaiing voor verschillende sectoren, in graden ten opzichte van de betreffende windrichting. In Zwart het verloop in de tijd van de windsnelheid.

4.5.5 Uitvoerlocaties en controle productieberekeningen

In WBI-2017 zijn analoog aan de Rijn en de Maas (paragraaf 4.2 en 4.3) nieuwe uitvoerlocaties gedefinieerd voor het gebied van de Vecht- en IJsseldelta. Het betreft twee typen uitvoerlocaties: aslocaties en oeverlocaties. Beiden zijn opgenomen in de schematisatie van het WAQUA-IJVD model. De aslocaties gelden alleen voor de IJssel (tot de monding in het Ketelmeer), het Zwarte Water (tot de monding in het Zwarte Meer) en de Overijsselse Vecht.

De aslocaties zijn gedefinieerd om de kilometer op de as van de rivieren en zijn vrijwel onveranderd ten opzichte van WTI-2011 en HR-2006 (op kleine afrondingen na). In WBI-2017 zijn overal in het gebied van de IJssel- en Vechtdelta de Baseline rivierkilometerpunten gebruikt om de as-locaties te definiëren (Deltares, 2013a).

Voor WBI-2017 zijn nieuwe oeverlocaties gedefinieerd. Als uitgangspunt hiervoor is de nieuwe dijkkringlijn 4.0 van RWS gebruikt. Voor het definiëren van de oeverlocaties zijn verder dezelfde criteria gehanteerd als voor het gebied van de Rijntakken, zie paragraaf 4.2.5. De afstand tussen uitvoerlocaties en de dijkkringlijn varieert hiermee grofweg tussen 30 en 60 m.

De resultaten van de productieberekeningen met WAQUA-IJVD zijn uitgebreid gecontroleerd voor alle locaties op fysische consistentie. Ten opzichte van de productieberekeningen voor de Rijntakken en de Maas zijn meer locaties afgekeurd. Het WAQUA-IJVD model is een gecompliceerd WAQUA-model met een aantal aan elkaar gekoppelde deelgebieden (paragraaf 4.5.2), gecompliceerde randvoorwaarden en een aantal keersluizen. Dit alles maakt dat het model soms last heeft van numerieke instabiliteiten. Bij hoge windsnelheden zijn er veel uitvoerpunten met instabiliteiten rond de piek van de storm doordat bij sterke wind veel locaties te maken krijgen met droogval (afwaaiing). Dit is vooral merkbaar in combinatie met een lage rivierafvoer en laag meerpeil omdat er dan relatief weinig water in het systeem aanwezig is. Instabiliteiten rond de Ramspolkering treden vooral op in geopende toestand. Op de rechteroever van de IJssel ligt de verbindende Ramspolkering. Die kering heeft een hoogte van rond de 3 m+NAP. Wanneer deze kering tijdens een berekening overstroomt, treden soms instabiliteiten op. Ondanks deze problemen zijn consistente patronen gevonden voor het verloop van gemodelleerde waterstanden als functie van de verschillende stochastcombinaties. Daarnaast functioneren de Ramspolkering, de hoogwatergeul Veessen Wapenveld, de Bypass Kampen en de spuisluisen in de Afsluitdijk conform verwachting. Dit leidt tot de conclusie dat de berekeningen betrouwbaar zijn en gebruikt kunnen worden voor het vullen van de relationele databases voor Hydra-Ring. Meer details met betrekking tot de uitgevoerde controles en de kwaliteit van de resultaten van de productieberekeningen met WAQUA-IJVD zijn te vinden in (Deltares, 2016i).

4.6 Waterstanden Meren

4.6.1 IJsselmeer (regio 7)

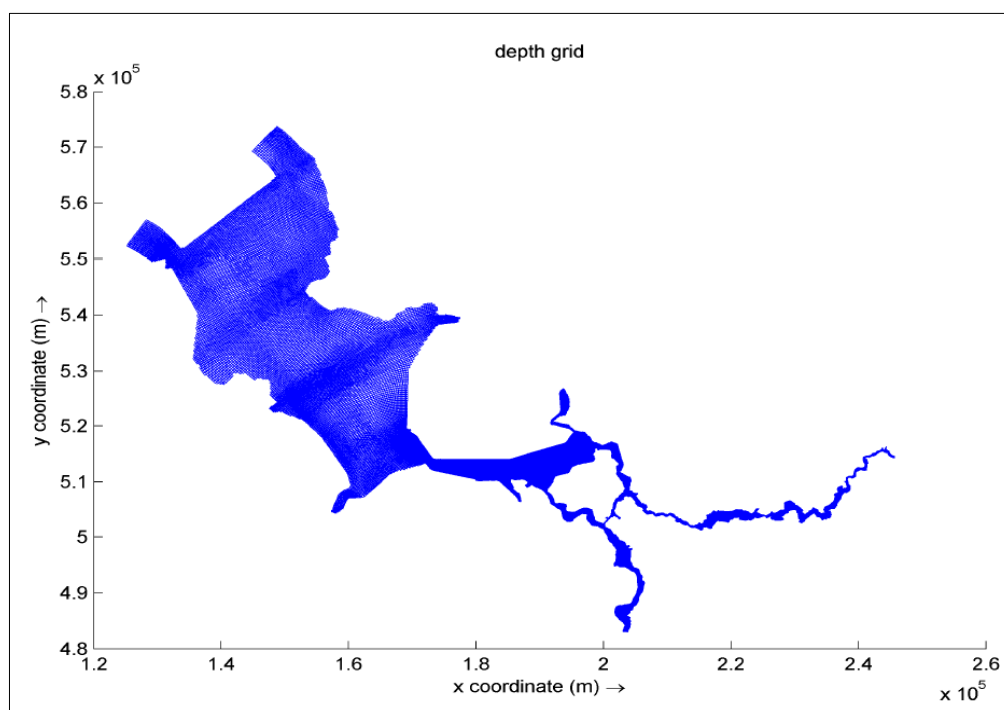
Voor WBI-2017 zijn voor het IJsselmeer (regio 7) geen nieuwe productieberekeningen gemaakt om de waterstanden bij de waterkering te bepalen. Die waterstanden zijn overgenomen uit de database van WTI-2011. In de volgende paragrafen worden de in WTI-2011 gebruikte modelschematisatie en gehanteerde modelrandvoorwaarden behandeld.

4.6.1.1 Modelschematisatie en rekenrooster

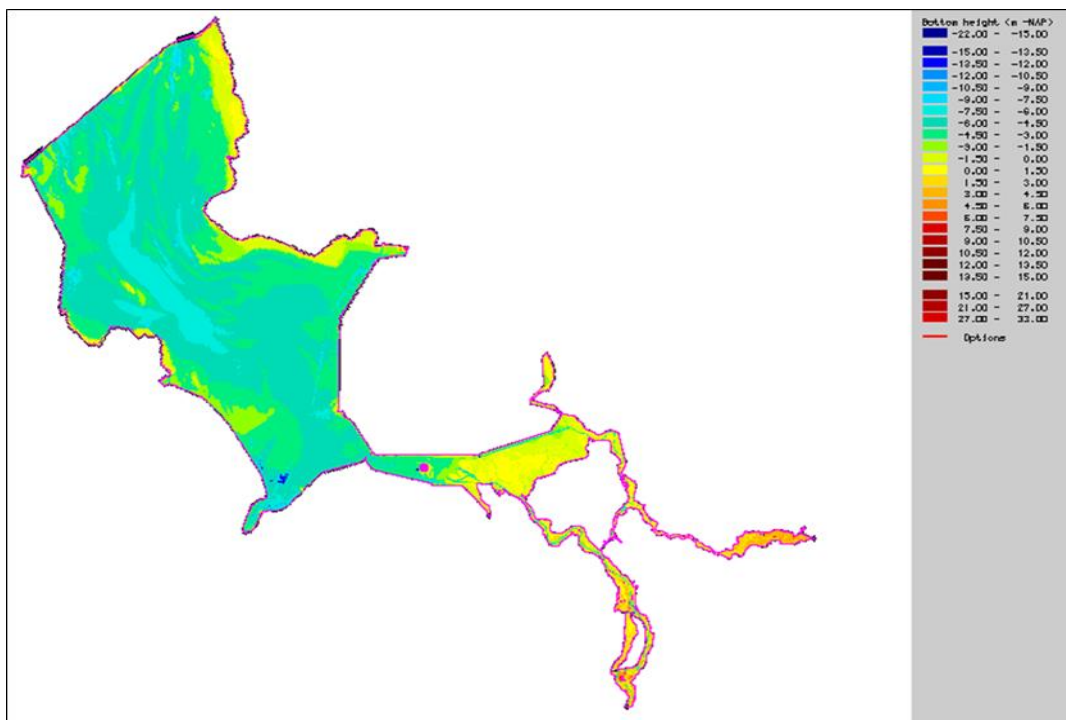
In het WTI-2011 project zijn modelberekeningen gemaakt met WAQUA. Het destijds gebruikte WAQUA model omvat naast het IJsselmeer ook het Ketelmeer, het Vossemeer en de Vecht- en IJsseldelta: het integrale WAQUA-IJVD model, zie voorgaande paragraaf. Dit model is door Deltares ontwikkeld in opdracht van Rijkswaterstaat (Deltares, 2010b). De eerste versie van WAQUA die eerder was ontwikkeld door Alkyon (2006) voor het IJsselmeer, Vecht- en IJsseldelta diende hierbij als basis. In onderstaande paragrafen beschrijven we enkele belangrijke aspecten van het integrale WAQUA-IJVD model zoals gebruikt in WTI-2011 evenals de daarmee uitgevoerde productieberekeningen voor het IJsselmeer. Details met betrekking tot het integrale WAQUA-IJVD model zijn te vinden in Deltares (2010b). De achtergronden van de productieberekeningen zijn beschreven in Deltares (2012c).

De productieberekeningen voor het IJsselmeer zijn in het WTI-2011 project uitgevoerd met versie "ijvd_09_wti_Q-model" van het WAQUA-IJVD model. Dit rekenrooster is gebaseerd op het rooster rij40_5rgf dat door Alkyon is gemaakt (Alkyon, 2008), met enkele kleine aanpassingen op verschillende plaatsen. Deze aanpassingen zijn beschreven in (Hartsuiker, 2010). Figuur 4.19 toont het rekenrooster van het WAQUA-IJVD model zoals toegepast voor de productieberekeningen voor het IJsselmeer.

De bodemligging van het IJsselmeer zoals opgenomen in het WAQUA-IJVD model is weergegeven in Figuur 4.20. Het rekenrooster van het WAQUA-IJVD model varieert tussen 8x8 m in het rivierengebied tot 300x300 m in het IJsselmeer.



Figuur 4.19 Het rekenrooster van het WAQUA-IJVD model zoals gebruikt voor de productieberekeningen van WTI-2011 voor het IJsselmeer (Deltares, 2010b).



Figuur 4.20 Bodemligging van het IJsselmeer in WAQUA-IJVD modelschematisatie inclusief Vecht- en IJsseldelta.

4.6.1.2 Uitvoerlocaties

In WBI-2017 zijn voor het IJsselmeer de uitvoerlocaties gebruikt die voor het WTI-2011 zijn gedefinieerd. Het uitgangspunt voor deze uitvoerlocaties is de dijkkringlijn versie 3.2 van Rijkswaterstaat (RWS, 2009). De volgende criteria zijn gebruikt voor het definiëren van de uitvoerlocaties langs het IJsselmeer:

- De uitvoerlocaties liggen zo dicht mogelijk bij de dijk, maar in ieder geval niet in de eerste roostercel uit de rand van het model,
- Hooggelegen gebieden, zoals uiterwaarden, worden niet ontweken tenzij deze hoge gebieden de functie van een primaire waterkering vervullen,
- De uitvoerlocaties worden gedefinieerd met een onderlinge afstand van 150-200 m in de richting langs de dijk.

Het eerste criterium leidt ertoe dat de uitvoerlocaties op een min of meer vaste afstand van de dijkkringlijn liggen, zodanig dat er minimaal één actieve roostercel ligt tussen een uitvoerlocatie en de rand van het WAQUA- of SWAN-model. Aangezien de roosterresolutie van het WAQUA-IJVD (maar ook van SWAN) niet uniform is, is ook de gehanteerde afstand niet uniform. De afstand tot de dijk varieert daarom grofweg tussen de 30 en 60 m.

Naast de set uitvoerlocaties zoals hierboven beschreven, de zogenoemde basisset, is een extra set uitvoerlocaties, de zogenoemde natte set, gedefinieerd. Deze extra set vermijdt de hoge gronden en volgt min of meer de oeverlijn van het IJsselmeer.

Uit de basisset én de natte set is een selectie gemaakt van locaties die gebruikt zijn voor WTI-2011. Deze set waarin locaties uit zowel de basisset als de natte set opgenomen zijn, vormt de basis voor WBI-2017.

4.6.1.3 Productieberekeningen

Er zijn modelberekeningen gemaakt met het WAQUA-IJVD model voor de stochastcombinaties gegeven in Tabel 4.10. In totaal zijn er 720 berekeningen gemaakt bestaande uit combinaties van 16 windrichtingen, 9 windsnelheden en 5 IJsselmeerpeilen. De berekeningen zijn uitgevoerd met open water windsnelheden. De omzetting van potentiële windsnelheid naar open water windsnelheid is volgens de methodiek zoals beschreven in (de Waal, 2003) gebeurd, zie Tabel 3.1. Het verloop van de windsnelheid in de tijd is als volgt: in 23 uur loopt de windsnelheid lineair op van nul naar de maximale waarde. De maximale windsnelheid treedt vervolgens gedurende twee uur op. Daarna neemt de windsnelheid in opnieuw 23 uur lineair af tot nul. Figuur 4.21 geeft het verloop van de windsnelheid in de tijd schematisch weer.

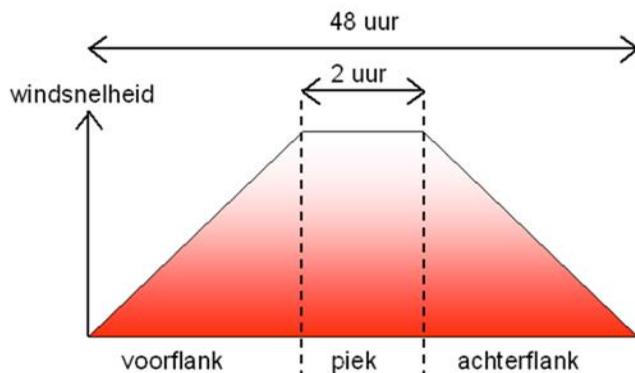
In WAQUA-IJVD is voor het IJsselmeer, anders dan in de HR-2001/2006-productieberekeningen waarbij een ruimtelijk variërend windveld werd gehanteerd, een ruimtelijk uniform windveld opgelegd (Deltares, 2010d).

Tabel 4.10 Basisstochastwaardecombinaties voor productieberekeningen waterstanden met WAQUA voor het IJsselmeer.

Meerpeil	Wind, Schiphol	
	snelheid U_p	richting
[m+NAP]	[m/s]	[°N]
-0.4	14	22.5
-0.1	19	45.0
0.4	22	67.5
1.0	25	90.0
1.8	28	112.5
	31	135.0
	34	157.5
	38	180.0
	42	202.5
		225.0
		247.5
		270.0
		292.5
		315.0
		337.5
		360.0
5	9	16
Totaal		720

Er zijn 16 windrichtingen meegenomen in de productieberekeningen, met intervallen van 22,5 graden. Tijdens de simulatie wordt een winddraaiing in de tijd toegepast voor de westelijke windrichtingen (180 graden t/m 360 graden). Voor de oostelijke sectoren is geen winddraaiing toegepast. De gehanteerde winddraaiing voor het IJsselmeer is identiek aan de winddraaiing voor de Vecht en IJsseldelta en is afgebeeld in Figuur 4.18.

De schuifspanning die de wind op het wateroppervlak uitoefent, is berekend met behulp van een variabele windschuifspanningscoëfficiënt C_d (Bak en Vlag, 1999). Deze is geïllustreerd in Figuur 3.2, waarin $C_{dA} = 0,0014$, $C_{dB} = 0,0039$, $wind_A = 7,8$ m/s en $wind_B = 50,0$ m/s.



Figuur 4.21 Schematische weergave van het verloop van de windsnelheid (Deltares, 2012c).

De afvoeren van de IJssel en de Overijsselse Vecht zijn gecorreleerd met het IJsselmeerpeil. Er is dus een vaste koppeling tussen het IJsselmeerpeil en de beide rivierafvoeren. Elk meerpeil is gekoppeld aan één specifieke combinatie van een IJsselafvoer en een Vechtafvoer. Het IJsselmeerpeil is in WAQUA opgelegd door middel van de beginvoorwaarde voor de waterstand. De rivierafvoeren worden stationair op de bovenranden van het model opgelegd. In totaal zijn vijf verschillende afvoerniveaus met vanwege de volledige correlatie vijf bijbehorende IJsselmeerpeilen beschouwd, zie Tabel 4.11. Naast deze twee bovenranden is er in de productieberekeningen met WAQUA ook rekening gehouden met laterale toestromingen in het stroomgebied van de Vechtdelta. De lateralen zijn volledig gecorreleerd met de Vechtafvoer. Details over deze laterale toestromingen zijn te vinden in Paragraaf 4.5 en (Vuik et al, 2011a).

Tabel 4.11 Gehanteerde koppeling tussen IJsselmeerpeil en afvoer IJssel en Vecht in productieberekeningen waterstand

Meerpeil	Afvoer	
	IJssel	Vecht
[m+NAP]	[m ³ /s]	[m ³ /s]
-0.4	80	8
-0.1	882	227
0.4	1420	412
1.0	3084	935
1.8	5325	1704

Voor de productieberekeningen van waterstanden in het IJsselmeer is alleen de situatie met gestuurde (niet-falende) Ramspolkering beschouwd. De Ramspolkering heeft geen invloed op de waterstanden in het gebied van het IJsselmeer (Deltares, 2012c).

4.6.2 Markermeer (regio 8)

In WBI-2017 zijn voor het Markermeer (regio 8) geen nieuwe productieberekeningen gemaakt om de waterstanden bij de teen van de waterkering te bepalen. Deze waterstanden zijn overgenomen uit de database van HR-2001 (voor Markermeer, Gooi- en Eemmeer) en HR-2006 (voor IJburg en de Eem). Daar verschillende keuzes en modellen ten grondslag liggen aan HR-2001 en HR-2006, behandelen wij in deze paragraaf IJburg en Eem los van het Markermeer en Gooi- en Eemmeer.

4.6.2.1 Markermeer, Gooi- en Eemmeer

In het kader van de studie “Onafhankelijk Onderzoek Markermeer” (ook bekend als OOM-studie) is een Delft2D schematisatie voor het Markermeer, Gooi- en Eemmeer (in het vervolg gemakshalve Markermeer genoemd) gemaakt (WL|Delft Hydraulics, 1997, fase 1b-2). Met dit model werden waterstandsberekeningen gemaakt, aanvankelijk bedoeld om te onderzoeken of het Markermeer de status van “buitenwater” moest krijgen. Later zijn de resultaten van de betreffende berekeningen gebruikt om de Hydraulische Randvoorwaarden voor het Markermeer vast te stellen en op te nemen in het Randvoorwaardenboek HR2001. De resultaten van de berekeningen vormen nog steeds de basis voor de Hydraulische Belastingen in het Markermeer.

Figuur 4.22 toont het rekenrooster van het Delft2D model zoals toegepast voor de productieberekeningen van de waterstanden voor het Markermeer. Het betreft een kromlijinig rekenrooster met cellengroottes die variëren tussen 35 en 600 m. Het rekenrooster bestond in totaal uit 129x290 cellen. Voor meer details betreffende het rekenrooster verwijzen we naar (WL|Delft Hydraulics, 1997, fase 1b-2).

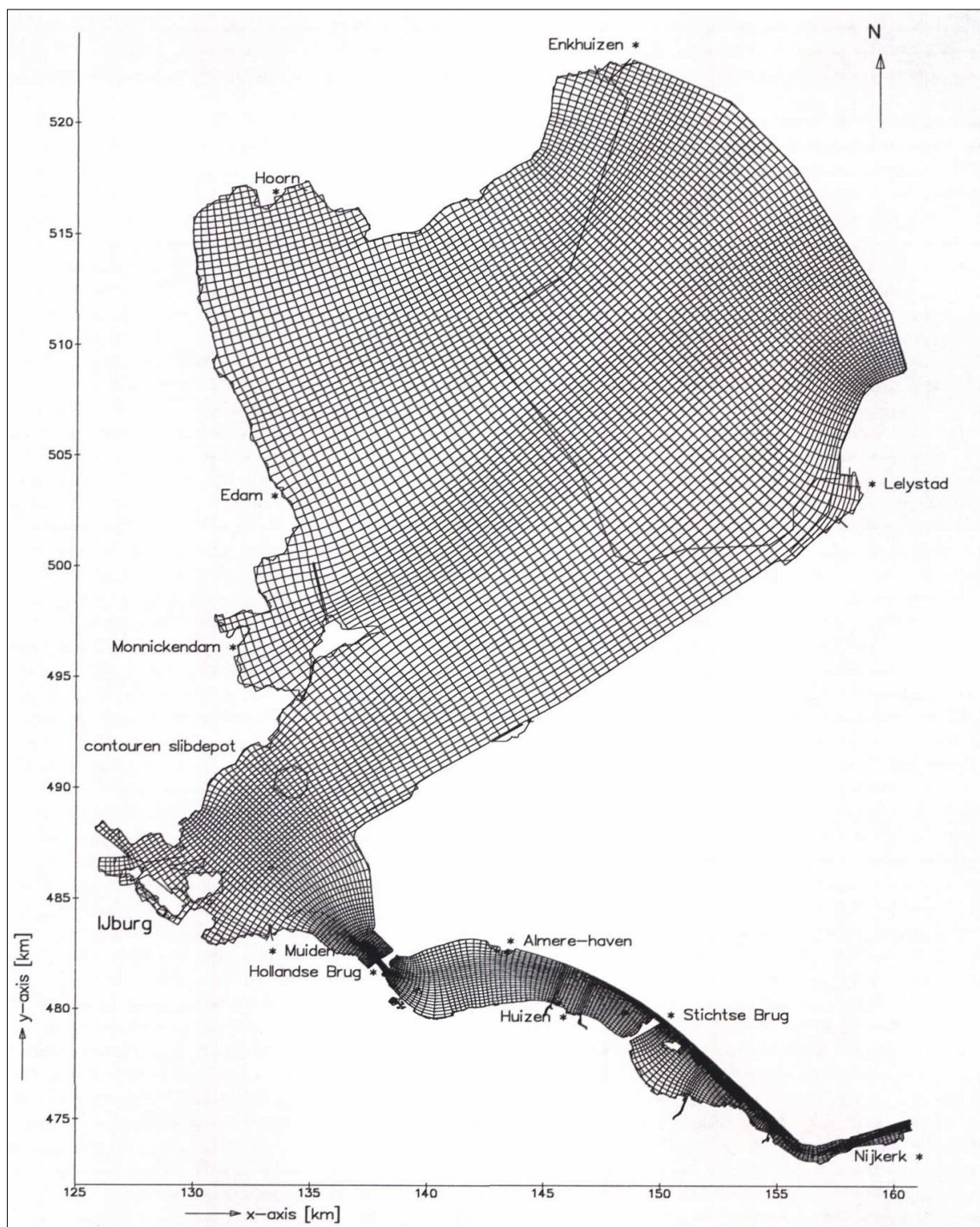
De bodemligging van het Delft2D model voor het Markermeer is afgebeeld in Figuur 4.23. Deze bodem is verkregen door middeling van lodingsgegevens uit de periode 1986-1994. Een overzicht van de lodingsgegevens is te vinden in (WL|Delft Hydraulics, 1997, fase 1b-2). In gebieden waar lodinggegevens ontbraken (midden en rechtsboven Markermeer) is de bodem aangevuld met gegevens van omliggende gebieden. De resolutie van de bodem in Delft2D bedraagt 125 m bij 125 m voor het Markermeer en 50 m bij 50 m voor Gooi- en Eemmeer.

In de schematisatie van Delft2D zijn uitvoerlocaties gedefinieerd. In vergelijking met het IJsselmeer liggen deze locaties niet aan maar op een afstand uit de teen van de dijk. Deze afstand wordt bepaald door de grootte van het bodemrooster. Voor het Markermeer liggen de uitvoerlocaties op een afstand van ca. 275 m uit de teen van de dijk en voor Gooi- en Eemmeer van ca. 125 m. De onderlinge afstand tussen de uitvoerpunten is voor het hele Markermeer gelijk en bedraagt ca. 200 m (WL|Delft Hydraulics, 1997, fase 1b-2).

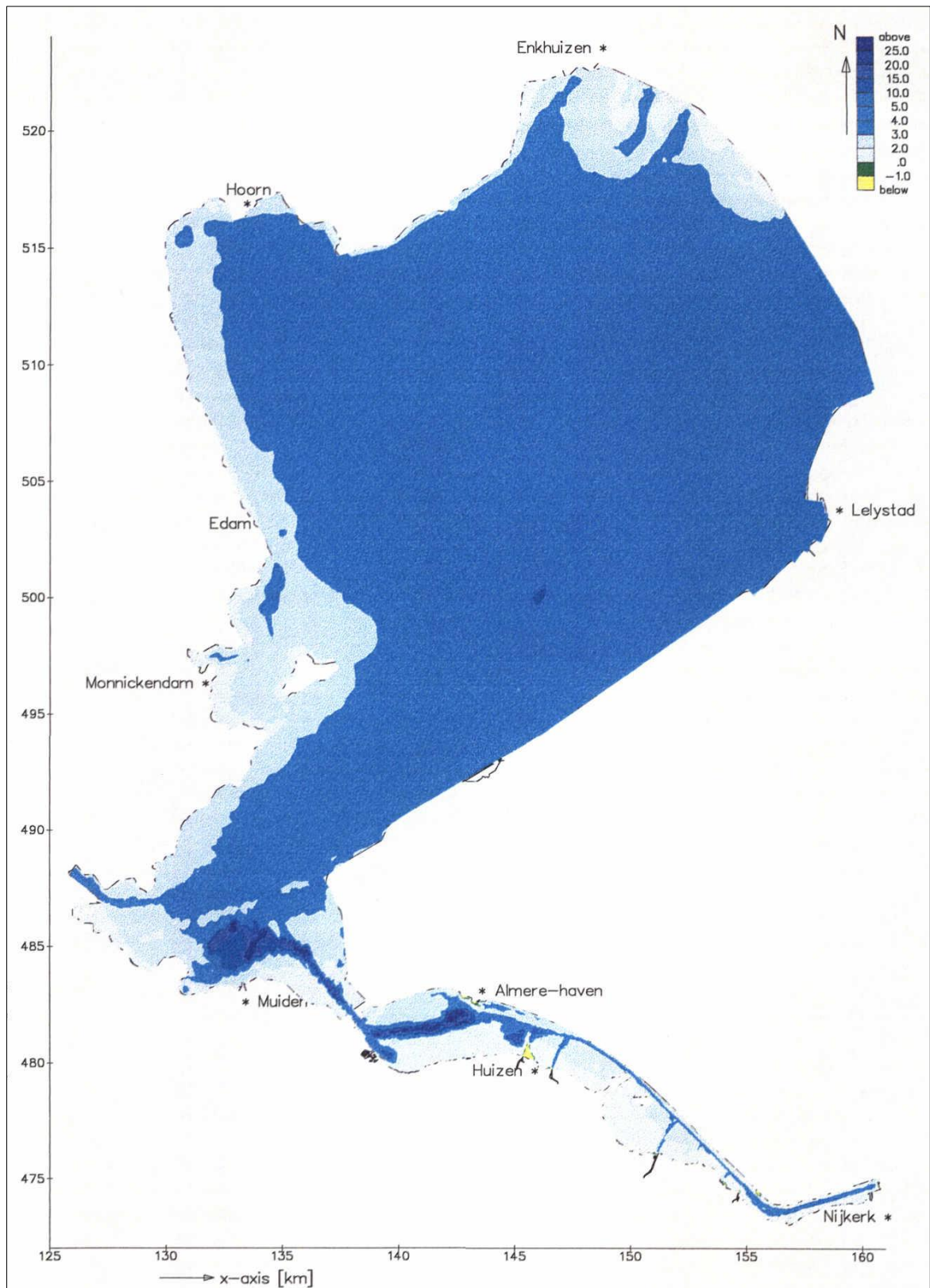
Met het Delft2D model zijn modelberekeningen gemaakt voor combinaties van windsnelheden, windrichtingen en Markermeerpeilen zoals weergegeven in Tabel 4.12. In totaal zijn er 216 berekeningen gemaakt bestaande uit combinaties van 12 windrichtingen, 6 windsnelheden en 3 Markermeerpeilen.

De berekeningen zijn uitgevoerd met open water windsnelheden. De omzetting van potentiële windsnelheid naar open water windsnelheid is gebeurd volgens een enigszins afwijkende methodiek, zoals beschreven in (WL|Delft Hydraulics, 1997, fase 1b-3) en (de Waal, 2003): een mengvorm van transformatie via meso- en macro-niveau.

In de productieberekeningen is het tijdsverloop van de windsnelheid geschematiseerd als een trapezium, met een duur van de voorflank van 9 uur en een duur van de top van 4 uur. De achterflank van de wind is in de productieberekeningen buiten beschouwing gelaten. Afhankelijk van de windrichting kan er een draaiing van de wind in de tijd plaatsvinden volgens Tabel 4.13. Details met betrekking tot deze keuzes zijn te vinden in WL|Delft Hydraulics, 1997, fase 1b-4).



Figuur 4.22 Rekenrooster Delft2D model voor het Markermeer zoals ontwikkeld en gebruikt in OOM-studie (WL/Delft Hydraulics, 1997, fase 1b-2).



Figuur 4.23 Bodemligging Delft2D model voor het Markermeer zoals ontwikkeld en gebruikt in OOM-studie (WL|Delft Hydraulics, 1997, fase 1b-2).

Tabel 4.12 Stochastwaardecombinaties voor de productieberekeningen waterstanden Markermeer (WL|Delft Hydraulics, 1997, fase 1b-4).

Meerpeil	Westelijke richtingen		Oostelijke richtingen	
	Wind, Schiphol		Wind, Schiphol	
	snelheid U_p	richting	snelheid U_p	richting
[m+NAP]	[m/s]	[°N]	[m/s]	[°N]
-0.4	22	210	15	0
0.3	28	240	20	30
1.3	33	270	23	60
	36	300	26	90
	39	330	28	120
	42		30	150
				180
3	6	5	6	7
	30		42	
			Totaal	216

De berekeningen met Delft2D zijn uitgevoerd met ruimtelijk variabele windvelden (WL|Delft Hydraulics, fase 1b-3, 1997). De schuifspanning die de wind op het wateroppervlak uitoefent, is berekend met behulp van een variabele windschuifspanningscoëfficiënt C_d conform (Bak en Vlag, 1999). Deze is geïllustreerd in Figuur 3.2.

Tabel 4.13 Stormduur en stormverloop OOM-studie en HR-2006 (WL|Delft Hydraulics, 1997, fase 1b-4)

Voorflank	Duur	9 uur
	winddraaiing	39,6 graden
	Interpolatie winddraaiing	Vectorieel
	Start windsnelheid	1 m/s
	Eind windsnelheid	Piekwindsnelheid
Piek	Duur	4 uur
	winddraaiing	4,4 graden
	Interpolatie winddraaiing	Vectorieel
	Start windsnelheid	Piekwindsnelheid
	Eind windsnelheid	Piekwindsnelheid
Achterflank	Duur	n.v.t
	winddraaiing	n.v.t
	Interpolatie winddraaiing	n.v.t
	Start windsnelheid	n.v.t
	Eind windsnelheid	n.v.t
Windsnelheid	Ruimtelijke verdeling	Macro/meso windsnelheid

4.6.2.2 IJburg en Eem

Voor IJburg en de Eem is ten behoeve van HR-2006 een WAQUA modelschematisatie opgezet. De basis voor deze schematisatie is de Delft2D schematisatie voor het Markermeer, Gooi- en Eemmeer (Paragraaf 4.6.2.1). In het kader van HR-2006 is deze WAQUA schematisatie omgezet in Baseline en uitgebreid met de Eem. De omgeving van IJburg is meer gedetailleerd opgenomen in de schematisatie. Concreet zijn de volgende onderdelen/elementen geactualiseerd en verbeterd ten opzichte van de oorspronkelijke

schematisatie voor het Markermeer, zie (RWS-RIZA, 2007). De nummering komt overeen met de nummers in Figuur 4.24, linker paneel:

1. De eilanden van IJburg zijn als hoogwater vrije eilanden opgenomen in de schematisatie,
2. De scheepvaartgeleidedam ten noorden van IJburg is als een overstroombare dam opgenomen in de schematisatie,
3. Het schiereiland Zeeburg is als een hoogwater-vrij eiland geschematiseerd in het model,
4. De buitendijkse gebieden langs het Markermeer zijn opgenomen in de schematisatie. De regionale keringen die deze gebieden omsluiten zijn als overstroombare 'schotjes' opgenomen in de schematisatie,
5. De bodemhoogte van het Markermeer is geactualiseerd met lodinggegevens uit de periode 1996 tot 2004 (RWS, IJG, 2005),
6. De celgrootte van WAQUA is voor de gehele omgeving van IJburg sterk verkleind ten opzichte het oorspronkelijke Delft2D model voor het Markermeer.

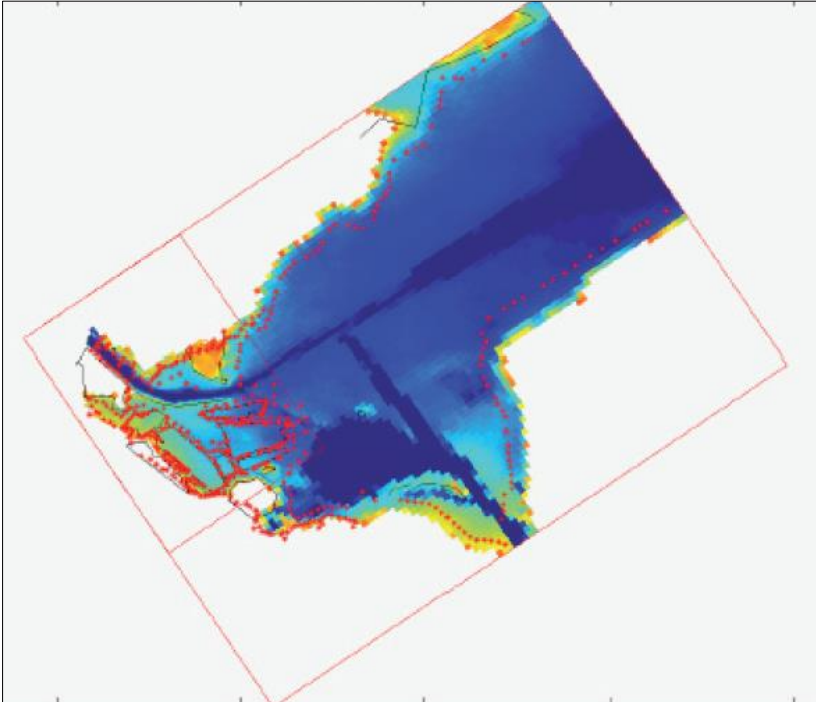


Figuur 4.24 IJburg (links) en de Eem (rechts), inclusief nummers geactualiseerde onderdelen in WAQUA Markermeer (RWS-RIZA, 2007).

Ten behoeve van de Eem zijn de volgende aanpassingen doorgevoerd:

1. De Eem inclusief de omliggende buitendijkse gebieden zijn toegevoegd aan de schematisatie, de grens ligt bij Amersfoort,
2. De regionale keringen langs de Eem zijn overstroombaar gemaakt,
3. De bodemhoogte is geactualiseerd zodat deze representatief is voor 2004,
4. De bodemhoogte van de gehele Eem is gezet op -3,8 m+NAP,

Voor IJburg en de Eem zijn uitvoerlocaties gedefinieerd en opgenomen in de WAQUA schematisatie (en ook in SWAN, zie paragraaf 5.4.3. In tegenstelling tot het Markermeer, waar de afstand tussen een uitvoerlocatie en de teen van de waterkering ca. 200 m bedraagt, liggen de uitvoerlocaties bij IJburg en de Eem, afhankelijk van de situatie, tussen 15 en 50 m van de teen van de waterkering. Figuur 4.25 toont voor IJburg de ligging van de uitvoerlocaties.



Figuur 4.25 Ligging uitvoerlocaties (rode punten) bij IJburg (RWS-RIZA, 2007).

4.6.2.3 Productieberekeningen

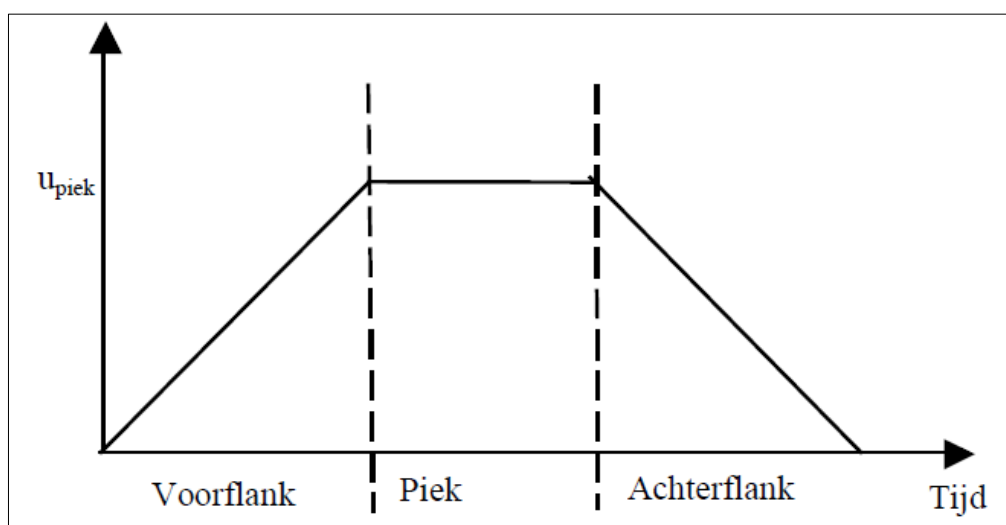
Voor IJburg en de Eem zijn productieberekeningen uitgevoerd met WAQUA voor dezelfde combinaties van windsnelheden, windrichtingen en meerpeilen als voor het Markermeer, zoals weergegeven in Tabel 4.12.

In de productieberekeningen met WAQUA voor IJburg en de Eem is de windsnelheid anders geschematiseerd dan voor het Markermeer (RWS-RIZA, 2007). Het verschil betreft voornamelijk de achterflank van de storm. Andere verschillen zijn weergegeven in Tabel 4.14.

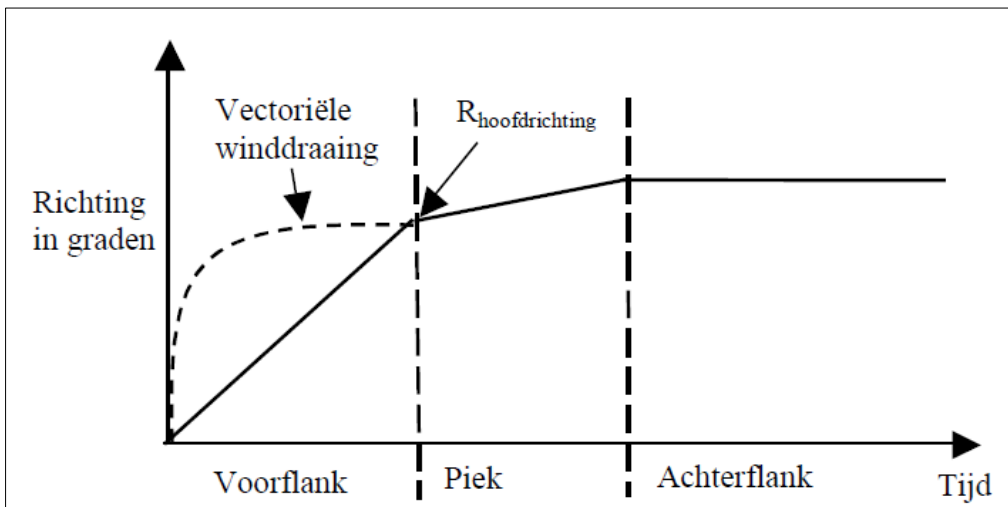
Tabel 4.14 Stormduur en stormverloop Markermeer (OOM studie) en IJburg en Eem (HR-2006).

		Markermeer (OOM-studie)	IJburg en Eem (HR-2006)
Voorflank	Duur	9 uur	9 uur
	Winddraaiing	39,6 graden	39,6 graden
	Interpolatie winddraaiing	Vectorieel	Graden
	Start windsnelheid	1 m/s	0 m/s
	Eind windsnelheid	Piekwindsnelheid	Piekwindsnelheid
Piek	Duur	4 uur	4 uur
	Winddraaiing	4,4 graden	4,4 graden
	Interpolatie winddraaiing	Vectorieel	Graden
	Start windsnelheid	Piekwindsnelheid	Piekwindsnelheid
	Eind windsnelheid	Piekwindsnelheid	Piekwindsnelheid
Achterflank	Duur	n.v.t	9 uur
	winddraaiing	n.v.t	0 graden
	Interpolatie winddraaiing	n.v.t	Graden
	Start windsnelheid	n.v.t	Piekwindsnelheid
	Eind windsnelheid	n.v.t	0 m/s
Windsnelheid	Ruimtelijke verdeling	Macro/meso windsnelheid	Constant met uitzondering van het traject Hollandse Brug naar Nijkerk (lineair afnemend van 100% naar 90%)

Het gebruikte stormverloop voor de productieberekeningen met WAQUA voor het gebied van IJburg en de Eem is afgebeeld in Figuur 4.26. Figuur 4.27 geeft in grafische vorm de winddraaiing weer.

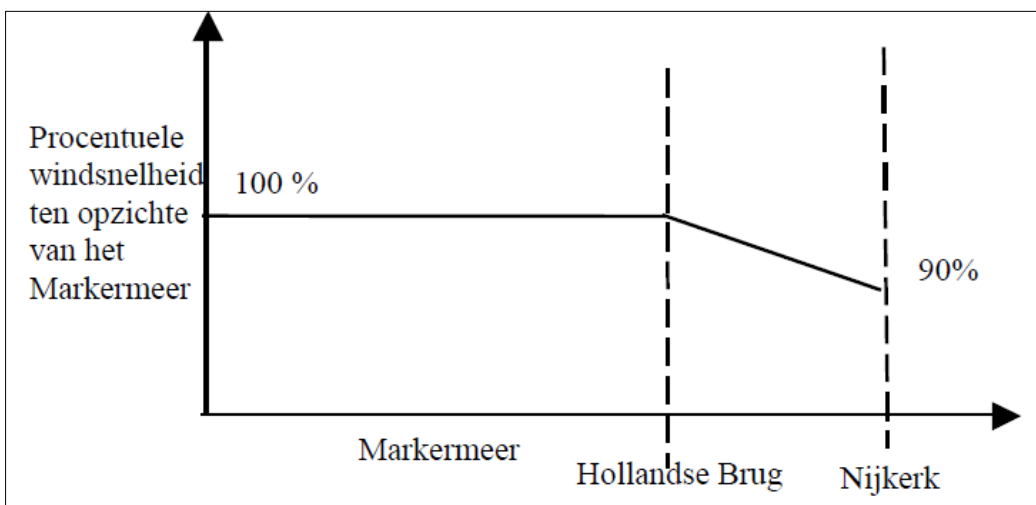


Figuur 4.26 Schematische weergave stormverloop productieberekeningen IJburg en Eem (RWS, 2007).



Figuur 4.27 Winddraaiing productieberekeningen IJburg en Eem (RWS, 2007)

De berekeningen met WAQUA zijn uitgevoerd met een ruimtelijk variërende windsnelheid. De windsnelheid is boven het Markermeer ruimtelijk uniform, maar vanaf de Hollandse Brug neemt de windsnelheid lineair af tot 90% bij Nijkerk. De afname van de windsnelheid boven het Markermeer is afgebeeld in Figuur 4.28.



Figuur 4.28 Ruimtelijke variatie van de windsnelheid zoals opgelegd in WAQUA voor IJburg en de Eem (RWS, 2007).

Voor de productieberekeningen is naast een representatief windveld ook een afvoer van de Eem nodig. Gezien de beperkte invloed van de Eem op de maximale waterstanden is de Eemafvoer niet als afzonderlijke stochast gemodelleerd die gevarieerd moet worden. De afvoer van de Eem heeft in de productieberekeningen een vaste waarde gekregen. Deze waarde komt overeen met een afvoer die eens per jaar wordt overschreden en bedraagt $75 \text{ m}^3/\text{s}$ (RWS-RIZA, 2007).

4.7 Waterstanden Kustgebieden - harde keringen

4.7.1 Inleiding

Voor de harde keringen in kustgebieden wordt in feite geen fysische relatie bepaald tussen de lokale waterstand en basisstochasten, maar wordt de statistiek van de lokale waterstand bepaald uit interpolatie van de waterstandstatistiek op referentielocaties. In die zin vinden voor deze watersystemen geen productieberekeningen fysica plaats. De genoemde interpolatie vindt ook niet vooraf plaats, maar binnen het probabilistisch model HydraRing. In dat licht zou de behandeling van de waterstanden voor deze watersystemen thuis horen bij de bespreking van het probabilistisch model (paragraaf 9.1). In dit rapport is er echter voor gekozen de behandeling van de waterstanden bij elkaar in onderhavig hoofdstuk te houden.

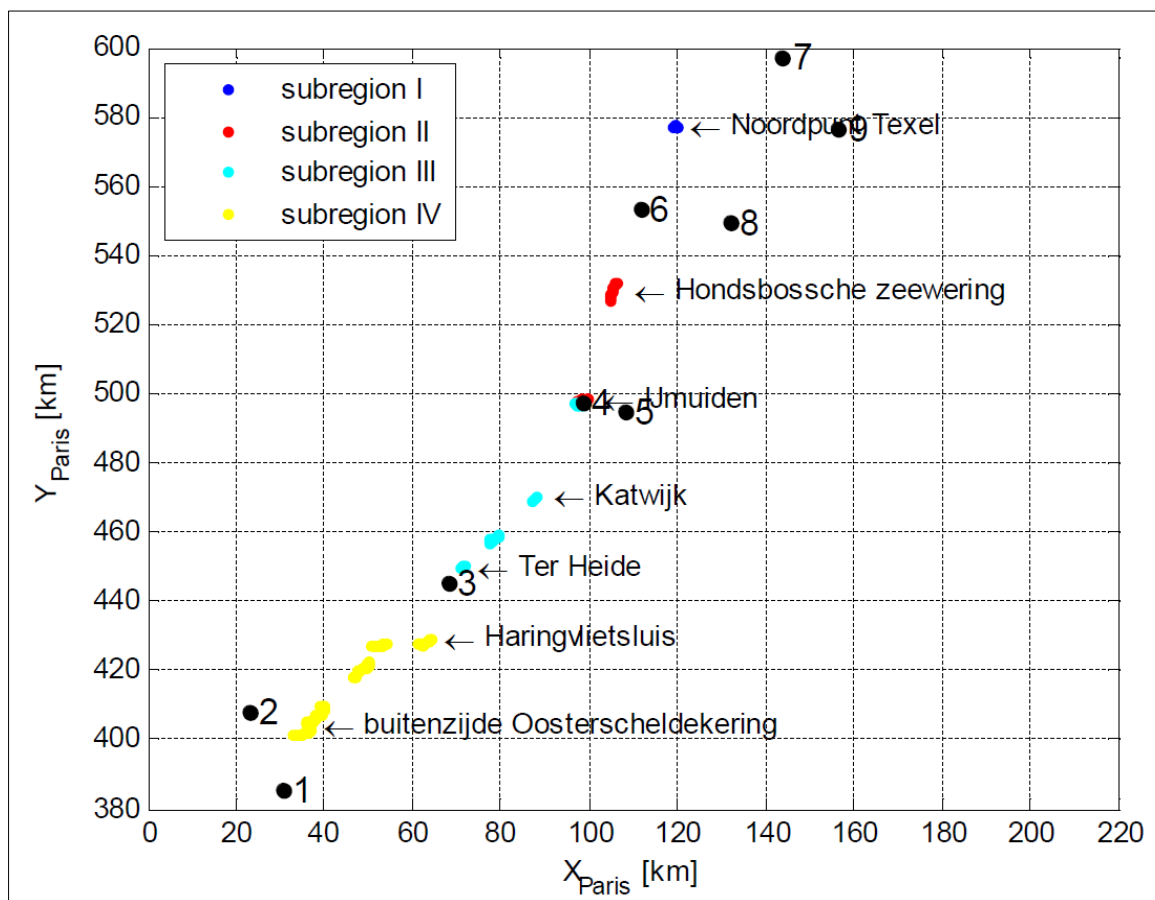
In onderstaande paragrafen beschrijven we per regio de keuze van de steunpunten.

4.7.2 Hollandse kust (regio 11, 12, 13)

De triangulaire interpolatie voor de locaties langs de Hollandse kust wordt bepaald op basis van de steunpunten (stations) gegeven in Tabel 4.15. Het gebied wordt opgedeeld in 4 deelgebieden zoals beschreven in Figuur 4.29 en Tabel 4.16. De keuze van de drie steunpunten per deelgebied wordt mede bepaald door de wens om het verloop van de basispeilen (Paragraaf 6.5) zo goed mogelijk te reproduceren. In een aantal gevallen is daarbij gebruik gemaakt van zogenoemde 'virtuele' stations, zoals het virtuele station IJmuiden. De waterstand in een virtueel station wordt onder alle omstandigheden gelijk gesteld aan de waterstand in het 'werkelijk' station. De waterstand bij het virtuele station IJmuiden bijvoorbeeld is gelijk aan de waterstand bij station IJmuiden.

Tabel 4.15 Gekozen steunpunten voor de triangulaire interpolatie van lokale waterstanden Hollandse kust (regio 11 t/m 13)

Nummer	Steunpunt	x-coördinaat	y-coördinaat
1	Vlissingen	30480	385220
2	OS 11	23013	407778
3	Hoek van Holland	67930	445000
4	IJmuiden	98430	947500
5	IJmuiden virtueel	108133	495081
6	Den Helder	111850	553230
7	Terschelling West	143870	597420
8	Den Oever	132030	549440
9	Harlingen	156480	576550



Figuur 4.29 Indeling Hollandse kust in 4 deelgebieden voor triangulaire interpolatie. Station nummers corresponderen met nummers in Tabel 4.16.

Tabel 4.16 Deelgebieden Hollandse kust en gekozen steunpunten voor triangulaire interpolatie lokale waterstanden.

Deelgebied	Steunpunt 1	Steunpunt 2	Steunpunt 3
I	Den Oever	Harlingen	Terschelling West
II	IJmuiden	Den Helder	IJmuiden virtueel
III	Hoek van Holland	IJmuiden	Den Helder
IV	Vlissingen	OS 11	Hoek van Holland

4.7.3 Waddenzee (regio 9, 10)

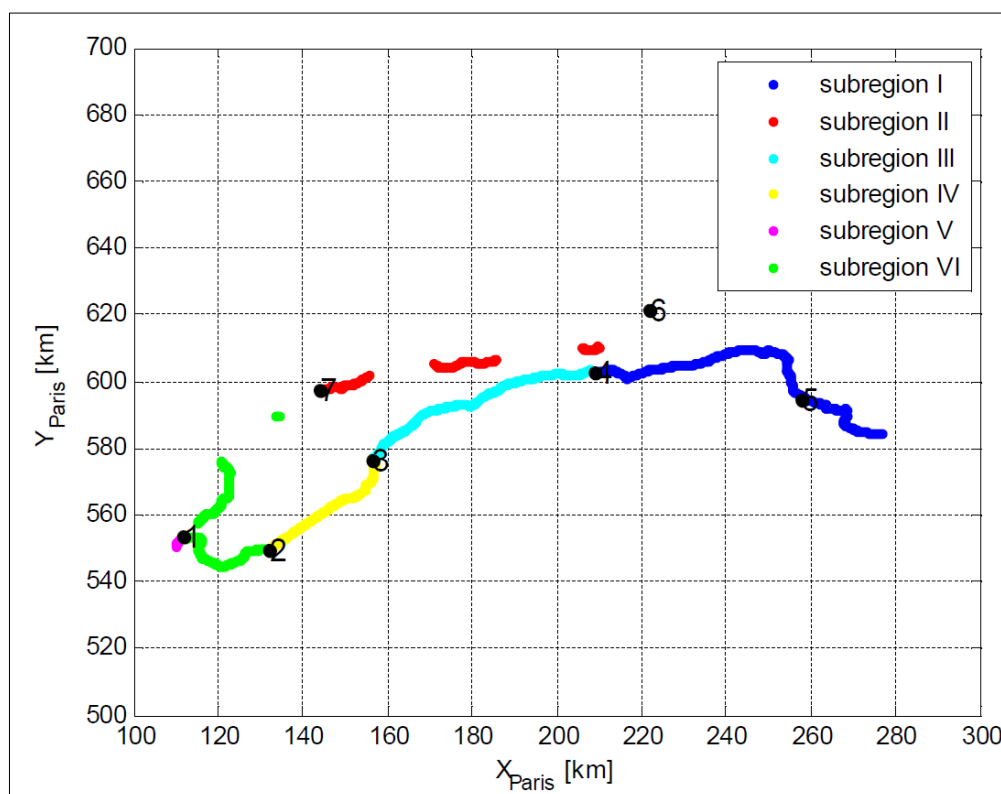
De steunpunten van de triangulaire interpolatie voor de locaties langs de Waddenzee zijn weergegeven in Tabel 4.17. Om de triangulaire interpolatie te verrichten wordt het gebied van de Wadden opgedeeld in 7 deelgebieden. Per deelgebied gelden drie steunpunten; deze steunpunten zijn weergegeven in Figuur 4.30 en Tabel 4.18.

Tabel 4.17 Gekozen steunpunten voor de triangulaire interpolatie van lokale waterstanden in de Waddenzee (regio 9 en 10)

Nummer	Steunpunt	x-coördinaat	y-coördinaat
1	Den Helder	111850	553230
2	Den Oever	132030	549440
3	Harlingen	156480	576550
4	Lauwersoog	208850	602790
5	Delfzijl	258000	594430
6	Huibertgat	221990	621330
7	Terschelling West	143870	597420

Tabel 4.18 Deelgebieden Waddenzee en corresponderende steunpunten voor de triangulaire interpolatie van lokale waterstanden.

Deelgebied	Steunpunt 1	Steunpunt 2	Steunpunt 3
I	Lauwersoog	Delfzijl	Huibertgat
II	Huibertgat	Lauwersoog	Terschelling West
III	Harlingen	Lauwersoog	Terschelling West
IV	Harlingen	Den Oever	Terschelling West
V	Den Helder	Den Helder	Den Helder
VI	Harlingen	Den Oever	Terschelling West



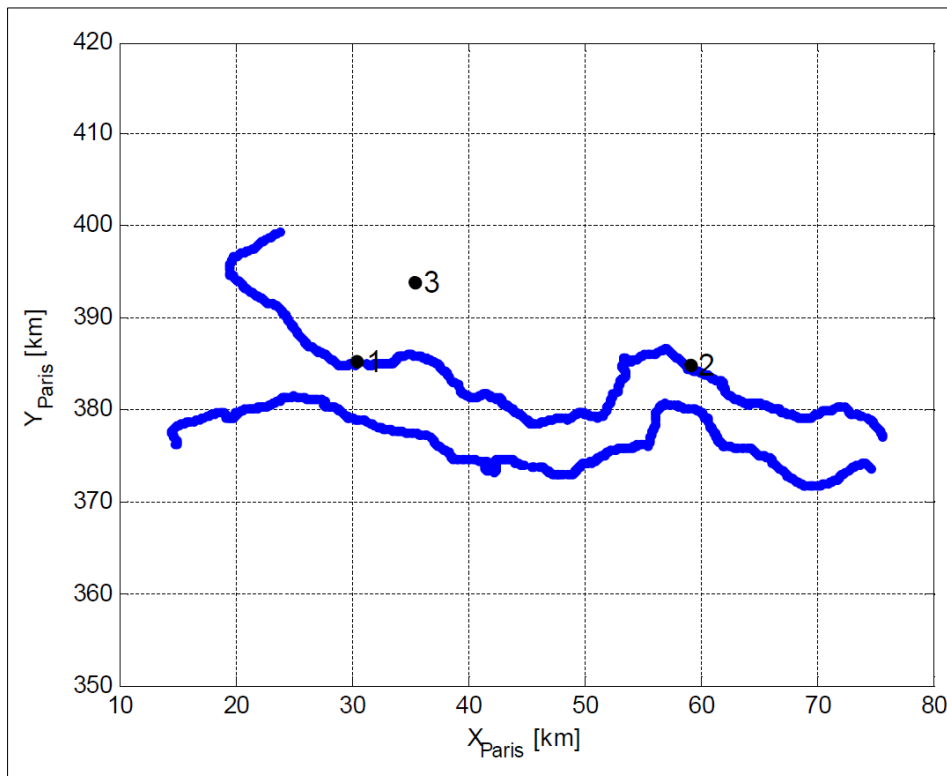
Figuur 4.30 Deelgebieden Waddenzee en gekozen steunpunten voor triangulaire interpolatie waterstanden

4.7.4 Westerschelde (regio 15)

Voor de Westerschelde zijn twee hoofdstations beschikbaar waarvoor marginale statistiek voorhanden is, te weten Vlissingen en Hansweert. Om de oriëntatie/verhanglijn van het waterstandsverloop te kunnen forceren is een derde, virtueel, station gedefinieerd, ten Noordoosten van Vlissingen. De marginale statistiek van het virtuele station is beschreven in Diermanse et al (2016).

Tabel 4.19 Steunpunten Westerschelde voor de triangulaire interpolatie van lokale waterstanden

Nummer	Station	x-coördinaat	y-coördinaat
1	Vlissingen	30480	385220
2	Hansweert	59050	384960
3	Vlissingen-virtueel	35480	393880



Figuur 4.31 Ligging steunpunten Westerschelde, zie ook Tabel 4.19.

4.8 Waterstanden Oosterschelde (regio 14)

Voor een groot aantal scenario's van falende schuiven van de Oosterscheldekering zijn berekeningen van de waterstand gemaakt met IMPLIC (RWS-Bouwdienst, 2008). Door RWS (Krijn Saman) zijn de volgende gegevens aangeleverd:

- Database met rekenresultaten van waterstanden op IMPLIC stations (FSmax422)
- Tabel met correctiecoëfficiënten
- Tabel met kansen op voorkomen van sluitscenario's
- Tabel met kansen op sluiting (reguliere sluiting of noodsluiting)

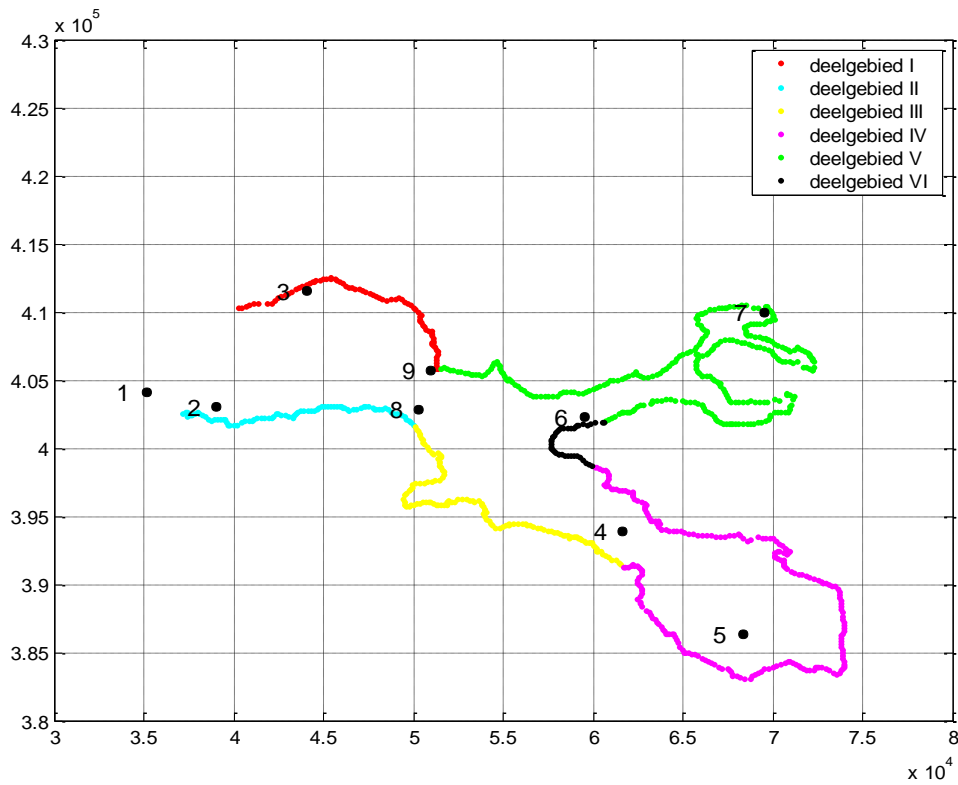
De FSmax422 database bestaat uit 18 datafiles. Voor elk van de negen sluitscenario's (zie Tabel 6.22) is voor de strategiesluiting enerzijds en noodsluiting anderzijds een aparte database gemaakt. Vervolgens is per database per IMPLIC locatie de waterstand gegeven voor de combinaties van 5 stormduren, 3 faseverschuivingen tussen astronomisch getij en stormopzet, 51 waterstanden bij OS11, 5 windsnelheden en 12 windrichtingen. De beschouwde waarden staan vermeld in Tabel 4.20. Deze waarden zijn gerapporteerd in de Tabellen 1 tot en met 6 van RWS-Bouwdienst (2008).

Tabel 4.20 Stochastwaardencombinaties voor IMPLIC berekeningen Oosterschelde.

Zee-waterstand	Wind		Fase-verschui-ving	Storm-duur	SVK	
	OS11	snelheid U_p			richting	# falende schuiven
[m+NAP]	[m/s]	[°N]	[min]	[uur]	[-]	[-]
1.5	10	30	-260	20	0	strategiesluiting
1.6	20	60	0	40	1	noodsluiting
1.7	30	90	260	60	2	
...	40	120		80	3-5	
6.5	50	150		100	6-10	
		180			kwart	
		210			helft	
		240			driekwart	
		270			heel	
		300				
		330				
		360				
51	5	12	3	5	1+8	2
					17	
					Totaal	780300

Dit maakt dat de database is verkregen door $5 \times 3 \times 51 \times 5 \times 12 = 45.900$ verschillende "natuurscenario's" te beschouwen voor elk van de 17 combinaties van faalscenario's en type sluiting (voor het falen van de gehele kering is het type sluiting niet relevant). In totaal zijn dus 780300 combinaties met IMPLIC doorgerekend. In de IMPLIC database zijn de berekende waterstanden in de IMPLIC stations opgeslagen. In Tabel 8.7 zijn de IMPLIC stations weergegeven.

De IMPLIC databases worden uitgeleverd met correctiecoëfficiënten, zie RWS-Zeeland (2010, hoofdstuk 7). Deze correctiecoëfficiënten moeten toegepast worden op de IMPLIC resultaten in de FSmax422 database. De waterstand op een willekeurige uitvoerlocatie wordt vervolgens verkregen door triangulaire interpolatie tussen drie IMPLIC stations. Hierbij wordt de Oosterschelde ingedeeld in zes verschillende deelgebieden. Figuur 4.32 toont deze indeling. Hierin zijn ook de steunpunten die worden gebruikt voor de interpolaties weergegeven. Tabel 4.21 toont per deelgebied de gehanteerde drie steunpunten. Merk op dat steunpunt 1 buiten het gebied ligt en niet (meer) wordt gebruikt.



Figuur 4.32 Indeling in deelgebieden inclusief de 9 steunpunten voor de triangulaire interpolatie.

Tabel 4.21 Steunpunten per deelgebied in de Oosterschelde (zie ook Figuur 4.32)

Deelgebied	Steunpunten		
I	2	3	9
II	2	8	9
III	4	8	9
IV	4	5	6
V	6	7	9
VI	4	6	9

4.9 Waterstanden Duinen (regio 16)

Voor het watersysteem duinen zijn geen productieberekeningen voor lokale waterstanden gemaakt. De waterstand op de gebiedsrand geldt zowel als basisstochast als als hydraulische belastingparameter voor het toetsspoor duinafslag.

5 Productieberekeningen fysica: golfparameters

5.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft de golfparameters binnen WBI-2017. De golfcondities bij de waterkering volgen uit modelberekeningen met het golfmodelmodel SWAN (www.swan.tudelft.nl), HISWA of berekeningen met de Bretschneiderformule (TAW, 1989). SWAN wordt toegepast voor kust, meren en bredere wateren van het rivierengebied. De formule van Bretschneider wordt toegepast voor smalle wateren van het rivierengebied en de Eem. Voor WBI-2017 zijn evenals voor de waterstanden, enkel voor de watersystemen waar Ruimte voor de Rivier maatregelen van toepassing de golfparameters opnieuw bepaald. Uitzondering hierop vormt het gebied van het Ketelmeer en Vossemeer. Voor dit gebied zijn in WBI-2017 namelijk nieuwe SWAN berekeningen uitgevoerd.

Voor de kust en meren (IJsselmeer en Markermeer) zijn in WBI-2017 geen nieuwe productieberekeningen met SWAN gemaakt. De golfparameters voor deze watersystemen zijn overgenomen uit de databases van WTI-2011/HR-2006. De golfparameters voor het rivierengebied inclusief berging- en overgangsgebieden zijn opnieuw berekend, met uitzondering van regio 17 (Europoort). De berekeningen zijn uitgevoerd met SWAN voor de bredere wateren van het rivierengebied en Bretschneider voor de smalle wateren. De bredere wateren omvatten ondermeer 1) Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch, 2) Zwarte Meer en 3) Europoort.

5.2 Golfcondities smalle wateren rivierengebied

De golfparameters in de smalle wateren van het rivierengebied worden berekend met behulp van de formule van Bretschneider (TAW, 1989). Voor toepassing van deze formule dienen bij de teen van de waterkering bekend te zijn:

- De representatieve waterdiepte, op basis van de lokale waterstand en een representatief bodemniveau
- De effectieve strijklengte
- De open water windsnelheid

Waarden voor het representatieve bodemniveau en de effectieve strijklengte zijn in WBI-2017 voor alle uitvoerlocaties in het rivierengebied en 16 windrichtingen bepaald. Ter bepaling van de representatieve waterdiepte en effectieve strijklengte is gebruik gemaakt van de Baseline schematisaties van de betreffende gebieden. De volgende gebieden zijn beschouwd:

- Rijntakken,
- Maas,
- Vechtdelta (exclusief Zwarte Meer)
- IJsseldelta,
- Benedenrivieren (exclusief Europoort, Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch),
- Eemvallei

De strijklengtes zijn bepaald met behulp van de shapes, waarbij de buiten kruinlijnen zijn gevolgd. Daarbij is als (conservatief) uitgangspunt gehanteerd om hoogwatervrije gebieden en obstakels niet te verdisconteren, zie (Deltares, 2015h).

Met de afgeleide representatieve waterdieptes en effectieve strijklengtes zijn testberekeningen uitgevoerd met de Bretschneider formule. Deze testberekeningen zijn op verschillende manieren gecontroleerd en zijn goed bevonden, zie voor meer details (Deltares, 2015h).

5.3 Golfcondities bredere wateren rivierengebied

De bredere wateren van het rivierengebied omvatten de volgende wateren:

- Zwarte Meer
- Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch (HHDB)
- Europoortgebied

Omdat er voor de productieberekeningen voor deze gebieden verschillende modelschematisaties danwel verschillende randvoorwaarden (stochastcombinaties) zijn gehanteerd, behandelen we deze watersystemen separaat.

Voor het Ketelmeer/Vossemeer, Zwarte Meer en het gebied van de Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch zijn nieuwe berekeningen gemaakt in WBI-2017. De golfparameters voor het Europoortgebied zijn overgenomen uit WTI-2011.

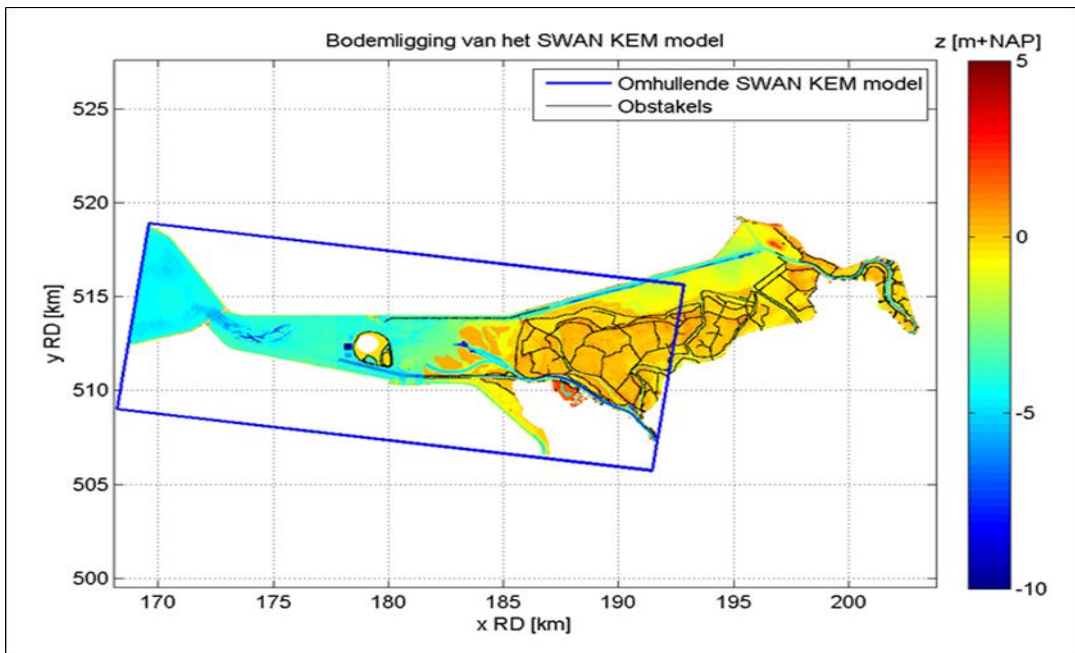
5.3.1 Zwarte Meer

Het Zwarte Meer maakt onderdeel uit van de Vechtdelta en is het gebied dat ligt tussen de Ramspolkering en de monding van het Zwarte Water, zie Figuur 5.1.

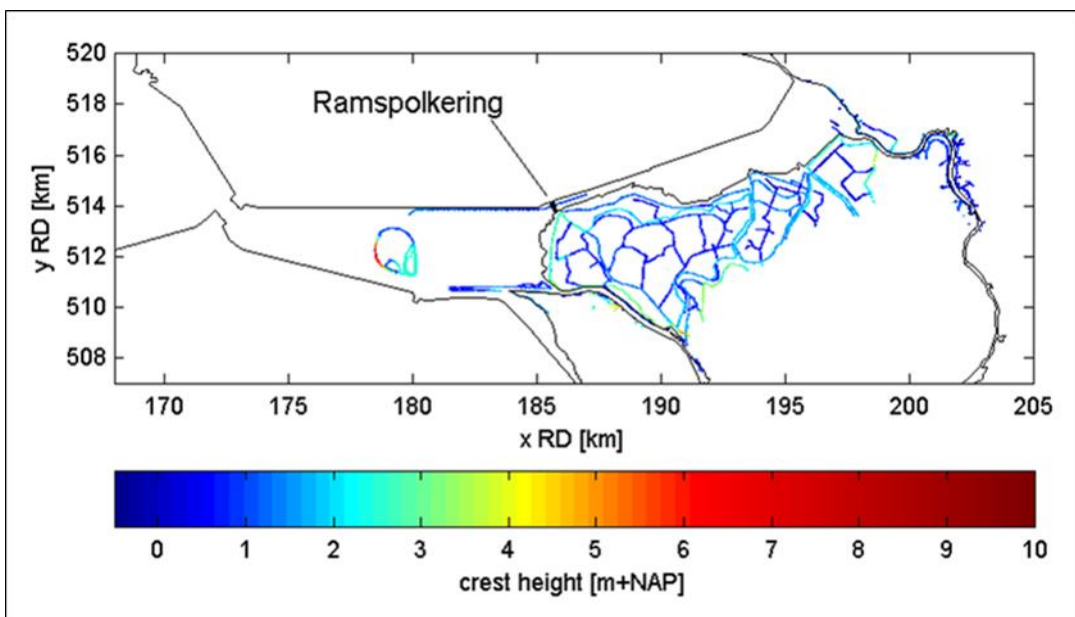


Figuur 5.1 Ligging van het Zwarte Meer, Zwarte Water en Kampereiland. Bron: Google Earth.

In WBI-2017 is een nieuw SWAN model opgezet voor het Zwarte Meer. Dit model maakt onderdeel uit van een groter model dat ook het Ketelmeer en Vossemeer omvat. De bodemligging en rekenrooster zijn op identieke wijze tot stand gekomen als in WTI-2011, obstakels zijn ook op dezelfde manier gemodelleerd, zie voor details (Klein, 2011). Figuur 5.2 en Figuur 5.3 tonen de bodemligging ten opzichte van NAP respectievelijk de ligging en de hoogte van de obstakels in de SWAN schematisatie voor het Zwarte Meer.



Figuur 5.2 Bodemligging (t.o.v. NAP) Zwarte Meer (inclusief Ketelmeer en Vossemeer)



Figuur 5.3 Ligging en hoogte van obstakels in SWAN modelschematisatie voor Zwarte Meer (inclusief Ketelmeer en Vossemeer).

Met het SWAN model voor het Zwarte Meer zijn productieberekeningen gemaakt voor de stochastcombinaties gegeven in Tabel 5.1. In tegenstelling tot het Ketelmeer en Vossemeer zijn de productieberekeningen uitgevoerd met uniforme waterstanden in plaats van waterstandsvelden uit productieberekeningen met WAQUA-IJVD. Het bereik van de waterstand bevat acht waarden variërend tussen -0,4 en 6,0 m+NAP.

Tabel 5.1 Stochastwaardecombinaties voor de productieberekeningen golven met SWAN voor het Zwarte Meer

Waterstand	Wind, Schiphol	
	snellheid U_p	richting
[m+NAP]	[m/s]	[°N]
-0.4	10	22.5
0.1	16	45.0
0.6	22	67.5
1.1	27	90.0
1.6	32	112.5
2.5	37	135.0
3.5	42	157.5
6.0		180.0
		202.5
		225.0
		247.5
		270.0
		292.5
		315.0
		337.5
		360.0
8	7	16
Totaal		896

De in Tabel 5.1 genoemde windsnelheden betreffen potentiële windsnelheden tijdens de piek van de storm. In de SWAN berekeningen zijn deze potentiële windsnelheden vertaald naar open water windsnelheden volgens Tabel 3.1. Stroming is buiten beschouwing gelaten. De stationaire SWAN berekeningen resulteren in golfparameters op alle uitvoerlocaties zoals beschreven in Paragraaf 4.5.5. De berekeningen zijn uitgebreid gecontroleerd op zowel fysische als numerieke juistheid. De controles hebben geen noemenswaardige problemen aan het licht gebracht. Slechts 3 locaties zijn afgekeurd. Details met betrekking tot de uitgevoerde controles zijn te vinden in (Deltares, 2016d).

5.3.2 Haringvliet, Hollandsch Diep en Biesbosch (HHDB)

Het Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch vormen een aaneengesloten gebied in de Benedenrivieren. In het Westen wordt het Haringvliet begrensd door de Haringvlietdam. Het Haringvliet staat ter hoogte van de Haringvlietbrug in open verbinding met het Hollandsch Diep. Ten Oosten van de Moerdijkbruggen komen de riviertak de Nieuwe Merwede en de riviertak de Amer samen in het Hollandsch Diep. De Biesbosch ligt ingesloten tussen deze twee riviertakken die beduidend smaller zijn dan het Hollandsch Diep. De golven op het Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch worden voornamelijk door lokale golfgroei bepaald. Figuur 5.4 geeft een overzicht van het gebied van het Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch. Golfdoordringing vanuit de riviertakken die in open verbinding staan met het

gebied van het Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesch is van ondergeschikte rol en is in de productieberekeningen buiten beschouwing gelaten (Deltares, 2016g).



Figuur 5.4 Gebied Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch

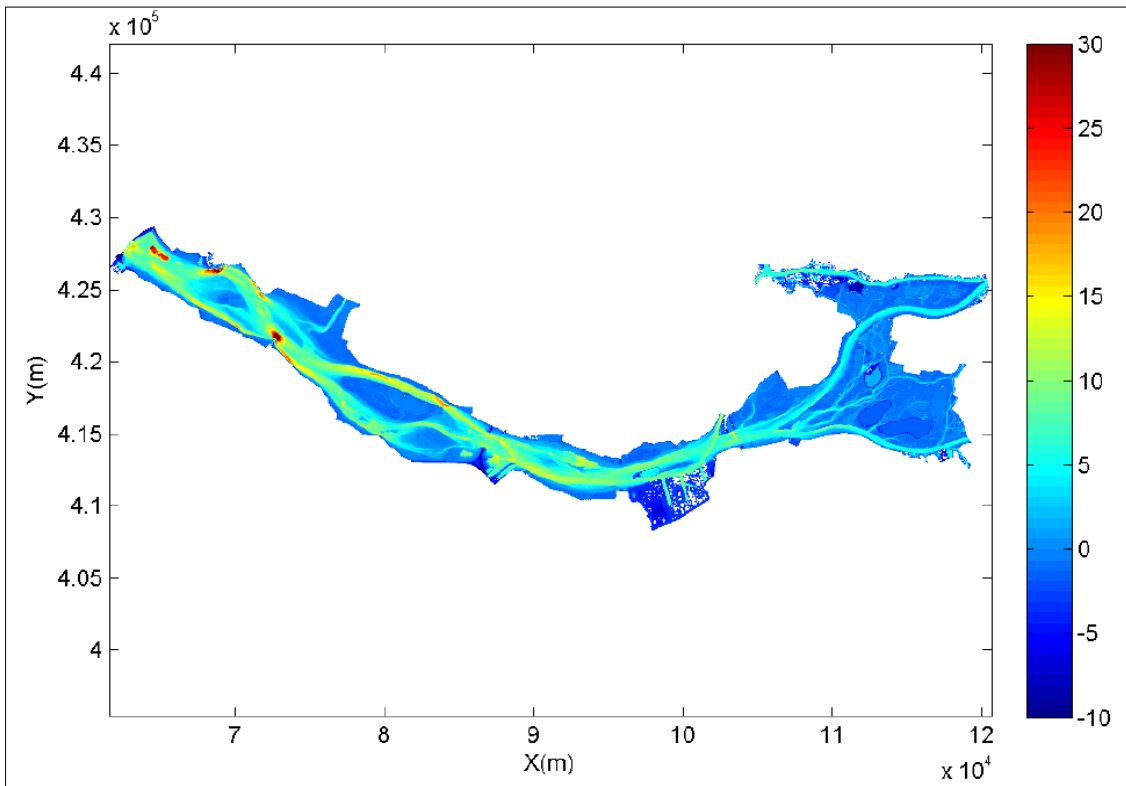
In het WBI-2017 project is een nieuw SWAN model, SWAN-HHDB, opgezet voor het gebied van het Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch; zie voor een beschrijving (Deltares, 2015e). De basis voor dit SWAN-HHDB model is het in WTI-2011 ontwikkelde model. Belangrijke verschillen met WTI-2011 vormen de bodemschematisatie en de expliciete verdiscontering van obstakels. Beiden zijn verkregen uit de Baseline database van WAQUA-RMM (Deltares, 2014c). Ook is de Noordwaard opgenomen in de schematisatie van het SWAN model. Details van het SWAN model zijn te vinden in Deltares (2015e). De numerieke en fysische instellingen zijn identiek aan de versie gehanteerd in WTI-2011 voor het IJsselmeer. De versie en numerieke en fysische en numerieke instellingen zijn gegeven in Paragraaf 5.4.1, zie Klein en Kroon (2011d). Figuur 5.5 toont de bodemligging van het SWAN-HHDB model.

Het rekenrooster van het SWAN-HHDB model is kromlijinig; dit rekenrooster is hetzelfde rooster als gebruikt in de WTI-2011 productieberekeningen met dit verschil dat het model is uitgebreid zodanig dat de Noordwaard nu onderdeel van het modelgebied uitmaakt. De karakteristieken van het rekenrooster zijn samengevat in Tabel 5.2.

Tabel 5.2 Karakteristieken van het SWAN-RMM rooster.

Cellen in x-richting	Cellen in y-richting	Totaal aantal cellen	Aantal actieve cellen	Minimale celgrootte [m]	Maximale celgrootte [m]
3424	907	3 105 568	1 003525	5	34

Met het SWAN-HHDB model zoals hierboven beschreven zijn productieberekeningen gemaakt voor de stochastcombinaties uit Tabel 5.3. Op de modelranden zijn geen golftrandvoorwaarden opgelegd omdat het effect hiervan klein wordt geacht. Dit houdt in dat voor het Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch alleen de lokale opgewekte golven worden beschouwd. Aan de westzijde van het modelgebied is dit een realistische aanname omdat de westrand samenvalt met de Haringvlietluizen (waarvan wordt aangenomen dat deze gesloten zijn bij de extreme weersomstandigheden van de productieberekeningen).



Figuur 5.5 Bodemligging SWAN-HHDB model WBI-2017 voor Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch.

Tabel 5.3 Stochastwaardecombinaties SWAN berekeningen Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch.

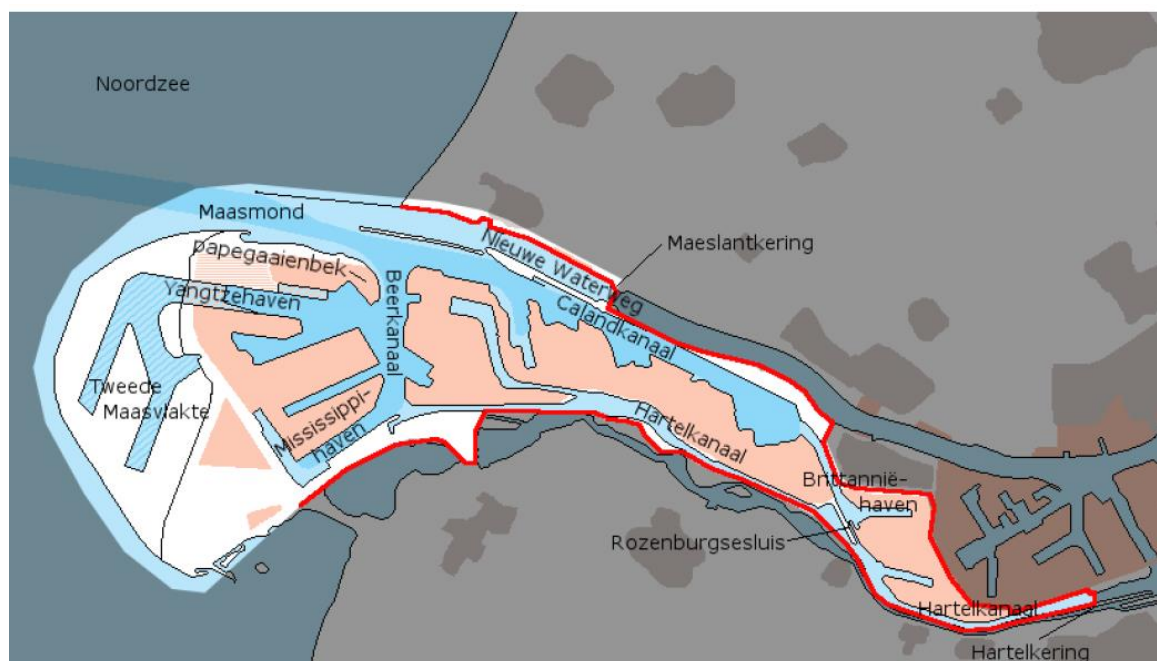
Waterstand	Westelijke richtingen		Oostelijke richtingen	
	Wind, Schiphol		Wind, Schiphol	
	snelheid U_p	richting	snelheid U_p	richting
[m+NAP]	[m/s]	[°N]	[m/s]	[°N]
-1.0	10	225.0	10	22.5
0.0	20	247.5	20	45.0
1.0	30	270.0	30	67.5
2.0	42	292.5	42	90.0
3.0	46	315.0		112.5
4.0		337.5		135.0
5.0		360.0		157.5
7.0				180.0
9.0				202.5
9	5	7	4	9
	35		36	
	Totaal			639

De berekeningen zijn uitgevoerd met uniforme waterstanden (in plaats van waterstandsvelden uit WAQUA-RMM). Stroming is niet meegenomen in de berekeningen. De in Tabel 5.3 genoemde windsnelheden betreffen potentiële windsnelheden tijdens de piek van de storm. In de SWAN berekeningen zijn deze potentiële windsnelheden vertaald naar open water windsnelheden volgens Tabel 3.1.

De SWAN berekeningen resulteren in golfparameters op de uitvoerlocaties zoals beschreven in Paragraaf 4.4.6. De berekeningen zijn uitgebreid gecontroleerd op zowel fysieke als numerieke juistheid. De controles hebben geen noemenswaardige problemen aan het licht gebracht. De controles hebben echter wel geleid tot afkeuring van de resultaten op een klein deel van de uitvoerlocaties (96 in totaal op een totaal aantal van 2065 locaties, dus minder dan 5%). Details met betrekking tot de uitgevoerde controles zijn te vinden in Deltares (2016g).

5.3.3 Europoortgebied

Het Europoortgebied is het gebied buiten de Europoortkering. In het Westen staat de Europoort via de Maasmond in open verbinding met de Noordzee. Richting het oosten splitst de Maasmond zich in de Nieuwe Waterweg en het Calandkanaal. De Nieuwe Waterweg wordt begrensd door de Maeslantkering. Het Calandkanaal loopt door tot aan de Rozenburgse sluis. Vanaf de Maeslantkering tot ten oosten van de Hartelkering lopen de verbindende Europoortkeringen 8 en 9. Het gebied van de Europoort omvat verder de havenbassins van de Maasvlakte en de havenbekkens grenzend aan het Hartel- en Calandkanaal, zie Figuur 5.6.



Figuur 5.6 Gebiedsoverzicht Europoortgebied. Ligging van primaire kering is weergegeven in rode lijn

In het WBI-2017 project zijn voor het Europoortgebied geen nieuwe productieberekeningen gemaakt van de golfparameters (lokale golven en golfdoordringing vanuit de Noordzee). De golfparameters zijn overgenomen uit WTI-2011.

In het WTI-2011 is een nieuw SWAN model opgezet en gebruikt voor het bepalen van de golfparameters in het Europoortgebied. De omhullende van het opgezette SWAN model is weergegeven in Figuur 5.7. In verband met golfdoordringing vanuit de Noordzee omvat het SWAN-Europoort model een deel van de Noordzee. De begrenzing met de Noordzee is zo gekozen dat voor de zee-randvoorwaarden gebruik kon worden gemaakt van de resultaten

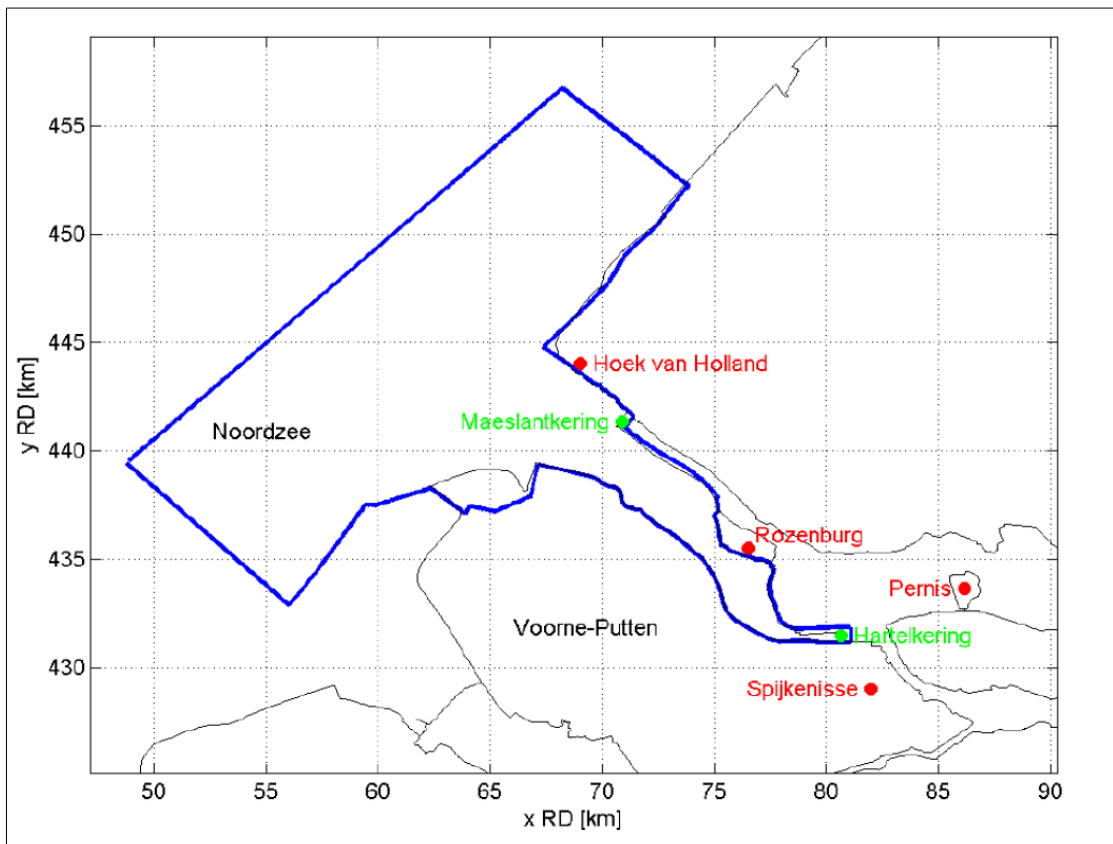
van de SWAN berekeningen voor de Hollandse kust (Paragraaf 5.5). De grens van het SWAN-Europoort model volgt grotendeels de -20 m+NAP dieptelijn (van Leeuwen, 2011). Verder zijn alle numerieke instellingen van SWAN-Europoort overgenomen uit het SWAN model voor de Hollandse Kust met één uitzondering. In het SWAN model voor de Europoort is een eerste orde up-windschema gebruikt, zie voor nadere details Van Leeuwen (2011).

De bodemligging van het SWAN-Europoort model is gerapporteerd in Van Leeuwen (2011) en is afkomstig uit de Baseline database die ten grondslag lag aan de WAQUA-RMM modelschematisatie (Deltares, 2010g). Daar waar nodig zijn deze data gecorrigeerd of aangevuld met behulp van de destijds beschikbare waterkaarten. In gebieden waar geen of onvoldoende Baseline data voorradig was, zijn met behulp van omringende datapunten en waterkaarten schattingen gemaakt van de bodem. Steigers, dammen en andere obstakels, die niet bestand worden geacht tegen extreme omstandigheden zijn verwijderd en hebben daarom geen golfreducerende functie meer in het SWAN model. Uitzondering hierop vormen de volgende constructies:

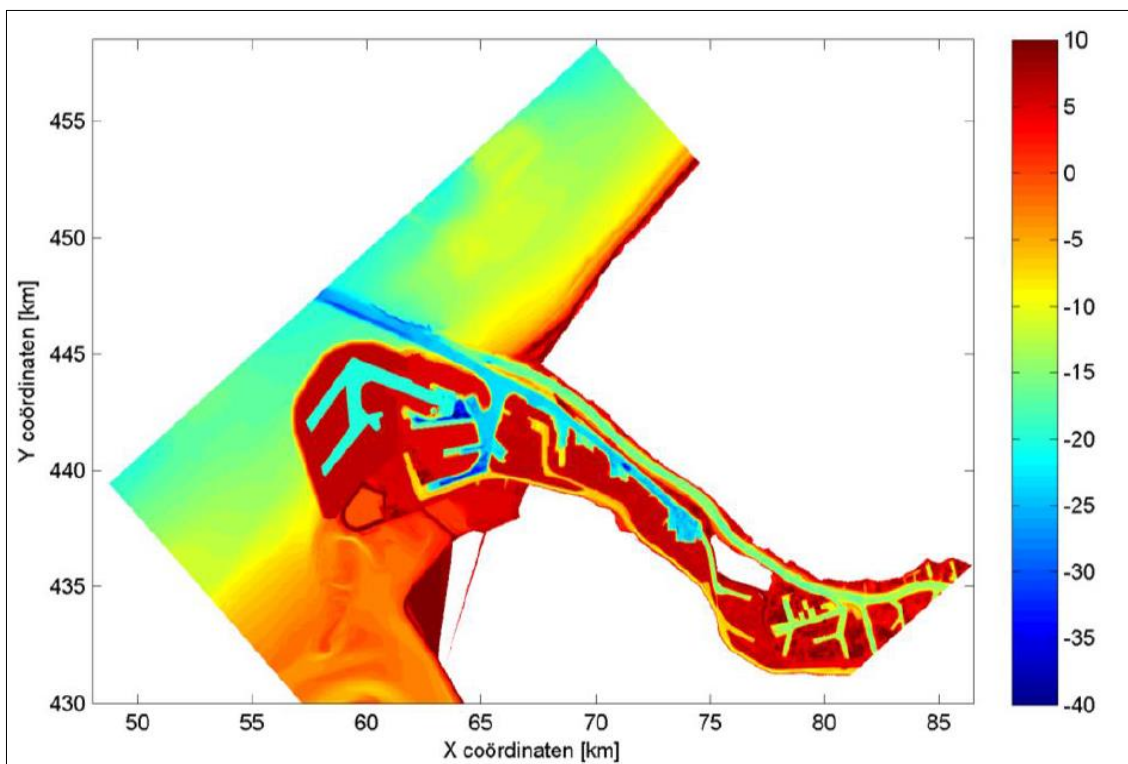
- De Noorderdam met het Noorderhoofd,
- De Zuiderdam
- De Splitsingsdam

Meer details met betrekking tot de bodemligging voor de Europoort zijn te vinden in Van Leeuwen (2011). Een schematische weergave van de bodemligging is afgebeeld in Figuur 5.8.

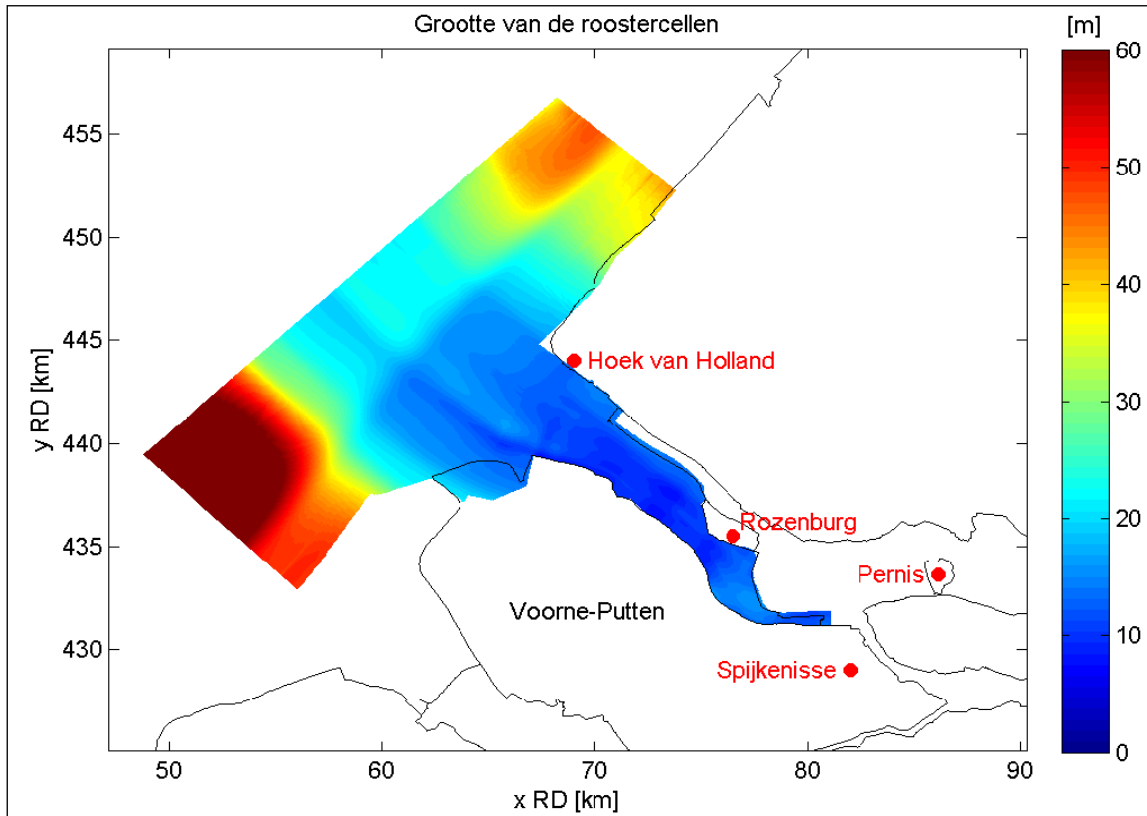
Het rekenrooster van het SWAN-Europoort model is curvilineair en sluit aan bij het WAQUA-RMM rooster. Het rekenrooster heeft een gemiddelde celgrootte van ongeveer 10 m. Het rekenrooster in het zeegebied is grover dan het rekenrooster in het Europoortgebied. Meer details met betrekking tot het resolutieonderzoek en resolutiekeuze zijn beschreven in Van Leeuwen (2011). Het rekenrooster dat gebruikt is voor de productieberekeningen van de golfparameters in het Europoortgebied is afgebeeld in Figuur 5.9.



Figuur 5.7 Schematische weergave SWAN model Europoort zoals opgezet voor WTI-2011 voor de productieberekeningen van de golfparameters.



Figuur 5.8 Bodemligging t.o.v. NAP van het SWAN-Europoort model (van Leeuwen, 2011).



Figuur 5.9 Resolutie van het Rekenrooster SWAN-Europoort WTI-2011 (van Leeuwen, 2011).

Met het SWAN-Europoort model zijn berekeningen gemaakt voor de combinaties van waterstanden, windsnelheden en windrichtingen in Tabel 5.4. Op de Noordzeerand zijn golftrandvoorwaarden opgelegd; deze randvoorwaarden volgen uit golfspectra berekend met het SWAN model voor de Hollandse Kust. In Tabel 5.4 is aangegeven welke randvoorwaarden van het model SWAN Kust zijn gebruikt bij het genereren van randvoorwaarden waterstand en wind (snelheid en richting) voor het model SWAN-Europoort. Zoals uit Tabel 5.4 blijkt, geldt dit alleen voor de westelijke richtingen; voor de oostelijke windrichtingen is er geen golfdoordringing vanuit de Noordzee.

Tabel 5.4 Stochastcombinaties SWAN berekeningen voor Europoort, inclusief bijbehorende stochastwaarden van de kust die de golf randvoorwaarden op de Noordzee leveren (Klein en Kroon, 2011c).

Waterstand		Windrichting		Windsnelheid U_p	
SWAN Europoort	SWAN kust	SWAN Europoort	SWAN kust	SWAN Europoort	SWAN kust
[m+NAP]	[m+NAP]	[°N]	[°N]	[m/s]	[m/s]
1.0	1.0	22.5	n.v.t.	10	15
2.0	2.0	45.5	n.v.t.	15	15
3.0	3.0	67.5	n.v.t.	20	20
4.0	4.0	90.0	n.v.t.	25	25
5.0	5.0	112.5	n.v.t.	30	30
6.0	6.0	135.0	n.v.t.	35	35
		157.5	n.v.t.	42	40
		180.0	n.v.t.		
		202.5	210		
		225.0	240		
		247.5	240		
		270.0	270		
		292.5	300		
		315.0	300		
		337.5	330		
		360.0	360		
6		16		7	
				Totaal	672

De productieberekeningen met SWAN zijn uitgevoerd met open water wind. Hiertoe zijn de in Tabel 5.4 genoemde potentiële windsnelheden vertaald naar open water windsnelheden volgens Tabel 3.1. De resultaten van de productieberekeningen van de golfparameters voor het Europoortgebied zijn uitvoerig gecontroleerd en zijn goed bevonden (Klein en Kroon, 2011c). Deze golfparameters zijn gebruikt voor de afleiding van de concept hydraulische randvoorwaarden CR2011. De berekende golfparameters zijn overgenomen in WBI-2017.

5.4 Golfcondities Meren

5.4.1 IJsselmeer

Voor het IJsselmeer zijn binnen het project WBI-2017 geen nieuwe berekeningen gemaakt van de golfparameters; de golfparameters in WBI-2017 voor het IJsselmeer zijn overgenomen uit WTI-2011.

De golfparameters binnen WTI-2011 zijn bepaald met het tweedimensionale golfvoortplantingsmodel SWAN. Hiertoe is een SWAN model opzet en gevalideerd (Klein et al, 2010). De productieberekeningen met SWAN zijn gerapporteerd in (Klein, 2011) en (Klein en Kroon, 2011d). In het vervolg van deze paragraaf vatten we de belangrijkste aspecten van het gebruikte SWAN model en de hiermee uitgevoerde productieberekeningen samen.

De toegepaste versie van SWAN voor de productieberekeningen voor het IJsselmeer is SWAN 40.72ABCDE; nadere details met betrekking tot versienummer, bodemligging en rekenrooster zijn te vinden in de hierboven vermelde referenties.

Figuur 5.10 toont de bodemligging van het gebruikte SWAN model. Zoals de figuur laat zien omvat het SWAN model naast het IJsselmeer ook het Ketelmeer, Vossemeer en het Zwarte Meer¹⁸. De fysische en numerieke instellingen van het SWAN model voor het IJsselmeer zijn gebaseerd op de instellingen uit de kalibratie van het SWAN model voor de Waddenzee en de Westerschelde (TU-Delft, 2010) en (Deltares, 2010h). De fysische instellingen zijn:

```
GEN3 WESTH  
WCAP WESTH cds2=5.0e-05 br=0.00175 p0=4.0 powst=0.0 powk=0.0 nldisp=0.0  
cds3=0.8 powfsh=1.0  
QUAD iquad=2 lambda=0.25 Cnl4=3.0+07  
LIMITER ursell=10.0 qb=1.0  
FRIC JONSWAP cfjon=0.067  
BREA WESTH alpha=0.96 pown=2.5 bref=-1.3963 shfac=500.0  
TRIAD trfac=0.1 cutfr=2.5
```

De numerieke instellingen zijn als volgt:

```
NUM STOPC 0.00 0.01 0.001 99. STAT mxitst=80
```

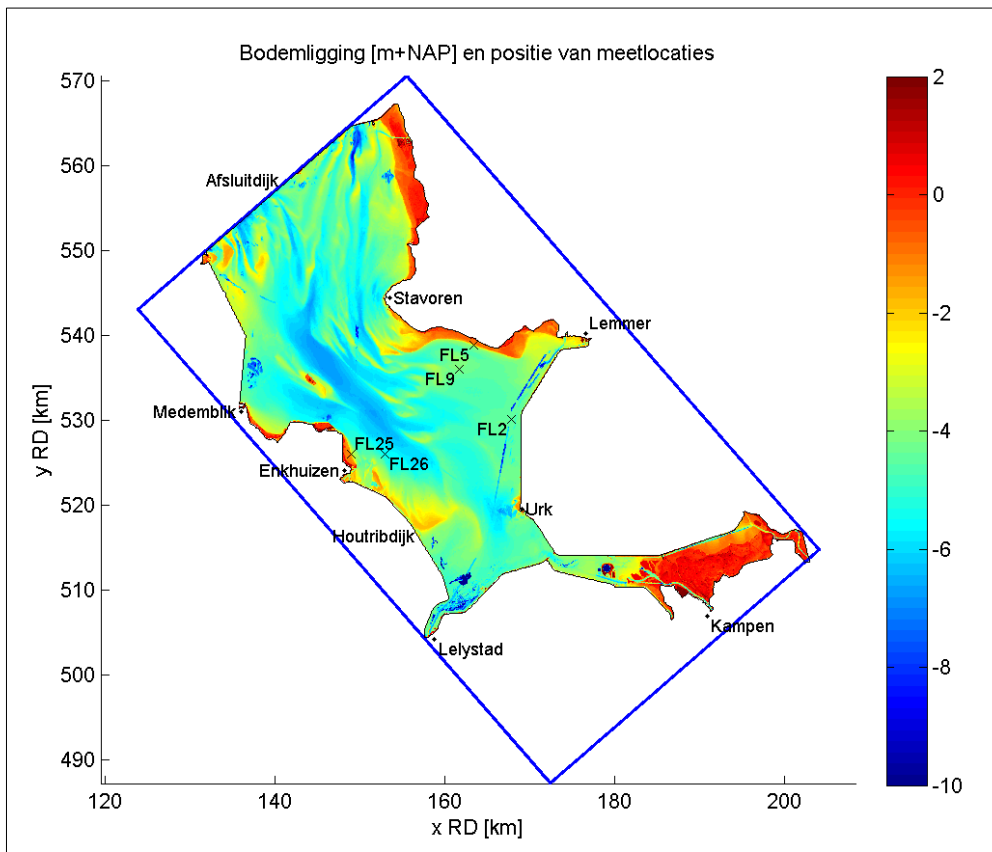
Een en ander betekent dat het criterium voor convergentie van een SWAN berekening is dat de relatieve verandering van de significante golfhoogte H_{m0} en de gemiddelde periode T_{m01} van de ene iteratie naar de andere in minimaal 99% van de natte cellen niet meer dan 1% bedraagt en dat de kromming van de met H_{m0} genormaliseerde convergentiecurve van H_{m0} niet meer dan 0,001 bedraagt. Het model wordt toegepast in stationaire modus en het maximale aantal iteraties dat een SWAN berekening doorloopt is vastgesteld op 80.

Voor het construeren van de bodem van het SWAN model voor IJsselmeer is gebruik gemaakt van verschillende brongegevens. Verreweg de meeste bodemgegevens zijn afkomstig uit het dieptebestand zoals gebruikt voor het construeren van het WAQUA-IJVD model (Deltares, 2010b). Met uitzondering van de Ramspolkering en de dam die de Ramsgeul scheidt van het Ramsdiep zijn alle dammen, kribben e.d. verwijderd uit de bodem. Zodoende zijn de productieberekeningen met SWAN uitgevoerd alsof er geen dammen en dergelijke aanwezig zijn ofwel alsof de dammen tijdens de storm bezwijken.

Zoals hierboven vermeld zijn de numerieke en fysische instellingen voor het SWAN model voor het IJsselmeer afkomstig uit de kalibratie van het SWAN Waddenzee model. De betreffende instellingen zijn getoetst en gevalideerd aan een breed scala aan metingen, zie voor meer details (Klein et al, 2010). Het aldus ontstane SWAN model is geverifieerd op rekenroosters van 80x80 m², 40x40 m² en 20x20 m². Een rekenrooster van 40x40 m² is uiteindelijk gebruikt voor de productieberekeningen van de golfparameters in het IJsselmeer.

Evenals met WAQUA zijn met het SWAN model en instellingen zoals hierboven beschreven 720 berekeningen gemaakt om de golfcondities bij de teen van de waterkering te bepalen. Het SWAN model is toegepast in stationaire modus en het maximale aantal iteraties dat een SWAN berekening mocht doorlopen was vastgesteld op 80.

¹⁸ Het Zwarte Meer maakt onderdeel uit van regio 6 (de Vechtdelta); dit meer is meegenomen in het IJsselmeemodel vanwege de inzet van SWAN voor het Zwarte Meer in de Vechtdelta; zie paragraaf 5.4.2 van dit rapport.



Figuur 5.10 Bodemligging (t.o.v. NAP) SWAN model IJsselmeer (inclusief Ketelmeer, Vossemeer en Zwarte Meer) inclusief meetlocaties FL2, FL5, FL9, FL25 en FL26.

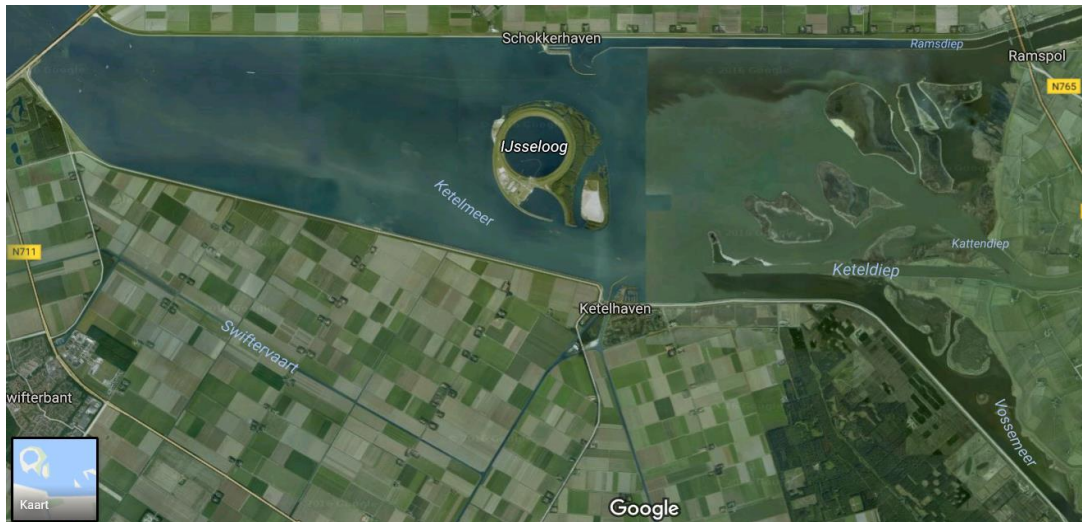
In de SWAN productieberekeningen voor het IJsselmeer is gebruik gemaakt van ruimtelijk variërende waterstandsvelden volgend uit de productieberekeningen met WAQUA voor dit gebied (Paragraaf 4.6.1). De productieberekeningen met SWAN zijn uitgevoerd voor dezelfde 720 stochastwaardecombinaties waarvoor waterstandsberekeningen zijn uitgevoerd, zie Tabel 4.10. Per stochastwaardecombinatie is conform (Deltares, 2010) een uniform windveld opgelegd. De productieberekeningen met SWAN zijn uitgevoerd met open water wind. Hiertoe zijn de in Tabel 4.10 genoemde potentiële windsnelheden vertaald naar open water windsnelheden volgens Tabel 3.1. Strooming is buiten beschouwing gelaten.

De resultaten van de productieberekeningen met SWAN zijn uitgebreid gecontroleerd op onder meer convergentie, consistentie van de golfparameters (H_{m0} , T_{ps} en $T_{m-1,0}$) met toenemende wind. De resultaten van SWAN zijn goed bevonden (Klein en Kroon, 2011). Op de resultaten van de golfperiode uit SWAN is een correctie toegepast. De correctie heeft betrekking op de golfperiode en is gebaseerd op metingen in het IJsselmeer en Slotermeer. Meer details ten aanzien van noodzaak en argumentatie zijn te vinden in Bijlage A uit (Deltares, 2012c).

5.4.2 Ketelmeer en Vossemeer

Een gebiedsoverzicht van het Ketelmeer en Vossemeer is afgebeeld in Figuur 5.11. Aan de westelijke kant staat het Ketelmeer via de Ketelbrug in open verbinding met het IJsselmeer en aan de oostelijke kant met het Vossemeer (welke zich uitstrekt tot aan de Roggebotsluis) en via het Ramsdiep en de Ramsgeul met het Zwarte Meer en via het Keteldiep en het

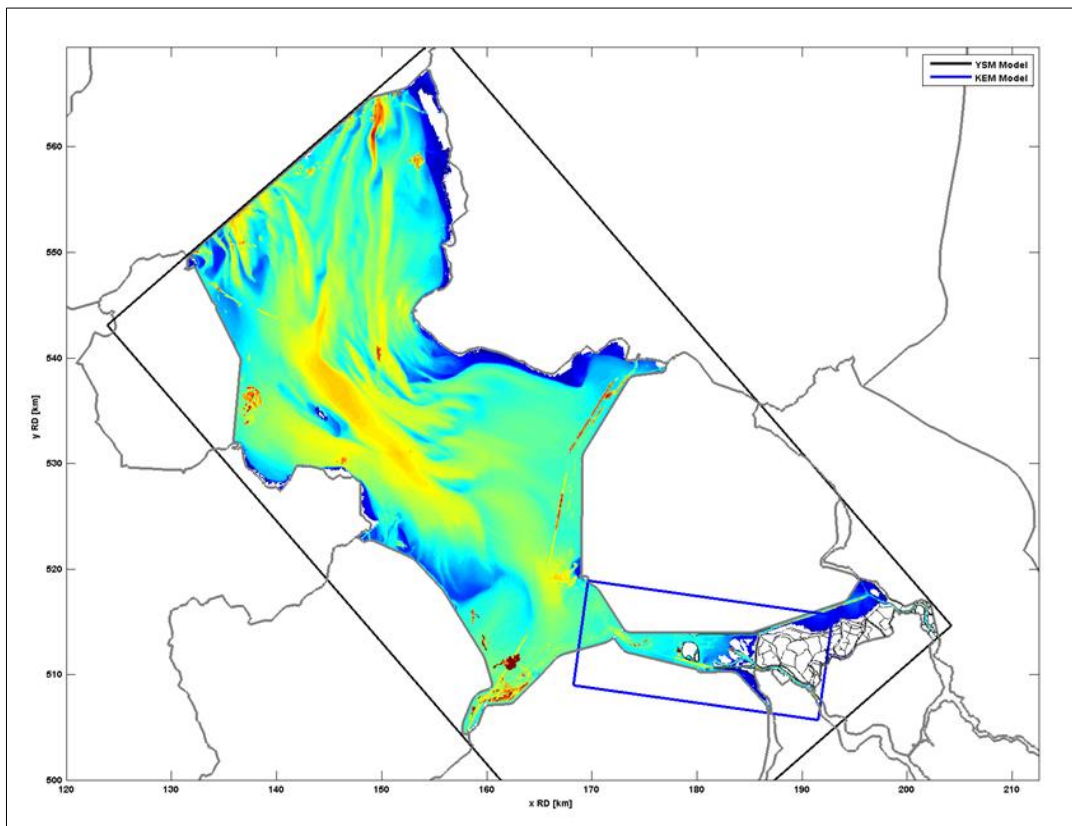
Kattendiep met de IJssel. De grens tussen het Ketelmeer en Zwarte Meer ligt bij de Ramspolbrug.



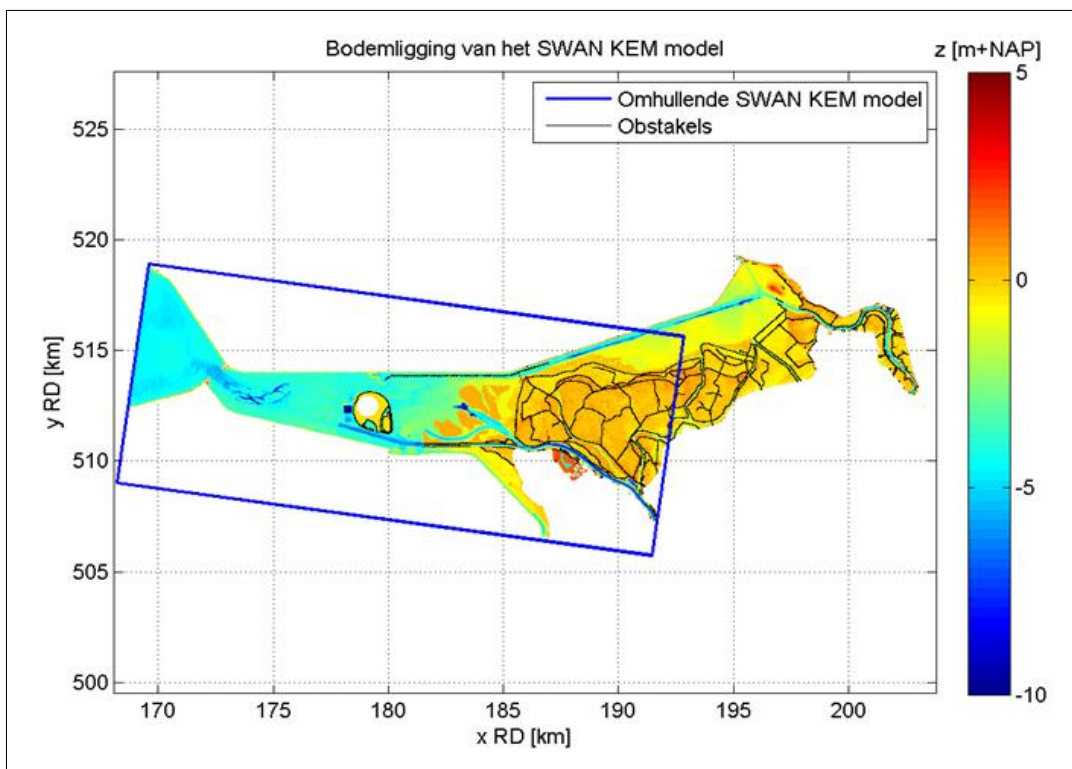
Figuur 5.11 Gebiedsoverzicht van het Ketelmeer en Vossemeer.

In het WBI-2017 project is een SWAN model voor dit gebied opgezet, SWAN-KEM. Naast het Ketelmeer en Vossemeer omvat het model ook het Zwarte Meer. Het SWAN model dat in het ontwikkeld is voor het IJsselmeer is hierbij als uitgangspunt gebruikt. De modelopzet van SWAN is uitgebreid beschreven in Deltares (2015g). Belangrijke verschillen met het model voor het IJsselmeer vormen de bodemschematisatie alsmede de expliciete modellering van obstakels. Beiden zijn verkregen uit de Baseline database van WAQUA-IJVD, Paragraaf 4.5 (Deltares, 2014e). Het SWAN model voor Ketelmeer en Vossemeer is genest in het SWAN model van het IJsselmeer, zie Figuur 5.12. Voor details omtrent de modelopzet en gebruikte gegevens wordt verwezen naar Deltares (2015g). De versie van het SWAN model en de numerieke en fysische instellingen zijn ongewijzigd ten opzichte van de instellingen gehanteerd voor WTI-2011. Deze zijn weergegeven in Paragraaf 5.4.1.

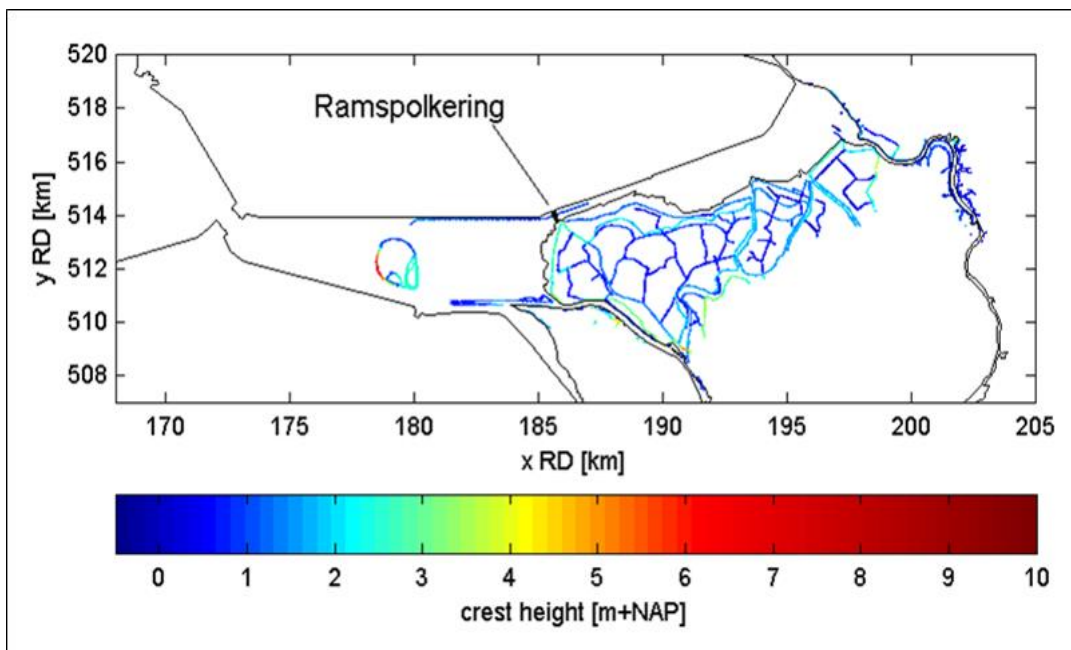
Figuur 5.13 toont de bodemligging zoals opgenomen in het SWAN-KEM model. De bodem in SWAN-KEM is in WBI-2017 geactualiseerd ten opzichte van WTI-2011. Deze is gebaseerd op de Baseline database van het WAQUA-IJVD model (ijvd-hr2017 5-v1), zie ook paragraaf 4.5. Figuur 5.14 geeft een overzicht van de in het SWAN-KEM model opgenomen obstakels.



Figuur 5.12 Omtrekken SWAN model IJsselmeer en SWAN-KEM, alsmede de bodemligging.



Figuur 5.13 Bodemligging SWAN model Ketelmeer en Vossemeer



Figuur 5.14 Locatie en hoogte van de SWAN obstakels. De Ramspolkering is als dikke zwarte lijn gemarkeerd.

Het rekenrooster van het SWAN-KEM model is hetzelfde rooster als gebruikt in de WTI-2011 productieberekeningen van de golfparameters. Het rooster is een regelmatig rooster met 1175 bij 500 roostercellen geroteerd over een hoek van -8 graden. De roostercellen zijn 20 m bij 20 m groot.

Met het SWAN-KEM model zoals hierboven beschreven zijn productieberekeningen gemaakt voor de stochastcombinaties uit Tabel 5.5. Zoals Figuur 5.13 laat zien, omvat het SWAN-KEM model een deel van het IJsselmeer. Op de rand van het deel dat in het IJsselmeer ligt, zijn golftrandvoorwaarden opgelegd die via nesting verkregen zijn uit een serie dezelfde berekeningen met het IJsselmeemodel dat ook voor WTI-2011 is gebruikt, zie Paragraaf 5.4.1. Echter, de berekeningen voor het IJsselmeer zijn uitgevoerd met een grover rooster (40 m bij 40 m). Merk op dat afvoer en IJsselmeerpeil geen invoer zijn voor SWAN berekeningen maar de daaruit resulterende waterstandsvelden, zie Paragraaf 4.5. Windrichting en windsnelheid gelden wel als invoer voor SWAN. Specifiek betreft het de openwater windsnelheid. Hiertoe zijn de in Tabel 5.5 genoemde potentiële windsnelheden vertaald naar open water windsnelheden volgens Tabel 3.1. Strooming is buiten beschouwing gelaten.

De SWAN berekeningen leveren golfparameters op de uitvoerlocaties zoals beschreven in Paragraaf 4.5.5. De berekeningen zijn uitgebreid gecontroleerd op zowel fysische als numerieke juistheid. De controles hebben geen noemenswaardige problemen aan het licht gebracht. Ook hebben de controles geen aanleiding gegeven bepaalde berekeningen af te keuren. Details met betrekking tot de uitgevoerde controles zijn te vinden in (Deltares, 2016m).

In tegenstelling tot het IJsselmeer is binnen WBI-2017 besloten om geen correctie toe te passen op de golfperiode, zie Paragraaf 5.4.1.

Tabel 5.5 Stochastcombinaties voor WBI-2017 SWAN-KEM berekeningen

Afvoer		Meerpeil	Wind, Schiphol	
IJssel	Vecht	IJsselmeer	snellheid U_p	richting
[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m+NAP]	[m/s]	[°N]
100	10	-0.4	10	22.5
500	100	-0.1	16	45.0
950	250	0.4	22	67.5
1400	400	0.9	27	90.0
1850	550	1.3	32	112.5
2300	700	1.5	37	135.0
2750	850		42	157.5
2975	925			180.0
3200	1000			202.5
3400	1067			225.0
3600	1133			247.5
3800	1200			270.0
4000	1267			292.5
				315.0
				337.5
				360.0
13	6	7	16	
Totaal				8736

5.4.3 Markermeer

Voor het Markermeer zijn binnen het project WBI-2017 geen nieuwe berekeningen gemaakt van de golfcondities, deze zijn overgenomen uit HR-2001 voor het Markermeer (WL|Delft Hydraulics, 1997) en HR-2006 voor IJburg en de Eem (RWS-RIZA, 2007).

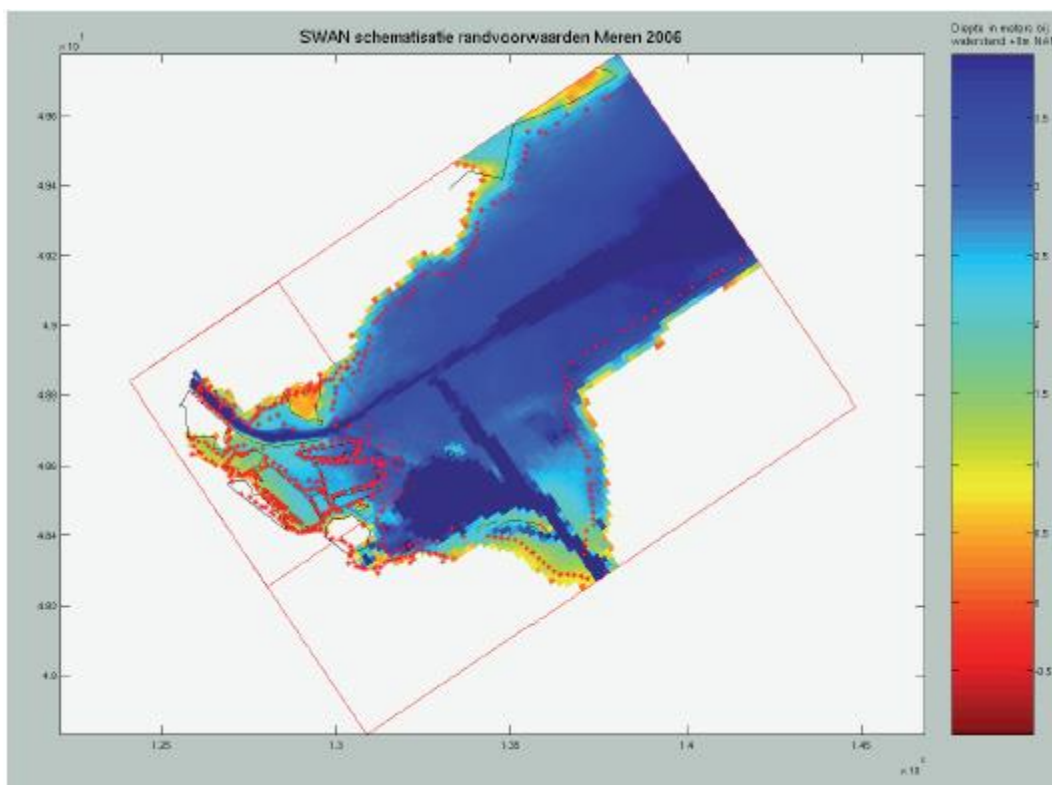
Voor het bepalen van de golfparameters voor het Markermeer is gebruik gemaakt van het golfmodel HISWA (versie 110.61). Het HISWA¹⁹ model berekent net als het SWAN model golfgroei en golfvoortplanting. Beide modellen, HISWA en SWAN, zijn ontwikkeld aan de Technische Universiteit Delft (Holthuijsen, 1980). Hierbij is het zogeheten derde generatie model SWAN een opvolgend model op het tweede generatie model HISWA. Het grootste verschil tussen HISWA en SWAN is gelegen in het feit dat SWAN een spectraal golfvoorspellingsmodel heeft en HISWA niet. Het golfspectrum in HISWA heeft vaste vorm voor het hele rekengebied, terwijl het golfspectrum in SWAN uit de berekeningen volgt. HISWA kent daarom slechts één periodemaat (T_p). Andere periodematen moeten hieruit worden afgeleid. Voor SWAN worden deze uit het spectrum bepaald.

Het Markermeer en het Gooi- en Eemmeer zijn apart gemodelleerd, er zit geen koppeling tussen. Er is aangenomen dat geen golfenergie onder de Muiderbrug door kan (WL|Delft Hydraulics, 1997). De bodemligging voor HISWA is gebaseerd op de bodemligging van het Delft2D model voor het Markermeer, zie paragraaf 4.6.2. De bodemresolutie bedraagt voor het Markermeer 125 bij 125 m en voor Gooi- en Eemmeer 50 bij 50 m.

¹⁹ Hindcast Shallow water WAves

In de HISWA berekeningen voor het Markermeer en Gooi- en Eemmeer is gebruik gemaakt van ruimtelijk variërende waterstandsvelden volgend uit de productieberekeningen met Delft2D voor dit gebied (Tabel 4.12).

In tegenstelling tot het Markermeer, waar de golfparameters bepaald zijn met HISWA, zijn de golfparameters voor IJburg bepaald met het SWAN model, versie SWAN40.31ABCDEFG (Witteveen&Bos, 2004). In Figuur 5.15 is een visualisatie van de toegepaste SWAN-schematisatie gegeven. De SWAN-instellingen voor IJburg zijn vastgesteld aan de hand van golfmetingen op het IJsselmeer en Slotermeer (Bottema, 2004). Gezien de overeenkomstige eigenschappen van de wateren rond IJburg is aangenomen dat dezelfde SWAN instellingen gebruikt kunnen worden.



Figuur 5.15 Toegepaste SWAN schematisatie voor IJburg. De rode lijnen geven de grenzen van het hele en het geneste rooster aan. De rode punten zijn de uitvoerlocaties.

Voor de golfberekeningen met SWAN is net als voor de berekeningen met WAQUA de wind als invoer nodig. Voor SWAN berekeningen is niet uitgegaan van een windverloop maar van een ruimtelijk uniforme en stationaire wind met een snelheid en richting gelijk aan het begin van de top van de storm. Voor het berekenen van de golfcondities is het acceptabel om uit te gaan van een stationaire wind aangezien de tijd die een golf nodig heeft om zich te ontwikkelen vele malen korter is dan de duur van de storm. De waterstand (als invoer) is ook uniform. De stroming is buiten beschouwing gelaten. Voor de fysische en numerieke instellingen is gebruik gemaakt van de standaard waarden, met uitzondering van de whitecapping formulering. De aangepaste formulering van Rogers et al (2002) is gebruikt. Met deze instellingen wordt een langere golfperiode T_p berekend waardoor de hydraulische belastingniveaus enkele centimeters hoger uit kunnen vallen.

Voor IJburg zijn productieberekeningen gemaakt met SWAN voor dezelfde 216 stochastwaardecombinaties waarvoor waterstandsberoeeningen zijn uitgevoerd, zie Tabel 4.12.

De golfberekeningen met SWAN voor IJburg zijn gecontroleerd. Hieruit bleken de berekende golfcondities de verwachte trends te vertonen; er zijn geen golfberekeningen afgekeurd, zie (RWS-RIZA, 2007). Ondanks het toepassen van de aangepaste white-capping formulering, zijn er toch nog systematische verschillen tussen de metingen en de berekeningen. Deze verschillen zijn middels correctiefactoren geminimaliseerd. De gebruikte correctiefactor voor de piekperiode en golfhoogte zijn respectievelijk 1,022 en 0,964 (Witteveen&Bos, 2004).

De golfparameters voor het gebied van de Eem zijn bepaald met Bretschneider. Voor toepassing van Bretschneider dienen bij de teen van de waterkering bekend te zijn: de zogenoemde gemiddelde waterdiepte (d), de effectieve strijklengte F en de windsnelheid op 10 m hoogte boven open water (via de openwatertransformatie uit de potentiële wind, zie Tabel 3.1). Deze grootheden zijn in WBI-2017 overgenomen uit de HR-2006 database voor het Markermeer.

5.5 Golfcondities Kustgebieden - harde keringen

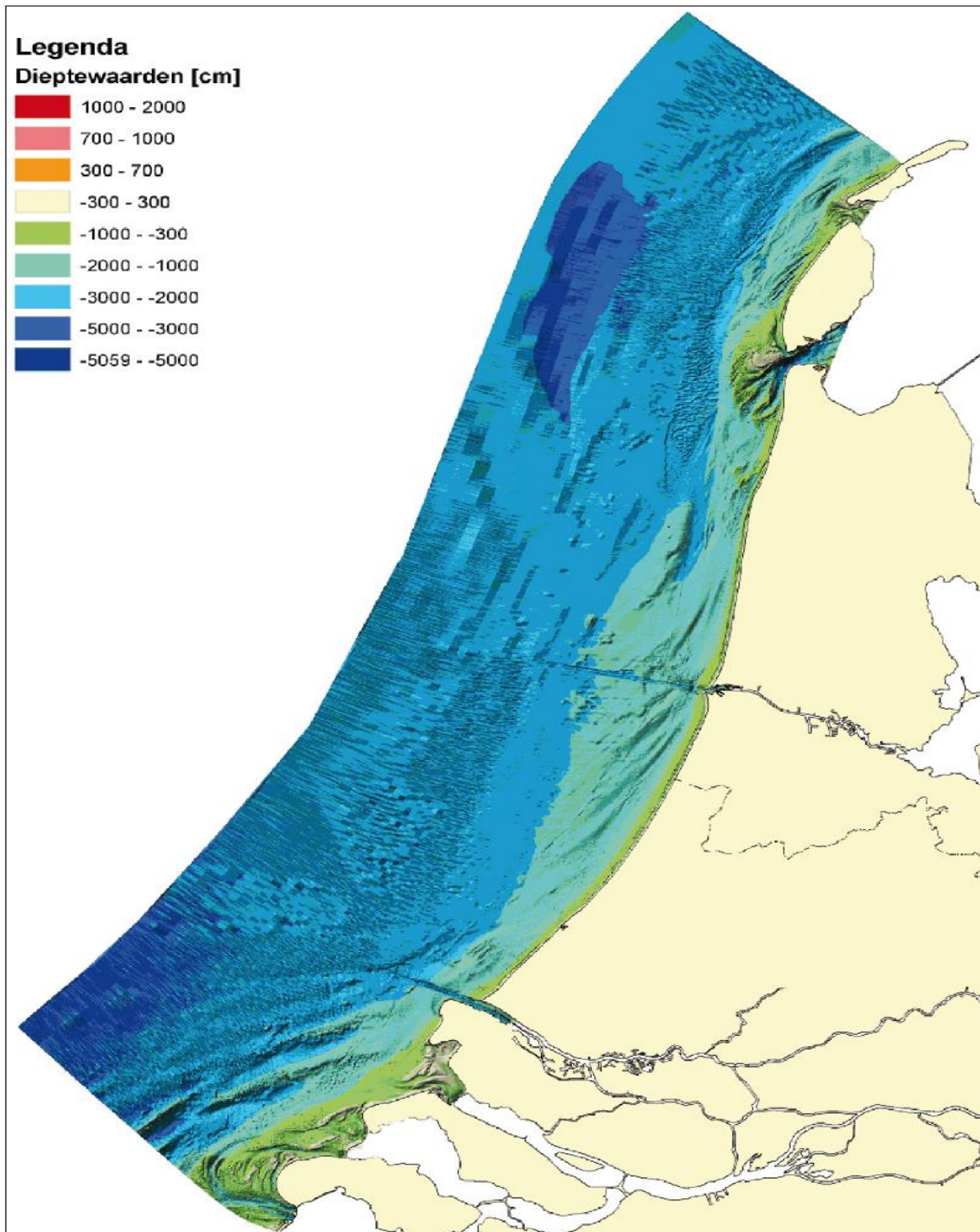
Voor de kustgebieden zijn binnen het project WBI-2017 geen nieuwe berekeningen gemaakt van de golfparameters. De golfparameters voor de Hollandse kust (regio's 11 t/m 13) zijn overgenomen uit HR-2006 en voor de Waddenzee en Westerschelde (regio's 9, 10 en 15) uit WTI-2011.

5.5.1 Hollandse Kust

In WBI-2017 zijn geen SWAN berekeningen uitgevoerd voor de Hollandse Kust, de golfparameters zijn overgenomen uit KustDB2006 uit HR-2006. De golfparameters ten behoeve van HR-2006 zijn berekend met SWAN; dit is gebeurd met versie 40.41 met patches A, B en a. Details zijn te vinden in (RWS-RIKZ, 2007).

De schematisatie van de bodem voor SWAN-kust is opgebouwd uit (RWS-RIKZ, 2006). De bodemligging bestaat uit de gemiddelde bodemdiepte over de periode 1994-2003. Er is gekozen voor gebruik van de gemiddelde bodemdiepte omdat de variatie in de bodemligging ten gevolge van (quasi-) cyclisch morfologisch gedrag groot is. Details met betrekking tot de bodemligging voor de Hollandse kust zijn te vinden in (RWS-RIKZ, 2006). De bodemligging van de Hollandse kust zoals toegepast voor deze SWAN berekeningen is afgebeeld in Figuur 5.16.

Het rooster is kromlijinig en is gebaseerd op het WAQUA Kuststrookmodel. Aan de kustzijde van het rooster zijn extra cellen toegevoegd, om voldoende dicht bij de kust uitvoerpunten te kunnen definiëren. Het rooster is aan de kustzijde uitgebreid tot aan de teen van de dijk in geval van harde keringen en tot aan de lijn +7 m+NAP in geval van duinen. Het rooster omvat ook de Nieuwe Waterweg tot aan de stormvloedkering (regio 17). Het kromlijnige rekenrooster omvat 1980x768 cellen (kustlangs x kustdwars). De resolutie van het rekenrooster heeft een min of meer constante maaswijdte in kustlangse richting van ongeveer 100 m; kustdwars varieert de maaswijdte van 900 m op de zeerand tot 30 m bij de kust.



Figuur 5.16 Bodemligging t.o.v. NAP van het SWAN model voor de Hollandse kust zoals gebruikt voor de productieberekeningen van de golfparameters in HR-2006 (RWS-RIKZ, 2006).

Obstakels zoals strekdammen en havenhoofden zijn opgenomen in de bodemligging. Het gaat hier om de dammen bij IJmuiden, Hoek van Holland en Scheveningen (RWS-RIKZ, 2006).

Tabel 5.6 toont de stochastcombinaties waarvoor SWAN productieberekeningen zijn gemaakt voor de Hollandse Kust. In totaal zijn 504 berekeningen uitgevoerd met SWAN.

Er is gerekend met een niet-uniforme windsnelheid met een noord-zuid verhang, op basis van de windstatistiek op de windmeetstations, zie ook (Deltares, 2010c). De windrichting is in sectoren van 30 graden opgedeeld; alleen de zuidwestelijke tot noordelijke windrichtingen zijn echter beschouwd in de berekeningen met SWAN. De windrichtingen uit de oostelijke richtingen zijn namelijk niet relevant voor de Hollandse kust. Uiteindelijk zijn 7 windrichtingen beschouwd. Er is gerekend met horizontale waterstand. De stroming is niet beschouwd.

Tabel 5.6 Stochastwaardecombinaties voor productieberekeningen golven met SWAN voor de Hollandse Kust (RWS-RIKZ, 2006)

Waterstand	Wind		Golfperiode
	snelheid U_p	richting	
[m+NAP]	[m/s]	[°N]	[s]
1.0	15	0.0	$E(T_{m-1,0})-10\%$
2.0	20	30.0	$E(T_{m-1,0})$
3.0	25	210.0	
4.0	30	240.0	
5.0	35	270.0	
6.0	40	300.0	
		330.0	
6	6	7	2
Totaal			504

In de productieberekeningen voor HR-2006 is de verwachte golfperiode $E(T_{m-1,0})$ als extra stochast beschouwd. De verwachtingswaarde voor de golfperiode verschilt voor elke wind-waterstandscombinatie. Er is gekozen om productieberekeningen te maken voor de verwachtingswaarde en voor de waarde die 10% lager is dan de verwachtingswaarde. Voor elke berekening met SWAN zijn de golfrandvoorwaarden op diepwater bepaald uit de windrichting en windsnelheid. Het afleiden van de diepwaterrandvoorwaarden voor golfperiode en golfhoogte vindt plaats in twee stappen:

1. Eerst is de golfperiode ($T_{m-1,0}$) bepaald die de grootste kans van optreden heeft, gegeven de windsnelheid en windrichting (er zijn twee waarden bepaald: het meest waarschijnlijke en het meest waarschijnlijke minus 10%),
2. Vervolgens is een deterministische relatie gelegd tussen de golfperiode uit stap 1 en de daarmee corresponderende significante golfhoogte H_s en piekperiode T_p .

De berekeningen zijn uitgevoerd met ruimtelijk variërende windsnelheden. Voor iedere combinatie van windrichting en windsnelheid zijn ruimtelijke variërende windsnelheidsvelden geconstrueerd. Dit is gebeurd aan de hand van statistische gegevens in drie meetlocaties: Texel, YM6 (IJmuiden) en Hoek van Holland. De potentiële windsnelheid is hierbij eerst omgezet naar open water wind middels een 'open water factor' volgens de methode beschreven in (Verkaik et al, 2002). De windrichting is voor ieder windsnelheidsveld constant.

Voor de Hollandse kust zijn uitvoerlocaties gedefinieerd op ca. 100 m afstand van de kruin. De uitvoerlocaties zijn zodanig gekozen dat ze niet op een te steile helling liggen en dat er minimaal twee natte cellen zijn; de onderlinge afstand (kustlangs) bedraagt ca. 250 m. Zie voor details (RWS-RIKZ, 2006).

De resultaten van de SWAN berekeningen zijn grondig gecontroleerd, zowel procedureel als numeriek. Dit heeft geleid tot de conclusie dat de berekeningen betrouwbaar zijn en gebruikt kunnen worden voor het vullen van de KustDB-2006 (RWS-RIKZ, 2006).

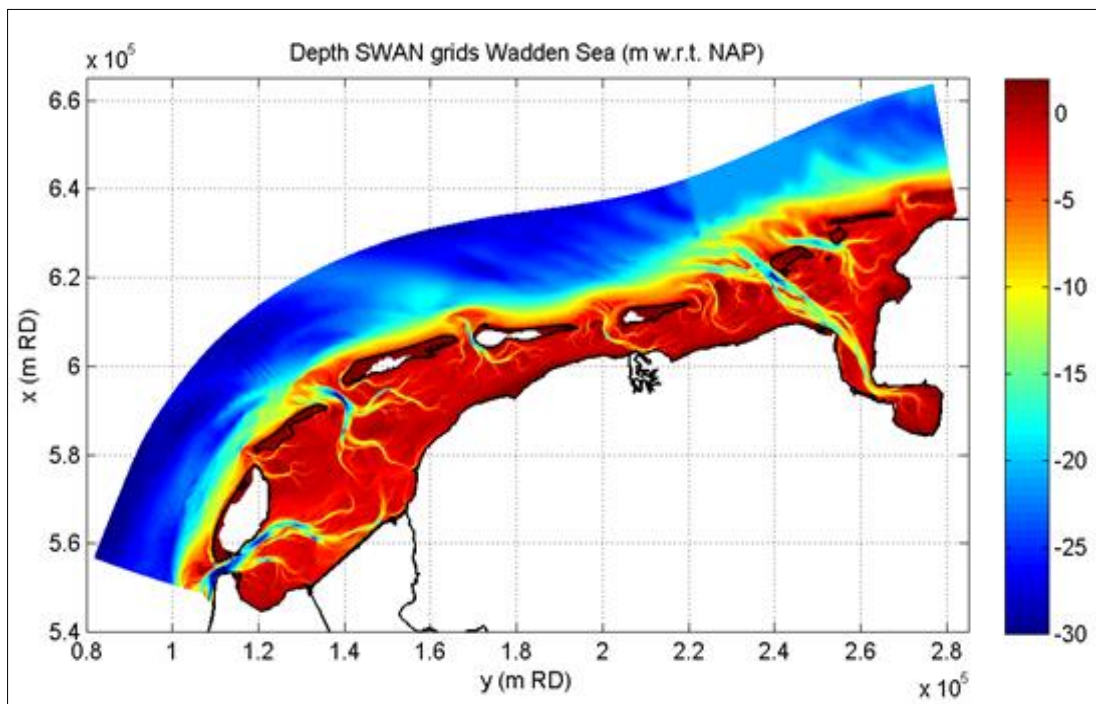
In WBI-2017 geldt $E(T_{m-1,0})$ niet als stochast. Op basis van de resultaten van de uitgevoerde SWAN berekeningen zoals hierboven beschreven is een database aangemaakt voor Hydra-Ring zonder de stochast verwachte golfperiode. Alleen de berekeningsresultaten die corresponderen met $E(T_{m-1,0})$ zijn daarom beschouwd.

5.5.2 Waddenzee

In WBI-2017 zijn geen nieuwe SWAN berekeningen uitgevoerd voor de Waddenzee, de golfparameters zijn overgenomen uit KustDB2011.

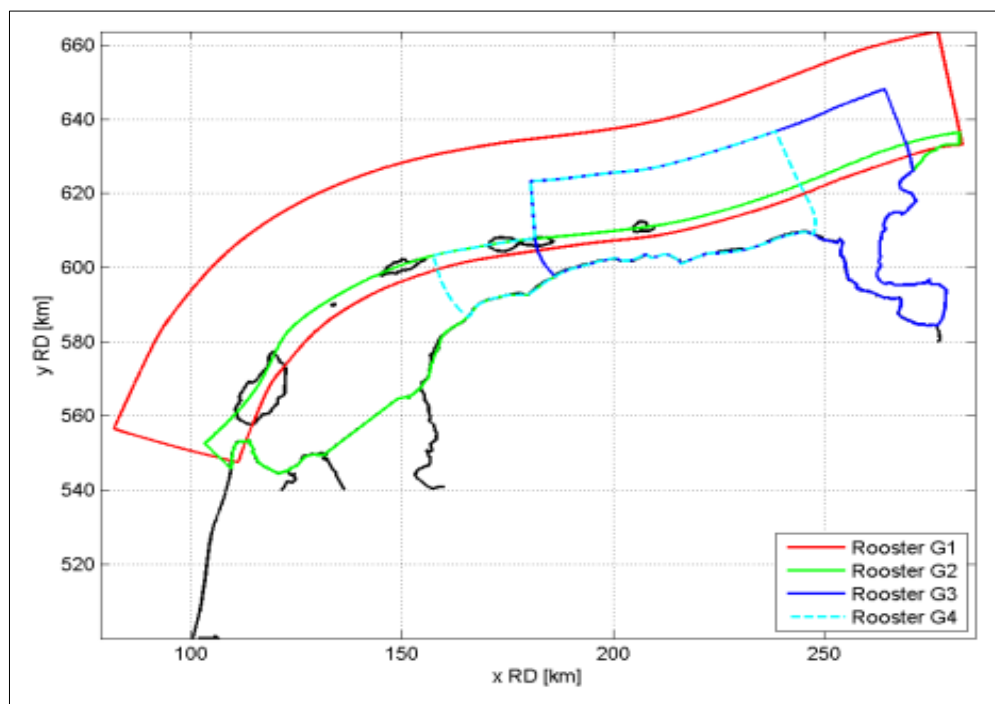
De golfparameters binnen WTI-2011 zijn bepaald met SWAN. Hiertoe is een SWAN model opgezet, gekalibreerd en gevalideerd. De productieberekeningen met SWAN zijn gerapporteerd in (Klein en Kroon, 2011). In het vervolg van deze paragraaf vatten we de belangrijkste aspecten van het gebruikte SWAN model samen en de hiermee uitgevoerde productieberekeningen; nadere details met betrekking tot SWAN versienummer, gebruikte bodemligging en rekenrooster zijn te vinden in de hierboven vermelde referenties.

De bodemschematisatie is gebaseerd op de vaklodingen uit de periode 2003-2008. Hiaten zijn opgevuld met SBW²⁰ projectmetingen (Deltares, 2012d). Voor enkele gebieden waarvoor gegevens ontbraken is ook gebruik gemaakt van o.a. het actuele hoogtebestand (AHN), zeekaarten en de bodem van het Kuststrookmodel.



Figuur 5.17 Bodemligging t.o.v. NAP van het Waddenzee SWAN model

²⁰ Sterkte en Belasting Waterkeringen



Figuur 5.18 Omtrekken van de SWAN rekenroosters voor de Waddenzee zoals gebruikt voor de productieberekeningen van de golfparameters WTI-2011.

De SWAN berekeningen zijn in stationaire modus uitgevoerd op kromlijnjige roosters. De fysieke en numerieke instellingen van het SWAN model voor de Waddenzee, gebaseerd op een uitgebreide kalibratie en validatie met de focus op de Waddenzee, zijn te vinden in (Deltares, 2010h).

De SWAN berekeningen zijn uitgevoerd met een ruimtelijk uniforme windsnelheid en windrichting. De windsnelheid en windrichting variëren echter in de tijd. De waterstand en stroming zijn niet uniform. Deze komen uit WAQUA berekeningen met het Kuststrook-model (Rego, 2010). Dit model wordt aangedreven door randvoorwaarden in de vorm van getij en opzet van ZUNO en DCSM, en een ruimtelijk uniforme wind. De uitvoer bestaat uit waterstands- en stromingsvelden.

Op de randen van het SWAN model zijn offshore golftrandvoorwaarden toegepast in de vorm van zogenaamde 1.5D-spectra die zich voortplanten in het Waddenzeegebied. Deze spectra passen bij de opgelegde windsnelheid en -richting uit Tabel 5.7. Details met betrekking tot de opgelegde golftrandvoorwaarden op de randen van het SWAN model zijn te vinden in (Klein en Kroon, 2011b).

Tabel 5.7 Stochastwaardecombinaties productieberekeningen golven met SWAN voor de Waddenzee (Klein en Kroon, 2011b)

Wind		Windopzet	Faseverschil getijtop en stormpiek	Tijdstip t.o.v. stormpiek
snelheid U_p	richting			
[m/s]	[°N]	[m]	[uur]	[uren]
20	0	0.0	0	-2
25	90	2.0	4	-1
30	180	4.0	8	0
35	210			1
40	240			2
	270			
	300			
	330			
5	8	3	3	5
Totaal				1800

Met SWAN is uitvoer van de golfparameters gegenereerd voor ruim 1300 uitvoerlocaties. De basis van deze uitvoerlocaties is de Rand2001 database, die ten grondslag ligt aan HR-2001. De punten uit Rand2001 zijn aan de hand van enkele criteria beoordeeld en waar nodig aangepast. Deze criteria zijn:

- 100 m uit de kruin van de dijk,
- Minimaal 2 actieve roosterzellen tussen de dijk en de uitvoerlocatie,
- Onderlinge afstand niet groter dan 250 m.

De resultaten van de SWAN berekeningen zijn grondig gecontroleerd, zowel procedureel als numeriek. Dit heeft geleid tot de conclusie dat de berekeningen betrouwbaar zijn en gebruikt kunnen worden voor het vullen van de KustDB-2011 voor de Waddenzee (Klein en Kroon, 2011a, 2011b).

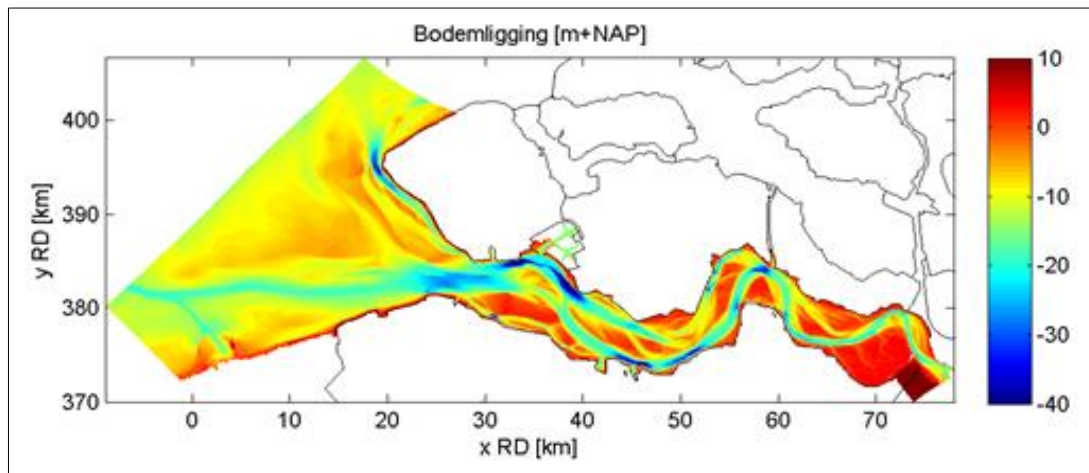
5.5.3 Westerschelde

Voor WBI-2017 zijn geen nieuwe SWAN berekeningen uitgevoerd voor de Westerschelde, de golfparameters zijn overgenomen uit KustDB2011.

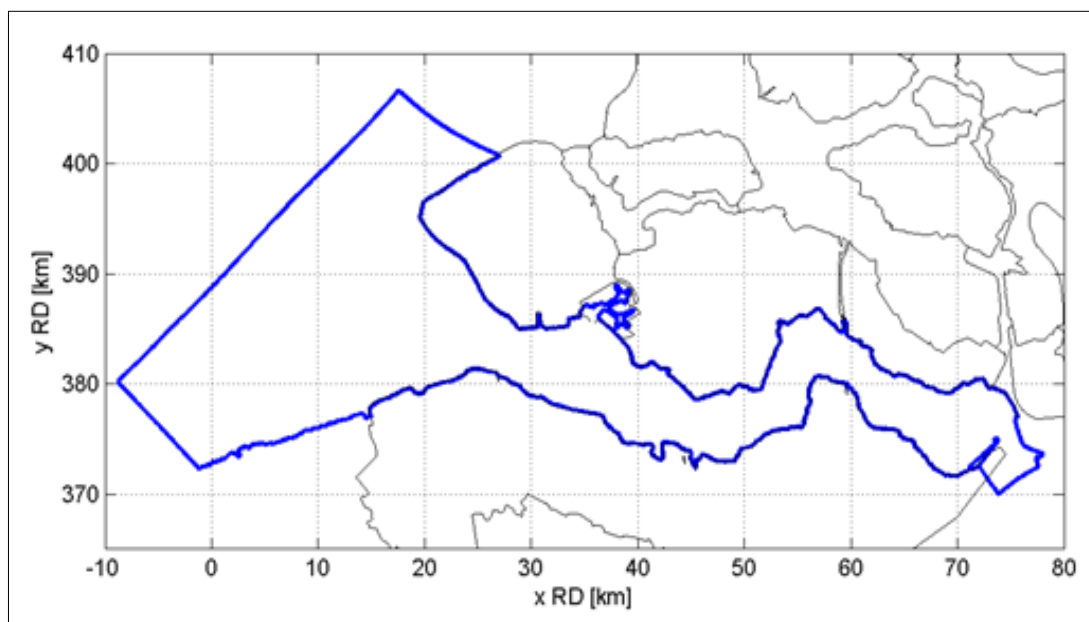
De golfparameters binnen WTI-2011 zijn bepaald met SWAN. De gebruikte SWAN versie en instellingen (fysisch en numeriek) zijn identiek aan de SWAN versie gebruikt voor de berekeningen voor de Waddenzee (paragraaf 5.5.2).

De bodemschematisatie voor de Westerschelde is gebaseerd op metingen van 2007 en 2008 (Groeneweg, 2010). De bodem nabij Borssele is enigszins aangepast, aangezien oorspronkelijk de aanlegsteiger daar ten onrechte als bodem was geschematiseerd. De bodemligging van de Westerschelde is weergegeven in Figuur 5.19.

Voor de SWAN berekeningen op de Westerschelde is een kromlijng rekenrooster gebruikt. Dit rooster is gemaakt door Witteveen+Bos (2010).



Figuur 5.19 Bodemligging t.o.v. NAP van het SWAN model voor de Westerschelde zoals gebruikt voor de productieberekeningen van de golfparameters in WTI-2011 (Groeneweg, 2010).



Figuur 5.20 Omtrek van het rekenrooster van het SWAN model voor de Westerschelde zoals gebruikt voor de productieberekeningen van de golfparameters in WTI-2011 (Deltares, 2010h).

Voor de Westerschelde zijn berekeningen gemaakt voor dezelfde randvoorwaarden als beschreven in Tabel 5.6.

De resultaten van de SWAN berekeningen zijn grondig gecontroleerd, zowel procedureel als numeriek. Dit heeft geleid tot de conclusie dat de berekeningen betrouwbaar zijn en gebruikt kunnen worden voor het vullen van de KustDB-2011 voor de Westerschelde, (Klein en Kroon, 2011a, 2011b).

5.6 Golfcondities Oosterschelde

De database met SWAN resultaten is overgenomen uit de HR2006. Oorspronkelijk betreft dit SWAN resultaten uit 1997/1998, die gebaseerd zijn op uitgangspunten voor ontwerp. Deze zijn in 2004/2005 gecorrigeerd om ze ook voor toetsing geschikt te maken. De golfcondities zijn bepaald voor 12 windrichtingen en een aantal windklassen (het aantal varieert per windrichting). Horizontale waterstanden van 0, 2, 3 en 4m+NAP zijn beschouwd. Voor de drie laagste waterstanden is verondersteld dat de stormvloedkering open is, met golfdoordringing door de Oosterscheldekering. Voor de hoogste waterstand is aangenomen dat de kering gesloten is. Faalscenario's zijn dus voor de golfberekeningen niet beschouwd.

5.7 Golfcondities Duinen

Voor het watersysteem duinen zijn geen productieberekeningen golven gemaakt. De golfcondities op de gebiedsrand gelden zowel als basisstochasten als als hydraulische belastingparameters voor het toetsspoor duinafslag, zie paragraaf 3.4.7.

6 Statistiek: inherente onzekerheid

6.1 Inleiding

In dit hoofdstuk beschrijven we de statistiek van de basisstochasten voor alle regio's gegeven in Bijlage A. De statistiek van de basisstochasten in WBI-2017 is nieuw, met uitzondering van de meerpeilstatistiek en de zeewaterstandsstatistiek. De statistiek van het meerpeil en zeewaterstand is overgenomen uit HR-2006 of WTI-2011. De toeslagen voor hoogwaterstijging en trendcorrecties zijn wel geactualiseerd in WBI-2017.

De windstatistiek is vernieuwd in WBI-2017. Het Rijkcoort-Weibull model voor de windstatistiek (Rijkcoort en Wieringa, 1983) is in WBI-2017 vervangen door de nieuwe windstatistiek die in het kader van SBW is afgeleid (Caires, 2009). In verband met deze nieuwe statistiek is ook de gecombineerde wind-waterstandsstatistiek geactualiseerd in WBI-2017.

De afvoerstatistiek van de Rijn, de Maas en de Overijsselse Vecht is ook vernieuwd in WBI-2017. De afvoerstatistiek van de Rijn bij Lobith en die van de Maas bij Borgharen zijn bepaald met de Generator of Rainfall And Discharge Extremes, GRADE (Beersma et al, 2014), (Deltares, 2014j), (Deltares, 2014i), (Leander et al, 2005), (Leander en Buishand, 2009), (Deltares, 2015j) en (Deltares, 2016l). Aan de hand van een aantal WAQUA berekeningen uit de productieberekeningen fysica (Hoofdstuk 4) voor de Rijntakken en de Maas is de afvoerstatistiek van GRADE bij Lobith en Borgharen respectievelijk vertaald naar de afvoerstatistiek bij Olst en Lith. De afvoerstatistiek van de Overijsselse Vecht bij Dalfsen is in WBI-2017 opnieuw bepaald; hierbij is rekening gehouden met overstromingen in het bovenstroomse deel van de Vecht en de zijleidingen (Jungermann en Horn, 2016) en (Geerse, 2017).

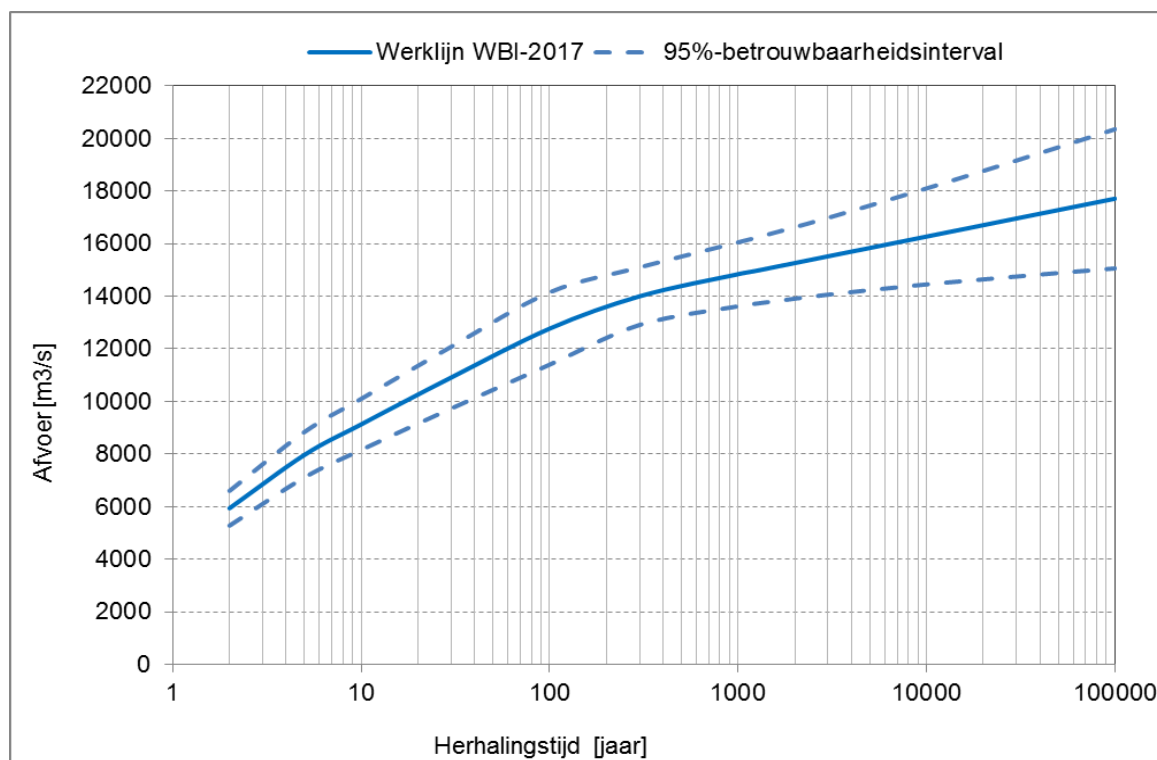
In dit hoofdstuk behandelen we de marginale statistiek van alle basisstochasten in Hydra-Ring, inclusief onderlinge correlaties. Achtereenvolgens komen aan de orde de afvoerstatistiek van de Rijn, Maas en de Overijsselse Vecht (Paragraaf 6.2), de windstatistiek (Paragraaf 6.3), de meerpeilstatistiek van het IJsselmeer en het Markermeer (Paragraaf 6.4) en de zeewaterstandsstatistiek bij verschillende hoofdstations langs de kust (Paragraaf 6.5). Paragraaf 6.6 beschrijft de statistiek met betrekking tot het functioneren van de stormvloedkeringen, inclusief de waterstandsvoorspellingen t.b.v. de aansturing van de keringen. In paragraaf 6.7 worden de correlaties tussen verschillende basisstochasten behandeld.

De inhoud van dit hoofdstuk is grotendeels gebaseerd op de documenten (Chbab en Eilander, 2017) en (Deltares, 2016k).

6.2 Statistiek van de rivierafvoeren

6.2.1 Statistiek van de Rijnafvoer bij Lobith

De afvoerstatistiek van de Rijn bij Lobith in WBI-2017 is uitvoerig beschreven in (Chbab en Eilander, 2017). Deze is bepaald met het model GRADE²¹, een combinatie van een stochastische neerslaggenerator en een hydraulisch/hydrologisch simulatiemodel van de Rijn. Met GRADE zijn verschillende varianten beschouwd en doorgerekend: de situatie waarbij wel/geen overstromingen in de bovenstroomse delen van het stroomgebied worden beschouwd al dan niet in combinatie met noodmaatregelen om die overstromingen te beperken. De variant waarbij geen rekening wordt gehouden met overstromingen in Duitsland zou een overschatting van de extreme waterstanden bij Lobith opleveren, omdat bij dergelijke debieten ook bovenstroomse gebieden zullen overstromen. De variant waarbij wel rekening wordt gehouden met overstromingen maar niet met noodmaatregelen in Duitsland zou een onderschatting van de waterstanden bij Lobith kunnen geven, omdat verwacht wordt dat bij extreem hoogwater op de Rijn in Duitsland noodmaatregelen getroffen zullen worden, die een waterstandsverhogend effect hebben op benedenstroomse locaties. Deze benadering is daarom door ENW als onvoldoende conservatief beoordeeld. Voor toepassing binnen WBI-2017 is daarom, na overleg met Rijkswaterstaat en ENW, gekozen voor de variant met overstromingen en inzet van noodmaatregelen in Duitsland.



Figuur 6.1 Resultaten (werklijn en 95%-betrouwbaarheidsinterval) van GRADE voor de Rijn bij Lobith, rekening houdend met overstromingen in bovenstroomse delen van het stroomgebied en inzet van noodmaatregelen (Bron: Deltares, 2015j).

²¹ GRADE = Generator for Rainfall And Discharge Extremes

Bij de berekeningen met GRADE met deze variant is daarnaast rekening gehouden met onzekerheden in klimaat, hydrologie en hydraulica (SOBEK²²). Onzekerheden in het SOBEK-model omvatten het al dan niet treffen van noodmaatregelen tegen overstromingen in Duitsland, de dijkhoogtes, het bergend volume achter de dijken, het al dan niet bezwijken van de dijken en de bodemfrictie; voor meer details wordt verwezen naar Deltares (2015j).

De uitkomsten van GRADE met de variant met overstromingen in Duitsland in combinatie met noodmaatregelen zijn beschreven in Tabel 6.1 en Figuur 6.1. Ter vergelijking zijn in de laatste kolom van Tabel 6.1 ook de afvoeren zoals in het kader van WTI-2011 berekend door middel van statistische extrapolatie opgenomen, zoals beschreven in Deltares (2009a). Voor een herhalingstijd van 1250 jaar wordt volgens deze methode een afvoer berekend van (onafgerond) 15.700 m³/s; het bijbehorende 95%-betrouwbaarheidsinterval is 5300 m³/s breed ([13.080, 18.400 m³/s]). GRADE berekent voor een terugkeertijd van 1250 jaar een afvoer bij Lobith van 14.970 m³/s (niet afgerond). Hierbij geldt een 95%-betrouwbaarheidsinterval van ca. 2.500 m³/s breed ([13.720, 16.230 m³/s]). Merk op dat 'maatgevende' afvoer in HR-2006 16.000 m³/s bedraagt, mede tot stand gekomen op basis van beleidsmatige²³ overwegingen. De afvoer berekend met GRADE voor een herhalingstijd van 1250 jaar is dus aanzienlijk lager dan de oude 'maatgevende' afvoer van 16.000 m³/s; ook is het 95%-betrouwbaarheidsinterval ca. een factor 2 smaller. Een afvoer van 16.000 m³/s komt volgens de GRADE methode gemiddeld eens in ca. 7500 jaar voor (in plaats van 1250 jaar volgens de statistische extrapolatiemethode).

Figuur 6.1 laat zien dat vanaf afvoeren van ca. 12.000 m³/s afvlakking optreedt in de werklijn bepaald met GRADE. Deze afvlakking is niet aanwezig in de oude werklijn. Verder valt op dat voor afvoeren met herhalingstijden tussen 50 en 100 jaar een lokale toename te zien is in de onzekerheidsband. Dit heeft er zeer waarschijnlijk mee te maken dat rond dit afvoerniveau (i.e. rond de 12.000 m³/s, zoals ook te zien in Figuur 6.1) de eerste overstromingen optreden in Duitsland. Hierdoor kunnen kleine aanpassingen van de modelparameters in GRADE er voor zorgen dat er net wel of net niet een overstroming in Duitsland plaatsvindt. Voor lagere afvoeren doen dergelijke modelonzekerheden er minder toe want er treden toch geen overstromingen op. Voor hogere afvoeren neemt de modelonzekerheid weer af omdat de afvoer dan zo hoog is dat een overstroming in Duitsland hoe dan ook gaat plaatsvinden. Rond de 12.000 m³/s is de onzekerheid het grootst vanwege het net wel of net niet overstroomd van bovenstroomse dijken.

Figuur 6.2 toont een vergelijking tussen de werklijn van GRADE en de werklijn uit HR-2006, inclusief bijbehorende betrouwbaarheidsintervallen. Vergeleken met de werklijn uit HR-2006, berekent GRADE voor herhalingstijden kleiner dan 10 jaar relatief lagere afvoeren, de onzekerheidsband van GRADE voor het lage bereik (1 – 10 jaar) is echter relatief groot. Voor een herhalingstijd van 2 jaar bijvoorbeeld bedraagt het verschil tussen de extrapolatie en GRADE ca. 1.000 m³/s (ca. 15%). In gebieden waar relatief lage afvoeren (in combinatie met andere basisstochasten) de hydraulische belasting bepalen, kan dit verschil een verhogend effect hebben. In het middenbereik (herhalingstijden tussen 25 en 250 jaar) berekent GRADE hogere afvoeren. Voor het hoge en extreme bereik (herhalingstijd > 250 jaar) komt GRADE

²² SOBEK is een modelsysteem voor de simulatie van ondermeer waterbeweging en neerslagafvoer in één dimensie in geschematiseerde open waterlopen. Dit model vormt de basis voor de waterbeweging in GRADE.

²³ De oude maatgevende afvoer van de Rijn bij Lobith is beleidsmatig gekozen en is in principe niet identiek aan het getal dat rechtstreeks volgt uit de statistische extrapolatie van afvoermetingen, zie ook Tabel 6.1.

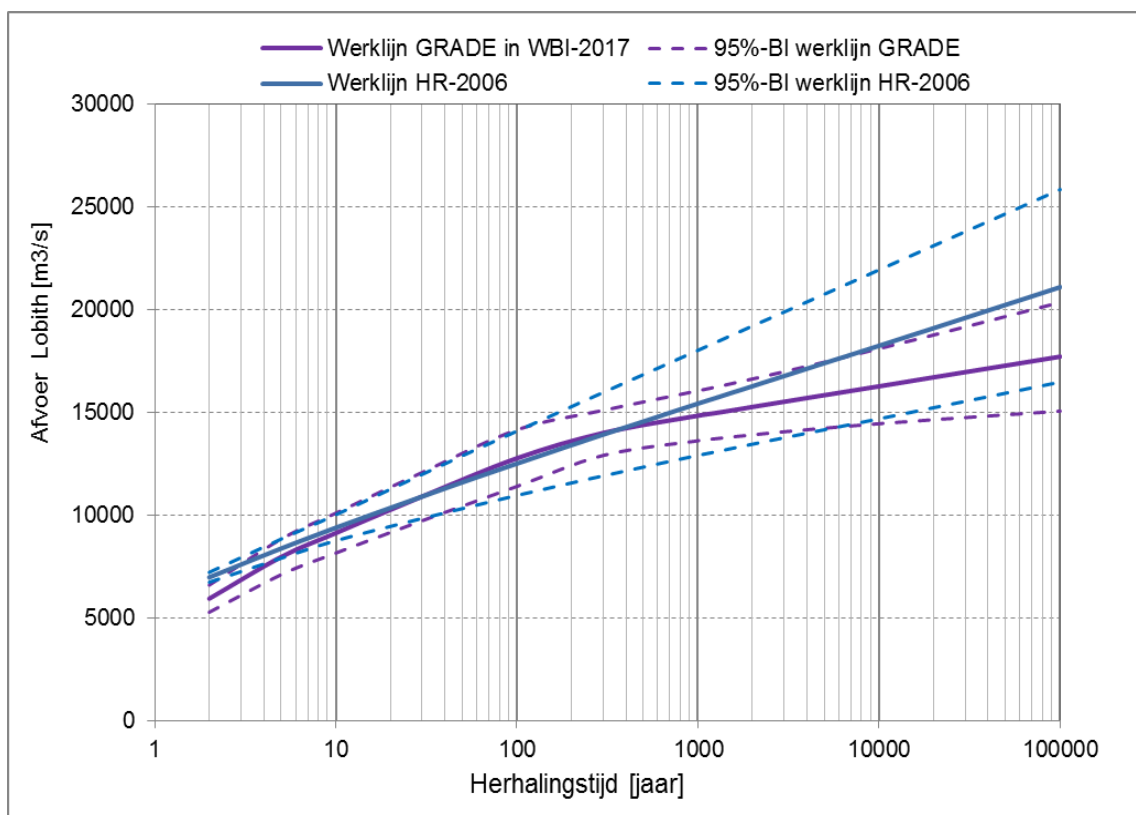
juist beduidend lager uit dan de werklijn in HR-2006. Het verschil loopt voor $T = 10.000$ jaar op tot bijna $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Voor herhalingstijden groter dan 10.000 jaar loopt het verschil nog gestaag op. De waterstanden-bij-de-norm zullen hierdoor dan ook aanzienlijk lager zijn in afvoer-gedomineerde gebieden (tot enkele decimeters). Deze verlaging kan echter deels of volledig teniet worden gedaan door het meenemen van de onzekerheden, zie hoofdstuk 7.

Tabel 6.1 Afvoeren van de Rijn bij Lobith inclusief 95% betrouwbaarheidsintervallen, voor de situatie met overstromingen in Duitsland in combinatie met noodmaatregelen (Bron: Deltares, 2015j). De laatste kolom omvat afvoeren (behorende bij enkele herhalingstijden) die verkregen zijn met de extrapolatiemethode.

Herhalings-tijd [jaar]	Afvoer GRADE [m^3/s]	95% betrouwbaarheidsinterval [m^3/s]		Afvoer extrapolatie-methode [m^3/s]
		ondergrens	bovengrens	
2	5.940	5.280	6.600	6.980
5	7.970	7.110	8.840	8.380
10	9.130	8.160	10.100	9.390
30	10.910	9.730	12.080	-
100	12.770	11.400	14.150	12.510
300	14.000	12.910	15.100	-
1000	14.840	13.620	16.050	15.430
1250	14.970	13.720	16.230	15.700
3000	15.520	14.060	16.980	-
10000	16.270	14.450	18.100	18.240
30000	16.960	14.750	19.160	-
100000	17.710	15.060	20.350	-

6.2.2 Statistiek van de Maasafvoer bij Borgharen

Net als voor de Rijn wordt voor WBI-2017 de afvoerstatistiek voor de Maas bepaald met GRADE. Voor de Maas wordt alleen de variant zonder dijkdoorbraken in bovenstroomse gebieden in België beschouwd. Deze variant is mogelijk conservatief (zie onder). Details met betrekking tot de GRADE statistiek voor de Maas bij Borgharen zijn te vinden in Deltares (2014i). Het 95%-betrouwbaarheidsinterval is afgeleid in (Deltares, 2016l). De afvoeren van de Maas bij Borgharen voor verschillende herhalingstijden, zoals berekend met GRADE, zijn weergegeven in Tabel 6.2. Ter vergelijking zijn in de laatste kolom van Tabel 6.2 ook de afvoeren zoals in het kader van WTI-2011 berekend door middel van statistische extrapolatie opgenomen, zoals beschreven in Deltares (2009b). Voor een herhalingstijd van 1250 jaar wordt volgens deze methode een afvoer berekend van (onafgerond) $3.840 \text{ m}^3/\text{s}$; het bijbehorende 95%-betrouwbaarheidsinterval is $1.365 \text{ m}^3/\text{s}$ breed ($[3.180, 4.545 \text{ m}^3/\text{s}]$).



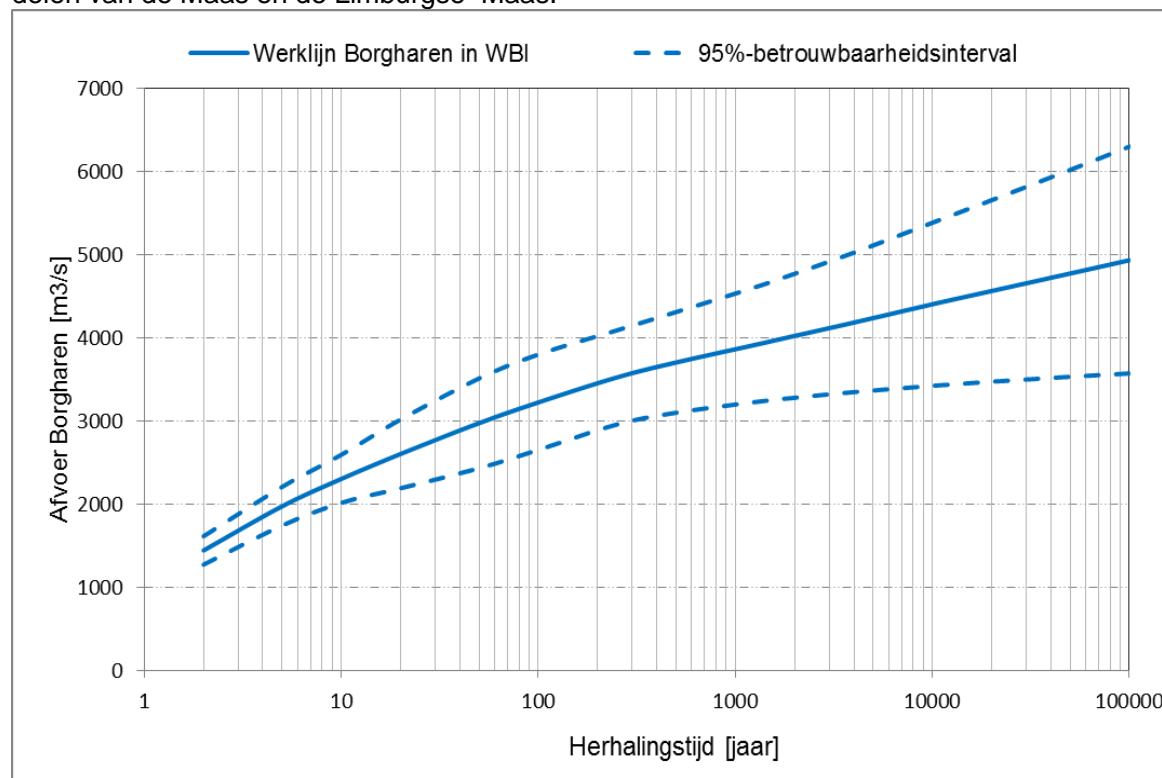
Figuur 6.2 Vergelijking werklijn GRADE met werklijn HR-2006 voor de Rijn bij Lobith, inclusief 95%-betrouwbaarheidsintervallen.

Tabel 6.2 Afvoeren van de Maas bij Borgharen behorende bij verschillende herhalingsjijden, inclusief 95%-betrouwbaarheidsintervallen. De laatste kolom omvat afvoeren berekend met de extrapolatiemethode (Deltares, 2009b).

Herhalingsjijd [jaar]	Afvoer GRADE [m ³ /s]	95%-betrouwbaarheidsinterval [m ³ /s]		Afvoer extrapolatiemethode [m ³ /s]
		ondergrens	bovengrens	
2	1.440	1.269	1.609	1.570
5	1.970	1.738	2.204	1.920
10	2.300	2.012	2.595	8.120
20	2.600	2.188	3.017	-
50	2.970	2.428	3.503	2.760
100	3.220	2.649	3.800	3.000
250	3.520	2.954	4.086	3.310
500	3.700	3.096	4.306	3.540
1250	3.910	3.223	4.605	3.840
2000	4.020	3.276	4.771	-
4000	4.180	3.344	5.026	-
10000	4.400	3.419	5.378	4.510
20000	4.560	3.469	5.651	-
50000	4.770	3.528	6.019	-
100000	4.930	3.569	6.300	-

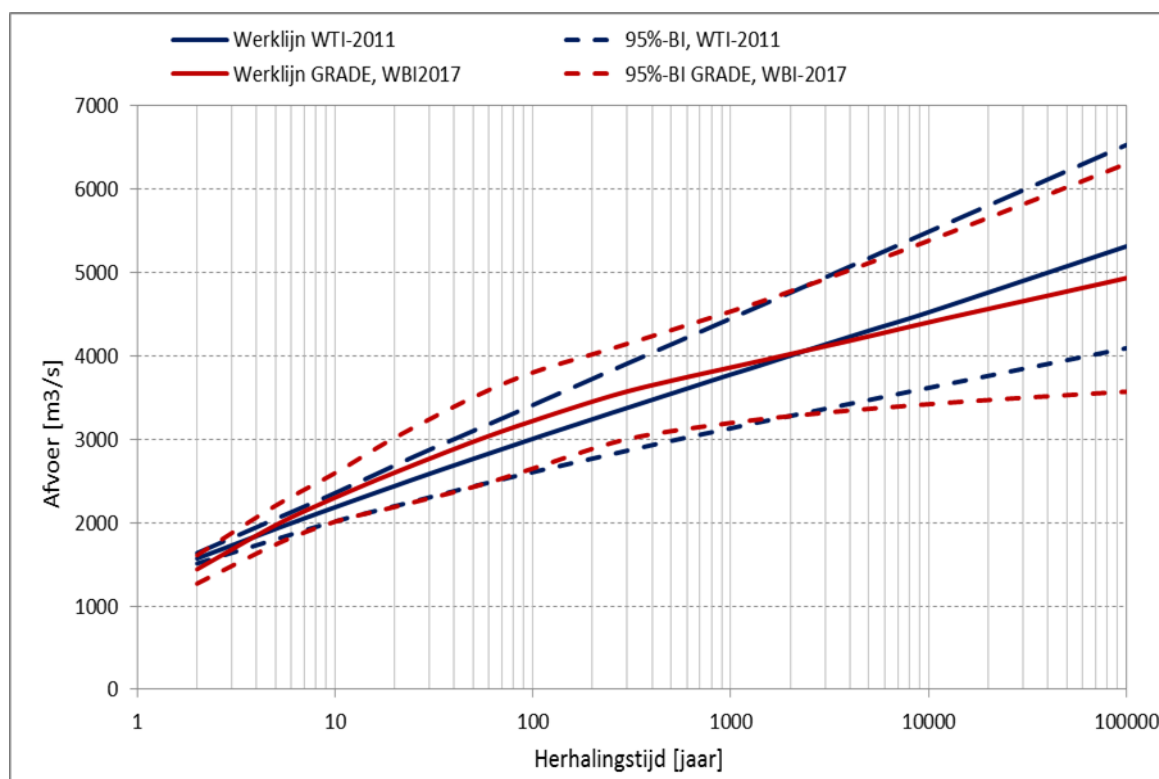
GRADE berekent voor de Maas bij Borgharen een afvoer van $3.910 \text{ m}^3/\text{s}$ bij een gemiddelde terugkeertijd van 1250 jaar. De breedte van het betrouwbaarheidsinterval dat hierbij hoort bedraagt $1.382 \text{ m}^3/\text{s}$. De oude 'maatgevende'²⁴ afvoer (1/1250 per jaar) op basis van statistische extrapolatie bedraagt $3.850 \text{ m}^3/\text{s}$, met een 95%-betrouwbaarheidsinterval van $1.400 \text{ m}^3/\text{s}$ (Van de Langemheen en Berger, 2002). Figuur 6.4 laat zien dat er voor herhalingstijden tot ca. 2500 jaar hogere afvoeren worden berekend met GRADE; het verschil met afvoeren berekend met de statistische extrapolatiemethode loopt op van $50 \text{ m}^3/\text{s}$ voor $T = 5$ jaar tot $220 \text{ m}^3/\text{s}$ voor $T = 100$ jaar en neemt daarna geleidelijk af tot $70 \text{ m}^3/\text{s}$ voor $T = 1250$ jaar. GRADE berekent voor herhalingstijden boven de 2500 jaar lagere afvoeren, zie ook Figuur 6.4. Voor herhalingstijden korter dan 5 jaar berekent GRADE lagere afvoeren dan de extrapolatiemethode. Voor $T = 2$ jaar geldt een verschil van $130 \text{ m}^3/\text{s}$.

Uit Figuur 6.4 blijkt verder dat voor herhalingstijden tot ca. 300 jaar het betrouwbaarheidsinterval van GRADE veel breder (ca. 2 keer zo breed) is dan dat van de extrapolatiemethode. Voor herhalingstijden van rond 50 jaar is het betrouwbaarheidsinterval twee keer zo breed. Dit betekent dat de onzekerheid van GRADE voor zulke relatief lage herhalingstijden bijna twee keer zo groot is als die behorende bij de statistische extrapolatiemethode. De hogere afvoeren berekend met GRADE in combinatie met de daarbij behorende grote onzekerheid zullen een verhogend effect hebben op de waterstanden in gebieden waar dergelijke Maasafvoer relevant is. Dit geldt specifiek voor de bovenstroomse delen van de Maas en de Limburgse Maas.



Figuur 6.3 Werklijn Maas bij Borgharen in WBI-2017, gebaseerd op GRADE, inclusief 95% betrouwbaarheidsinterval.

²⁴ De oude maatgevende afvoer van de Maas bij Borgharen is evenals de Rijn beleidsmatig gekozen en is in principe niet identiek aan het getal dat rechtstreeks volgt uit de statistische extrapolatie van afvoermetingen (Deltares, 2009b).



Figuur 6.4 Vergelijking werklijn GRADE en statistische extrapolatiemethode voor de Maas bij Borgharen, inclusief onzekerheidsbanden.

In GRADE is voor de Maas geen rekening gehouden met demping van hoogwatergolven als gevolg van overstromingen rond Luik in België. Uit onderzoek van de Universiteit van Luik, (Mail Buiteveld, 2015), waarbij een hoogwatergolf van 5.000 m³/s is doorgerekend, is namelijk gebleken dat demping van hoogwatergolven klein is en in de orde van 3 à 5% ligt. Het is de bedoeling om deze kennis te verwerken in GRADE voor de Maas. Hiertoe is echter nader onderzoek nodig. Onder de aanname dat er voldoende neerslag kan vallen in het stroomgebied van de Maas, lijkt er vooralsnog geen fysisch maximum te zijn in de afvoercapaciteit van de Maas. Mede hierom is geen aftopping van de werklijn van GRADE voor de Maas bij Borgharen toegepast.

6.2.3 Statistiek van de IJsselafvoer bij Olst

De afvoerstatistiek van de IJssel bij Olst is in WBI-2017 opnieuw afgeleid van de GRADE afvoerstatistiek voor de Rijn bij Lobith. Ter vergelijking beschrijven we eerst de werklijn bij Olst uit HR-2006. Deze werklijn bestaat uit twee exponentiële trajecten: een traject voor afvoeren die kleiner of gelijk zijn aan 800 m³/s (de afvoer met een gemiddelde herhalingstijd van 1 jaar) en een traject voor afvoeren die hoger zijn dan 800 m³/s. Voor dit tweede traject geldt de volgende relatie tussen afvoer Q en herhalingstijd T : $Q = 269,2 * \ln(T) + 800$. Een uitvoerige beschrijving van deze statistiek is te vinden in (Geerse, 2006).

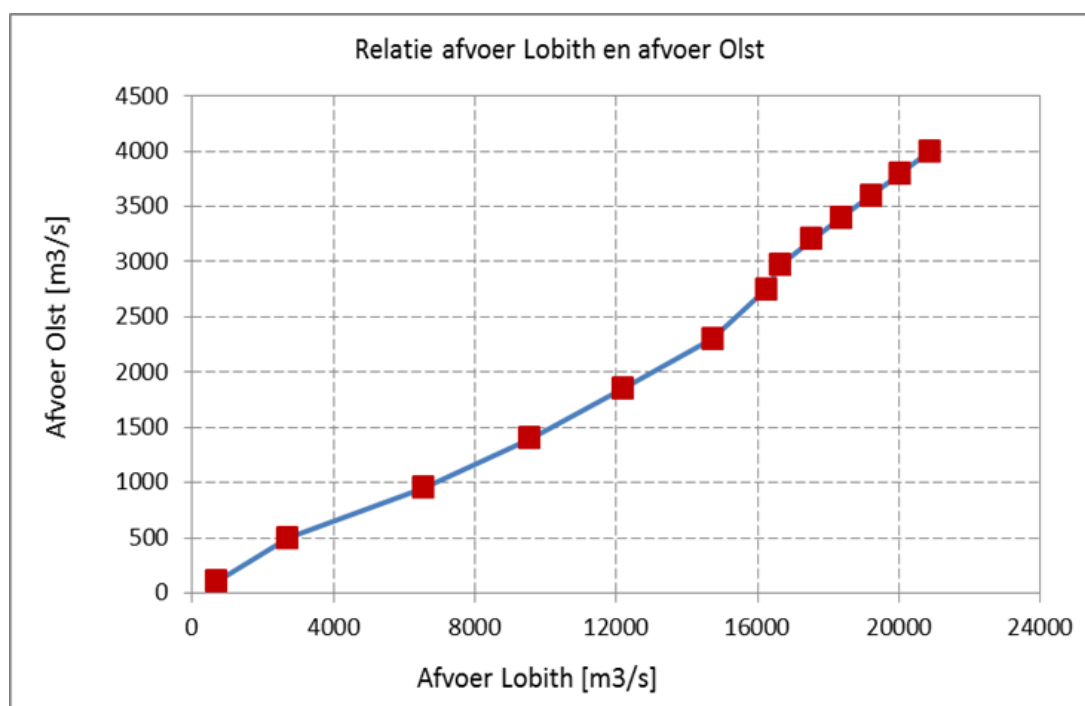
Ten behoeve van de nieuwe afvoerstatistiek van de IJssel bij Olst zijn 13 afvoergolven bij Lobith doorgerekend met het WAQUA-Rijntakken model (paragraaf 4.2) en vertaald naar corresponderende afvoergolven bij Olst. De gemiddelde afvoergolfvorm van de Rijn bij Lobith

bepaald met GRADE, weergegeven in Figuur 4.5, is hierbij als bovenrand opgelegd. Op deze wijze zijn mogelijke effecten van de Ruimte voor de Riviermaatregelen en de (nieuwe) afvoerverdeling bij de splitsingspunten evenals van de nieuwe afvoerstatistiek bij Lobith verdisconteerd in de afvoeren van de IJssel. De toppen van beschouwde afvoergolven bij Lobith en resulterende toppen van de afvoergolven bij Olst zijn weergegeven in Tabel 6.3. Figuur 6.5 toont deze relatie in grafische vorm. Uit de figuur blijkt dat vanaf een afvoer van ca. 16.000 m³/s bij Lobith de afvoer naar de IJssel meer dan evenredig toeneemt. Dit wordt veroorzaakt door Ruimte voor de riviermaatregelen en het regelwerk Hondsbroeksche Pleij bij de IJsselkop; dit regelwerk is namelijk zodanig ingesteld dat de Neder-Rijn/Lek zoveel mogelijk ontzien wordt bij afvoeren hoger dan 16.000 m³/s. De IJssel krijgt hierdoor extra afvoer te verwerken.

Op basis van de relatie uit Tabel 6.3 enerzijds en de werklijn van de Rijn bij Lobith en bijbehorende 95%-betrouwbaarheidsintervallen anderzijds (paragraaf 6.2.1) is de relatie tussen herhalingstijd en afvoer bij Olst uit Tabel 6.3 bepaald. Hierbij is uitgegaan van een volledige correlatie tussen Lobith en Olst. De eerste twee afvoerwaarden bij Olst (100 en 500 m³/s) zijn hierbij niet beschouwd. Deze afvoeren zijn namelijk zo laag dat ze gemiddeld elk jaar worden overschreden. Tabel 6.4 toont voor enkele relevante afvoeren bij Olst uit Tabel 6.3 de bijbehorende herhalingstijden. Op basis hiervan en de werklijn van de Rijn bij Lobith (paragraaf 6.2.1) is de werklijn bij Olst inclusief het bijbehorende 95%-betrouwbaarheidsinterval geconstrueerd. Deze werklijn en het bijbehorende 95%-betrouwbaarheidsinterval zijn weergegeven in Tabel 6.5 en Figuur 6.6; Zie (Chbab en Eilander, 2017) voor meer details. Tabel 6.5 bevat voor de volledigheid ook de afvoeren van de Rijn bij Lobith.

Tabel 6.3 Afvoer Lobith en bijbehorende afvoer bij Olst.

Afvoer Lobith [m ³ /s]	Afvoer Olst [m ³ /s]
675	100
2.709	500
6.536	950
9.566	1.400
12.215	1.850
14.735	2.300
16.259	2.750
16.661	2.975
17.539	3.200
18.375	3.400
19.212	3.600
20.048	3.800
20.885	4.000



Figuur 6.5 Relatie IJsselafvoer bij Olst en afvoer van de Rijn bij Lobith zoals volgt uit de productieberekeningen (paragraaf 4.2).

Tabel 6.4 Relatie afvoer Olst en herhalingsstijd, inclusief bijbehorende 95%-betrouwbaarheidsinterval

Afvoer Olst [m ³ /s]	95%-betrouwbaarheidsinterval [m ³ /s]	Herhalingsstijd [jaar]
950	856	1.044
1.150	1.003	1.297
1.400	1.218	1.582
1.850	1.593	2.107
2.150	1.864	2.436
2.300	1.957	2.643
2.750	2.309	3.191
2.975	2.424	3.526
3.200	2.520	3.880
3.400	2.714	4.086

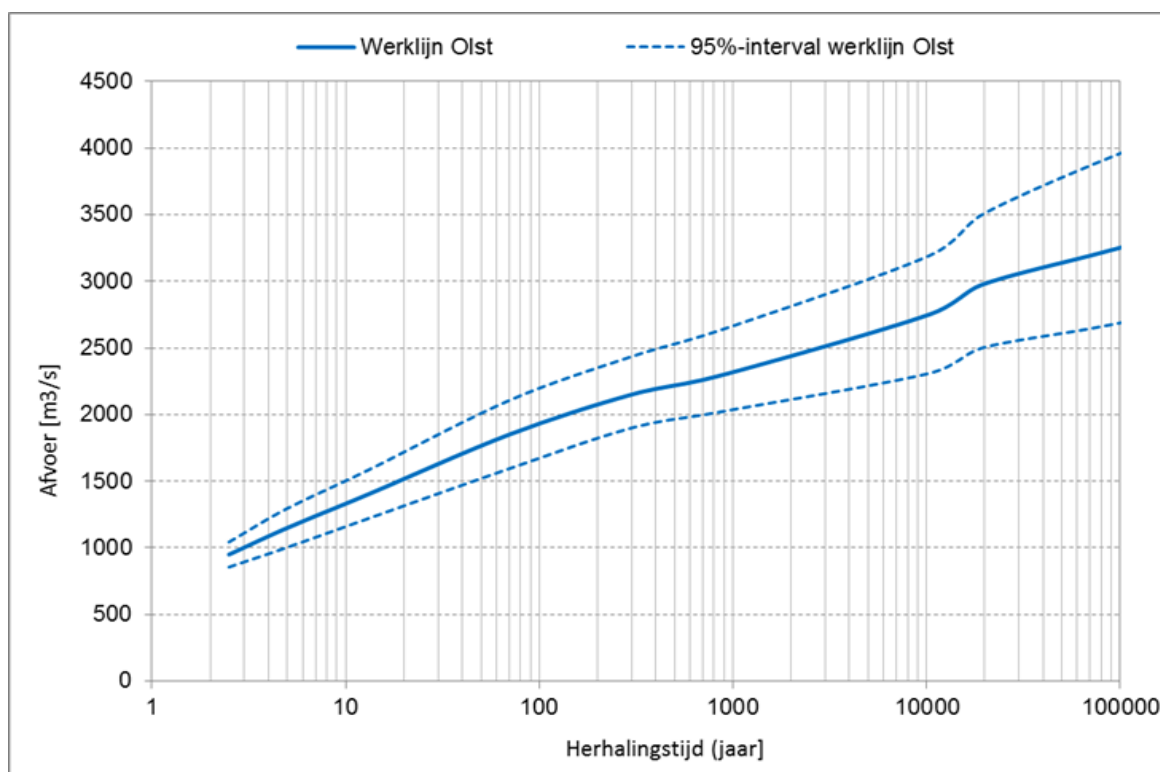
Ten opzichte van de werklijn van de IJssel bij Olst zoals gebruikt in WTI-2011 resulteert de werklijn gebaseerd op GRADE uit Figuur 6.6 in lagere afvoeren. Voor een gemiddelde herhalingsstijd van 1.250 jaar geldt volgens Tabel 6.5 een afvoer van 2.360 m³/s; dit is ruim 350 m³/s lager dan de 'maatgevende' afvoer bij Olst uit HR-2006²⁵. De werklijn en het bijbehorende 95%-betrouwbaarheidsinterval van GRADE bij Olst laten verder veel overeenkomsten zien met die van de Rijn bij Lobith. Uitzondering hierop vormt de knik in de relatie tussen Lobith en Olst. Afvoeren hoger dan ca. 16.000 m³/s bij Lobith resulteren zoals hierboven al vermeld in relatief hogere afvoeren bij Olst. Een vergelijking van de oude werklijn en de nieuwe werklijn van GRADE is weergegeven in Figuur 6.7. Het verschil tussen beide werklijnen is voor herhalingsstijden tot ca. 100 jaar klein en bedraagt ca. 100 m³/s.

²⁵ De maatgevende afvoer van de IJssel bij Olst uit HR-2006 bedraagt 2720 m³/s.

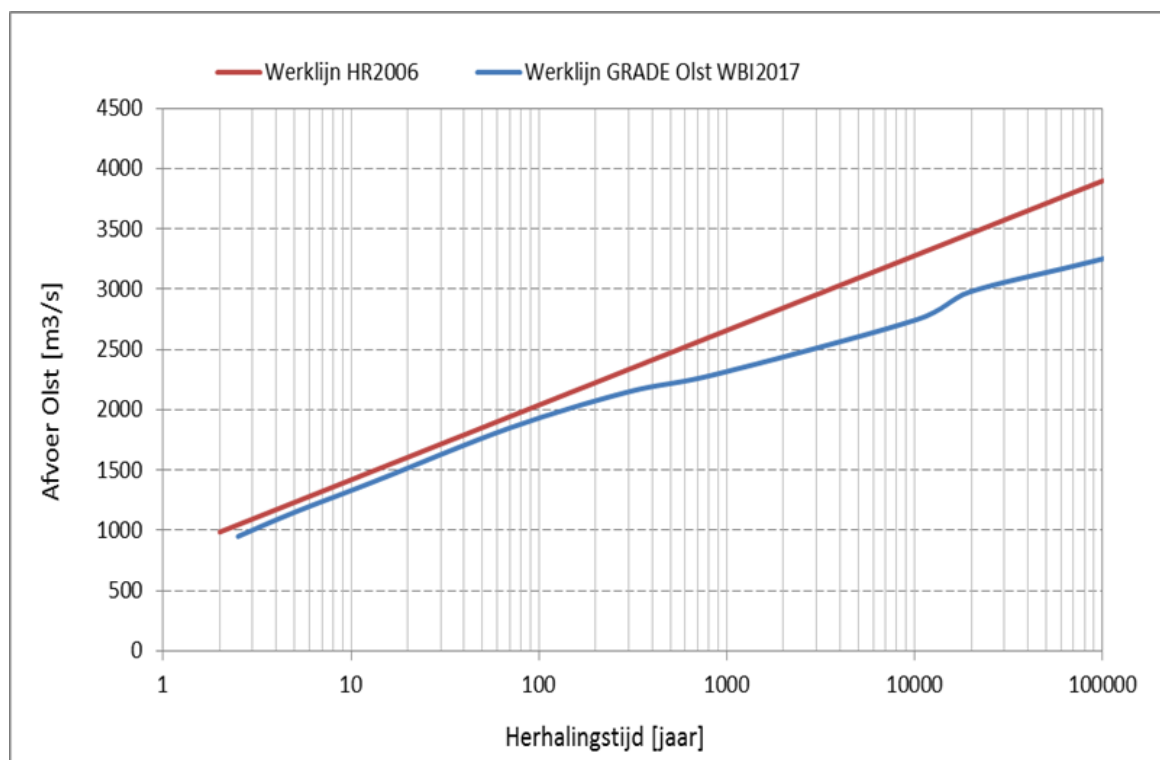
Vanaf een herhalingstijd van 100 jaar loopt het verschil gestaag op en bedraagt voor een herhalingstijd van 100.000 jaar ca. 650 m³/s.

Tabel 6.5 Werklijn IJssel bij Olst inclusief het 95%-betrouwbaarheidsinterval

Herhalingstijd [jaar]	Afvoer Lobith [m ³ /s]	Afvoer Olst [m ³ /s]	95%-ondergrens [m ³ /s]	95%-bovengrens [m ³ /s]
2	5.940	896	803	989
5	7.970	1.143	1.007	1.279
10	9.130	1.329	1.160	1.497
30	10.910	1.624	1.404	1.844
100	12.770	1.940	1.656	2.224
300	14.000	2.140	1.856	2.424
1000	14.840	2.320	1.957	2.683
1250	14.970	2.360	1.989	2.731
3000	15.520	2.510	2.100	2.920
10000	16.270	2.738	2.296	3.179
30000	16.960	3.049	2.448	3.650
100000	17.710	3.251	2.568	3.933



Figuur 6.6 Werklijn IJssel bij Olst inclusief het bijbehorende 95%-betrouwbaarheidsinterval.



Figuur 6.7 Vergelijking van de werklijn van GRADE en de werklijn uit WTI-2011 van de IJssel bij Olst.

6.2.4 Statistiek van de Maasafvoer bij Lith

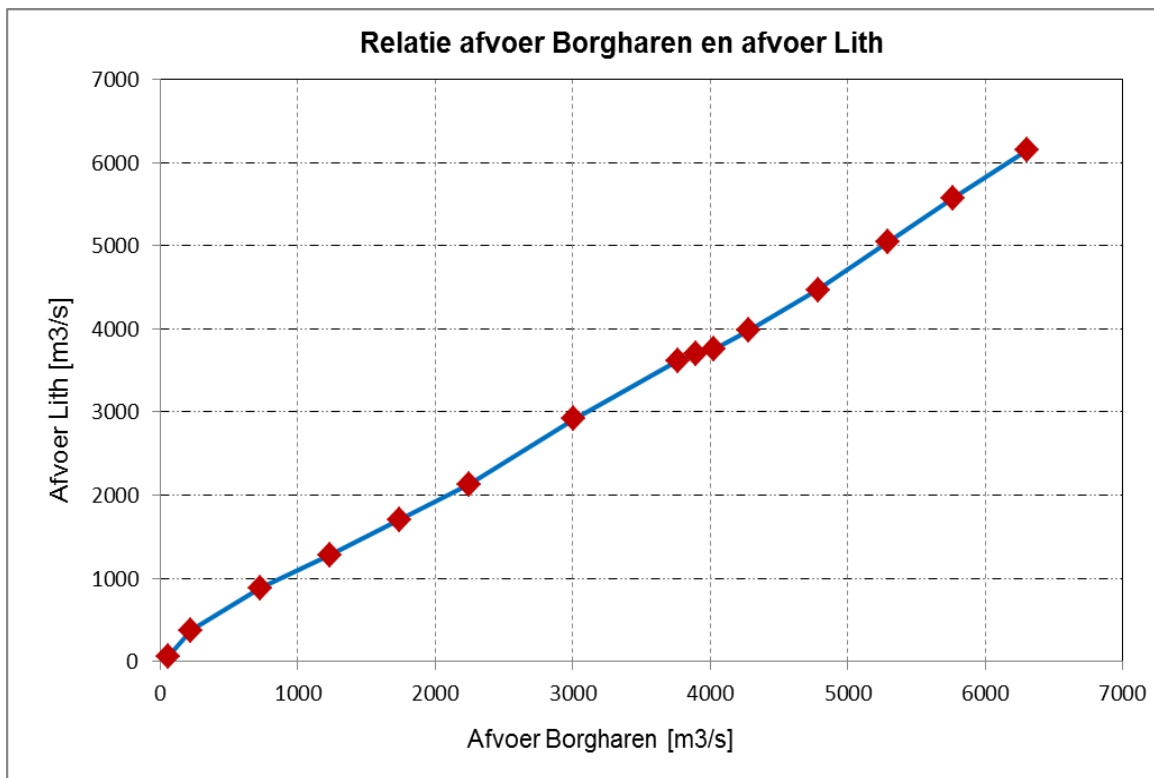
De afvoerstatistiek bij Lith is afgeleid van de afvoerstatistiek van GRADE voor de Maas bij Borgharen. Hiertoe zijn in het kader van de productieberekeningen van waterstanden 15 afvoergolven van de Maas bij Borgharen doorgerekend met het WAQUA-Maas model, zie hiervoor paragraaf 4.3. De gemiddelde afvoergolfvorm van GRADE bij Borgharen is hierbij als bovenrand opgelegd. Deze doorberekening heeft geresulteerd in 15 afvoergolven bij Lith. De topwaarden van de 15 beschouwde afvoergolven bij Borgharen en de resulterende topwaarden van de afvoer bij Lith zijn weergegeven in Tabel 6.6.

De berekende afvoer bij Lith is kleiner dan die bij Borgharen. Achtergrond hiervan is het feit dat in het bovenstroomse deel van de Maas topvervlakking van de afvoergolf optreedt. In het traject tussen Borgharen en Boxmeer wordt de afvoergolfvorm namelijk geleidelijk vlakker en breder. De golfvorm verandert benedenstrooms van Boxmeer veel minder.

Op basis van Tabel 6.6 en de werklijn van de Maas bij Borgharen en de bijbehorende 95%-betrouwbaarheidsintervallen in Tabel 6.2 is de werklijn van de Maas bij Lith inclusief bijbehorende 95%-betrouwbaarheidsintervallen geconstrueerd. Hierbij is aangenomen dat een afvoer van de Maas bij Borgharen dezelfde herhalingstijd heeft als de bijbehorende afvoer bij Lith. Tabel 6.7 toont de piekafvoeren bij Lith voor verschillende herhalingstijden, inclusief 95%-betrouwbaarheidsintervallen. Figuur 6.9 toont de resultaten in grafische vorm.

Tabel 6.6 Afvoer Maas bij Borgharen en bijbehorende afvoer bij Lith (productieberekeningen)

Afvoer Borgharen [m ³ /s]	Afvoer Lith [m ³ /s]
55	55
222	377
729	884
1.235	1.284
1.742	1.708
2.248	2.134
3.008	2.918
3.768	3.620
3.895	3.693
4.022	3.755
4.275	3.978
4.782	4.469
5.289	5.041
5.769	5.570
6.303	6.145



Figuur 6.8 Relatie tussen afvoer van de Maas bij Borgharen en die bij Lith.

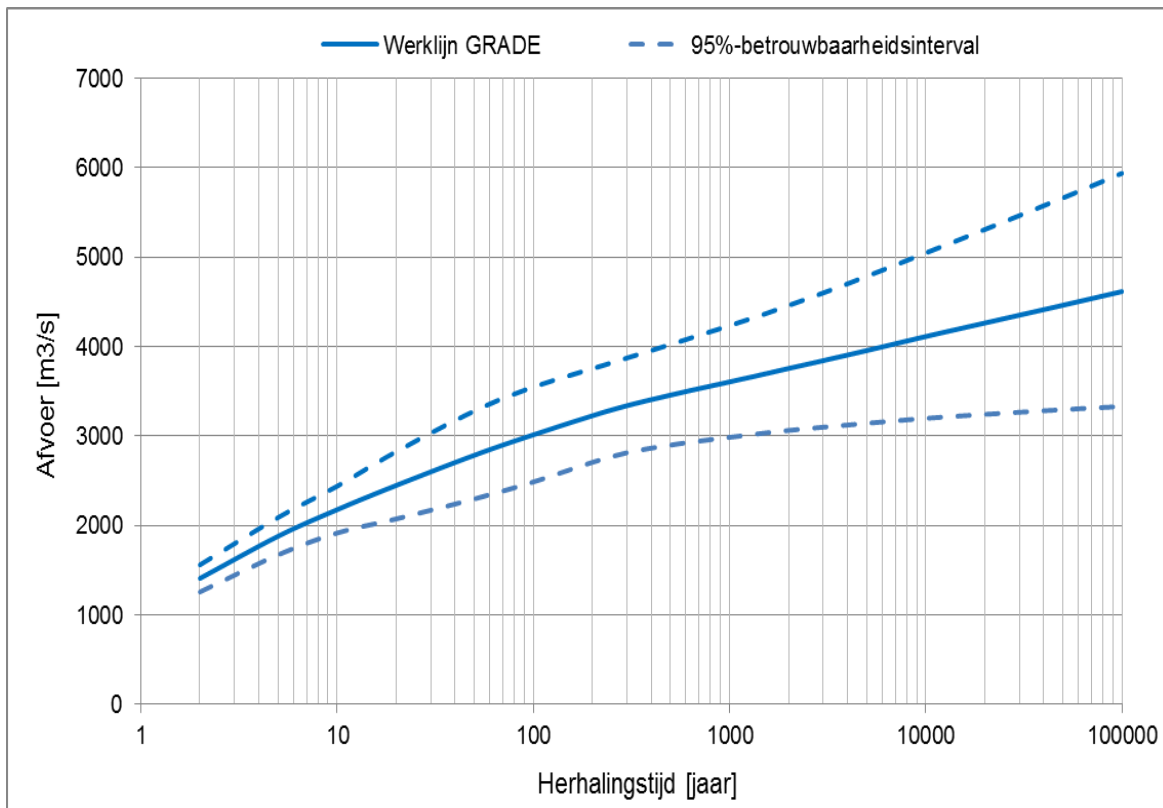
Ten opzichte van de werklijn van de Maas bij Lith uit HR-2001/WTI-2011 leidt de werklijn gegeven in Tabel 6.7 tot afvoeren van dezelfde orde grootte. Voor een gemiddelde herhalingsjijd van 1250 jaar geldt volgens Tabel 6.7 een afvoer van (afgerond) 3.650 m³/s; dit

is identiek aan de maatgevende afvoer uit TMR-2006 en 30 m³/s hoger dan de 'maatgevende' afvoer uit HR-2001. Verder valt te constateren dat het verschil tussen de afvoeren bij Borgharen en Lith klein is voor afvoeren met korte herhalingstijden. Het verschil bedraagt 30 m³/s voor T = 2 jaar en loopt op tot ruim 300 m³/s voor T = 100.000 jaar, zie Figuur 6.11.

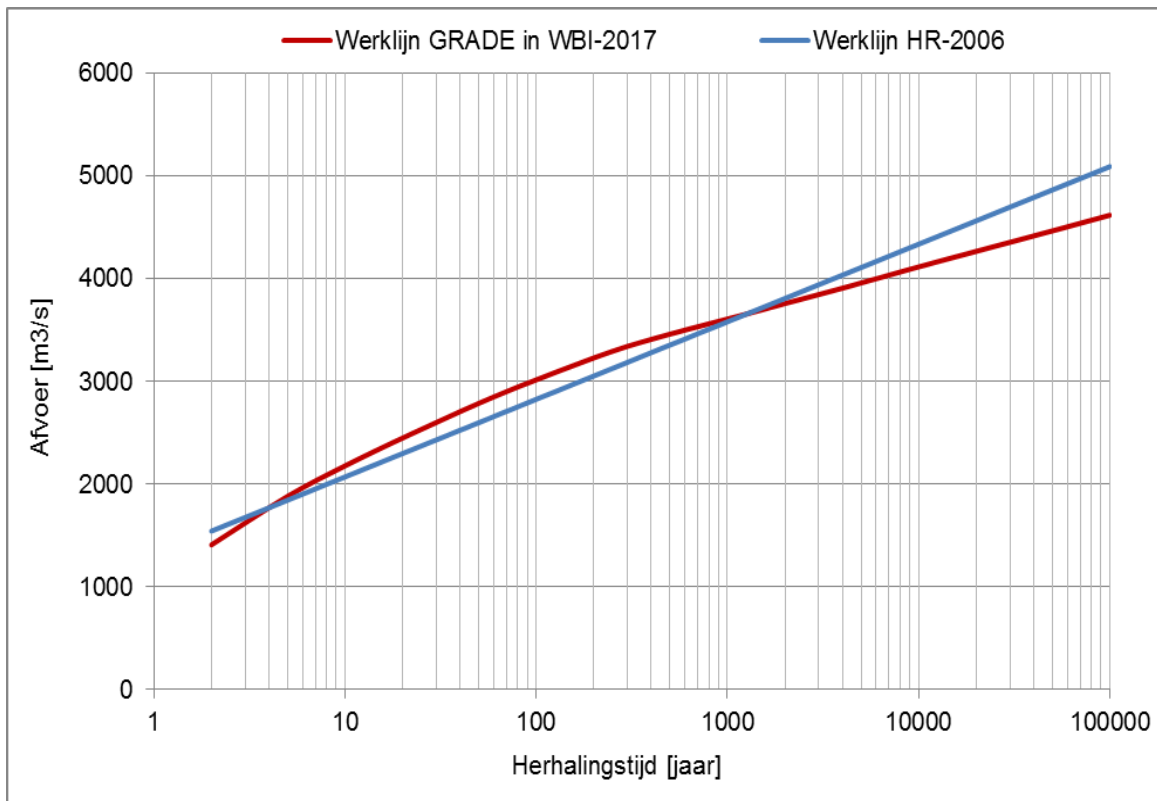
Figuur 6.10 laat een vergelijking zien tussen de werklijn uit HR-2006 en de werklijn in WBI-2017 volgend uit GRADE voor station Lith. GRADE berekent voor herhalingstijden tussen 10 jaar en 1.000 jaar hogere afvoeren dan de extrapolatiemethode in HR-2006; het verschil is het grootst voor T = 100 jaar en bedraagt ca. 190 m³/s. Vooral langs de dijktrajecten met relatief hogere normen (herhalingstijden van 1:300 en 1:1000 per jaar) zal dit verschil leiden tot hogere waterstanden (ca. 1 dm). Voor herhalingstijden langer dan 1.000 jaar berekent GRADE lagere afvoeren. Het verschil bedraagt ca. 470 m³/s voor T = 100.000 jaar.

Tabel 6.7 Afvoeren van de Maas bij Lith behorende bij verschillende herhalingstijden, inclusief 95%-betrouwbaarheidsintervallen. De laatste kolom omvat afvoeren die bepaald zijn met de extrapolatiemethode.

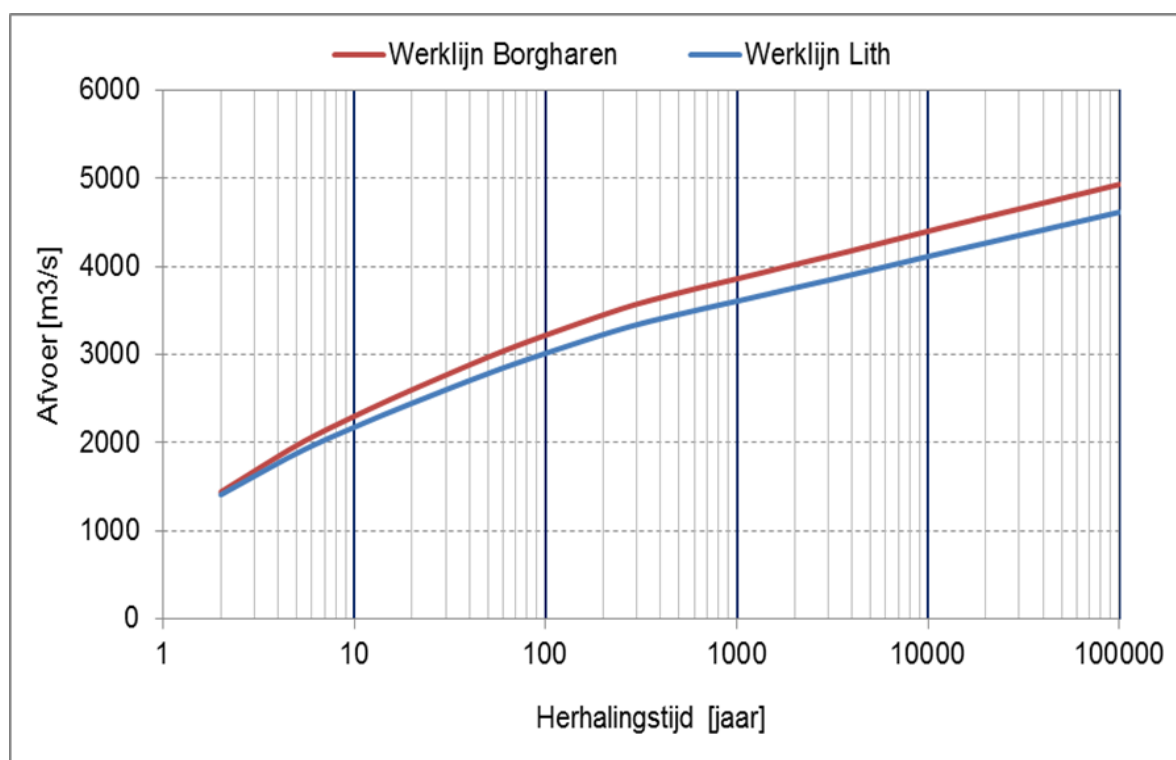
Herhalingstijd [jaar]	Afvoer GRADE Borgharen [m ³ /s]	Afvoer GRADE Lith [m ³ /s]	95%-betrouwbaarheidsinterval		Afvoer Lith extrapolatie [m ³ /s]
			Ondergrens [m ³ /s]	Bovengrens [m ³ /s]	
2	1.440	1.409	1.258	1.560	1.542
5	1.970	1.880	1.672	2.089	1.843
10	2.300	2.177	1.916	2.439	2.070
20	2.600	2.448	2.074	2.825	-
50	2.970	2.785	2.297	3.279	2.597
100	3.220	3.014	2.487	3.547	2.824
250	3.520	3.291	2.770	3.818	3.124
500	3.700	3.458	2.899	4.024	3.351
1250	3.910	3.653	3.012	4.304	3.652
2000	4.020	3.756	3.063	4.460	-
4000	4.180	3.906	3.124	4.703	-
10000	4.400	4.113	3.198	5.047	4.335
20000	4.560	4.264	3.243	5.309	
50000	4.770	4.463	3.296	5.662	
100000	4.930	4.616	3.331	5.937	



Figuur 6.9 Werklijn Maas bij Lith, inclusief het bijbehorende 95%-betrouwbaarheidsinterval.



Figuur 6.10 Werklijn Maas bij Lith volgens uit GRADE samen met de werklijn uit HR-2006.



Figuur 6.11 GRADE werklijnen van de Maas bij Borgharen (rood) en bij Lith (blauw).

6.2.5 Statistiek van de Overijsselse Vecht bij Dalfsen

Voor de Vecht geldt dat de afvoerstatistiek in het verleden is vastgesteld door middel van statistische extrapolatie van afvoerdata bij Dalfsen²⁶ in combinatie met een neerslagafvoer model, zie (Klopstra et al, 2002). In het kader van HR-2006 zijn aanvullende statistische analyses uitgevoerd op basis van afvoergegevens van de Vecht bij Dalfsen. Bij deze aanvullende analyses is onder andere de Bayesiaanse statistiek toegepast om onzekerheden te verdisconteren. Overstromingen in het bovenstroomse deel van de Vecht en zijleidingen zijn hierbij echter buiten beschouwing gelaten. Op basis van de resultaten van deze analyses en beleidsmatige overwegingen is de afvoer met een herhalingstijd van 1250 jaar vastgesteld op 550 m³/s, zie (Geerse, 2006).

In WBI-2017 is een nieuwe werklijn afgeleid voor de Vecht bij Dalfsen; hierbij zijn op pragmatische wijze de effecten van overstromingen in het bovenstroomse deel van de Vecht en van de zijleidingen meegenomen. De nieuwe werklijn is tot stand gekomen door een bepaalde transformatie toe te passen, waarbij afvoeren bij Dalfsen zonder overstromingen worden getransformeerd naar afvoeren mét overstromingen; details met betrekking tot deze pragmatische werkwijze zijn te vinden in (Geerse, 2016a, 2017). De betreffende transformatie is weergegeven in Tabel 6.8.

²⁶ De afvoerstatistiek van de Overijsselse Vecht is afgeleid voor Dalfsen. Soms wordt ook de stuw bij Vechterweerd genoemd als representatieve locatie voor de afvoerstatistiek van de Vecht. Tussen Dalfsen (km 45) en Vechterweerd (km 49,3) is geen sprake van zijdelingse toevoer zodat de statistiek op beide locaties gelijk genomen kan worden.

Op basis van de transformatie uit Tabel 6.8 is een nieuwe werklijn bij Dalfsen geconstrueerd. Deze nieuwe werklijn is samen met de werklijn uit HR-2006 afgebeeld in Figuur 6.12. Het effect van overstromingen is duidelijk terug te zien in deze figuur. De nieuwe werklijn laat namelijk een afbuiging zien vanaf T = 100 jaar. Vanaf T = 10.000 jaar (afvoer = ca. 600 m³/s) is de afbuiging het sterkst. Tabel 6.9 toont voor enkele relevante herhalingstijden de bijbehorende afvoeren volgens de nieuwe werklijn (en ter vergelijking ook die volgens de werklijn uit HR-2006).

Tabel 6.8 Gegevens van de transformatie van afvoeren zonder overstromingen naar afvoeren met overstromingen (Geerse, 2016a, 2017).

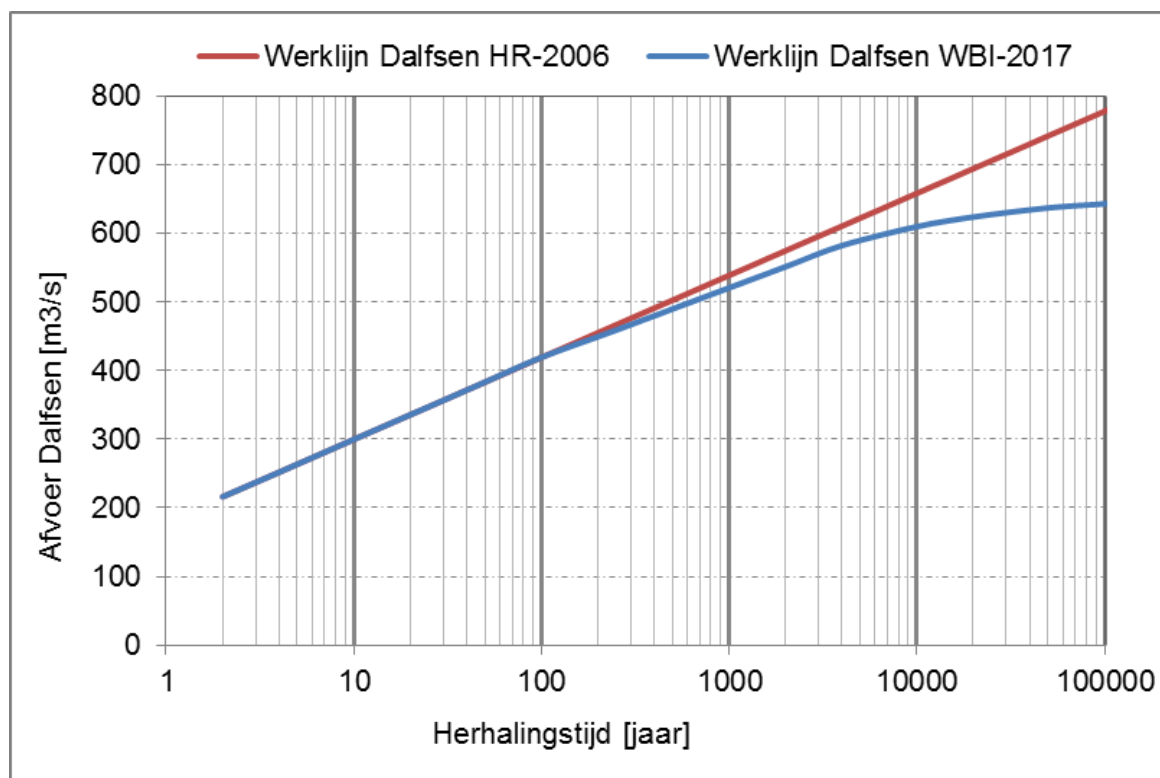
Afvoer zonder overstromen [m ³ /s]	Afvoer met overstromen [m ³ /s]
0	0
420	420
429,5	427,1
625,9	595,2
665,2	612,7
704,2	627,3
743,4	637,2
782,4	643,4

Op analoge wijze is op basis van de transformatie van afvoeren zonder overstromingen naar afvoeren met overstromingen (Tabel 6.8) een 95%-betrouwbaarheidsinterval bepaald. Dit betrouwbaarheidsinterval is gebruikt om de statistische onzekerheid van de Vecht te modelleren; dit onderdeel komt aan de orde in paragraaf 7.3.5.

Tabel 6.9 Relatie afvoer en herhalingstijd voor de Vecht bij Dalfsen, inclusief 95%-betrouwbaarheidsintervallen.

Herhalings- tijd [jaar]	Afvoer werklijn Dalfsen HR-2006 [m ³ /s]	Afvoer Dalfsen, werklijn WBI-2017 [m ³ /s]	Ondergrens 95%- interval WBI-2017 [m ³ /s]	Bovengrens 95%- interval werklijn WBI- 2017 [m ³ /s]
2	216	216	200	232
5	264	264	240	288
10	299	300	271	329
20	335	335	282	388
50	383	383	301	465
100	419	419	311	527
250	466	459	341	577
500	502	490	382	618
1250	550	530	452	648
2000	574	551	475	659
4000	610	582	511	675
10000	658	609	543	689
20000	694	623	558	696
50000	741	637	574	700
100000	777	643	584	702

Voor een herhalingstijd van 1250 jaar geldt een afvoer bij Dalfsen van 530 m³/s; dit is 20 m³/s lager dan de maatgevende afvoer van 550 m³/s uit HR-2006.



Figuur 6.12 Werklijn Overijsselse Vecht bij Dalfsen in WBI-2017 (blauwe lijn) en uit HR-2006 (rode lijn)

6.3 Windstatistiek

6.3.1 Windstatistiek hoog bereik

In WBI-2017 is de windstatistiek van het KNMI uit 1983 (Wieringa en Reijkoort, 1983) vervangen door de nieuwe windstatistiek uit Caires (2009). De informatie-overzichten in deze paragraaf zijn overgenomen uit (Caires, 2009). In deze overzichten ontbreekt het station West-Terschelling. De statistiek voor dit station is later op basis van dezelfde rekenmethode bepaald, maar de overzichten zijn daarop niet aangepast.

De windstatistiek van het KNMI is gebaseerd op metingen uit de periode 1962-1976. De nieuwe windstatistiek is gebaseerd op langere en meer betrouwbare meetreeksen van 21 windstations verspreid over heel Nederland. De meetreeksen omvatten de periode 1970 t/m 2008 (39 jaar). De volgende stations zijn gebruikt voor het afleiden van de nieuwe windstatistiek: IJmuiden, Texelhors, De Kooy, Schiphol, De Bilt, Soesterberg, Leeuwarden, Deelen, Lauwersoog, Eelde, Twenthe, Cadzand, Vlissingen, LE Goeree, Hoek van Holland, Zestienhoven, Gilze-Rijen, Herwijnen, Eindhoven, Volkel en Beek en West-Terschelling. Een overzicht van deze windstations met uitzondering van West-Terschelling is geografisch weergegeven in Figuur 6.13.

Voor de statistische analyse is de potentiële windsnelheid gehanteerd. Uit de tijdreeksen van potentiële windsnelheid zijn 2 sets van maxima onderzocht: een serie jaarmaxima (Annual Maxima) en een serie pieken boven een bepaalde drempelwaarde, de zogenoemde Peaks over Threshold (POT-series). Zowel de omni-directionele als de richtingsafhankelijke series zijn hierbij beschouwd, waarbij windsectoren van 30 graden zijn gebruikt. Tabel 6.10 toont de gehanteerde drempelwaardes voor de selectie van de POT series. De afgeleide

windstatistiek uit deze POT-series is dan ook alleen bruikbaar voor windsnelheden hoger dan de gehanteerde drempelwaarden, ook het hoge bereik genoemd.

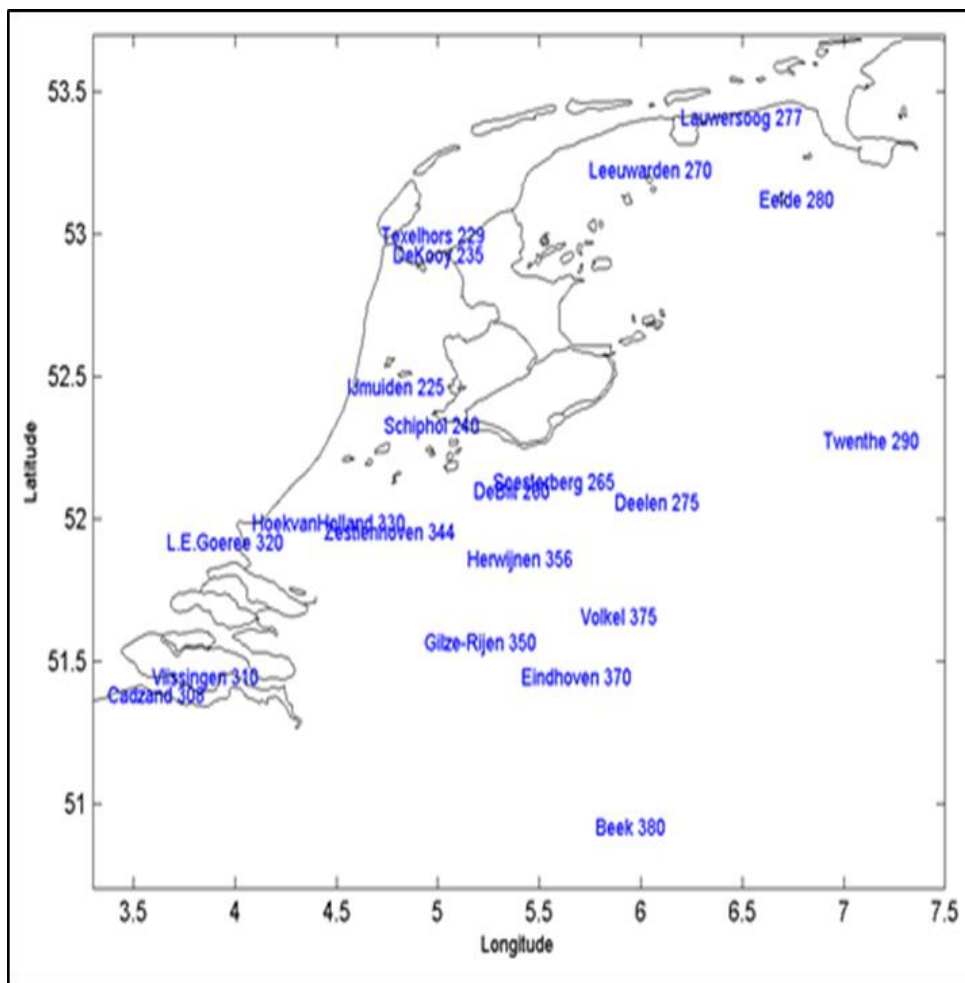
Tabel 6.10 Gebruikte drempelwaarden voor de selectie van de POT series voor de beschouwde windstations (Caires, 2009).

Station	omni-directional	345°N - 15°N	15°N - 45°N	45°N - 75°N	75°N - 105°N	105°N - 135°N	135°N - 165°N	165°N - 195°N	195°N - 225°N	225°N - 255°N	255°N - 285°N	285°N - 315°N	315°N - 345°N
Ijmuiden	18,3	12,9	10,6	11,9	10,6	08,3	09,5	14,4	16,3	16,2	17,0	15,7	13,9
Texelhors	18,0	15,3	09,7	11,5	10,4	10,4	10,8	14,8	15,1	14,8	15,3	17,1	14,8
De Kooy	16,9	10,7	10,3	09,5	08,9	09,5	10,9	13,8	17,8	17,5	16,8	14,8	11,7
Schiphol	16,6	08,4	09,7	09,2	08,3	06,9	09,4	11,2	12,9	17,2	14,0	14,0	11,3
De Bilt	11,6	08,6	07,4	07,9	06,8	07,5	08,0	09,0	11,5	11,0	09,4	09,5	07,5
Soesterberg	11,5	07,4	07,4	08,5	08,5	08,1	07,5	09,1	09,9	12,2	10,5	09,6	08,3
Leeuwarden	15,0	09,9	09,0	10,3	09,1	09,0	08,2	11,6	13,5	14,6	14,0	14,6	12,1
Deelen	13,4	08,7	08,3	09,1	8,2	09,0	09,0	10,0	11,2	12,5	10,3	09,8	09,9
Lauwersoog	15,9	11,9	11,8	12,0	12,5	10,8	10,4	12,5	14,1	15,9	15,5	14,8	14,9
Eelde	15,3	07,3	08,3	08,4	08,0	07,8	07,5	10,0	12,6	13,2	12,2	10,6	09,7
Twente	12,1	06,5	06,3	06,7	06,8	05,6	07,2	10,0	10,9	11,0	09,8	09,4	07,4
Cadzand	16,9	13,4	11,6	11,3	10,3	07,0	07,8	11,6	15,3	17,9	15,5	12,8	12,7
Vlissingen	17,0	09,2	10,3	09,2	07,9	08,8	09,7	13,1	14,3	16,9	15,4	13,5	10,4
L,E, Goeree	16,3	11,7	11,8	08,8	09,9	08,9	10,7	14,4	13,5	15,4	14,5	14,6	12,4
Hoek van Holland	17,3	14,4	12,9	11,0	09,1	09,3	10,0	13,8	16,0	17,0	17,0	15,3	16,7
Zestienhoven	14,5	09,2	08,2	09,4	08,1	07,4	08,4	11,1	13,7	13,5	13,1	13,1	10,2
Gilze-Rijen	12,1	07,6	07,9	09,2	07,3	07,1	07,1	09,9	10,7	12,9	11,1	10,9	07,8
Herwijnen	15,0	08,2	07,3	06,9	08,0	07,3	08,4	09,3	13,6	15,1	14,6	11,4	08,1
Eindhoven	13,3	07,4	07,1	08,1	07,1	08,1	07,0	09,2	11,2	12,2	13,4	11,0	08,6
Volkel	13,0	06,6	06,8	09,0	08,0	08,3	06,4	08,3	11,9	11,1	11,5	08,5	06,7
Beek	14,4	06,9	07,2	08,6	07,5	06,6	06,0	10,0	13,1	15,7	10,0	09,1	07,8

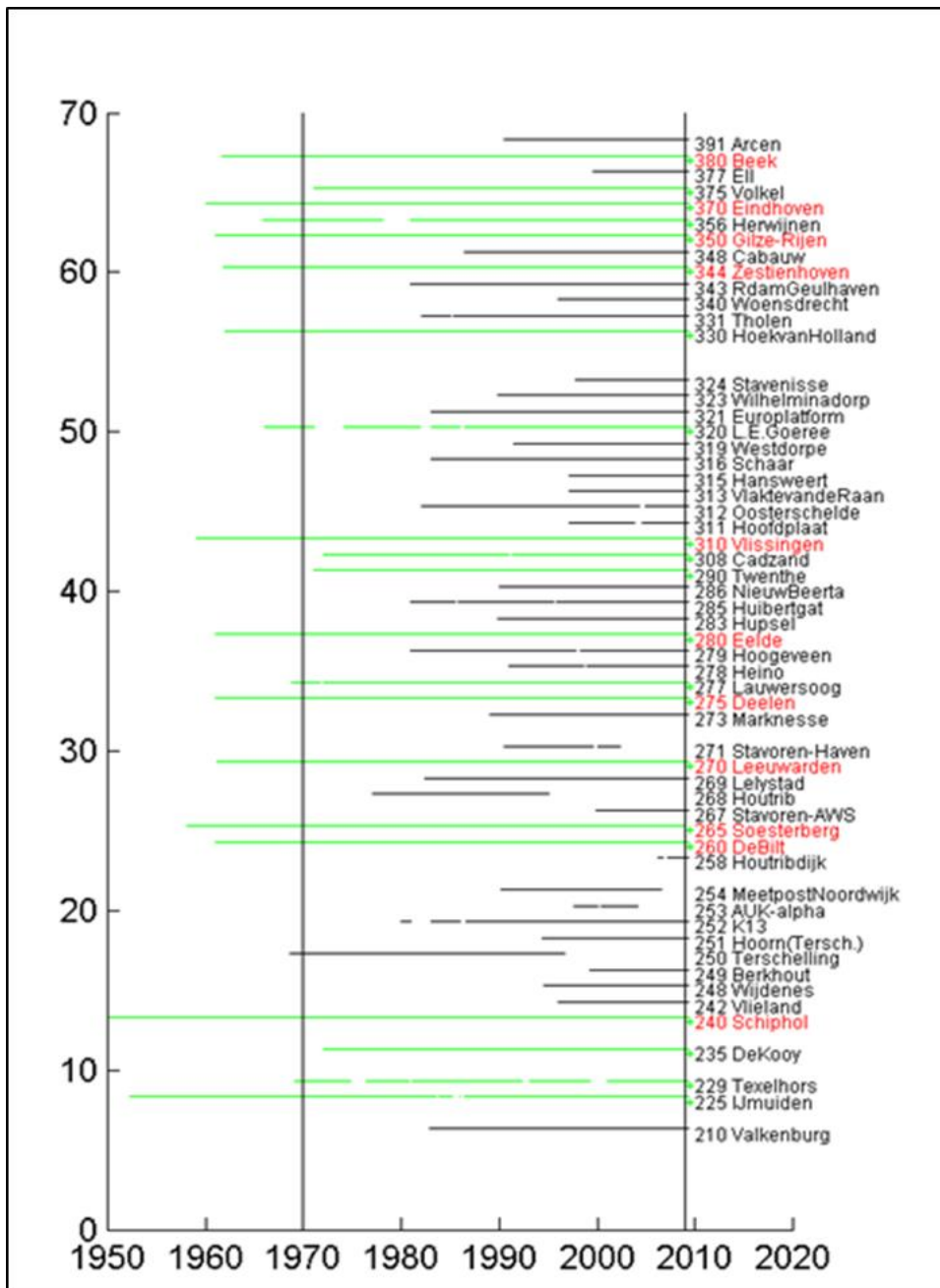
De statistische analyse op basis van de jaarmaxima is uitgevoerd met behulp van de zogenoemde Gegeneraliseerde Extremewaarden verdeling (GEV). Voor de POT-series is de zogenoemde Gegeneraliseerde Pareto Verdeling (GPV) gebruikt. Zowel de GEV als de GPV kansverdelingen worden standaard gebruikt voor de analyse van jaarmaxima en POT-series respectievelijk, zie (Caires, 2009) voor meer details.

Ten aanzien van de series jaarmaxima blijkt na uitgebreide statistische analyse dat de Gumbelverdeling de beste fit geeft; de POT series blijken volgens exponentiële verdeling te zijn verdeeld. De Gumbelverdeling en de exponentiële kansverdelingen zijn speciale gevallen van respectievelijk de GEV en de GPV verdeling. De exponentiële kansverdeling op basis van POT series blijkt verder beter te fitten dan de Gumbel kansverdeling op basis van jaarmaxima. De nieuwe windstatistiek is daarom gebaseerd op de exponentiële kansverdeling gefit op POT series, zie voor meer details (Caires, 2009).

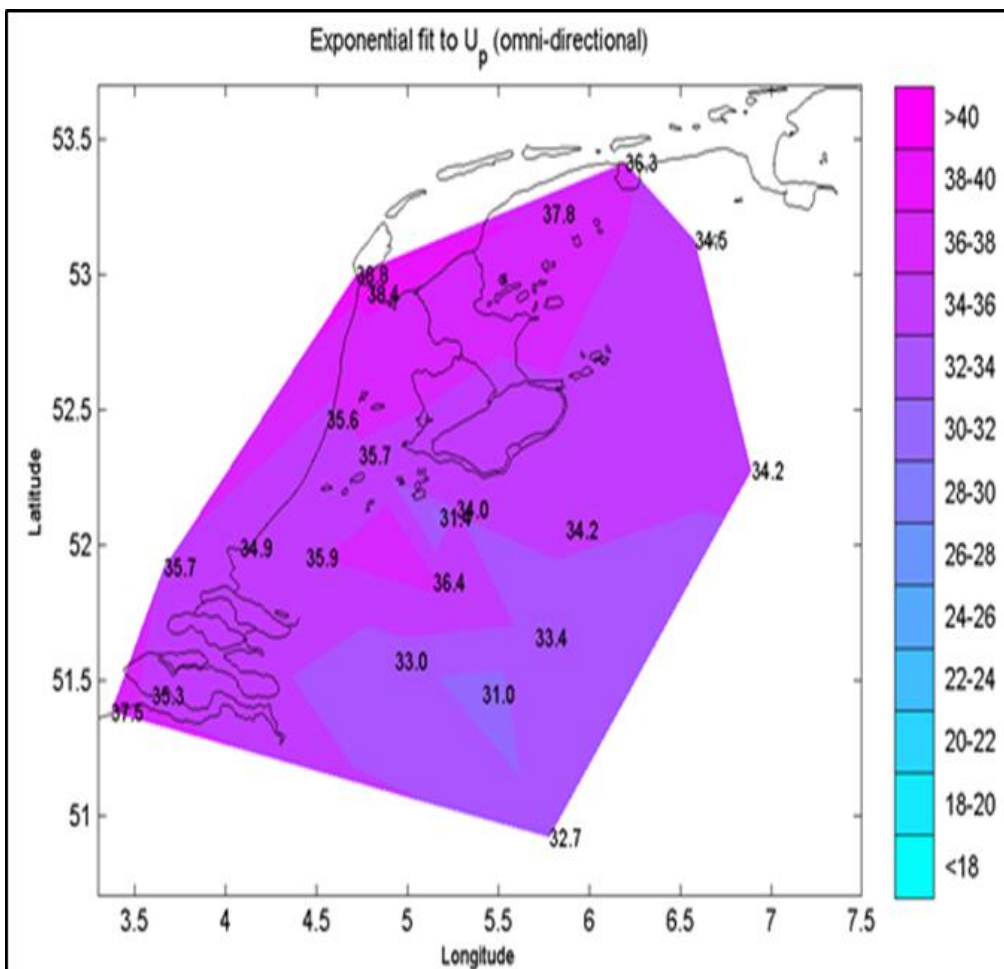
Een grafische weergave van de afgeleide potentiële windsnelheid U_p voor een herhalingstijd van 10.000 jaar is gegeven in Figuur 6.15. Tabel 6.11 toont ditzelfde resultaat in tabelvorm. Naast de 1/10.000 kwantilen bevat de tabel ook de 95% betrouwbaarheidsgrenzen (deze staan tussen haakjes).



Figuur 6.13 Grafische weergave van de windstations gebruikt voor de afleiding van de nieuwe windstatistiek (Caires, 2009).



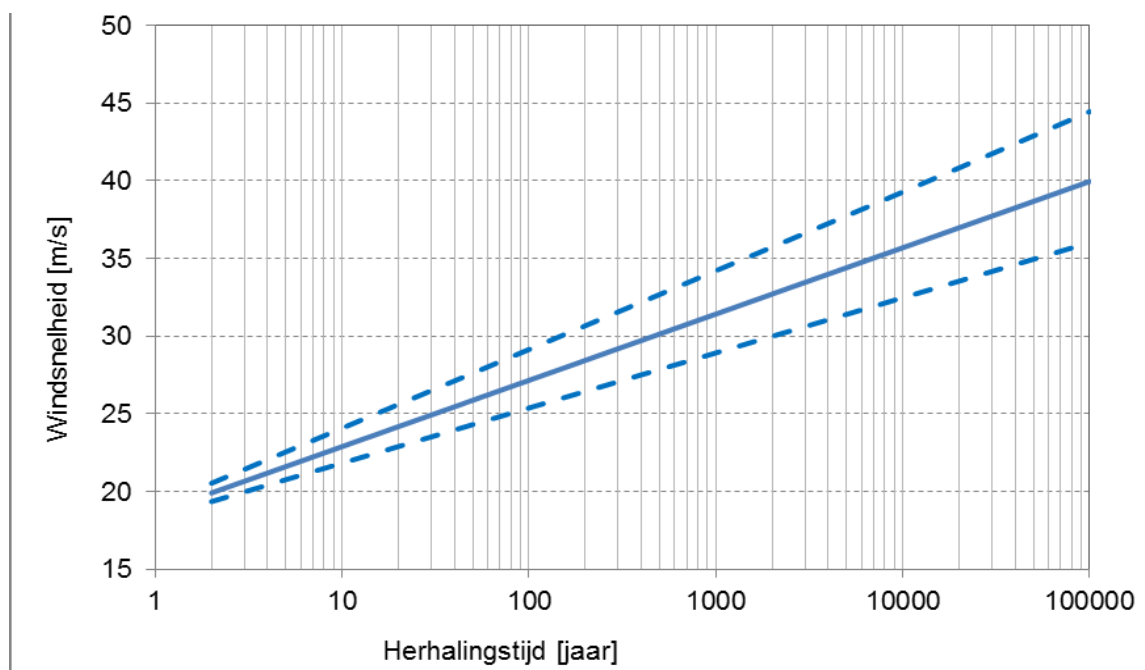
Figuur 6.14 Gebruikte windstations voor het afleiden van de nieuwe windstatistiek, inclusief meetperiode. Rood = KNMI (1983) en groen = Deltares/KNMI (Caires, 2009).



Figuur 6.15 Potentiële wind met een herhalingsjijd van 10.000 jaar voor verschillende windstations (Caires, 2009).

Tabel 6.11 Windsnelheid U_p met een overschrijdingskans van 1/10.000 per jaar inclusief betrouwbaarheidsintervallen: omni-directioneel en richtingsafhankelijk (Bron: Caires, 2009).

Station \ Sector	omni-directional						
IJmuiden	35.6 (32.9, 38.5)						
Texelhors	38.8 (35.4, 42.6)						
De Kooy	38.4 (35.1, 41.9)						
Schiphol	35.7 (32.4, 39.3)						
De Bilt	31.4 (28.8, 34.1)						
Soesterberg	34.0 (31.3, 36.9)						
Leeuwarden	37.8 (34.4, 41.3)						
Deelen	34.2 (31.2, 37.7)						
Lauwersoog	36.3 (33.9, 38.6)						
Eelde	34.5 (30.9, 38.5)						
Twenthe	34.2 (30.8, 37.9)						
Cadzand	37.5 (34.6, 40.6)						
Vlissingen	35.3 (32.4, 38.4)						
L.E. Goeree	35.7 (33.3, 38.3)						
Hoek van Holland	34.9 (32.5, 37.4)						
Zestienhoven	35.9 (33.3, 38.8)						
Gilze-Rijen	33.0 (30.6, 35.5)						
Hervijnen	36.4 (32.9, 40.5)						
Eindhoven	31.0 (28.4, 33.6)						
Volkel	33.4 (30.0, 36.8)						
Beek	32.7 (29.8, 35.9)						
Station \ Sector	345°N -15°N	15°N -45°N	45°N -75°N	75°N -105°N	105°N -135°N	135°N -165°N	
IJmuiden	29.0 (26.5, 32.2)	26.2 (23.9, 28.6)	24.1 (21.5, 26.8)	25.2 (23.1, 27.7)	20.9 (19.2, 22.8)	26.5 (24.2, 29.0)	
Texelhors	30.9 (27.5, 34.6)	32.1 (29.4, 35.0)	27.3 (24.4, 30.2)	29.9 (27.4, 32.5)	27.5 (25.1, 30.0)	31.6 (28.5, 34.9)	
De Kooy	30.0 (26.2, 34.1)	29.8 (26.2, 33.6)	31.0 (27.9, 34.5)	27.4 (25.0, 30.0)	21.5 (19.2, 24.3)	24.4 (21.5, 27.3)	
Schiphol	27.1 (25.0, 29.5)	22.2 (19.9, 24.7)	24.0 (22.0, 26.0)	21.8 (19.8, 24.0)	18.9 (17.5, 20.3)	20.7 (19.0, 22.8)	
De Bilt	18.0 (15.9, 20.4)	20.2 (18.4, 22.1)	21.1 (19.0, 23.4)	20.4 (18.7, 22.2)	18.2 (16.5, 20.1)	17.6 (15.8, 19.6)	
Soesterberg	19.7 (18.2, 21.3)	18.2 (16.6, 19.8)	16.1 (14.5, 17.7)	18.1 (16.3, 19.9)	15.1 (13.8, 16.4)	16.8 (15.7, 18.1)	
Leeuwarden	28.1 (25.5, 30.9)	23.8 (21.5, 25.9)	28.7 (24.5, 33.5)	24.1 (21.7, 26.7)	19.0 (17.3, 20.8)	23.1 (21.3, 25.1)	
Deelen	19.8 (17.8, 21.8)	19.9 (18.3, 21.7)	21.0 (18.9, 23.3)	20.3 (18.5, 22.2)	18.0 (15.6, 20.7)	19.7 (17.9, 21.8)	
Lauwersoog	31.2 (28.7, 33.6)	26.1 (23.6, 28.8)	26.7 (24.1, 29.2)	24.8 (22.2, 27.5)	20.6 (18.5, 22.8)	22.9 (20.3, 25.7)	
Eelde	22.4 (20.8, 24.0)	19.2 (17.5, 20.9)	21.5 (19.4, 23.8)	19.4 (17.7, 21.3)	17.6 (15.6, 19.5)	21.7 (19.8, 23.7)	
Twenthe	18.4 (17.0, 20.0)	18.7 (17.1, 20.6)	17.7 (16.4, 19.0)	16.6 (15.3, 18.0)	16.0 (14.9, 17.1)	18.7 (16.7, 20.9)	
Cadzand	32.7 (28.6, 36.9)	24.5 (22.5, 26.7)	25.7 (23.1, 28.4)	24.5 (21.6, 27.9)	20.1 (18.2, 22.1)	25.2 (23.0, 27.5)	
Vlissingen	23.0 (21.0, 25.1)	19.3 (17.4, 21.5)	22.0 (20.1, 24.1)	22.3 (20.6, 24.1)	22.7 (20.6, 24.8)	24.3 (22.2, 26.6)	
L.E. Goeree	30.6 (28.1, 33.2)	26.9 (24.1, 29.7)	29.0 (26.7, 31.2)	25.7 (22.3, 29.9)	25.0 (22.9, 27.3)	24.1 (21.9, 26.2)	
Hoek van Holland	28.7 (25.8, 31.7)	28.4 (25.5, 31.8)	25.1 (22.8, 27.5)	22.5 (20.6, 24.4)	22.1 (20.1, 24.2)	24.4 (22.3, 26.4)	
Zestienhoven	26.2 (23.7, 28.4)	24.1 (22.1, 26.1)	18.2 (16.4, 20.0)	19.6 (17.9, 21.6)	18.5 (16.8, 20.2)	21.5 (19.8, 23.4)	
Gilze-Rijen	21.9 (20.1, 23.8)	20.6 (18.7, 22.5)	20.2 (18.1, 22.3)	21.4 (19.7, 23.2)	17.9 (16.4, 19.5)	18.3 (16.9, 19.8)	
Hervijnen	21.7 (19.6, 23.7)	22.1 (20.2, 23.9)	22.9 (20.8, 25.0)	21.9 (19.6, 24.4)	20.2 (18.3, 22.4)	19.7 (17.5, 21.8)	
Eindhoven	21.2 (19.4, 22.9)	19.4 (18.1, 20.8)	20.3 (18.6, 22.2)	18.5 (17.1, 20.0)	17.2 (15.1, 19.4)	17.8 (16.3, 19.2)	
Volkel	17.4 (16.0, 18.8)	18.0 (16.6, 19.4)	19.1 (17.3, 21.3)	19.5 (17.6, 21.4)	16.1 (14.2, 18.2)	19.0 (17.6, 20.5)	
Beek	20.0 (18.5, 21.6)	19.9 (18.5, 21.3)	17.1 (15.3, 19.1)	20.3 (18.6, 22.1)	18.6 (16.1, 21.5)	21.2 (19.4, 23.1)	
Station \ Sector	165°N -195°N	195°N -225°N	225°N -255°N	255°N -285°N	285°N -315°N	315°N -345°N	
IJmuiden	29.8 (26.9, 32.9)	35.0 (32.6, 37.6)	37.3 (34.4, 40.7)	35.6 (32.3, 39.3)	33.5 (30.3, 36.8)	33.0 (30.1, 36.0)	
Texelhors	32.0 (29.2, 35.1)	35.3 (32.8, 37.9)	39.1 (36.1, 42.2)	38.3 (34.9, 41.9)	37.0 (32.7, 42.1)	34.0 (30.7, 37.7)	
De Kooy	30.2 (26.8, 33.7)	30.6 (27.2, 34.4)	32.6 (29.1, 36.4)	37.1 (33.1, 42.0)	34.0 (30.6, 38.0)	35.0 (31.3, 38.9)	
Schiphol	25.6 (23.2, 28.2)	33.1 (30.2, 36.2)	34.6 (30.6, 39.1)	35.4 (31.7, 39.2)	33.2 (29.3, 37.3)	30.6 (27.0, 34.4)	
De Bilt	21.7 (19.7, 23.8)	27.0 (24.6, 29.8)	32.6 (29.4, 35.5)	32.2 (29.4, 35.1)	26.6 (23.3, 30.4)	23.7 (21.5, 26.4)	
Soesterberg	20.1 (18.2, 22.3)	25.9 (24.0, 28.0)	33.2 (29.5, 37.0)	32.8 (29.9, 35.9)	28.4 (25.7, 31.1)	23.8 (21.7, 26.2)	
Leeuwarden	26.4 (23.9, 29.1)	34.2 (30.4, 38.4)	34.9 (31.4, 38.4)	35.9 (32.4, 39.9)	32.6 (28.3, 37.7)	32.9 (29.4, 36.8)	
Deelen	22.7 (20.7, 24.7)	26.5 (24.7, 28.5)	34.0 (31.0, 37.2)	33.7 (30.8, 36.8)	30.5 (27.7, 33.4)	23.0 (20.7, 25.7)	
Lauwersoog	29.0 (26.7, 31.5)	35.0 (32.1, 37.8)	35.3 (32.1, 38.8)	35.4 (32.2, 38.7)	34.6 (31.5, 37.9)	31.8 (28.8, 35.1)	
Eelde	24.6 (22.6, 26.7)	30.3 (27.3, 33.2)	34.0 (31.1, 36.8)	32.8 (29.9, 35.9)	30.5 (27.7, 33.4)	25.0 (22.8, 27.5)	
Twenthe	22.0 (19.9, 24.3)	24.3 (22.3, 26.5)	32.0 (28.3, 35.7)	32.4 (29.3, 35.6)	30.4 (27.5, 33.5)	21.8 (20.0, 23.7)	
Cadzand	29.1 (27.1, 31.5)	31.9 (28.7, 35.1)	34.9 (31.5, 38.9)	36.9 (33.7, 40.5)	36.7 (34.0, 39.4)	33.1 (30.3, 36.0)	
Vlissingen	28.4 (25.8, 31.2)	29.9 (27.5, 32.6)	35.5 (32.1, 39.2)	35.0 (31.5, 38.7)	30.5 (27.2, 34.1)	26.8 (24.1, 29.5)	
L.E. Goeree	25.7 (23.2, 28.2)	33.1 (30.8, 35.4)	35.0 (32.0, 38.2)	35.8 (32.7, 38.8)	34.6 (31.5, 37.8)	35.0 (31.9, 38.1)	
Hoek van Holland	27.9 (25.5, 30.6)	28.4 (26.1, 30.8)	33.9 (30.7, 37.4)	34.8 (31.1, 38.7)	34.6 (31.7, 37.8)	29.9 (26.3, 34.0)	
Zestienhoven	25.1 (23.4, 27.1)	28.1 (25.7, 30.6)	35.2 (32.5, 37.8)	35.8 (32.6, 39.3)	34.9 (30.4, 39.8)	31.8 (28.9, 34.8)	
Gilze-Rijen	25.4 (23.0, 27.9)	28.3 (26.3, 30.5)	33.1 (29.3, 37.5)	33.0 (30.1, 35.9)	30.9 (27.7, 34.4)	22.5 (20.9, 24.4)	
Hervijnen	24.9 (22.9, 27.0)	27.0 (23.9, 30.0)	34.9 (30.8, 38.9)	36.2 (31.5, 40.9)	34.0 (30.1, 38.0)	27.1 (25.0, 29.3)	
Eindhoven	21.8 (20.0, 23.7)	27.8 (26.0, 29.7)	30.8 (28.2, 33.5)	30.1 (26.8, 33.7)	29.4 (26.1, 33.2)	23.7 (21.7, 25.8)	
Volkel	23.4 (21.7, 25.3)	27.7 (25.2, 30.4)	32.9 (30.3, 35.5)	33.1 (29.2, 37.3)	29.2 (26.2, 32.4)	20.4 (18.5, 22.1)	
Beek	25.1 (23.0, 27.4)	27.4 (25.6, 29.4)	30.5 (26.9, 34.1)	33.0 (30.1, 36.1)	27.0 (24.2, 30.0)	21.2 (19.2, 23.5)	



Figuur 6.16 Relatie windsnelheid en herhalingstijd (doorgetrokken lijn) voor de omnidirectionele situatie voor het extreme bereik voor station Schiphol, inclusief 95%-betrouwbaarheidsinterval, omni-directioneel

De statistiek van van potentiële windsnelheid (U_p) is afgeleid voor zowel de omni-directionele als de richtingsafhankelijke situatie (12 richtingssectoren van 30 graden). Figuur 6.16 toont voor station Schiphol de relatie tussen windsnelheid en herhalingstijd volgens de statistiek van Caires (2009) voor de omni-directionele situatie (alle windrichtingen) inclusief het 95%-betrouwbaarheidsinterval.

Het belastingmodel voor enkele regio's gaat echter uit van 16 windrichtingen van 22,5 graden in plaats van richtingssectoren van 30 graden. Dit geldt voor de regio's 1 t/m 8 en regio 17. Al deze regio's maken gebruik van de windstatistiek van Schiphol. De richtingsafhankelijke windstatistiek voor 16 sectoren is verkregen door middel van een omrekening van 12 naar 16 sectoren. Hiervoor is de procedure gebruikt zoals beschreven in (Geerse en Verkaik, 2010).

De (nieuwe) windstatistiek zoals afgeleid door Caires (2009) heeft betrekking op de relatief hoge windsnelheden. Ten behoeve van de probabilistische berekeningen met Hydra-Ring is naast de statistiek van hoge windsnelheden ook de statistiek voor het lage bereik van de windsnelheid nodig. Deze statistiek is afgeleid door middel van turven op basis van uurlijkse windgegevens. Dit is gebeurd volgens de methode beschreven in (Geerse en Verkaik, 2010) en wordt behandeld in Paragraaf 6.3.3.

6.3.2 Kans windrichting

De windrichting is sterk van invloed op de kans op hoge windsnelheid en daarmee samenhangende hoge waterstanden en golven. Langs de Nederlandse kust maar ook langs de meeste zoete watersystemen zijn voornamelijk de westelijk en noordwestelijk georiënteerde windrichtingen relevant met het oog op extreme waterstanden langs de kust en opstuwung op de meren. Voor golven zijn in principe alle windrichtingen relevant. Wind en zeewaterstand hangen af van de windrichting. Van wind en zeewaterstand is daarom naast de omni-directionele ook de richtingsafhankelijke statistiek nodig.

Hydra-Ring maakt gebruik van de windstatistiek van meerdere stations. Een overzicht van deze stations is gegeven in Tabel 6.12. Hydra-Ring maakt verder gebruik van windsectoren van 30 graden of 22,5 graden (12 of 16 windrichtingen) afhankelijk van het beschouwde watersysteem. Deze aanpak komt overeen met die van de vorige generatie Hydra's (Hydra-K met 12 richtingen en Hydra-Zoet met 12 (Markermeer) en 16 (de rest de zoete wateren) windrichtingen) en is aangehouden omdat in veel gevallen de databases uit deze Hydra's gebruikt worden in WBI-2017.

Tabel 6.12 Windstations Hydra-Ring

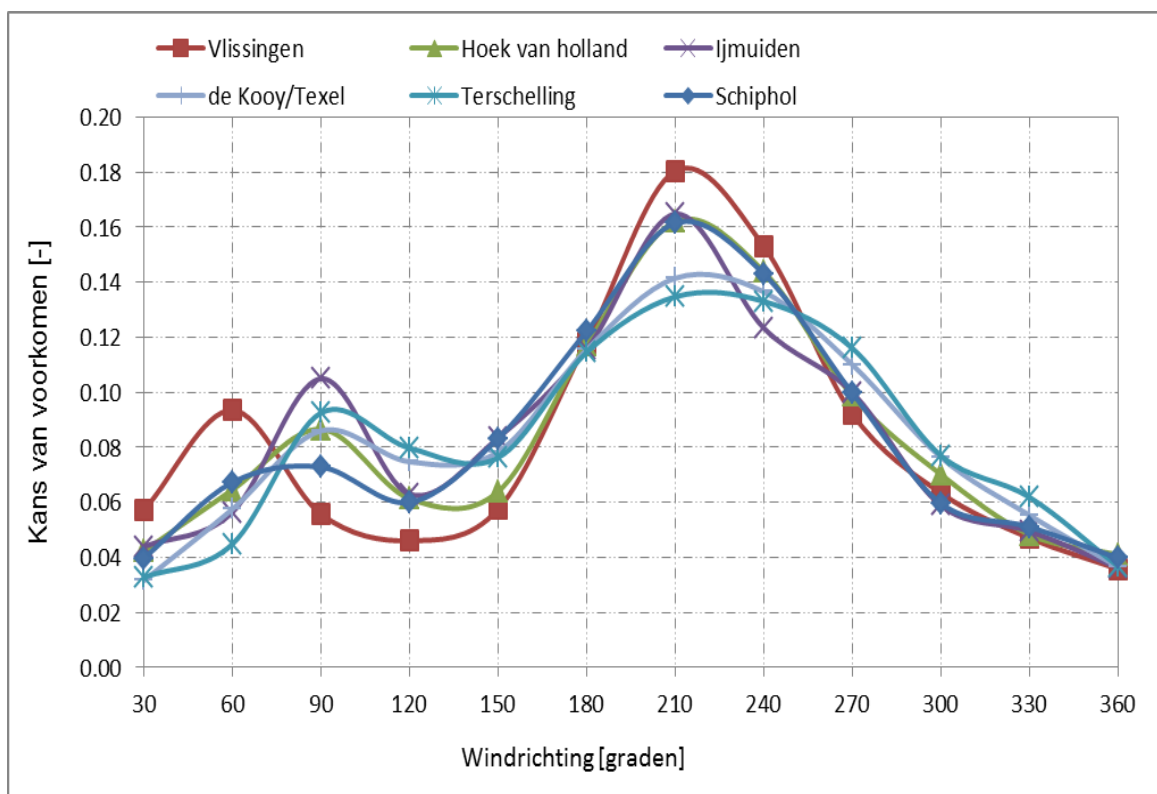
Windstation	Regio's
Schiphol	3 t/m 8 en 17
Deelen	1, 2 en 18
West-Terschelling	9 en 10
De Kooy/Texelhors	11
IJmuiden	12
Hoek van Holland	13
Vlissingen	14 en 15

De windmetingen zoals beschreven en gebruikt in paragraaf 6.3.1 voor het afleiden van de windstatistiek, zijn gebruikt voor het schatten van de kansverdeling van de windrichting. De nieuwe kansverdelingen van de windrichting (sectoren van 30 graden) van de relevante windstations is weergegeven in Tabel 6.13.

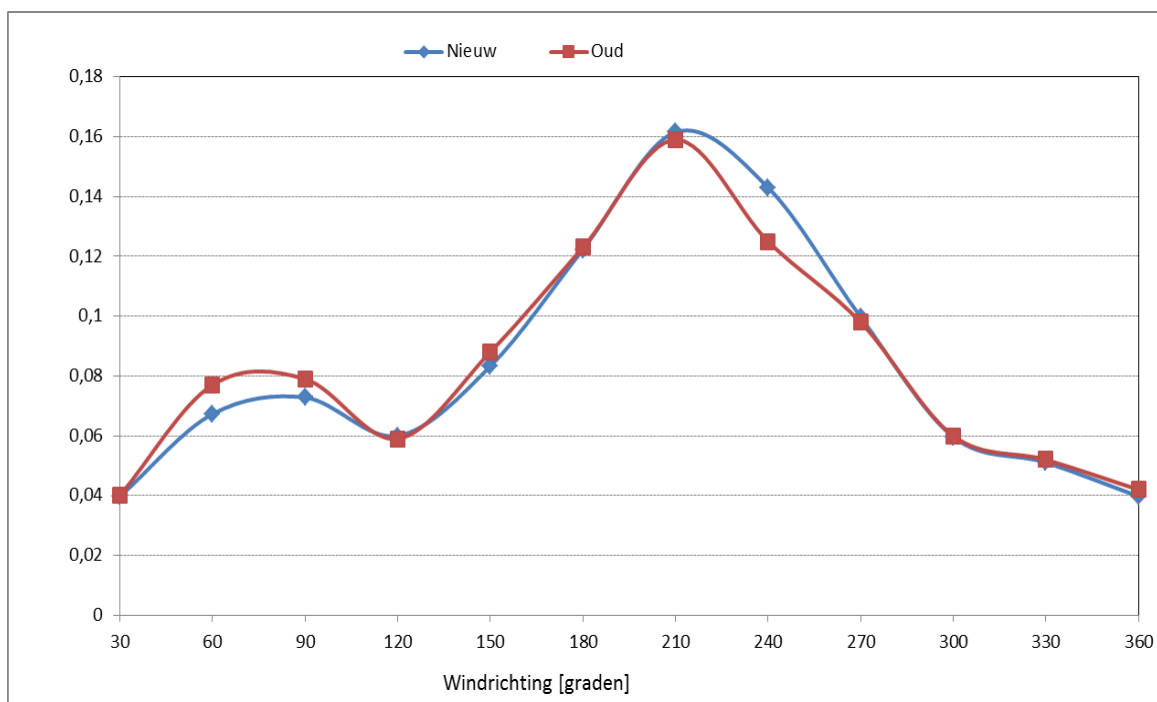
Tabel 6.13 Kansverdelingen windrichting relevante windstations, sectoren van 30 graden.

Windrichting [graden]	Kans op windrichting [-]					
	Vlissingen	Hoek van Holland	IJmuiden	Kooy/Texel	West-Terschelling	Schiphol
30	0.05712	0.04228	0.04391	0.03158	0.03278	0.03968
60	0.09349	0.06455	0.05641	0.05753	0.04484	0.06725
90	0.05571	0.08662	0.10492	0.08600	0.09253	0.07281
120	0.04607	0.06137	0.06298	0.07473	0.07974	0.06001
150	0.05754	0.06392	0.08344	0.07837	0.07625	0.08322
180	0.11825	0.11730	0.11567	0.11558	0.11453	0.12227
210	0.18043	0.16206	0.16477	0.14146	0.13473	0.16152
240	0.15300	0.14389	0.12334	0.13649	0.13304	0.14302
270	0.09215	0.09864	0.09988	0.11002	0.11601	0.09975
300	0.06338	0.07014	0.05889	0.07636	0.07699	0.05966
330	0.04706	0.04829	0.04954	0.05531	0.06187	0.05107
360	0.03580	0.04094	0.03624	0.03655	0.03670	0.03975

Figuur 6.17 toont de kans op voorkomen van verschillende windrichtingen voor de stations Vlissingen, de Kooy, Hoek van Holland, Terschelling, IJmuiden en Schiphol. Figuur 6.18 laat voor station Schiphol het verschil zien tussen de oude en nieuwe kansverdeling van de windrichting (sectoren van 30 graden). Het verschil is zoals te zien met uitzondering van de sector 240 graden klein.



Figuur 6.17 Kansverdeling van de windrichting voor 5 windstations die gebruikt worden voor de kustgebieden, sectoren van 30 graden.



Figuur 6.18 Vergelijking van de kansverdeling op windrichting (sectoren van 30 graden) voor Schiphol.

Tabel 6.14 toont de kansverdeling van de stations Schiphol en Deelen. Voor deze twee stations gelden sectoren van 22,5 graden.

Tabel 6.14 Kansverdeling windrichtingen van 22,5 graden voor Schiphol en Deelen

Windrichting [graden]	Schiphol [-]	Deelen [-]
0	0.03074	0.02139
22,5	0.02547	0.02962
45,0	0.03700	0.03976
67,5	0.06078	0.05868
90,0	0.05269	0.06122
112,5	0.04530	0.05284
135,0	0.05171	0.06495
157,5	0.06669	0.06178
180,0	0.09159	0.07705
202,5	0.12332	0.12314
225,0	0.11277	0.13615
247,5	0.10011	0.11307
270,0	0.07520	0.05967
292,5	0.05009	0.04137
315,0	0.03961	0.03244
337,5	0.03693	0.02688

6.3.3 Windstatistiek laag bereik

Zoals hierboven al genoemd geldt de windstatistiek zoals afgeleid in Caires (2009) en beschreven in Paragraaf 6.3.1 voor het winterhalf jaar en is uitsluitend geldig voor het hoge bereik: windsnelheden hoger dan de gebruikte drempelwaarden voor de selectie van de POT series (Tabel 6.10). Echter, ten behoeve van de probabilistische berekeningen met Hydra-Ring is windstatistiek nodig voor het hele bereik aan windsnelheden en bijbehorende overschrijdingskansen, gegeven de windrichting. Het winterhalfjaar dient daarnaast omgerekend te worden naar periodes van 12 uur. Deze transformatie is nodig omdat in Hydra-Ring de wind gemodelleerd wordt als onafhankelijke blokken van 12 uur, zie (Diermanse et al, 2016).

De windstatistiek voor het lage bereik is afgeleid voor de 7 windstations die nodig zijn voor Hydra-Ring; zie Tabel 6.15. Voor elk windstation geven de tweede en derde kolom de gebruikte gegevens aan: de gebruikte meetreeks en een referentie naar de kansverdeling van windsnelheden in het extreme bereik (Paragraaf 6.3.1). Deze zijn beschikbaar als jaarlijkse exponentiële overschrijdingsfrequentie-verdelingen voor 30° windsectoren. Voor de wind als snelle stochast geldt in Hydra-Ring een periode van 12 uur. Dit betekent dat de kans per jaar wordt omgerekend naar een kans voor een periode van 12 uur.

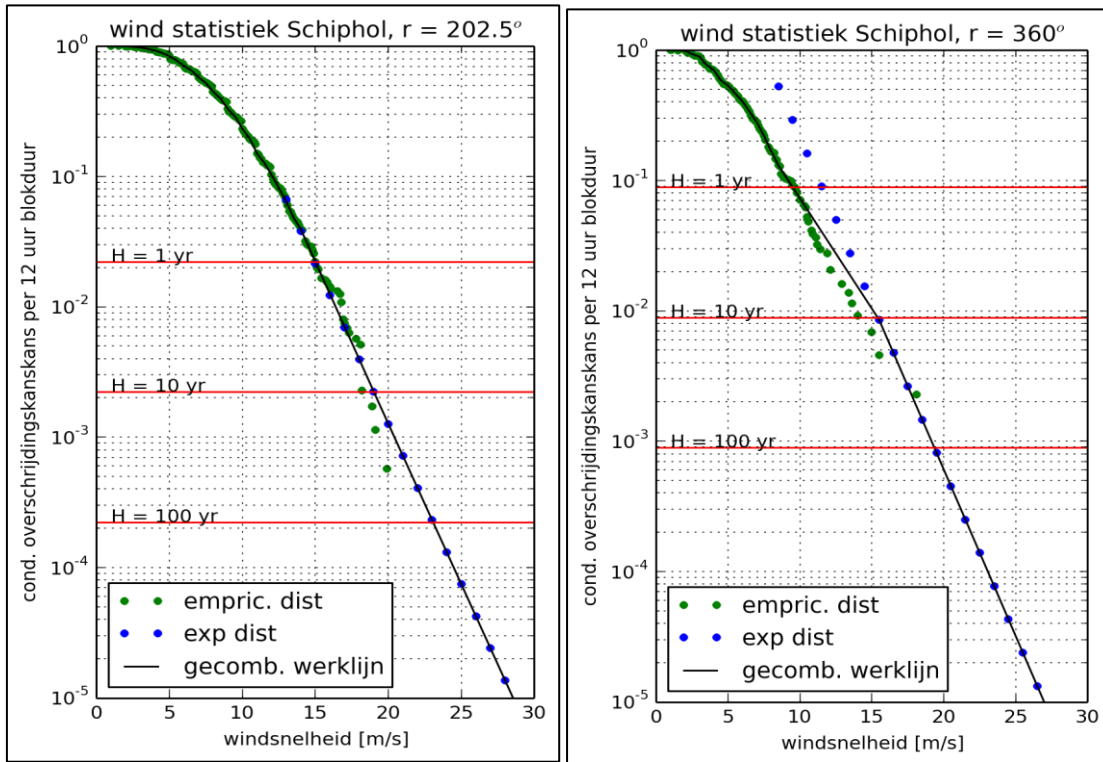
Tabel 6.15. Overzicht gebruikte data afleiding windstatistiek laag bereik

Station	Meetreeks	Exp. verdeling afgeleid in	t.b.v. regio	Station voor P(r)	Aantal sectoren
Schiphol	1970-2008	Caires (2009)	3, 4, 5, 6, 7 en 17	Schiphol	16 (22,5°)
Schiphol	1970-2008	Caires (2009)	8	Schiphol	12 (30°)
West Terschelling	1970-1995	WTI-2011	9, 10 en 16	Hoek van Holland	12 (30°)
de Kooy	1970-2008	Caires (2009)	11 en 16	Hoek van Holland	12 (30°)
IJmuiden	1970-2008	Caires (2009)	12 en 16	Hoek van Holland	12 (30°)
Hoek van Holland	1970-2008	Caires (2009)	13 en 16	Hoek van Holland	12 (30°)
Vlissingen	1970-2008	Caires (2009)	14, 15 en 16	Hoek van Holland	12 (30°)
Deelen	1970-2008	Caires (2009)	1, 2 en 18	Deelen	16 (22,5°)

De zeewaterstandsstatistiek (paragraaf 6.5) in Hydra-Ring volgt uit die in Hydra-K. In het probabilistisch model Hydra-K wordt enkel één kansverdeling voor de windrichting gehanteerd voor alle kustgebieden. Dit is nodig voor de zogenoemde triangulaire interpolaties, waarbij eenzelfde zeewaterstandsstation wordt gebruikt voor twee of meer kustregio's. Dit betekent dat voor alle kustgebieden enkel één kansverdeling voor de windrichting wordt gebruikt in Hydra-Ring. Figuur 6.17 toont de kansverdelingen van de windrichting (sectoren van 30 graden) voor vijf windstations die gehanteerd worden voor de windsnelheid. Station Hoek van Holland vertoont volgens Figuur 6.17 een gemiddeld verloop van de kansverdeling en is daarom gekozen voor gebruik in Hydra-Ring voor alle kustgebieden. Dit betekent dat er drie windstations worden gebruikt voor de kans op een windrichting $P(r)$ in Hydra-Ring, zie ook Tabel 6.15, kolom 5. Het betreft de windstations Hoek van Holland voor de kustgebieden, Schiphol 16 windrichtingen voor het IJsselmeer, Vecht-, IJsseldelta en Benedenrivieren, Schiphol 12 windrichtingen voor het Markermeer en windstation Deelen voor de Bovenrivieren.

6.3.4 Windstatistiek gehele bereik

De combinatie van de statistiek voor het extreme bereik (paragraaf 6.3.1) en de statistiek voor het lage bereik (paragraaf 6.3.3) resulteert in windstatistiek voor het hele bereik. Dit geldt voor zowel de omni-directionele als de richtingsafhankelijke windstatistiek. Figuur 6.19 toont een voorbeeld van de gecombineerde windstatistiek voor station Schiphol. Het betreft de richtingsafhankelijke windstatistiek (overschrijdingskansen) van de windsnelheid voor windrichtingen 202,5 en 360 graden. Het linkerpaneel van Figuur 6.19 laat een perfecte overgang zien van het lage naar het hoge windbereik. Rond de noordelijke windrichtingen, zie het rechter paneel, is de overgang niet perfect. Dit komt onder andere door "statistische ruis", maar ook omdat de exponentiële kansverdelingen voor het volledige kalenderjaar in plaats van winterhalfjaar zijn afgeleid. Toch kan met behulp van lineaire interpolatie een vloeiende overgang worden bewerkstelligd. De gekozen methode zorgt ervoor dat overschrijdingskansen in zowel het hoge als het lage bereik correct beschreven worden. In het overgangsbereik (voor herhalingstijden van circa 1 tot 10 jaar) is de kwaliteit van de beschrijving wisselend, afhankelijk van "statistische ruis" tussen de data en de exponentiële verdeling.



Figuur 6.19 Windstatistiek Schiphol voor het hele bereik voor 2 windrichtingen op basis van de exponentiële verdeling (blauwe punten voor hoog bereik) en via turven (laag bereik, groene punten): windrichting 202,5 graden (links) en 360 graden (rechts).

Tabel 6.16 Windstatistiek station Schiphol voor het hele bereik, periode van 12 uur, windsectoren van 30 graden.

Wind [m/s]	NOORD 1	30 2	60 3	OOST 4	120 5	150 6	ZUID 7	210 8	240 9	WEST 10	300 11	330 12
0	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
2	9.88E-01	9.84E-01	9.96E-01	9.95E-01	9.92E-01	9.97E-01	9.97E-01	9.97E-01	9.98E-01	9.99E-01	9.96E-01	9.93E-01
3	8.97E-01	9.43E-01	9.54E-01	9.40E-01	9.23E-01	9.46E-01	9.68E-01	9.75E-01	9.82E-01	9.80E-01	9.65E-01	9.37E-01
4	7.12E-01	8.40E-01	8.62E-01	8.07E-01	7.64E-01	8.12E-01	8.77E-01	9.32E-01	9.40E-01	9.46E-01	8.92E-01	8.46E-01
5	5.63E-01	6.86E-01	7.34E-01	6.31E-01	5.60E-01	6.32E-01	7.47E-01	8.58E-01	8.86E-01	8.77E-01	7.94E-01	7.40E-01
6	4.19E-01	5.14E-01	5.79E-01	4.69E-01	3.90E-01	4.58E-01	5.96E-01	7.41E-01	8.17E-01	7.98E-01	7.03E-01	6.28E-01
7	2.99E-01	3.51E-01	4.46E-01	3.18E-01	2.09E-01	2.87E-01	4.38E-01	6.11E-01	7.18E-01	7.21E-01	5.80E-01	4.93E-01
8	1.95E-01	2.43E-01	3.10E-01	1.75E-01	8.79E-02	1.67E-01	3.05E-01	4.86E-01	6.26E-01	6.06E-01	4.81E-01	3.55E-01
9	1.27E-01	1.52E-01	2.19E-01	7.65E-02	3.73E-02	8.96E-02	2.01E-01	3.83E-01	5.28E-01	4.84E-01	3.67E-01	2.45E-01
10	8.55E-02	7.99E-02	1.05E-01	3.45E-02	1.58E-02	4.42E-02	1.23E-01	2.82E-01	4.28E-01	3.93E-01	2.74E-01	1.60E-01
11	5.37E-02	4.09E-02	5.11E-02	1.55E-02	6.73E-03	1.94E-02	6.96E-02	1.99E-01	3.38E-01	3.10E-01	2.05E-01	1.01E-01
12	3.37E-02	2.10E-02	2.47E-02	7.09E-03	2.76E-03	8.51E-03	4.05E-02	1.37E-01	2.62E-01	2.28E-01	1.38E-01	6.17E-02
13	2.11E-02	1.07E-02	1.20E-02	3.28E-03	1.09E-03	3.73E-03	1.97E-02	8.93E-02	1.89E-01	1.56E-01	9.08E-02	3.95E-02
14	1.33E-02	5.50E-03	5.81E-03	1.52E-03	4.33E-04	1.56E-03	9.61E-03	4.85E-02	1.26E-01	1.06E-01	5.41E-02	2.52E-02
15	8.33E-03	2.44E-03	2.81E-03	7.05E-04	1.72E-04	6.24E-04	4.68E-03	2.64E-02	7.92E-02	5.06E-02	3.50E-02	1.61E-02
16	4.92E-03	1.08E-03	1.36E-03	3.27E-04	6.80E-05	2.49E-04	2.28E-03	1.43E-02	4.92E-02	3.13E-02	2.27E-02	1.03E-02
17	2.73E-03	4.80E-04	6.61E-04	1.51E-04	2.69E-05	9.96E-05	1.11E-03	8.45E-03	2.88E-02	1.94E-02	1.47E-02	6.61E-03
18	1.52E-03	2.13E-04	3.20E-04	7.02E-05	1.07E-05	3.98E-05	5.41E-04	4.98E-03	1.73E-02	1.20E-02	9.53E-03	4.22E-03
19	8.42E-04	9.44E-05	1.55E-04	3.25E-05	4.23E-06	1.59E-05	2.63E-04	2.93E-03	1.04E-02	7.40E-03	6.17E-03	2.49E-03
20	4.68E-04	4.19E-05	7.51E-05	1.51E-05	1.67E-06	6.35E-06	1.28E-04	1.73E-03	6.22E-03	4.57E-03	4.00E-03	1.47E-03
21	2.60E-04	1.86E-05	3.64E-05	6.98E-06	6.63E-07	2.54E-06	6.24E-05	1.02E-03	3.73E-03	2.83E-03	2.39E-03	8.64E-04
22	1.44E-04	8.23E-06	1.76E-05	3.23E-06	2.63E-07	1.01E-06	3.04E-05	6.00E-04	2.24E-03	1.75E-03	1.43E-03	5.09E-04
23	8.01E-05	3.65E-06	8.54E-06	1.50E-06	1.04E-07	4.05E-07	1.48E-05	3.53E-04	1.31E-03	1.08E-03	8.59E-04	3.00E-04
24	4.45E-05	1.62E-06	4.14E-06	6.95E-07	4.12E-08	1.62E-07	7.21E-06	2.08E-04	7.47E-04	6.69E-04	5.14E-04	1.77E-04
25	2.47E-05	7.18E-07	2.01E-06	3.22E-07	1.63E-08	6.47E-08	3.51E-06	1.23E-04	4.26E-04	4.13E-04	3.08E-04	1.04E-04
26	1.37E-05	3.19E-07	9.72E-07	1.49E-07	6.47E-09	2.58E-08	1.71E-06	7.22E-05	2.43E-04	2.56E-04	1.84E-04	6.13E-05
27	7.61E-06	1.41E-07	4.71E-07	6.91E-08	2.56E-09	1.03E-08	8.33E-07	4.26E-05	1.38E-04	1.58E-04	1.10E-04	3.61E-05
28	4.23E-06	6.27E-08	2.28E-07	3.20E-08	1.02E-09	4.13E-09	4.06E-07	2.51E-05	7.90E-05	9.77E-05	6.61E-05	2.13E-05
29	2.35E-06	2.78E-08	1.11E-07	1.48E-08	4.02E-10	1.65E-09	1.98E-07	1.48E-05	4.50E-05	6.04E-05	3.96E-05	1.25E-05
30	1.30E-06	1.23E-08	5.36E-08	6.88E-09	1.59E-10	6.59E-10	9.63E-08	8.70E-06	2.57E-05	3.74E-05	2.37E-05	7.39E-06
31	5.93E-07	4.12E-09	1.99E-08	2.41E-09	4.57E-11	1.91E-10	3.61E-08	4.23E-06	1.21E-05	1.94E-05	1.19E-05	3.64E-06
32	2.62E-07	1.34E-09	7.30E-09	8.29E-10	1.27E-11	5.36E-11	1.33E-08	2.03E-06	5.56E-06	9.96E-06	5.87E-06	1.75E-06
33	1.15E-07	4.28E-10	2.64E-09	2.82E-10	3.46E-12	1.48E-11	4.85E-09	9.67E-07	2.53E-06	5.07E-06	2.86E-06	8.33E-07
34	4.99E-08	1.35E-10	9.45E-10	9.46E-11	9.30E-13	4.03E-12	1.75E-09	4.56E-07	1.14E-06	2.57E-06	1.38E-06	3.93E-07
35	2.14E-08	4.17E-11	3.32E-10	3.12E-11	2.45E-13	1.07E-12	6.19E-10	2.13E-07	5.06E-07	1.28E-06	6.59E-07	1.83E-07
36	9.07E-09	1.28E-11	1.16E-10	1.02E-11	6.35E-14	2.82E-13	2.17E-10	9.84E-08	2.23E-07	6.36E-07	3.12E-07	8.48E-08
37	3.82E-09	3.87E-12	3.98E-11	3.28E-12	1.63E-14	7.31E-14	7.54E-11	4.52E-08	9.78E-08	3.14E-07	1.47E-07	3.89E-08
38	1.58E-09	1.14E-12	1.34E-11	1.04E-12	4.06E-15	1.85E-14	2.57E-11	2.05E-08	4.21E-08	1.53E-07	6.81E-08	1.76E-08
39	6.49E-10	3.34E-13	4.49E-12	3.23E-13	9.99E-16	4.61E-15	8.63E-12	9.18E-09	1.80E-08	7.37E-08	3.13E-08	7.91E-09
40	2.66E-10	9.73E-14	1.50E-12	1.01E-13	2.46E-16	1.15E-15	2.90E-12	4.12E-09	7.68E-09	3.56E-08	1.44E-08	3.55E-09
41	1.07E-10	2.77E-14	4.88E-13	3.07E-14	5.87E-17	2.78E-16	9.54E-13	1.82E-09	3.22E-09	1.69E-08	6.52E-09	1.57E-09
42	4.27E-11	7.76E-15	1.57E-13	9.21E-15	1.38E-17	6.61E-17	3.09E-13	7.94E-10	1.34E-09	7.97E-09	2.92E-09	6.84E-10

6.3.5 Effect nieuwe windstatistiek op de hydraulische belastingen

Mogelijke effecten van de nieuwe windstatistiek (zonder statistische onzekerheid) op de hydraulische belastingen zijn onderzocht en in beeld gebracht (Geerse en Verkaik, 2010). De effecten zijn bepaald met de destijds bestaande Hydra's: Hydra-K (kustgebieden), Hydra-B (Benedenrivieren) en Hydra-VIJ (meren, Vecht- en IJsseldelta). Voor een groot aantal locaties (307 stuks), verspreid over verschillende watersystemen, zijn voor zowel de waterstanden als de hydraulische belastingniveau's (HBN) bepaald. Voor de hydraulische belastingniveau's is steeds gerekend met een toelaatbaar overslagdebiet van 1 l/s/m. Voor de kustlocaties zijn daarbij standaardprofielen en dijknormalen gebruikt die in het programma Hydra-K zelf beschikbaar zijn. Voor Hydra-VIJ en Hydra-B zijn standaardprofielen van 1 op 4 gebruikt, waarbij op het oog de dijknormaal is geschat. Meer details over de uitgevoerde berekeningen zijn te vinden in (Geerse en Verkaik, 2010) De effecten van de nieuwe

windstatistiek op de statistiek van waterstand en HBN verschillen per watersysteem. In watersystemen waar de waterstand zelf een basisstochast is of waar de wind geen invloed heeft op de waterstand, heeft de verandering van de windstatistiek geen invloed op de statistiek van waterstand. In de andere watersystemen geldt voor de terugkeerniveaus van de waterstand bij de oude normen dat een overgang op de nieuwe windstatistiek slechts tot kleine verschillen leidt: 2 à 3 cm verlaging. Voor de IJssel- en Vechtdelta en de Benedenrivieren is de spreiding in de resultaten gering: de standaard deviatie σ is slechts 0,01 à 0,02 m. Voor de meren is de spreiding met $\sigma = 0,07$ m wat groter. Dat is plausibel, omdat zoals bekend de terugkeerniveaus van de waterstand op de meren, vooral op het Ketelmeer/Vossemeer, voor nogal wat locaties sterk bepaald worden door de wind. Voor de meren zijn de verschillen iets groter, maar nog steeds beperkt (Geerse en Verkaik, 2010). Voor de kust zijn er geen verschillen in waterstand, omdat deze in Hydra-K niet afhankelijk zijn van de windstatistiek.

De resultaten van de berekeningen ten behoeve van het HBN zijn weergegeven in Tabel 6.17.

Tabel 6.17 Resultaten effect nieuwe windstatistiek op benodigde kruinhoogten, bron (Geerse en Verkaik, 2010)

Gebied	Aantal Locaties	Gemiddelde verhoging [m]	Standaard deviatie verhoging [m]
Benedenrivieren	41	-0,05	0,04
IJssel- en Vechtdelta	51	-0,06	0,04
Meren	37	-0,01	0,16
Waddenzee Oost	30	-0,01	0,04
Waddenzee West	29	-0,08	0,04
Kust Noord	06	-0,03	0,02
Kust Midden	06	-0,01	0,05
Kust Zuid	18	0,08	0,11
Westerschelde	47	-0,07	0,07
Oosterschelde	42	-0,04	0,08

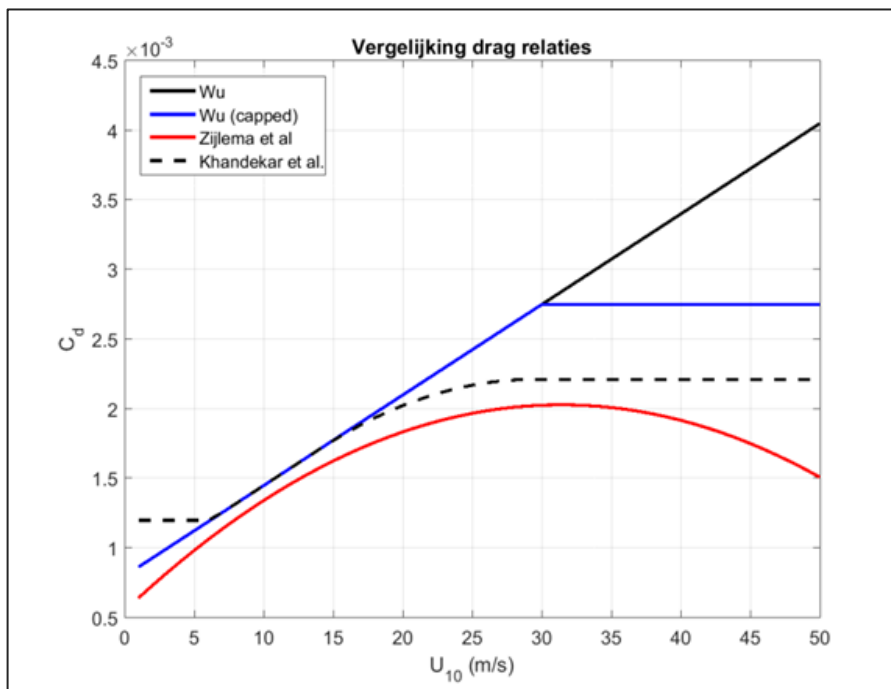
Zoals is te zien in Tabel 6.17, blijven de verschillen voor de benodigde kruinhoogten gemiddeld gezien ook redelijk beperkt, maar komen incidenteel wel duidelijke verhogingen en verlagingen voor, in het bijzonder voor de meren waar golven een belangrijke rol spelen.

6.3.6 Windstatistiek met correctie voor winddrag

6.3.6.1 Winddrag

Winddrag is afhankelijk van de ruwheid van het wateroppervlak. Deze ruwheid wordt voor een groot deel bepaald door windgolven. Bij toenemende windsnelheid worden de golven hoger en daarmee ook de ruwheid. De meest gangbare formulering voor de winddrag-coëfficiënt is die van Wu (1982); deze gaat uit van een lineair verband tussen windsnelheid en ruwheid. De ruwheid neemt dus toe met toenemende windsnelheid. Volgens nieuwe inzichten moet er echter een bovengrens zijn. Het fysisch mechanisme dat hieraan ten grondslag ligt, is dat de wind onder extreme omstandigheden minder grip krijgt op de golven door het afwaaien van de golftoppen waardoor de dalen tussen individuele golven gevuld

worden met schuim en waterdruppels. Deze effecten leiden tot een verzadiging en mogelijk zelfs een afname van de winddrag. Verdisconteren van dit effect heeft geresulteerd in verschillende drag relaties. Belangrijkste zijn: de “afgekapte” versie van Wu, de formulering van Zijlema et al (2012) en de formulering van Khandekar et al (1993). Figuur 6.20 laat een vergelijking zien van de verschillende winddrag relaties.



Figuur 6.20 Vergelijking drag relaties op basis van (Wu, 1982) (zwarte lijn), afgekapte Wu bij windsnelheid van 30 m/s (blauwe lijn), de Zijlema et al (2012) formulering (rode lijn) en de aanpassing van Khandekar et al (1993) formulering (zwart gestreepte lijn).

Naar verwachting zullen voor extreme windsnelheden waarbij de winddrag niet meegroeit of zelfs afneemt, windopzet en golfcondities, en daarmee de hydraulische belastingen, significant lager zijn. In de wetenschappelijke wereld is er op dit moment consensus dat de winddrag coëfficiënt niet verder toeneemt bij windsnelheden boven de 30 m/s. Ten aanzien van het precieze gedrag van de winddrag bij windsnelheden boven de 30 m/s is er echter nog geen consensus (van Vledder, 2015).

In WBI-2017 is besloten om rekening te houden met de nieuwe inzichten in de dragformulering. Daar een ‘capping’ van de winddrag bij windsnelheden van 30 m/s een algemeen aanvaarde techniek is, is besloten om voor de regio’s waar de hydraulische belasting bepaald wordt door extreme wind de windstatistiek te corrigeren voor effecten van de winddrag.

6.3.6.2 Correctie van de windstatistiek voor winddrag

Effecten van de nieuwe winddrag formulering zijn conform het voorstel van (van Vledder, 2015) verwerkt in de windstatistiek. De windstatistiek dient volgens het voorstel zodanig aangepast te worden dat deze de overschrijdingskans beschrijft van de windsnelheid die bij toepassing van de oude formulering dezelfde winddragcoëfficiënt zou geven als bij toepassing van de nieuwe formulering, zie voor meer details (van Vledder, 2015). De

aanpassing leidt tot kleinere kansen voor windsnelheden boven de 30 m/s. Merk op dat voor windsnelheden lager dan 30 m/s geen aanpassing geldt. Dit betekent dat aanpassing van de windstatistiek enkel relevant is voor watersystemen waar windsnelheden hoger dan 30 m/s voorkomen en tegelijkertijd bepalend zijn voor de Hydraulische Belastingen. Conform (van Vledder, 2015) wordt de windstatistiek aangepast voor het IJsselmeer, het Markermeer en de Oosterschelde. Voor de Benedenrijn, Benedenmaas, Europoort, IJsseldelta en Vechtdelta hoeft geen aanpassing voor winddrag plaats te vinden omdat windsnelheden van meer dan 30 m/s in deze gebieden nauwelijks een rol spelen. Voor al deze regio's geldt de windstatistiek van station Schiphol²⁷. Voor de Bovenrijn, de Bovenmaas en de Limburgse Maas geldt de windstatistiek van station Deelen. Ook hier is geen correctie toegepast voor winddrag. Voor de Kustgebieden (Hollandse Kust, Waddenzee en Westerschelde) komt de stormopzet niet uit een waterstandsmodel met een aanpasbare winddrag formulering, maar rechtstreeks uit extreme waarden statistiek toegepast op zeewaterstanden. Om deze reden is het effect van een aangepaste winddragrelatie niet eenvoudig te implementeren en vereist een nadere studie (van Vledder, 2015).

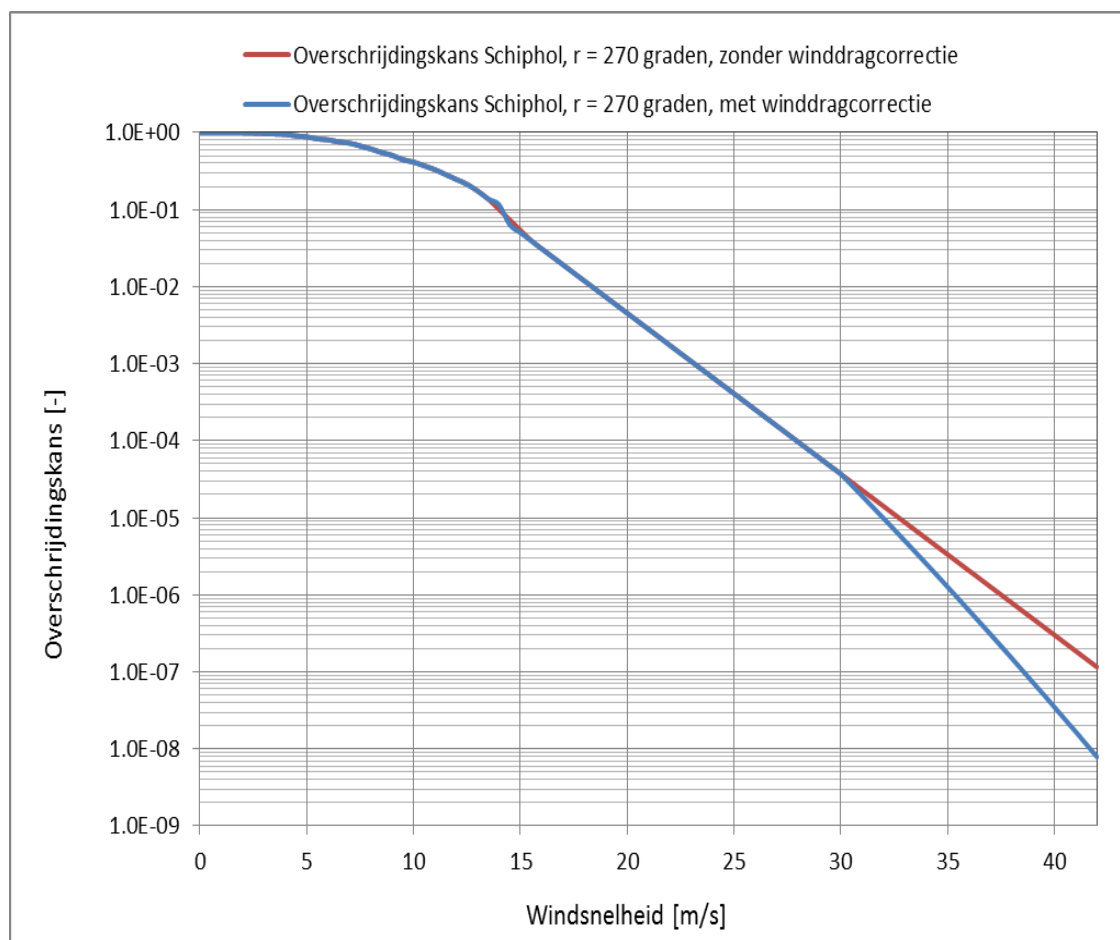
Samengevat is de correctie voor winddrag toegepast op de volgende windstations:

- Schiphol (12 windrichtingen): deze windstatistiek wordt gebruikt voor het Markermeer. Tot dit watersysteem horen ook het IJmeer, Gooimeer, Eemmeer, Nijkerkernauw en de Eem,
- Schiphol (16 windrichtingen): deze windstatistiek wordt gebruikt voor het IJsselmeer. Tot dit watersysteem behoren ook het Ketelmeer en het Vossemeer (zie Deltares, 2017a).
- Vlissingen (12 windrichtingen): deze windstatistiek wordt gebruikt voor de Oosterschelde (zie Deltares, 2017a).

Ten illustratie toont Figuur 6.21 voor windrichting West ($r = 270$ graden) de overschrijdingskansen van de windsnelheid met én zonder winddrag-correctie. Zoals te zien heeft de correctie alleen voor windsnelheden groter dan 30 m/s effect op de overschrijdingskansen.

Het effect van de aanpassing van de windstatistiek op het HBN is onderzocht voor locaties rond het IJsselmeer, waar de grootste effecten worden verwacht (Deltares, 2017a). Hierbij is de oude norm (norm T = 4000 jaar) beschouwd zonder onzekerheden. Als gevolg van de winddrag-correctie treedt er, zoals verwacht, een verlaging van de HBN berekeningen zonder onzekerheid. De verlaging bij meerpeilgedomineerde locaties zoals Enkhuizen (verschil van 5 cm) is kleiner dan bij meer wind-gedomineerde locaties zoals Lelystad (verschil 22 cm) en Rotterdamse Hoek (17 cm).

²⁷ Van station Schiphol wordt in Hydra-Ring de statistiek van zowel 16 als 12 windrichtingen gebruikt. De statistiek van 12 windrichtingen wordt toegepast in het Markermeer en 16 in het IJsselmeer. Dit betekent dat beide windstatistieken (zowel van de 12 als van de 16 richtingen) aangepast worden voor winddrag. Daarnaast is er een windstatistiek nodig met 16 windrichtingen en zonder correctie voor winddrag. Deze wordt gebruikt voor het rivierengebied.

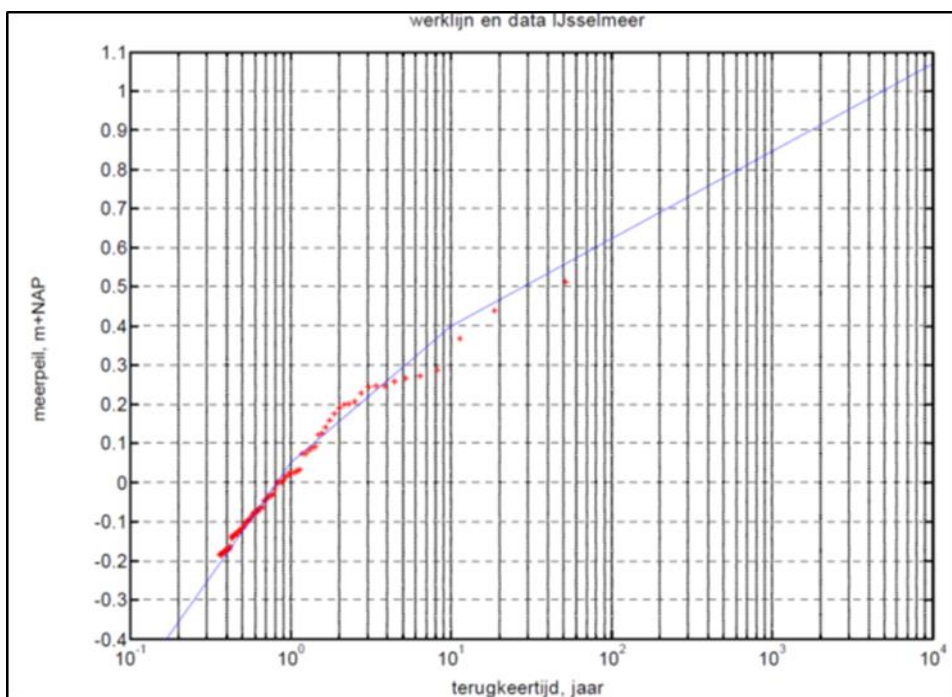


Figuur 6.21 Relatie windsnelheid en overschrijdingskans voor station Schiphol, 16 richtingssectoren, periode van 12 uur: met winddrag correctie (blauw) en zonder (rood).

6.4 Statistiek meerpeil

6.4.1 IJsselmeer

Voor WBI-2017 is de meerpeilstatistiek uit WTI-2011 aangehouden. De werklijn van het IJsselmeerpeil bestaat uit drie lijnstukken. Deze statistiek is uitvoerig beschreven in Geerse (2006), en is gebaseerd op statistische extrapolatie van meet- en modelgegevens. De gehanteerde meetreeks omvat de periode 1932 tot en met 2002. Van de werklijn voor het IJsselmeerpeil bestonden geen 95%-betrouwbaarheidsintervallen. Deze zijn in het kader WBI-2017 afgeleid met de bootstrapmethode (Geerse en Wojciechowska, 2014). Tabel 6.18 toont voor enkele herhalingstijden de bijbehorende meerpeilen inclusief bijbehorende betrouwbaarheidsintervallen. Figuur 6.22 toont de werklijn in grafische vorm. Zoals in deze figuur is te zien, loopt de lijn voor het hoogste deel vlakker dan de lijnen voor de gemiddelde en lage waarden. Een meerpeil dat gemiddeld eens in 10000 jaar wordt overschreden, bedraagt volgens de geldende statistiek 1,07 m+NAP; de bijbehorende 95%-bovengrens wordt geschat op 1,63 m +NAP.



Figuur 6.22 Werklijn IJsselmeerpeil WTI-2011

Tabel 6.18 Relatie IJsselmeerpeil en herhalingstijd, inclusief 95% betrouwbaarheidsbanden

Herhalingstijd [jaar]	IJsselmeerpeil [m+NAP]	95%-ondergrens [m+NAP]	95%-bovengrens [m+NAP]
10	0,40	0,33	0,45
100	0,62	0,50	0,77
1.000	0,85	0,62	1,16
10.000	1,07	0,71	1,63
100.000	1,29	0,78	2,19

Bij het bepalen van de werklijn en bijbehorende betrouwbaarheidsintervallen voor het IJsselmeerpeil zijn geen fysieke beperkingen betrokken. Recent is een probabilistisch model ontwikkeld door Dulfer (2014), waarbij de werklijn van het IJsselmeerpeil wordt uitgerekend op basis van de (belangrijke) stochasten aan de rand van het IJsselmeer. Het meerpeil met een gemiddelde overschrijdingsfrequentie van 10000 jaar berekend met dat probabilistisch model, komt goed overeen met het 1/10,000 meerpeil volgens de werklijn voor WTI-2011 uit Figuur 6.22.

6.4.2 Markermeer

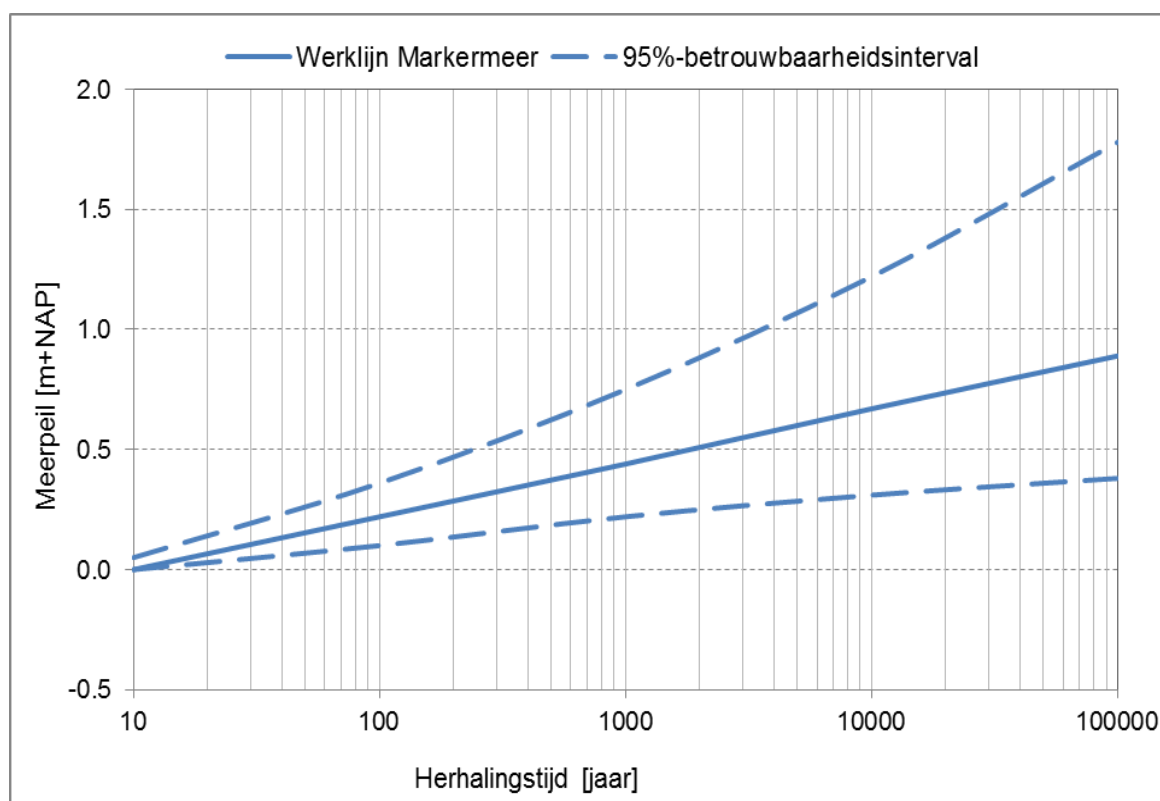
De statistiek van het Markermeerpeil is in WBI-2017 onveranderd ten opzichte van HR-2006 en dateert van 1996. Het is in het kader van de zogenoemde OOM-studie (Onafhankelijk Onderzoek Markermeer) afgeleid (WL|Delft Hydraulics, fase 1A, 1997). Voor het afleiden van deze statistiek is gebruik gemaakt van de meetreeks meerpeilen uit de periode 1976-1995. Deze reeks is kunstmatig verlengd met meerpeilen verkregen uit modelberekeningen over de periode 1951-1975. Details met betrekking tot de resultaten van de modelberekeningen zijn te vinden in (WL|Delft Hydraulics, 1997, fase 1A). Voor het afleiden van de meerpeilstatistiek

van het Markermeer is in de OOM-studie gebruik gemaakt van de Boertien²⁸ methode (Boertien, 1993). Bij deze methode worden de uitkomsten van de kansverdelingen, die de statistische toetsing doorstaan, gemiddeld. Hierbij krijgt elke kansverdeling eenzelfde gewicht toegekend. De 95%-betrouwbaarheidsintervallen zijn in kader van het WBI-2017 project afgeleid door middel van de bootstraphmethode, zie Geerse en Wojciechowska (2014). Tabel 6.19 toont voor enkele relevante herhalingstijden de bijbehorende Markermeerpeilen en 95%-betrouwbaarheidsgrenzen. Figuur 6.23 toont de werklijn in grafische vorm.

Tabel 6.19 Markermeerpeil voor enkele herhalingstijden, inclusief 95% betrouwbaarheidsgrenzen

Herhalingstijd [jaar]	Markermeerpeil [m+NAP]	95% ondergrens [m+NAP]	95% bovengrens [m+NAP]
10	0,00	-0,04	0,05
100	0,22	0,10	0,36
1.000	0,44	0,22	0,75
10.000	0,67	0,31	1,22
100.000	0,89	0,38	1,78

Tussen de peilen van het IJsselmeer en de peilen van het Markermeer bestaat een sterke fysische relatie. Mede om deze reden wordt net als voor het IJsselmeer geen fysisch maximum aangehouden voor het Markermeer.



Figuur 6.23 Werklijn Markermeerpeil, inclusief 95%-betrouwbaarheidsinterval

²⁸ De Boertien methode is in 1993 en 1995 gebruikt om de werklijnen van de Rijn en de Maas te bepalen. Deze methode is de basis van de werklijnen in HR-2006 en WTI-2011. Het principe van de methode is dat verschillende kansverdelingen worden gemiddeld om tot een werklijn te komen.

6.5 Zeewaterstandstatistiek

6.5.1 Basispeilen

De basispeilen²⁹ voor WTI-2011 zijn in 1993 afgeleid voor de zogenaamde hoofdstations langs de Nederlandse kust (Dillingh et al, 1993). Hierbij is gebruik gemaakt van metingen van hoogwaters (HW) tot en met 1985. De volgende hoofdstations en bijbehorende meetreeksen HW zijn beschouwd:

- Vlissingen 1881....1985
- Hoek van Holland 1887....1985
- Den Helder 1932....1985
- Harlingen 1932....1985
- Delfzijl 1881....1985

Voor het bepalen van de basispeilen is in eerste instantie een statistisch onderzoek uitgevoerd op basis van de hoofdstations afzonderlijk. Vervolgens is onderzoek gedaan naar de fysica van getij en stormopzettingen waarbij voornamelijk de samenhang tussen verschillende hoofdstations is beschouwd. Op basis van beide onderzoeken, statistisch en fysisch, werden de basispeilen voor HR-2006 en WTI-2011 vastgesteld. Later, in 2000, werden voor een set extra zeewaterstandsstations de bijbehorende basispeilen afgeleid, zie Roskam et al (2000). De meetreeksen eindigden ook hier in 1985.

Tabel 6.20 toont voor de herhalingstijden 10, 100, 1.000, 10.000 en 100.000 jaar de berekende zeewaterstanden voor 12 relevante kuststations.

Tabel 6.20 Zeewaterstanden behorende bij 5 herhalingstijden voor 12 kuststations.

Station	Herhalingstijd (jaar)				
	10	100	1.000	10.000	100.000
Delfzijl	4,08	4,86	5,54	6,15	6,71
Den Oever	3,20	3,86	4,44	4,96	5,44
Harlingen	3,49	4,08	4,58	5,02	5,42
Huibertgat	2,94	3,53	4,10	4,65	5,18
Den Helder	2,70	3,32	3,88	4,39	4,87
Hansweert	4,29	4,93	5,59	6,25	6,92
Hoek van Holland	2,94	3,57	4,26	4,99	5,78
Lauwersoog	3,48	4,10	4,65	5,15	5,61
Terschelling-West	2,99	3,52	3,95	4,33	4,68
Vlissingen	3,79	4,35	4,90	5,45	6,00
OS 11	3,24	3,81	4,38	4,94	5,51
IJmuiden buiten	2,85	3,55	4,29	5,09	5,94

²⁹ Een basispeil is gedefinieerd als een HW met een gemiddelde overschrijdingsfrequentie van eens in 10.000 jaar.

6.5.2 Effect verlenging meetreeks

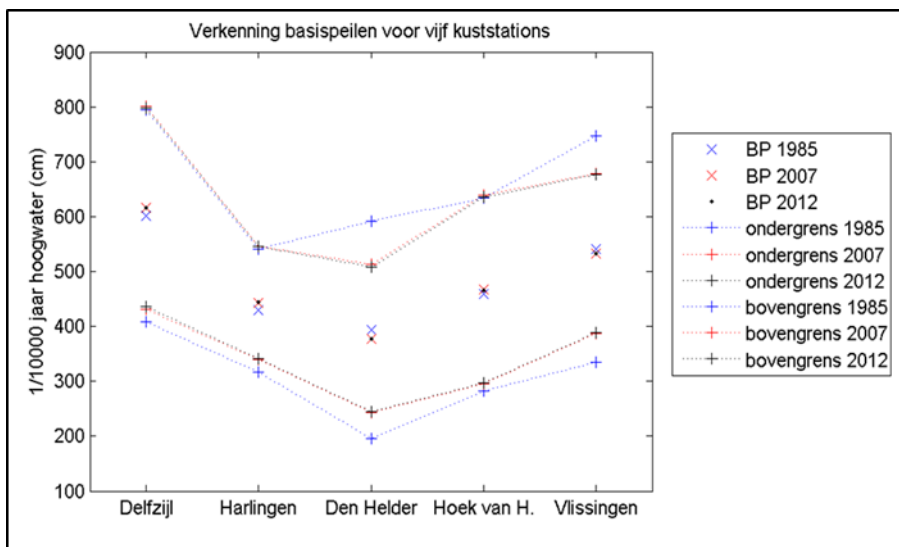
In het kader van WTI-2011 is onderzocht of verlenging van de meetreeksen hoogwaters (HW) van de hoofdstations met data uit de periode 1986 t/m 2007 aanleiding zou geven voor bijstelling van de basispeilen uit 1993 (Deltares, 2009c). De in 1993 gevolgde procedure om tot de basispeilen te komen is hierbij als uitgangspunt gebruikt. In tegenstelling tot (Dillingh et al, 1993) is er in Deltares (2009c) echter enkel gekeken naar de statistiek op de afzonderlijke hoofdstations; een fysisch onderzoek is achterwege gebleven. Dezelfde procedure is in WBI-2017 herhaald om te verkennen of de meetperiode 2007-2012 aanleiding zou geven voor bijstelling van de basispeilen uit 1993 (Eilander, 2014b).

De resultaten uit Deltares (2009c) en Eilander (2014a) zijn samen met de resultaten uit de basispeilen studie (Dillingh et al, 1993) samengevat in Tabel 6.21 en Figuur 6.24.

Tabel 6.21 Veranderingen in 1/10.000-hoogwaterstanden (HW) uit drie studies: basispeilen (BP) 1985 (Dillingh et al, 1993), 1985 reproductie, 2007 actualisatie (Deltares, 2009c) en actualisatie 2012 (Eilander, 2014a)

1/10,000-year HW (cm)	Delfzijl	Harlingen	Den Helder	Hoek van H.	Vlissingen
1985 BP (statistisch onderzoek)	615	440	415	475	555
HW 2007 series	616	442	378	467	533
HW 2012 series	616	444	376	466	532
Δ HW (2012-2007)	0	+2	-2	-1	-1

Tabel 6.21 laat zien dat het effect van de verlenging van de meetreeks met data uit 2007-2012 ten opzichte van Deltares (2009c) klein is; het effect bedraagt maximaal 0,02 m. Dit betekent dat de laatste 5 meetjaren de resultaten van de statistische analyse nauwelijks beïnvloeden. Ten opzichte van de basispeilen uit 1993 zijn er echter wel grote verschillen; deze lopen op tot (afgerond) 0,4 m voor station Den Helder, voor Vlissingen geldt een verschil van 0,23 m. Of en in hoeverre het analyseren van de samenhang tussen de hoofdstations deze verschillen kan beïnvloeden, is niet onderzocht en daarom onbekend. De geconstateerde verschillen ten opzichte van de basispeilen uit 1993 rechtvaardigen ons inziens nader onderzoek, zowel statistisch als fysisch, in het vervolg van dit project: dus in het kader van WBI-2023.



Figuur 6.24 Resultaten drie studies: 1985 reproductie (BP), actualisatie 2007 en actualisatie 2012 met bijbehorende 95% betrouwbaarheidsintervallen (Eilander, 2014b).

Op basis van de resultaten van de verkenning is besloten om in WBI-2017 de basispeilen voor het peiljaar 1985 zoals beschreven in Paragraaf 6.5.1 aan te houden. De basispeilen zijn in WBI-2017 dus onveranderd ten opzichte van WTI-2011.

6.5.3 Toeslagen hoogwaterstijging en trendcorrecties

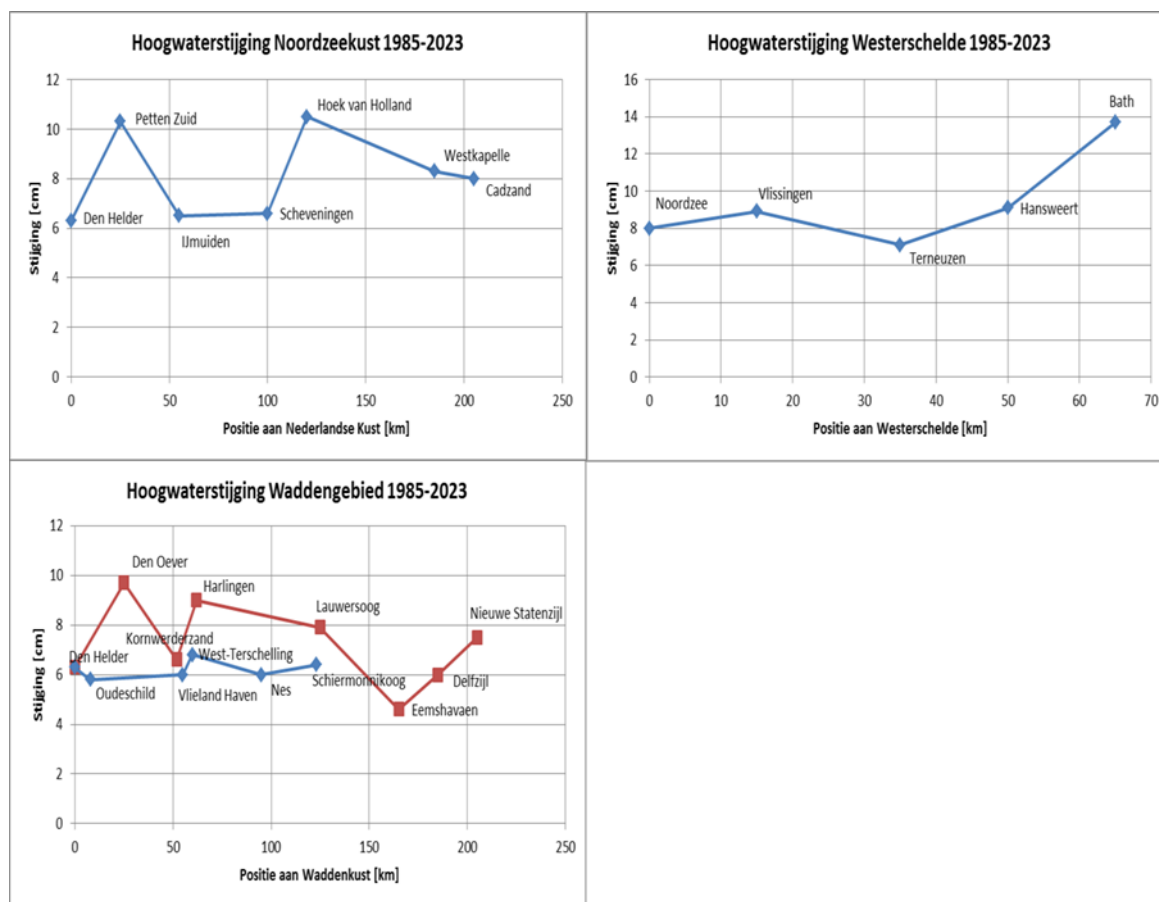
De basispeilen uit Dillingh et al. (1993) gelden voor de situatie in het jaar 1985. In verband met stijging van de hoogwaters (zeespiegelrijzing en lokale effecten) na 1985 dienen de basispeilen te worden geactualiseerd voor het jaar waarin de beoordeling betrekking heeft. Voor WBI-2017 betreft dat het jaar 2023 (het einde van de beoordelingsperiode).

Toeslagen voor hoogwaterstijging en trendcorrecties zijn onderzocht in Eilander (2014c). Voor het bepalen van deze toeslagen is dezelfde werkwijze gevolgd als in (Deltares, 2010f). De toeslagen zijn bepaald voor het peiljaar 2023 ten opzichte van het jaar 1985; hierbij zijn de tijdreeksen hoogwaters gebruikt over de periode 1985 t/m 2012. De resultaten van de berekende toeslagen zijn weergegeven in Figuur 6.25.

Op basis van deze resultaten zijn in WBI-2017 de volgende gemiddelde toeslagen voor zeespiegelstijging en trendcorrecties toegepast voor het peiljaar 2023:

- Voor Hollandse kust (met uitzondering van Hoek van Holland en Petten Zuid) de Waddenzee en de Westerschelde kust tot Hansweert geldt een toeslag van 0,08 m,
- Voor Hoek van Holland en Petten Zuid geldt een toeslag van 0,10 m,
- Voor de Westerschelde kust na Hansweert is een lineaire toename van 8 tot 14 cm bij Bath aangehouden,
- Voor de Eems-Dollard is een gemiddelde toeslag van 7 cm toegepast.

De toeslagen voor hoogwaterstijging en trendcorrecties voor het peiljaar 2023 zijn in WBI-2017 met uitzondering van Hoek van Holland en Petten Zuid onveranderd ten opzichte van toeslagen in WTI-2011 (peiljaar 2017).



Figuur 6.25 Ruimtelijke verdeling toeslagen kustgebieden

6.6 Statistiek met betrekking tot stormvloedkeringen

6.6.1 Faalkans per sluitvraag

Europaotkering

De faalkans van de Maeslantkering wordt in WBI-2017 gelijk gesteld aan 1/100 per sluitvraag. Ten opzichte van WTI-2011 is dit onveranderd. Voor de Hartelkering geldt een maximale toelaatbare faalkans van 1/10 per sluitvraag; dit betekent dat aangenomen wordt dat de Hartelkering in 9 van de 10 sluitvragen goed functioneert. De faalkans van de Hartelkering heeft bijna geen invloed op de hydraulische belastingen op achterliggende keringen, het effect bedraagt enkele cm's (De Deugd, 2007). Om rekentechnische redenen wordt de faalkans van de Hartelkering mede daarom altijd gelijk gesteld aan de faalkans van de Maeslantkering, te weten 1/100 per sluitvraag en wordt volledige correlatie tussen het falen van beide keringen verondersteld.

Ramspolkering

De Ramspolkering kan falen. Er is sprake van falen indien de kering niet sluit als dit volgens de geldende sluitcriteria wel zou moeten. Hierbij wordt geen onderscheid gemaakt tussen niet sluiten, niet tijdig sluiten of constructief falen na sluiten. De faalkans in WTI-2011, gebaseerd op basis van de MER Ramspol (Kors et al, 1994), is gesteld op 0,0035 per sluitvraag. In WBI-2017 wordt uitgegaan van de wettelijke vastgelegde eis van een maximaal toelaatbare

faalkans van 1/100 per sluitvraag in 2050 (mail WV, d.d. 26 mei 2015). Het effect op de waterstanden van deze aanpassing van de faalkans van de Ramspolkering van 0,0035 naar 0,01 per sluitvraag speelt voornamelijk op het Zwarte Meer en bedraagt minder dan 0,10 m.

Oosterscheldekering

Omdat de Oosterscheldekering bestaat uit 62 schuiven die onafhankelijk kunnen falen, zijn er faalscenario's gedefinieerd waarbij variërende aantallen schuiven open blijven staan. De in WBI gehanteerde kansen op de verschillende scenario's zijn gegeven in Tabel 6.22.

Tabel 6.22 Kansen voor verschillende sluitscenario's van de Oosterscheldekering, d.d. april 2015.

# falende schuiven	Bemand	Onbemand
0	0,98647542880	0,93950690530
1	0,01180000000	0,05410000000
2	0,00038100000	0,00183000000
3-5	0,00018800000	0,00200000000
6-10	0,00058800000	0,00097200000
kwart	0,00037700000	0,00060700000
helft	0,00017000000	0,00023100000
driekwart	0,00000007120	0,00000009470
heel	0,00002050000	0,00075300000

6.6.2 Waterstandsvoorspellingen ten behoeve van een sluitcommando

Het sluiten van de Europoortkeringen (Maeslant- en Hartelkering) en de Oosterscheldekering geschiedt op basis van waterstandsvoorspellingen. Deze voorspellingen bevatten onzekerheid, waardoor er een kans bestaat op een onterecht sluitcommando of een onterecht achterwege blijven van een sluitcommando.

Er valt wat voor te zeggen om deze onzekerheid in de waterstandsvoorspellingen tot de modelonzekerheden te rekenen. Het is echter gangbaar om deze onzekerheid bij de inherente onzekerheden in te delen.

Europoortkering

De voorspelling van de zeewaterstand bij Hoek van Holland op basis waarvan de beslissing genomen wordt om de stormvloedkeringen in de Europoort te sluiten gaat gepaard met onzekerheid. Deze onzekerheid wordt momenteel al meegenomen in de HB en deze aanpak blijft onveranderd in WBI-2017.

De waterstandsvoorspellingen voor Hoek van Holland worden gegeven door de Stormvloedwaarschuwingsdienst (SVSD). Het sluitcommando voor de beide Europoortkeringen wordt gegeven zodra de verwachte waterstanden te Rotterdam en Dordrecht de zogeheten sluitcriteria overschrijden. Het sluitcriterium voor Rotterdam is vastgesteld op 3,00 m+NAP en dat voor Dordrecht op 2,90 m+NAP. Om te bepalen of de sluitcriteria voor Rotterdam en Dordrecht gehaald worden, wordt gebruik gemaakt van het zogenoemde Beslis- en Ondersteunend Systeem (BOS). Eén van de invoeren van het BOS is de voorspelde zeewaterstand te Hoek van Holland. De nauwkeurigheid van de waterstandsvoorspelling bij Hoek van Holland wordt gemodelleerd door een normale verdeling. Op deze manier wordt de onzekerheid met betrekking tot de

voorspelnaauwkeurigheid van stormvloed in rekening gebracht. Op basis van Kroos (1999) en Geerse (2003) is een gemiddelde $\mu = -0,09$ m en een standaardafwijking van $\sigma = 0,18$ m gehanteerd voor de aangenomen normale verdeling. Dit houdt in dat de voorspellingen gemiddeld 9 cm te laag zijn.

De waterstandsvoorspellingen en realisaties uit de periode vanaf 2004 tot heden geven geen aanleiding voor aanpassing van bovengenoemde kansverdeling en bijbehorende parameters (persoonlijke communicatie met dhr. Kroos). Op basis hiervan is besloten om ten aanzien van de voorspelnaauwkeurigheid van de zeewaterstand bij Hoek van Holland de kansverdeling en bijbehorende parameters uit WTI-2011 te handhaven in WBI-2017. Dit houdt concreet in dat de voorspelfout van de zeewaterstand bij Hoek van Holland normaal verdeeld is met $\mu = -0,09$ m en $\sigma = 0,18$ m.

Oosterscheldekering

De Oosterscheldekering sluit bij een verwachte zeewaterstand bij de kering van 3,00 m+NAP of hoger. Als een waterstand van 2,75 m+NAP wordt verwacht, wordt het Beslisteam Sluiting Oosterscheldekering bijeengeroepen. Op basis van de weersvoorspellingen, in combinatie met lokale gegevens en het te verwachten getij, beslist dit team of de Oosterscheldekering gesloten moet worden (strategiesluiting). Door onzekerheid in de voorspelling kan het keringpersoneel op of kort voor een buitenpeil van 3,00 m + NAP de kering sluiten (bemande 3 m + NAP sluiting). Als bij hoge zeewaterstanden iets mis gaat met de alarmering of bediening, is er het noodsluitsysteem, dat bij 3,00 m+NAP de schuiven automatisch sluit. Er is een kans van 1% per sluiting van de stormvloedkering dat de handmatige sluiting faalt en het Noodsluitsysteem van de kering in werking treedt.

De daadwerkelijke optredende waterstand kan afwijken van waterstandsvoorspellingen. Analoog aan de Europoortkeringen wordt de onnauwkeurigheid van deze waterstandsvoorspellingen meegenomen door rondom de voorspelde zeewaterstand een standaardafwijking te zetten. De onnauwkeurigheid van waterstandsvoorspellingen ten behoeve van de sluiting van de Oosterschelde kering is normaal verdeeld met een gemiddelde van nul en een standaardafwijking van 0,25 m; zie voor details (RWS-RIKZ, 2007). Deze aanpak is in WBI-2017 aangehouden.

6.7 Correlaties

6.7.1 Inleiding

Bekend is dat hoge meerpeilen vaak samen gaan met verhoogde afvoeren op de IJssel en de Vecht: afvoer en meerpeil zijn derhalve (positief) gecorreleerd. Ook afvoeren onderling zijn gecorreleerd. Hoge en extreme zeewaterstanden gaan gepaard met extreme windsnelheden uit zuidwestelijk tot noordelijke windrichtingen. In de probabilistische en productieberekeningen wordt rekening gehouden met correlaties tussen verschillende basisstochasten. In dit hoofdstuk komen relevante correlaties tussen verschillende basisstochasten aan de orde.

6.7.2 Correlatie meerpeil-afvoer (IJssel en Vecht)

In (Diermanse et al, 2016) zijn enkele correlatiemodellen beschreven die gebruikt kunnen worden voor het modelleren van correlaties tussen basisstochasten. Het betreft:

- 1) het zogenoemde CS model (model met Constante Spreiding),
- 2) het PCR model (model PC-Ring) en
- 3) het HES model (model Hetero Scedastic).

Alleen het PCR model is geïmplementeerd in Hydra-Ring. Het eerste model is geïmplementeerd in Hydra-NL en is eerder gebruikt voor de afleiding van de hydraulische randvoorwaarden in HR-2006. Het tweede model is geïmplementeerd in PC-Ring en is gebruikt in de studie van VNK (Veiligheid Nederland in Kaart). De genoemde modellen hebben overeenkomsten, maar er zijn ook enige verschillen; zie (Diermanse et al, 2016) voor nadere details.

De correlatie tussen IJsselmeerpeil en afvoer van de IJssel bij Olst is in Hydra-Ring gemodelleerd door middel van het PCR model. Dit model ziet er als volgt uit:

$$y = x + us - \frac{s^2}{2} \quad (6.1)$$

waarin:

- x = realisatie van een standaard exponentieel verdeelde variabele X ; dit is de getransformeerde waarde van de onafhankelijke variabele (meerpeil in dit geval)
- u = realisatie van een standaard normaal verdeelde variabele U (U is onafhankelijk van X)
- y = realisatie van variabele Y ; dit is de getransformeerde waarde van de afhankelijke variabele (afvoer in dit geval)
- s = parameter die de mate van correlatie weergeeft tussen X en Y .

Lage waarden van s duiden op een sterke correlatie tussen de afhankelijke en onafhankelijke variabele, hoge waarden van s duiden op een zwakke correlatie. Het PCR-model gaat uit van de benadering dat y , zoals berekend met vergelijking (6.1), net als x een realisatie is uit de standaard exponentiële verdeling, dit in tegenstelling tot het CS model waarin de aanname van een exponentieel verdeelde variabele Y losgelaten wordt, zie (Geerse, 2006).

In Hydra-Ring is de waarde 1,2 gehanteerd voor de parameter s . Deze waarde wordt gebruikt voor zowel de IJsseldelta (correlatie IJsselafvoer-IJsselmeerpeil) als de Vechtdelta (correlatie Vechtafvoer-IJsselmeerpeil).

6.7.3 Correlatie IJssel- en Vechtafvoer

De correlatie tussen de IJssel- en Vechtafvoer is voor de probabilistische berekeningen met Hydra-Ring niet nodig omdat voor de IJsseldelta de IJsselafvoer als basisstochast geldt met de Vechtafvoer daaraan gerelateerd en voor de Vechtdelta de Vechtafvoer met de IJsselafvoer daaraan gelinkt (Geerse, 2006). Deze aanpak is onveranderd ten opzichte van WTI-2011. Voor de productieberekeningen van waterstanden met WAQUA is wel rekening gehouden met de correlatie tussen Vecht- en IJsselafvoer (Paragraaf 4.5).

6.7.4 Correlatie Rijn-Maas

De productieberekeningen van waterstanden voor het Benedenrivierengebied zijn uitgevoerd met 1 op 1 relatie tussen Rijnafvoer bij Lobith en Maasafvoer bij Borgharen (Paragraaf 4.4). De aanname van volledige afhankelijkheid, door middel van de 1 op 1 relatie, maakt een

correlatiemodel voor de Rijn- en Maasafvoer in Hydra-Ring overbodig. De probabilistische berekeningen worden uitgevoerd of met de statistiek van de Rijnafvoer bij Lobith of van de Maasafvoer bij Lith.

Voor onderzoeksdoeleinden en toekomstige toepassingen is in Hydra-Ring het PCR model zoals beschreven in Paragraaf 6.7.2 geïmplementeerd om de correlatie tussen de Rijnafvoer en de Maasafvoer te kunnen modelleren.

6.7.5 Correlatie wind-zeewaterstand voor kustregio's

De HR-2006 voor de kustregio's zijn bepaald met het probabilistische model Hydra-K. Hydra-K maakt gebruik van simultane waarnemingen van wind en zeewaterstand boven bepaalde drempelwaardes. De in Hydra-K gevolgde methode de Haan maakt rechtstreeks gebruik van deze simultane waarnemingen (RWS-RIKZ, 2007). Echter, ten behoeve van berekeningen met Hydra-Ring is een geparametriseerd model nodig die de correlatie tussen windsnelheid en zeewaterstand beschrijft. Hiertoe zijn de beschikbare simultane waarnemingen van wind en zeewaterstand per windrichting bewerkt volgens PCR model, zie ook Vrouwenvelder et al (2003) en (Diermanse et al, 2016):

$$y = x + us_r - \frac{s_r^2}{2} \quad (6.2)$$

Waarin:

- y = gereduceerde waarde van de windsnelheid
- x = gereduceerde waarde van de zeewaterstand
- u = standaard normaal verdeelde variabele
- s_r = de parameter die de mate van correlatie/spreiding tussen y en x weergeeft, voor windsector r.

Gereduceerd betekent in dit verband dat de betreffende basisstochasten, in dit geval wind en zeewaterstand, zijn getransformeerd tot standaard exponentiële variabelen; zie voor details Vrouwenvelder et al (2003).

Doel is om de s_r waarde af te leiden uit de data voor elke windrichtingssector r. Daartoe wordt s, gelijk gesteld aan de standaardafwijking van de getransformeerde waarnemingen rondom de lijn y = x. De waarde van s_r is bepaald uit:

$$s_r = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{1}{n} (x_i - y_i)^2}$$

De s_r-waarden, die de correlatie binnen de wind-waterstandsstatistiek beschrijven, zijn bepaald voor 6 hoofdstations van wind-waterstand; een overzicht van de gebruikte meetgegevens is weergegeven in Tabel 6.23. Voor elke regio is het windstation en zeewaterstandsstation aangegeven met een referentie naar het rapport of bestandnaam waar de data is verkregen. Deze nieuwe s_r-waarden zijn bepaald op basis van simultane waarnemingen boven een drempelwaarde, zoals beschreven in de mv-bestanden (Weerts & Diermanse, 2004). Deze bestanden geven simultane uur-waarnemingen van stormen waarbij

één of meer drempelwaarden voor golfhoogte, windsnelheid of stormopzet wordt overschreden. Voor het afleiden van de s-waarden is per storm de simultane waarneming van zeewaterstand en windopzet gekozen waarbij de maximale zeewaterstand optreedt; deze aanpak is in WBI-2017 onveranderd ten opzichte van HR-2006 en WTI-2011.

Tabel 6.23 Overzicht mv-bestanden en stations voor de afleiding van de wind-waterstandscorrelaties

Regio Hydra-Ring	Wind station	Zeewater-stand station	Exp. verdeling wind referentie	Weibull verdeling zeewaterstand referentie	mv-bestanden: Tijdreeks simultane metingen
Waddenzee Oost	West Terschelling	Lauwersoog	WTI-2011	lwo.e30	1979-2008
Waddenzee West	West Terschelling	Harlingen	WTI-2011	hrl.e30	1979-2008
Hollandse Kust Noord	de Kooy	Den Helder	Caires (2009)	hld.e30	1979-2008
Hollandse Kust Midden	IJmuiden	IJmuiden	Caires (2009)	ymb.e30	1979-2002
Hollandse Kust Zuid	Hoek van Holland	Hoek van Holland	Caires (2009)	hvl.e30	1979-2002
Westerschelde	Vlissingen	Vlissingen	Caires (2009)	vls.e30	1979-2008

De afgeleide s_T -waarden zijn weergegeven in Tabel 6.24.

Tabel 6.24 Berekende s-waarden als maat voor de correlatie wind-zeewaterstand voor de 6 kustregio's

Regio	Wind	Zeewaterstand	240 ⁰	270 ⁰	300 ⁰	330 ⁰	360 ⁰
Kust-Noord	De Kooy	Den Helder	1,85	1,27	1,21	1,39	1,78
Kust-Midden	IJmuiden	IJmuiden Buiten	1,87	1,39	1,50	1,51	1,98
Kust-Zuid	Hoek van Holland	Hoek van Holland	1,87	0,98	1,32	1,22	1,49
Waddenzee-Oost	Terschelling	Lauwersoog	1,81	1,47	1,35	1,30	1,61
Waddenzee-West	Terschelling	Harlingen	1,78	1,51	1,51	1,54	2,44
Westerschelde	Vlissingen	Vlissingen	1,68	1,66	1,62	1,65	1,85

6.7.6 Correlatie wind-waterstand Maasmond (Benedenrivieren)

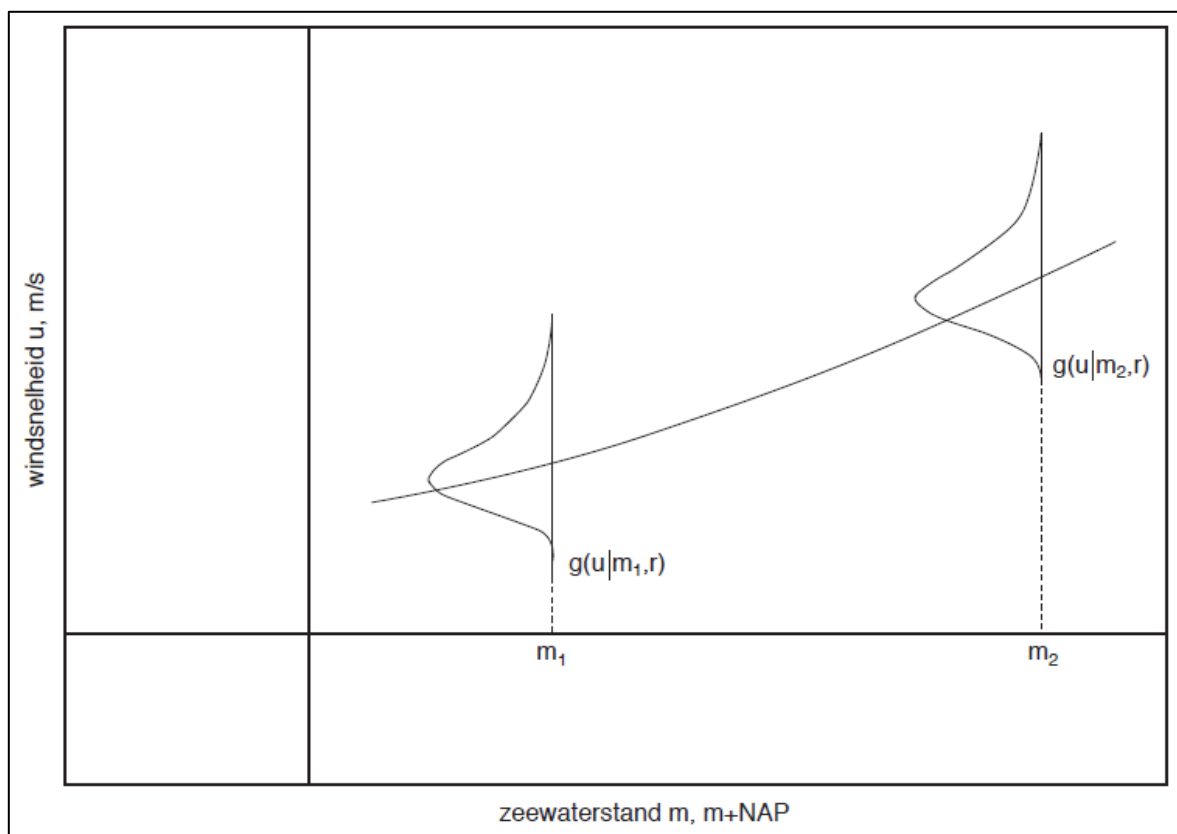
In het Benedenrivierengebied (regio 3 en regio 4) is de basisstochast zeewaterstand te Maasmond gecorreleerd met de windsnelheid en windrichting. Voor de westelijke windrichtingen (ZW, WNW, ..., N) wordt rekening gehouden met verhoogde windsnelheden bij verhoogde zeewaterstanden. De hoge zeewaterstanden worden immers veroorzaakt door hoge (NW) windsnelheden. Bij de probabilistische berekeningen met Hydra-Ring wordt daarom gebruik gemaakt de gecombineerde wind-waterstandsstatistiek, uitgedrukt als conditionele kansen van de windsnelheid bij Schiphol gegeven de zeewaterstand bij Maasmond en windrichting (Figuur 6.26). Voor de (overige) oostelijke³⁰ richtingen zijn zulke conditionele kansen niet nodig voor probabilistische berekeningen. N.B. de zeewaterstandsstatistiek bij Maasmond volgt eenvoudig uit die voor Hoek van Holland door de zeewaterstanden met een vaste waarde te verschuiven: de zeewaterstanden bij

³⁰ Deze richtingen kunnen slechts bedreigend zijn voor locaties in de buurt van de bovenrand van het gebied, waar de extreme afvoer bepalend is voor de kruinhoogte. Op dergelijke locaties is de invloed van de zeewaterstand, vanwege de grote afstand tot zee, verwaarloosbaar.

Maasmond liggen 0,02 m lager dan die bij Hoek van Holland (Geerse, 2003). De zeewaterstandsstatistiek bij Hoek van Holland is beschreven in paragraaf 6.5.

Voor het modelleren van de wind-waterstandsstatistiek wordt gebruikt gemaakt van het zogenoemde Volker model (Volker, 1987). De Volker wind-waterstandsstatistiek is in het kader van HR-2006 geactualiseerd (Geerse et al, 2002). Deze geactualiseerde wind-waterstandsstatistiek is echter niet meer bruikbaar voor WBI-2017 omdat de windstatistiek in WBI-2017 is aangepast (paragraaf 6.3). Daarom is de wind-waterstandsstatistiek uit (Geerse et al, 2002) nogmaals geactualiseerd.

Een belangrijk element in het Volker model is de zogenoemde Volkerfactor. Deze factor wordt geïntroduceerd om rekening te houden met het feit dat de kans dat een getijtop en de piek van de storm samenvallen circa 50% bedraagt, zie voor meer details (Geerse et al, 2002).



Figuur 6.26 Het principe achter de beschrijving van de wind-waterstandstatistiek in grafische vorm

De kansdichtheid volgens het Volker model voor de wind-waterstandstatistiek bestaat uit twee delen: een deel dat volledig afhankelijk is van de zeewaterstand en een deel dat onafhankelijk is van de zeewaterstand. De formule van het model luidt als volgt, zie (Geerse et al, 2002):

$$F_d(u|m, r) = \begin{cases} \frac{1}{1-d} \exp \left[-\exp \left(\frac{-K_r(u) + \frac{\rho_r[m - A_r]}{B_r}}{M_r} \right) \right], & u \leq u_d(m, r) \\ 1, & u > u_d(m, r) \end{cases}$$

Hierin is:

- $F(u|m,r)$: de kansdichtheid van de windsnelheid gegeven de zeewaterstand en windrichting
- m : de zeewaterstand te Hoek van Holland,
- r : de windrichting,
- d : een afknottingspercentage van de hoogste waarnemingen (2%),
- $K_r(u)$: een kwadratische functie van de vorm $K_r(u) = au^2 + bu + c$,
- ρ_r, A_r, B_r en M_r : parameters van de kansverdeling van de zeewaterstand.

De functie $K_r(u)$ vormt het deel in bovengenoemde formule dat onafhankelijk is van de waterstand, het overige deel van de teller is het afhankelijk deel. De zeewaterstandsstatistiek verandert niet in WBI-2017 (Paragraaf 6.5). Dit betekent dat de parameters ρ_r, A_r, B_r en M_r niet geactualiseerd hoeven te worden en overgenomen kunnen worden uit (Geerse et al, 2002). Tabel 6.25 toont voor de volledigheid deze parameters.

Tabel 6.25 Parameters van de kansverdeling van de zeewaterstand voor Hoek van Holland (Geerse et al, 2002)

Windrichting	A_r	B_r	ρ_r	M_r
0	0.87	0.24	0.36	0.67
22.5	0.00	1.00	0.00	1.00
45	0.00	1.00	0.00	1.00
67.5	0.00	1.00	0.00	1.00
90	0.00	1.00	0.00	1.00
112.5	0.00	1.00	0.00	1.00
135	0.00	1.00	0.00	1.00
157.5	0.00	1.00	0.00	1.00
180	0.00	1.00	0.00	1.00
202.5	0.00	1.00	0.00	1.00
225	1.23	0.12	0.51	1.00
247.5	1.23	0.17	0.61	1.00
270	1.22	0.23	0.48	0.67
292.5	1.20	0.26	0.61	0.67
315	0.89	0.33	0.77	0.67
337.5	0.90	0.29	0.68	0.67

De functies $K_r(u)$ worden benaderd door kwadratische functies met parameters a , b en c . Tabel 6.26, Tabel 6.26 en Tabel 6.27 tonen de parameterschattingen van de functies $K_r(u)$ voor de situaties met en zonder Volkerfactor, inclusief het zogenoemde afknottingspercentage d van 0.02. Deze waarde is bepaald door Volker (1987) en is in WBI-2017 onveranderd overgenomen. Figuur 6.27 toont de fit van $K_r(u)$ voor de windrichting WNW en met de Volkerfactor, door een kwadratische functie met parameters uit Tabel 6.26. N.B. Hydra-NL berekent zelf de functies $K_r(u)$. Figuur 6.27 dient dan ook als vergelijking tussen Hydra-NL en Hydra-Ring.

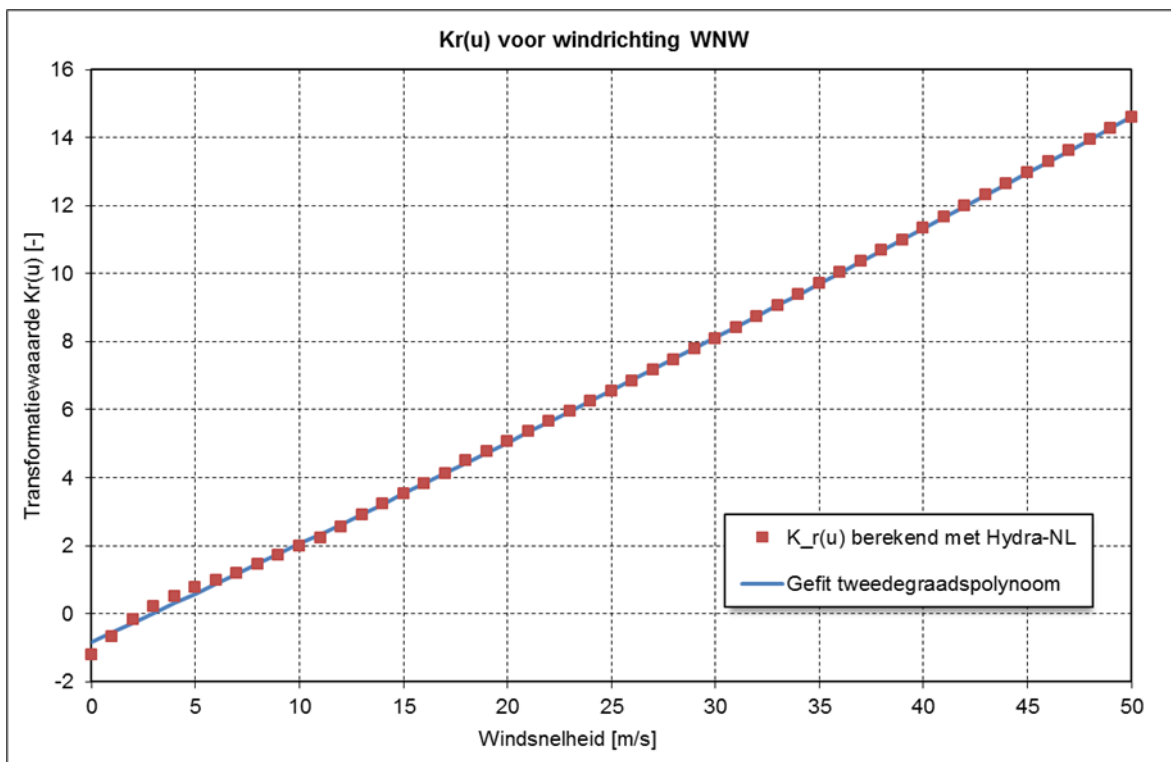
Tabel 6.26 Parameterschattingen $K_r(u)$, met Volkerfactor, inclusief de afknottingsparameter van 0,02.

Windrichting [°N]	a_r	b_r	c_r	d
0	-0.001314	0.2903	-0.7554	0.02
22.5	0.001396	0.5542	-2.8221	0
45	0.003102	0.5839	-3.3161	0
67.5	0.002716	0.618	-3.6472	0
90	0.003821	0.6536	-3.4686	0
112.5	-0.001867	0.8251	-3.6599	0
135	0.001806	0.7665	-3.7487	0
157.5	0.000358	0.6988	-3.8532	0
180	0.001973	0.5865	-3.4827	0
202.5	0.001117	0.4576	-3.0232	0
225	-0.000959	0.3701	-1.5357	0.02
247.5	-0.000696	0.3769	-1.6238	0.02
270	-0.000759	0.2859	-1.2586	0.02
292.5	0.00052	0.2828	-0.8312	0.02
315	0.001755	0.3019	-0.4869	0.02
337.5	0.000549	0.3362	-0.7533	0.02

Hydra-Ring berekent de conditionele kansen van de windsnelheid bij Schiphol gegeven windrichting en zeewaterstand bij Maasmond op basis van de formule van Volker en de parameters uit Tabel 6.25 en Tabel 6.26 respectievelijk Tabel 6.25 en Tabel 6.27 voor de situatie zonder Volkerfactor respectievelijk met Volkerfactor.

Tabel 6.27 Parameterschattingen $K_r(u)$, met Volkerfactor, inclusief de afknottingsparameter van 0,02.

Wind richting [°N]	a_r	b_r	c_r	d
0	-0.001203	0.278	-0.7626	0.02
22.5	0.001396	0.5542	-2.8221	0
45	0.003102	0.5839	-3.3161	0
67.5	0.002716	0.618	-3.6472	0
90	0.003821	0.6536	-3.4686	0
112.5	-0.001867	0.8251	-3.6599	0
135	0.001806	0.7665	-3.7487	0
157.5	0.000358	0.6988	-3.8532	0
180	0.001973	0.5865	-3.4827	0
202.5	0.001117	0.4576	-3.0232	0
225	-0.0009	0.3544	-1.4562	0.02
247.5	-0.000543	0.3574	-1.5463	0.02
270	-0.000478	0.2631	-1.1397	0.02
292.5	0.000779	0.2561	-0.6869	0.02
315	0.002211	0.2661	-0.3706	0.02
337.5	0.000996	0.3033	-0.66	0.02



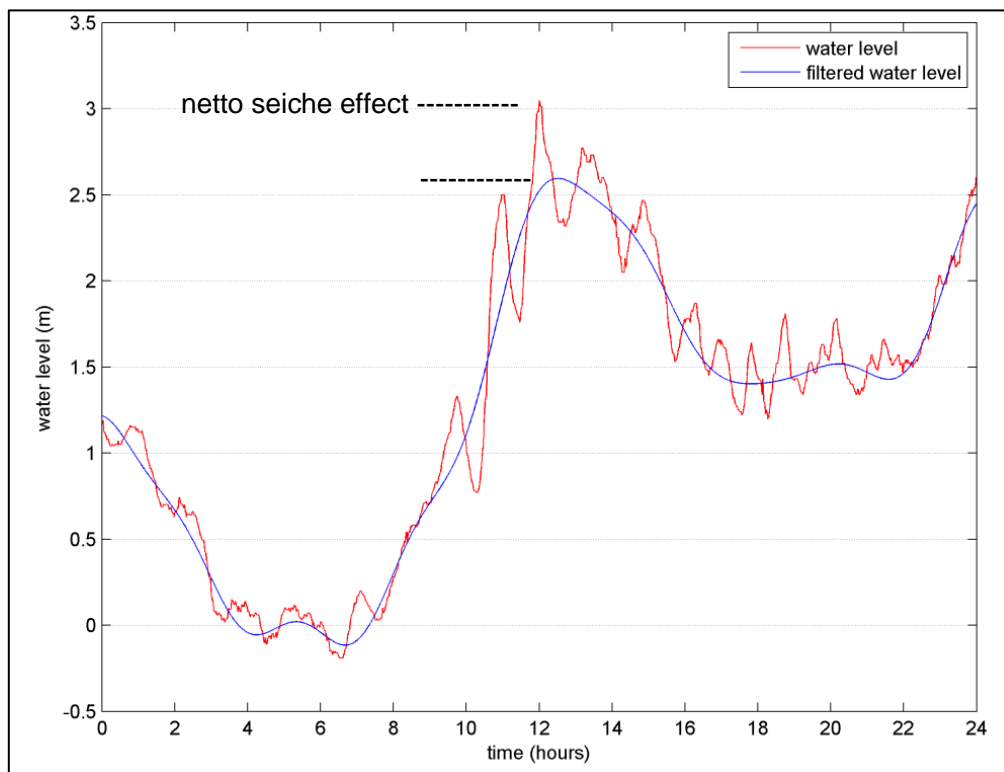
Figuur 6.27 Benadering $K_r(u)$ door kwadratische functie voor windrichting WNW, gefit op de berekende waarden uit Hydra-NL.

Tabel 6.25 t/m Tabel 6.27 dienen als invoer voor de wind-waterstandsstatistiek bij Maasmond in Hydra-Ring.

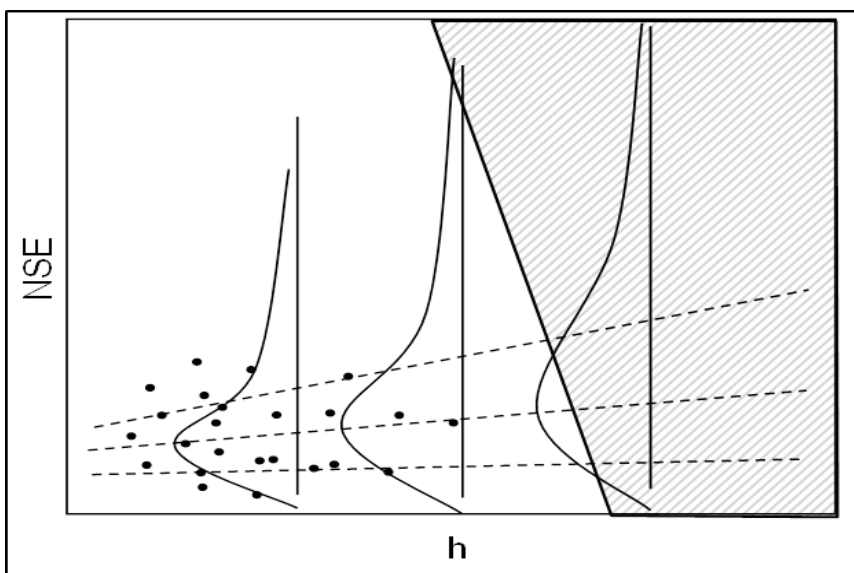
6.7.7 Correlatie seiches en zeewaterstand Maasmond

Seiches worden in WBI-2017 alleen voor het Europoortgebied in rekening gebracht. Seiches spelen alleen een rol bij gesloten Europoortkeringen (de maatgevende situatie voor het Europoortgebied). Deze aanpak is onveranderd ten opzichte van WTI-2011.

De seiches statistiek, ook de referentiestatistiek seiches genoemd, heeft betrekking op de locatie Rozenburgsesluis (ROZ). In het kader van WTI-2011 is deze statistiek opnieuw afgeleid (Deltares, 2010a). Hierbij is uitgegaan van een correlatie tussen het netto seiches effect, NSE, en de waterstand bij Hoek van Holland. Het NSE is het waterstandsverhogende effect van een seiche tijdens een stormvloed (zie Figuur 6.28). Voor de zeewaterstand bij Hoek van Holland geldt de statistiek/verdeling zoals beschreven in Paragraaf 6.5. Voor de conditionele kansverdeling van het NSE voor een gegeven waterstand is een Gamma verdeling aangenomen (Vrouwenvelder, 1994). Verder is aangenomen dat de spreiding lineair toeneemt voor toenemende waterstanden, zie Figuur 6.29.

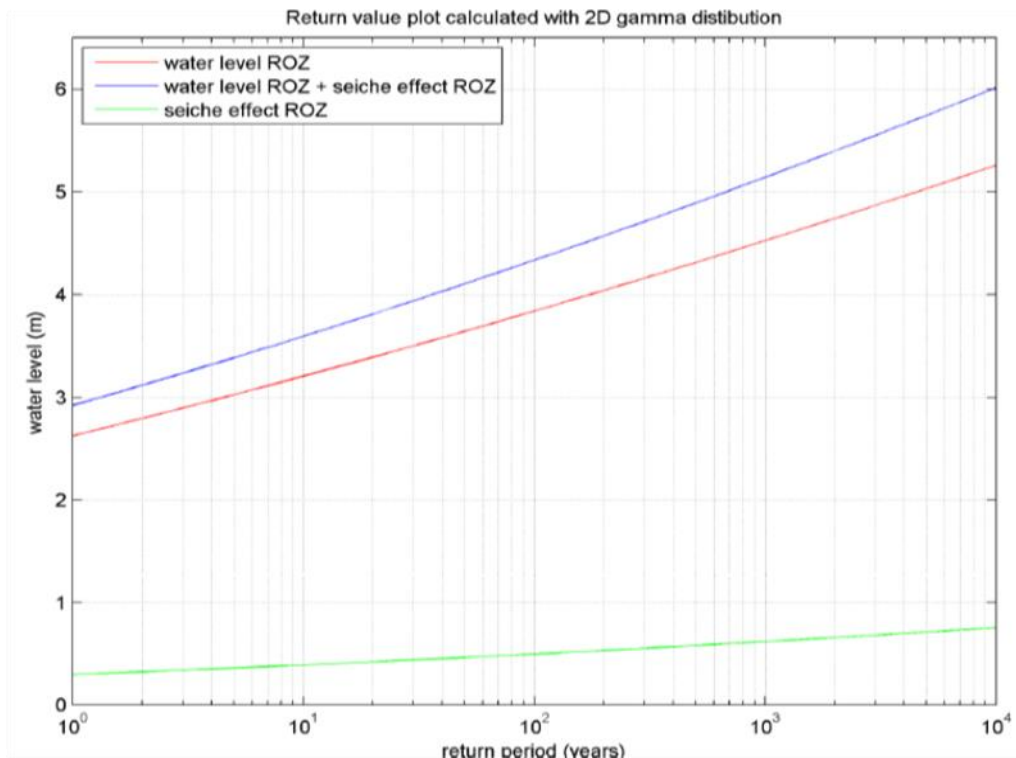


Figuur 6.28 Voorbeeld van waterstand inclusief seiches en definitie netto seiches effect.



Figuur 6.29 Schematische weergave van de conditionele kansverdeling van NSE gegeven de zeewaterstand h .

De overschrijdingskans van de waterstand inclusief het NSE wordt verkregen door de gezamenlijke kansverdeling van h en NSE te integreren over alle combinaties; zie voor details Deltares (2010a).



Figuur 6.30 Waterstand (met en zonder NSE) en NSE bij ROZ als functie van terugkeertijd.

Tabel 6.28 bevat de berekende waarden van het NSE bij ROZ die behoren bij herhalings tijden 1, 4.000 en 10.000 jaar.

Tabel 6.28 Netto seiche effect voor enkele terugkeertijden.

Herhalings tijd [jaar]	Seiches toeslag ROZ [m]
1	0,30
4.000	0,70
10.000	0,75

Voor het meenemen van seiche-effecten in de belastingmodellen van Hydra-Ring zijn nieuwe berekeningen uitgevoerd, zie Deltares (2014g). Met behulp van PHAROS (www.deltares.nl/nl/software-alg) zijn voor 41 waterstanden tussen NAP +2,40 m en NAP +6,40 m de netto seiche-effecten berekend voor alle uitvoerlocaties (zowel as- als oeverlocaties) in het Europoortgebied. Hierbij is rekening gehouden met het effect van demping door onderlopen van kades en overstromen van golfbrekers. Ook zijn hierbij veranderingen in de layout van het gebied meegenomen. Deze berekende seiches toeslagen dienen als invoer voor Hydra-Ring. Bij deze berekende toeslagen is uitgegaan van een functionerende Hartel- en Maeslantkering. In deze toeslagen zijn onzekerheden in bijvoorbeeld PHAROS echter nog niet meegenomen. Onzekerheden in seiches komen in Paragraaf 7.7 aan de orde.

6.8 Statistiek golfcondities zachte keringen

Duinen vormen één regio in Hydra-Ring, regio 16. De hydraulische belastingen voor duinafslagberekeningen zijn afgeleid in Deltares (2014f). Deze belastingen, vigerend voor

WBI-2017, komen hieronder kort aan de orde, voor een uitgebreide beschrijving wordt verwezen naar Deltares (2014f).

Ten behoeve van de probabilistische berekeningen zijn duinafslagsommen nodig voor een range aan herhalingstijden. Hiervoor wordt het duinafslagmodel DUROS+ gebruikt (Deltares, 2014f). DUROS+ maakt gebruik van hoge zeewaterstanden op verschillende hoofdstations. De zeewaterstandsstatistiek voor duinen is identiek aan die voor de harde keringen; deze statistiek is uitvoerig behandeld in Paragraaf 6.5 van onderhavig rapport. Een overzicht van de zeewaterstandsstations is weergegeven in Bijlage A. Hoge zeewaterstanden op tussenliggende stations worden verkregen door middel van interpolatie; de ruimtelijke verdeling van de zeewaterstanden voor verschillende overschrijdingsfrequenties is beschreven in RWS (1995).

Naast de zeewaterstand bestaat de invoer voor het model DUROS+ uit golfparameters, te weten de golfhoogte H_s en de golfpiekperiode³¹ T_p . Deze worden bepaald op “diep water” op de doorgaande -20 m + NAP dieptelijn. Voor de berekening van golfhoogten en golfperioden zijn op diep water zes zogenaamde steunpunten gedefinieerd waarvoor de golfstatistiek is afgeleid. De golfhoogte ter plaatse van een steunpunt hangt af van de zeewaterstand volgens de volgende formule:

$$H_s = a + b h - c \max(0; d - h)^e$$

Hierin is H_s de spectrale golfhoogte en h de hoogwaterstand ten opzichte van NAP ter plaatse van het steunpunt. De laatste term in deze vergelijking vertraagt de toename van extreme golfhoogten door het effect van dieptelimitatie. Deze vertraging treedt op bij waterstanden hoger dan 7 m + NAP. De waarden voor de parameters a tot en met e zijn weergegeven in Tabel 6.29. De relaties tussen waterstand en golfhoogte voor de zes steunpunten zijn grafisch weergegeven in Figuur 6.32, zie ook Deltares (2014f).

Tabel 6.29 Parameters voor de statistische relatie golfhoogte en zeewaterstand. Bron (Deltares, 2014f).

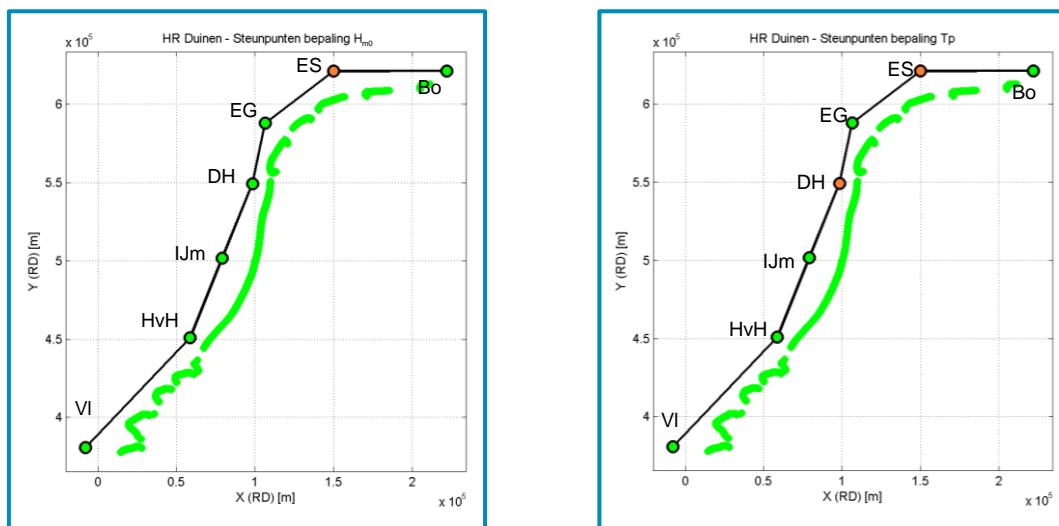
Steunpunt golven	a	b	c	d	e
Vlissingen	2,40	0,35	0,0008	7,00	4,67
Hoek van Holland	4,35	0,60	0,0008	7,00	4,67
IJmuiden	5,88	0,60	0,0254	7,00	2,77
Den Helder	9,43	0,60	0,68	7,00	1,26
Eierlandse Gat	12,19	0,60	1,23	7,00	1,14
Borkum	10,13	0,60	0,57	7,00	1,58

Om ervoor te zorgen dat in het Waddengebied de golfbelastingen bij benadering de -20 m + NAP dieptelijn volgen, zijn extra steunpunten gedefinieerd bij Den Helder en tussen Steunpunt Eierlandse Gat en Borkum (RWS-RIKZ, 2007). De golfhoogte op deze steunpunten is verkregen door middel van interpolaties. De ligging van alle steunpunten zijn weergegeven in Tabel 6.30 en Figuur 6.31.

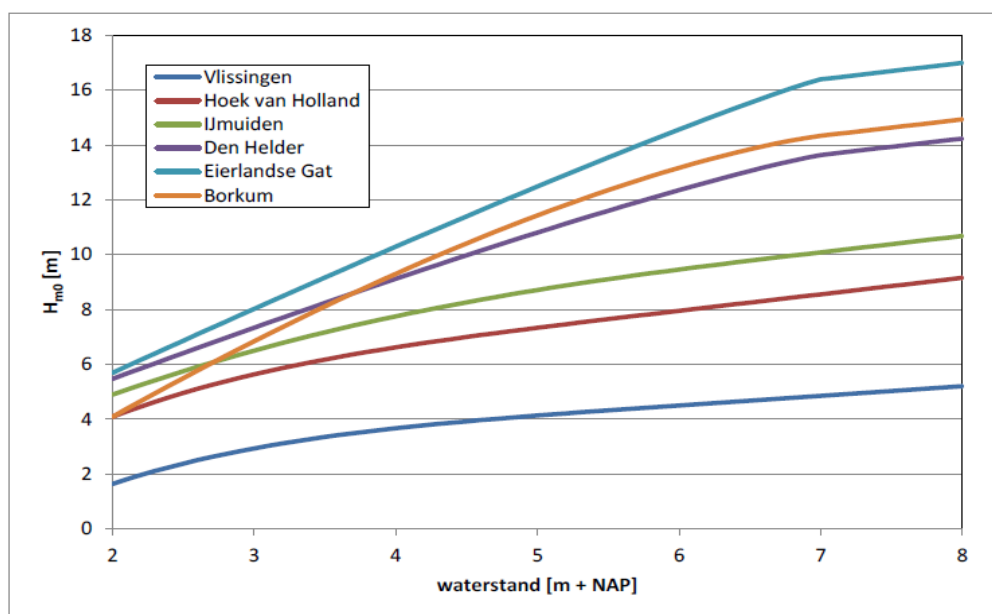
³¹ Evenals de HR-2006 wordt in WBI-2017 gebruik gemaakt van de piekperiode T_p . Het is echter ook mogelijk om met DUROS+ berekeningen uit te voeren met de spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$. Dit laatste is relevant voor condities met een golfspectrum dat geen standaardvorm heeft.

Tabel 6.30 Steunpunten golfbelastingen diep water (In *italic* zijn de steunpunten weergegeven die gebruik maken van interpolatie van twee nabijgelegen meetstations. Bron (Deltares, 2014f).

Steunpunt golven	Code	JARKUS-raai	RD_x [m]	RD_y [m]
Vlissingen	VI	Kustvak 17 raai 1419	29571	384893
Hoek van Holland	HvH	Kustvak 9 raai 11825	58748	450830
IJmuiden	IJm	Kustvak 8 raai 5750	79249	501800
Den Helder	DH	Kustvak 7 raai 308 (voor Noord – Holland) Kustvak 6 raai 880 (voor Texel)	98372	549340
Eierlandse Gat	EG	Kustvak 6 raai 2901 (voor Texel) Kustvak 5 raai 4000 (voor Vlieland)	106514	587985
Extra Steunpunt	ES	Kustvak 4 raai 1800	150000	621230
Borkum	BO	Kustvak 2 raai 1000	221990	621330



Figuur 6.31 Steunpunten golfstatistiek. De oranje symbolen geven een steunpunt aan waar een interpolatie van de waarden van de twee nabijgelegen steunpunten plaatsvindt.



Figuur 6.32 Relaties tussen zeewaterstand en golfhoogte voor 6 steunpunten (Deltares, 2014f)).

De golfperiode is gekoppeld aan de golfhoogte. Deze relatie is in WBI-2017 onveranderd ten opzichte van HR-2006. Met uitzondering van Den Helder en het extra steunpunt ES is per steunpunt een relatie met golfhoogte gelegd in de vorm van een tabel met overschrijdingsfrequenties van H_s en T_p (HKV, 2005). De afgeleide relaties zijn grafisch weergegeven in Figuur 6.33. Om de golfperiode bij Den Helder en het extra steunpunt af te leiden is gebruik gemaakt van interpolatie van de volgende vergelijking:

$$T_p = \lambda T_{p;1} + (1 - \lambda) T_{p;2}$$

Hierbij zijn de volgende waarden aangehouden voor de betreffende 2 steunpunten:

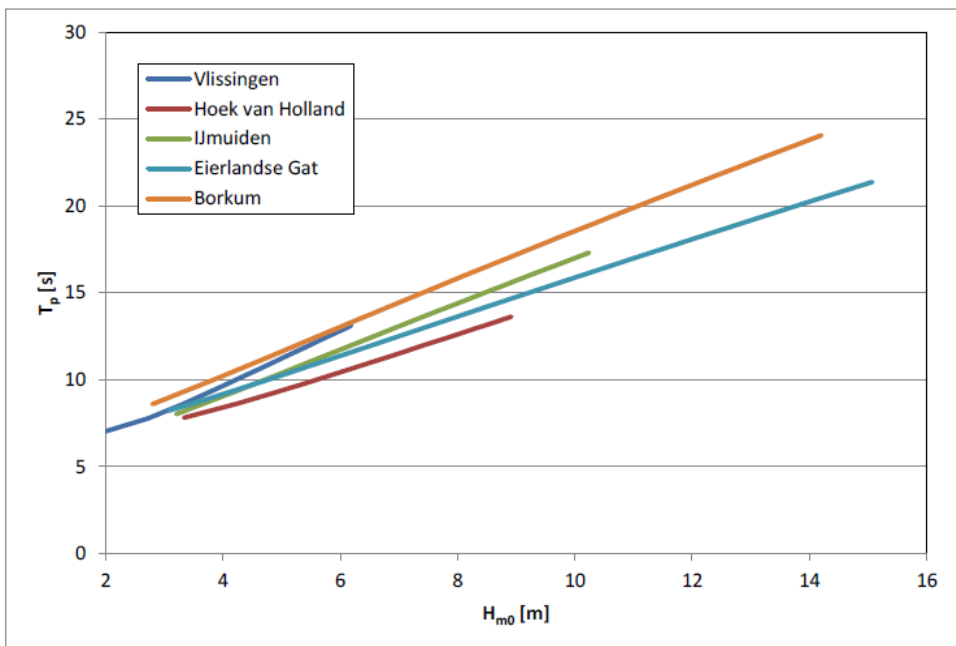
Den Helder:

$$\begin{aligned} T_{p;1} &= T_p \text{ zoals berekend voor steunpunt IJmuiden} \\ T_{p;2} &= T_p \text{ zoals berekend voor steunpunt Eierlandse Gat} \\ \lambda &= 0,35 \end{aligned}$$

Extra steunpunt

$$\begin{aligned} T_{p;1} &= T_p \text{ zoals berekend voor steunpunt Eierlandse Gat} \\ T_{p;2} &= T_p \text{ zoals berekend voor steunpunt Borkum} \\ \lambda &= 0,57 \end{aligned}$$

Om voor alle locaties langs de duinenkust golfbelastingen vast te stellen, dient er te worden geïnterpoleerd tussen de steunpunten. Zie voor details Deltares (2014f).



Figuur 6.33 Relaties golfhoogte en golfperiode voor 5 steunpunten (Deltares, 2014f).

7 Statistiek: statistische onzekerheid basisstochasten

7.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de statistische onzekerheid behandeld zoals deze in WBI-2017 wordt meegenomen in de berekening van HB. Deze onzekerheid wordt in Hydra-Ring als extra stochast toegevoegd. In de volgende paragrafen beschrijven we de voor deze statistische onzekerheid gebruikte modellen (Paragraaf 7.2), statistische onzekerheid afvoer, windsnelheid, meerpeil en zeewaterstand respectievelijk (Paragraaf 7.3 t/m paragraaf 7.6 respectievelijk), onzekerheid seiches (Paragraaf 7.7) en onzekerheid golfparameters voor duinen (Paragraaf 7.8).

Van de gebruikte modellen voor statistische onzekerheid worden de parameters gepresenteerd evenals de werklijnen (de zogenoemde uitgeïntegreerde werklijnen) waarin de statistische onzekerheid is verdisconteerd. Deze werklijnen worden hier enkel beschreven om een indicatie te geven van de effecten van het meenemen van statistische onzekerheid op de werklijnen zonder onzekerheden. In Hydra-Ring worden de werklijnen met onzekerheid namelijk niet gebruikt. Het uitïntegreren van de statistische onzekerheid vindt plaats binnen Hydra-Ring aan de hand van de daartoe gehanteerde modellen. Daarnaast wordt in dit hoofdstuk per basisstochast een indicatie gegeven van effecten van statistische onzekerheid op de hydraulische belastingen. Daarbij dient gerealiseerd te worden dat andere factoren dan de statistische onzekerheid ook nog van invloed kunnen zijn, zoals modelonzekerheid, Ruimte voor de Riviermaatregelen, e.d.

7.2 Modelling statistische onzekerheid

In een studie van HKV/Deltares (Nicolai et al, 2014) is onderzocht van welke basisstochasten de statistische onzekerheid relevant is en meegenomen zou moeten worden in Hydra-Ring. De studie resulteerde in de lijst basisstochasten weergegeven in Tabel 7.1. Van deze basisstochasten is de statistische onzekerheid gekwantificeerd en vervolgens geïmplementeerd in Hydra-Ring.

Tabel 7.1 Basisstochasten waarvoor statistische onzekerheid beschouwd is in Hydra-Ring

Basisstochast	Station	Relevant voor regio
Afvoer Rijn	Lobith	1, 3 en 4
Afvoer Maas	Borgharen	2 en 18
Afvoer Maas	Lith	3 en 4
Afvoer IJssel	Olst	5 en 6
Afvoer Vecht	Dalfsen	5 en 6
Windsnelheid	Deelen	1, 2 en 18
Windsnelheid	Schiphol	3 t/m 8 en 17
Windsnelheid	Terschelling West	9 en 10
Windsnelheid	De Kooy	11
Windsnelheid	IJmuiden	12
Windsnelheid	Hoek van Holland	13
Windsnelheid	Vlissingen	14 en 15
Zeewaterstand	Hoek van Holland/Maasmond	3, 4, 13, 16 en 17
Zeewaterstand	Lauwersoog	9 en 16
Zeewaterstand	Harlingen	10 en 16
Zeewaterstand	Den Helder	11 en 16
Zeewaterstand	IJmuiden	12 en 16
Zeewaterstand	OS11	14 en 16
Zeewaterstand	Vlissingen	15 en 16
Zeewaterstand	Delfzijl	9 en 16
IJsselmeerpeil	-	7
Markermeerpeil	-	8

Naast statistische onzekerheid van de basisstochasten weergegeven in Tabel 7.1 is in WBI-2017 tevens rekening gehouden met onzekerheden in de seichetoeslagen voor locaties in regio 17, het Europoortgebied. Seichetoeslagen gelden echter niet als basisstochast. Daarom zijn ze niet opgenomen in bovengenoemde tabel.

Statistische onzekerheid behorende bij een basisstochast is in Hydra-Ring toegevoegd als extra³² stochast met een kansverdeling. In Hydra-Ring is de keuze van het model voor de statistische onzekerheid gerelateerd aan de betreffende basisstochast en de aard van de onzekerheid. Waarden van basisstochasten als zeewaterstanden en meerpeilen worden gekwantificeerd in relatie tot het referentieniveau m+NAP. Het referentieniveau m+NAP heeft echter geen eenduidige fysische betekenis. Voor andere basisstochasten zoals de windsnelheid is er wel een eenduidige fysische betekenis van het nul-niveau (0 m/s). Er is geen windsnelheid lager dan 0 m/s. Bij het modelleren van de statistische onzekerheid van de windsnelheidsstatistiek is hier rekening mee gehouden. Immers, de windsnelheid is altijd positief en het model voor de statistische onzekerheid in windsnelheid mag geen negatieve windsnelheden opleveren. Voor dit type basisstochasten is in Hydra-Ring daarom een relatief (multiplicatief) model toegepast voor het modelleren van de statistische onzekerheid, terwijl

³² Het is een extra stochast voor de probabilistische berekeningen maar dient niet als basisstochast te worden gezien. Een basisstochast wordt naast probabilistische berekeningen ook beschouwd in de productieberekeningen in de zin dat er meerdere stochastwaarden worden doorgerekend met modellen (WAQUA en/of SWAN).

voor het andere type (zeewaterstanden, meerpeilen, e.d.) een additief model voor de hand ligt. Afvoeren vormen in dit opzicht een uitzondering. Het nul-niveau ($0 \text{ m}^3/\text{s}$) is weliswaar de laagst mogelijke waarde maar dit niveau wordt in de praktijk nooit bereikt. Voor de basisstochast afvoer wordt daarom ook een additief model gebruikt, zie voor details Scientific Documentation (Diermanse et al, 2016).

De volgende vier modellen³³ zijn geïmplementeerd in Hydra-Ring:

Model 1: additief

$$S_{incl} = S_{excl} + S_{onzekerheid}$$

Model 2: multiplicatief

$$S_{incl} = S_{excl} * S_{onzekerheid}$$

Model 3: begrensd additief

$$S_{incl} = \max(0, S_{excl} + S_{onzekerheid})$$

Model 4: begrensd multiplicatief

$$S_{incl} = \max(0, S_{excl} * S_{onzekerheid})$$

Hierin geldt:

- S_{incl} = realisatie basisstochast inclusief statistische onzekerheid
- S_{excl} = realisatie basisstochast zonder statistische onzekerheid
- $S_{onzekerheid}$ = een 'random' variabele die de statistische onzekerheid behorende bij de basisstochast S beschrijft. Deze variabele kan in principe elke willekeurige kansverdeling hebben.

De kansverdeling van $S_{onzekerheid}$ is geschat met behulp van de beschikbare informatie met betrekking tot de betrouwbaarheidsintervallen en/of percentielen van de basisstochasten. Dit komt erop neer dat eerst een geschikte kansverdeling is gekozen die de statistische onzekerheid beschrijft, waarna de bijbehorende parameters geschat zijn. De parameters van de onzekerheids-kansverdeling zijn voor alle basisstochasten afhankelijk van de herhalingstijd, met uitzondering van de statistische onzekerheid van de wind.

7.3 Statistische onzekerheid afvoer

7.3.1 Rijnafvoer bij Lobith

De statistische onzekerheid van de Rijnafvoer bij Lobith is gemodelleerd door middel van een normale verdeling, met een gemiddelde en een standaardafwijking die afhangen van de herhalingstijd. De statistische onzekerheid in de afvoerstatistiek van de Rijn bij Lobith is in Hydra-Ring als additief model geïmplementeerd. Tabel 7.2 toont de parameters van de

³³ Deze modellen zijn tevens geschikt en zijn ook gebruikt voor het modelleren van modelonzekerheid in lokale waterstand en golfparameters.

normale verdeling, evenals de afvoeren waarin de normale verdeling, die de statistische onzekerheid beschrijft, is uit-geïntegreerd (laatste kolom van Tabel 7.2). Deze laatste beschrijft de werklijn waarin zowel de statistische als de inherente onzekerheid (de natuurlijke variabiliteit) zijn verwerkt/geïntegreerd (door middel van numerieke integratie), zie (Geerse 2016b) voor de werkwijze van uitintegreren.

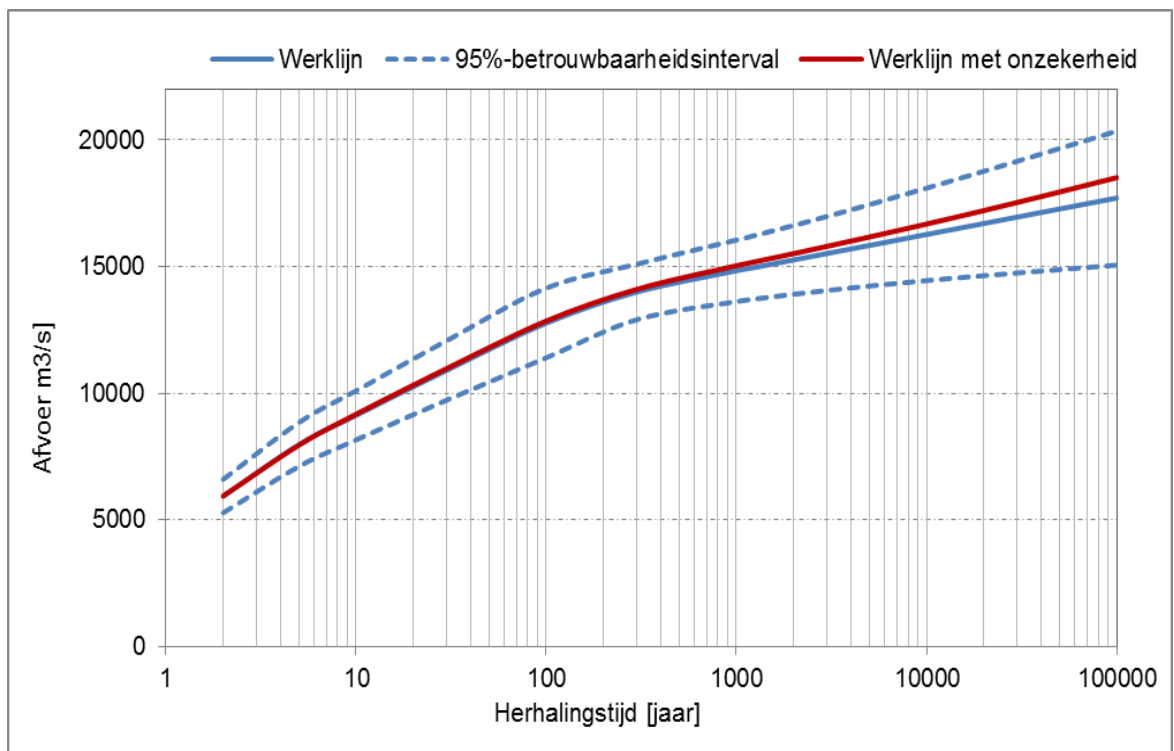
Tabel 7.2 Statistische onzekerheid afvoerstatistiek van de Rijn bij Lobith: additief model, normale verdeling met $\mu = 0 \text{ m}^3/\text{s}$ en standaardafwijking die afhangt van afvoerniveau/herhalingstijd.

Herhalings-tijd [jaar]	Afvoer [m^3/s]	Gemiddelde [m^3/s]	Standaardafwijking [m^3/s]	Afvoer incl. stat. onzekerheid [m^3/s]
2	5.940	0	340	5.941
5	7.970	0	440	7.949
10	9.130	0	500	9.172
30	10.910	0	600	10.978
100	12.770	0	700	12.854
300	14.000	0	560	14.107
1.000	14.840	0	620	15.035
1.250	14.970	0	640	15.191
3.000	15.520	0	750	15.802
10.000	16.270	0	930	16.682
30.000	16.960	0	1.120	17.535
100.000	17.710	0	1.350	18.516

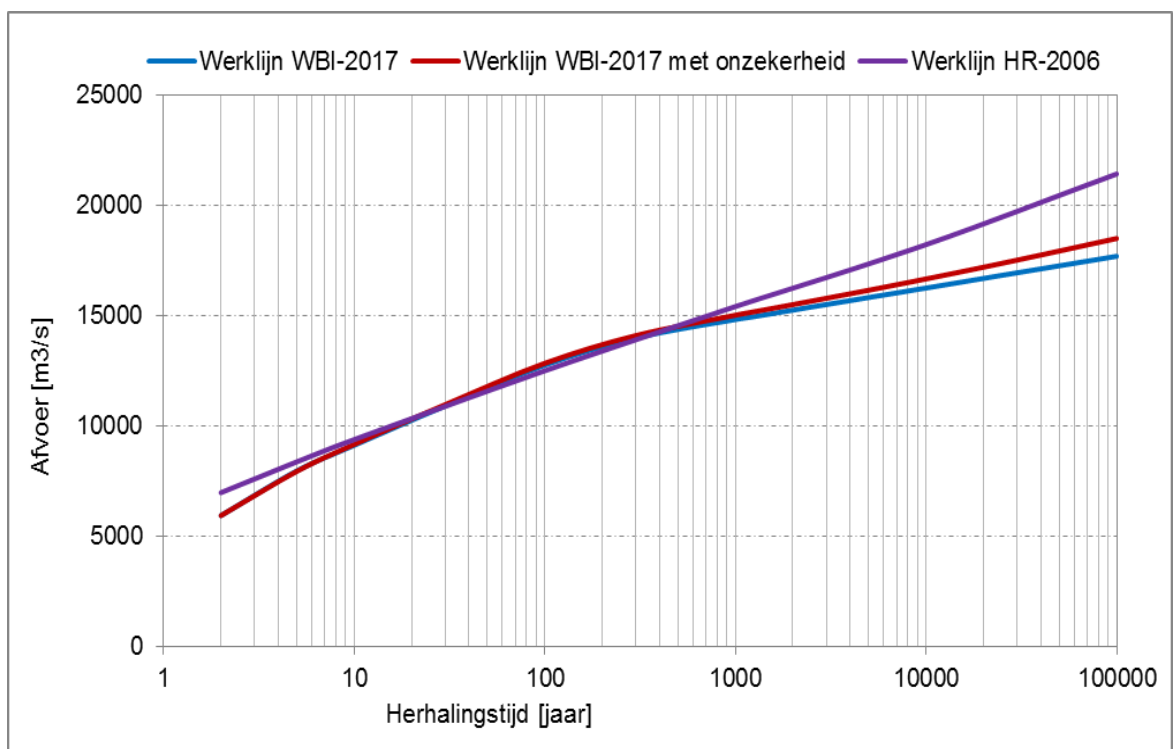
Figuur 7.1 toont de werklijn voor natuurlijke variabiliteit en de uitgeïntegreerde werklijn van de Rijnaafvoer bij Lobith. Figuur 7.2 illustreert de verschillen tussen de werklijn in WTI-2011 en de werklijnen van GRADE, met en zonder statistische onzekerheid. Zoals verwacht gaat de afvoer omhoog indien statistische onzekerheid wordt verdisconteerd.

Voor een gemiddelde terugkeertijd van 1250 jaar bedraagt de afvoer berekend met GRADE $14970 \text{ m}^3/\text{s}$; indien de statistische onzekerheid uitgeïntegreerd wordt, resulteert voor dezelfde terugkeertijd een afvoer van $15.191 \text{ m}^3/\text{s}$, een verhoging van $231 \text{ m}^3/\text{s}$, zie Tabel 7.2. Dit komt overeen met een verhoging van ca. 1,6%. Voor langere herhalingstijden is de verhoging nog groter. Voor een terugkeertijd van 100.000 jaar bedraagt de verhoging ruim $800 \text{ m}^3/\text{s}$, ofwel ruim 4% verhoging ten opzichte van de situatie zonder statistische onzekerheid.

De werklijn van GRADE met statistische onzekerheid ligt voor herhalingtijden tussen ca. 10 jaar en ca. 500 jaar boven de werklijn van HR-2006, zie Figuur 7.2. Het grootste verschil in deze range aan herhalingstijden treedt op bij herhalingstijden van ca. 100 jaar en bedraagt ca. $350 \text{ m}^3/\text{s}$. Dit betekent dat de nieuwe werklijn in combinatie met het meenemen van de statistische onzekerheid naar verwachting een verhogend effect heeft op de hydraulische belastingen in deze range aan herhalingtijden. Voor herhalingstijden langer dan ca. 500 jaar zal de overstap op GRADE tot verlaging van de hydraulische belastingen leiden, ook in geval van rekenen met statistische onzekerheid.



Figuur 7.1 Werklijn (blauw) en uit-geïntegreerde werklijn (inclusief statistische onzekerheid = rode lijn) van de Rijn bij Lobith.



Figuur 7.2 Vergelijking werklijn HR-2006 (paars) met werklijnen van GRADE met en zonder onzekerheid voor station Lobith (blauw en rood).

7.3.2 Maasafvoer bij Borgharen

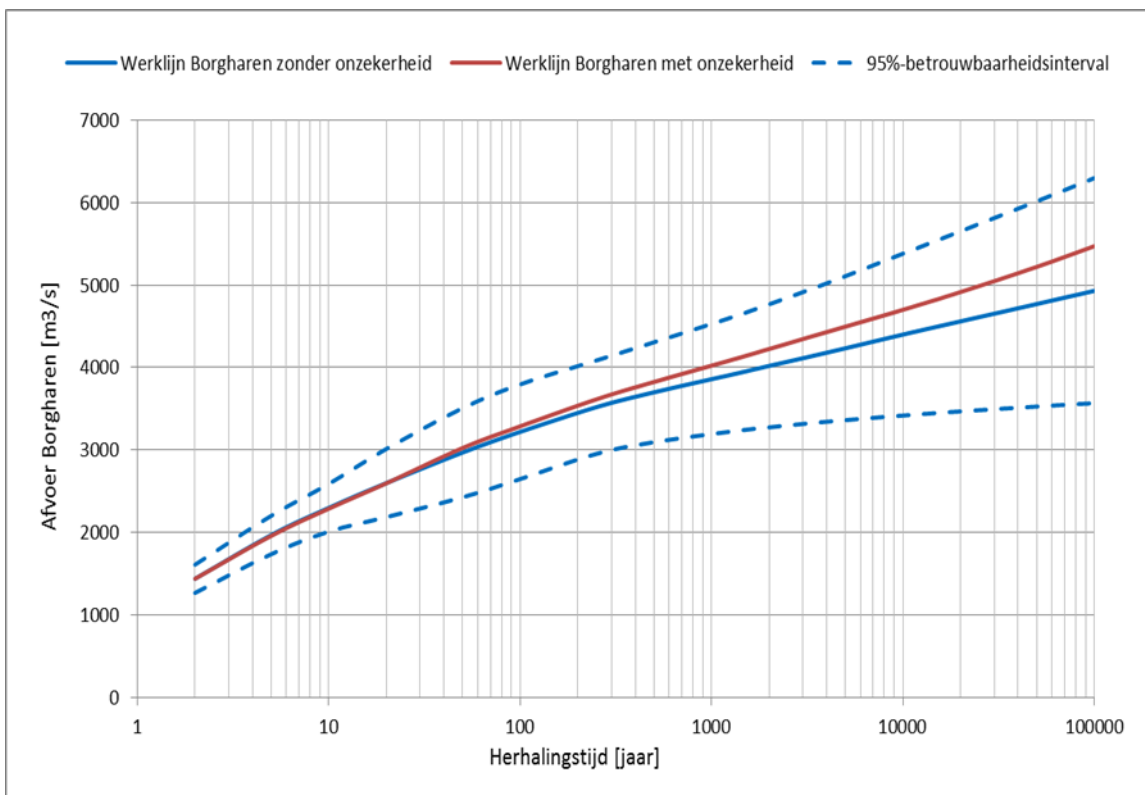
De statistische onzekerheid van de Maasafvoer bij Borgharen is, evenals de Rijnafvoer, beschreven met een normale verdeling. De statistische onzekerheid in de afvoerstatistiek van de Maas bij Borgharen is in Hydra-Ring als additief model geïmplementeerd. Tabel 7.3 toont de parameters van deze verdeling, evenals de uitgeïntegreerde afvoeren waarin de normale verdeling, die de statistische onzekerheid beschrijft is verdisconteerd in de overschrijdingskans.

Tabel 7.3 Werklijnen Maas bij Borgharen met en zonder onzekerheden.

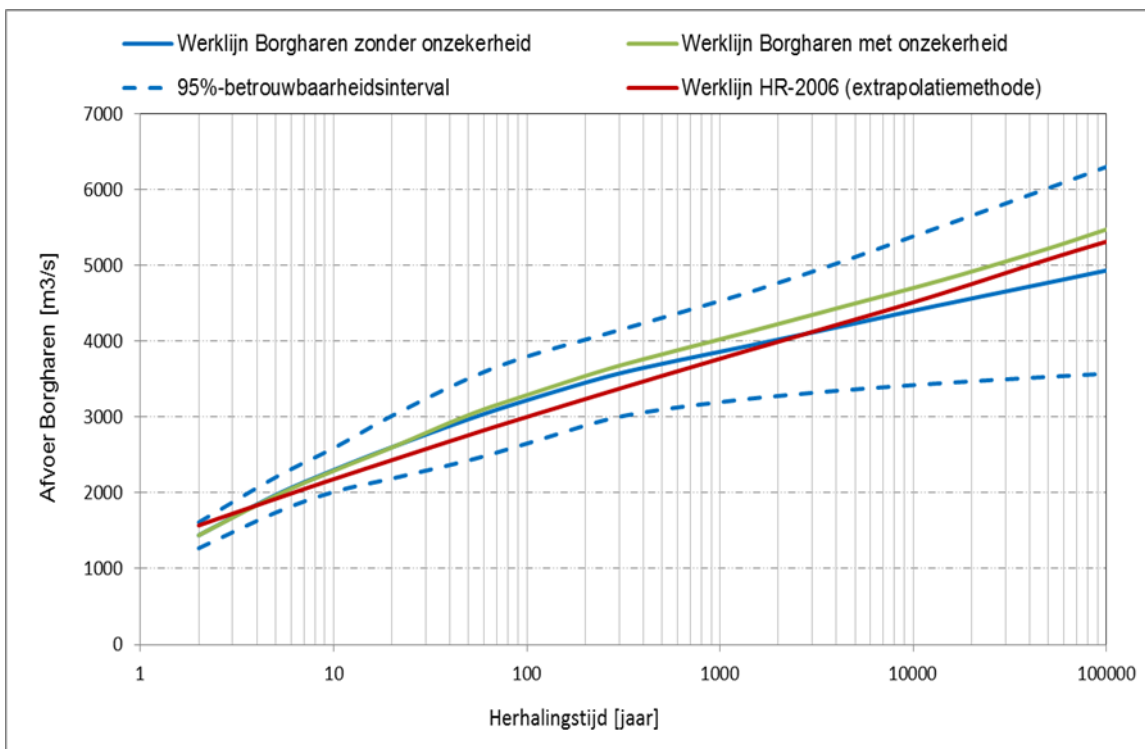
Herhalings-tijd [jaar]	Afvoer [m ³ /s]	Gemiddelde [m ³ /s]	standaardafwijking [m ³ /s]	Afvoer incl. st. onzek. [m ³ /s]
2	1.440	0	87	1440
5	1.970	0	119	1960
10	2.300	0	148	2290
20	2.600	0	211	2598
50	2.970	0	274	3025
100	3.220	0	294	3288
250	3.520	0	289	3615
500	3.700	0	309	3825
1250	3.910	0	353	4087
2000	4.020	0	381	4225
4000	4.180	0	429	4430
10000	4.400	0	500	4700
20000	4.560	0	557	4915
50000	4.770	0	635	5220
100000	4.930	0	697	5471

Figuur 7.3 toont de werklijn en de uit-geïntegreerde werklijn van de Maas bij Borgharen. Figuur 7.4 illustreert de verschillen tussen enerzijds de werklijn uit HR-2006 en anderzijds de werklijnen van GRADE, met en zonder statistische onzekerheid.

Na uit-integreren van de statistische onzekerheid gaat de afvoer bij Borgharen met een gemiddelde terugkeertijd van 1250 jaar met 163 m³/s omhoog, van 3.910 m³/s naar 4.087 m³/s; een verhoging van ruim 4%. Voor een gemiddelde terugkeertijd van 100.000 jaar is de verhoging nog groter en bedraagt 14%. De afvoer gaat namelijk omhoog van 4.930 m³/s naar 5.471 m³/s, zie Tabel 7.3. Het effect van het meenemen van de statistische onzekerheid is voor de Maas bij Borgharen groter dan voor de Rijn bij Lobith. Immers, het betrouwbaarheidsinterval van de Maas bij Borgharen is relatief breder dan het interval van de Rijn bij Lobith.



Figuur 7.3 Werklijnen Maas bij Borgharen: zonder onzekerheden (zwart) en met onzekerheden (groen gestippeld). Deze laatste is berekend met numerieke integratie.



Figuur 7.4 Vergelijking van werklijn HR-2006 met werklijnen van GRADE met en zonder onzekerheid voor station Borgharen, inclusief 95%-betrouwbaarheidsinterval

De werklijn van GRADE met onzekerheid ligt logischerwijs hoger dan de werklijn van GRADE zonder onzekerheid; de werklijn voor HR-2006 ligt onder de werklijnen van GRADE voor herhalingstijden tot ca. 3000 jaar en er tussenin voor herhalingstijden vanaf ca. 3000 jaar. De consequentie van de overstap op de GRADE statistiek in combinatie met het meenemen van de statistische onzekerheid zal daarom naar verwachting resulteren in hogere waterstanden langs de Maas over het bereik tot 3000 jaar. De grootste verhoging zal naar verwachting optreden bij waterstanden die gemiddeld eens in ca. 100-500 jaar voorkomen.

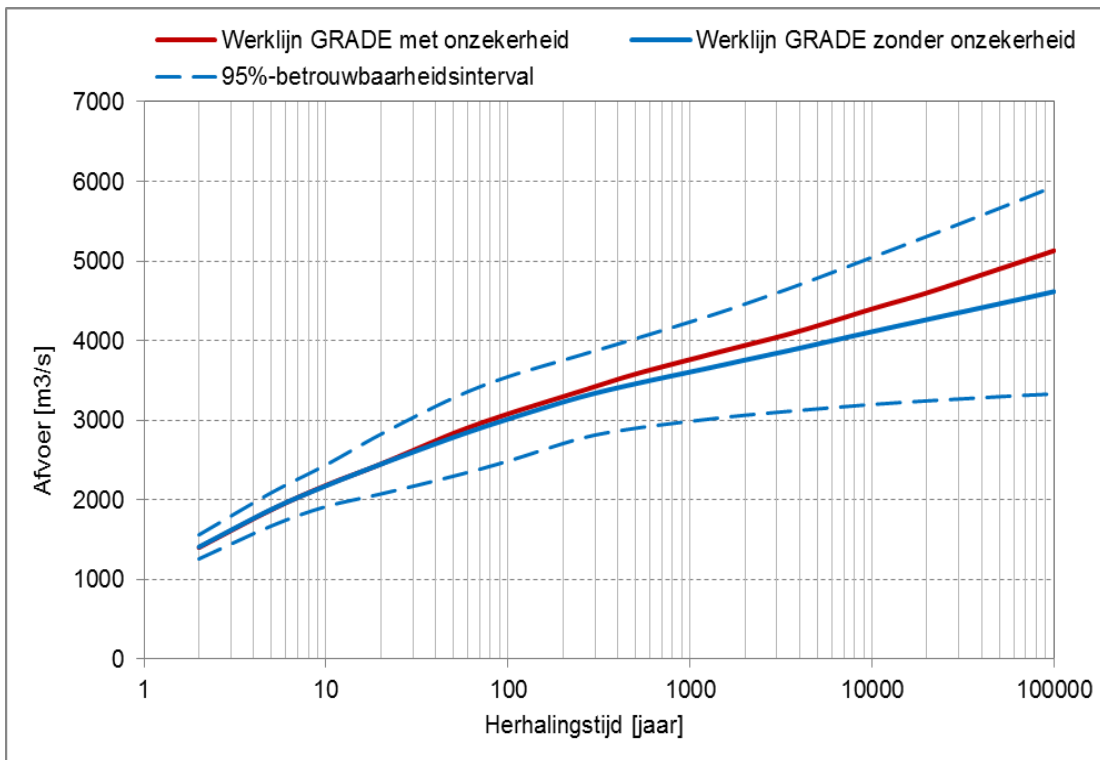
7.3.3 Maasafvoer bij Lith

De statistische onzekerheid van de Maasafvoer bij Lith is gemodelleerd door middel van een normale verdeling. De statistische onzekerheid in de afvoerstatistiek van de Maas bij Lith is in Hydra-Ring als additief model geïmplementeerd. Tabel 7.4 toont de parameters van deze verdeling, evenals de uit-geïntegreerde afvoeren waarin de normale verdeling, die de statistische onzekerheid beschrijft, uit-geïntegreerd is. Een uitgebreide beschrijving van de statistische onzekerheid van de Maas bij Lith is te vinden in Chbab en Eilander (2017).

Tabel 7.4 Statistische onzekerheid afvoerstatistiek van de Maas bij Lith: additief model, normale verdeling met $\mu = 0 \text{ m}^3/\text{s}$ en σ afhankelijk van herhalingstijd (kolom 4).

Herhalings-tijd [jaar]	Afvoer Lith [m^3/s]	Standaardafwijking σ [m^3/s]	Afvoer incl. stat. onz. [m^3/s]
2	1.409	77	1.400
5	1.880	106	1.875
10	2.177	133	2.183
20	2.448	191	2.450
50	2.785	251	2.835
100	3.014	270	3.080
250	3.291	265	3.375
500	3.458	287	3.580
1.250	3.653	329	3.820
2.000	3.756	356	3.940
4.000	3.906	403	4.120
10.000	4.113	472	4.399
20.000	4.264	527	4.600
50.000	4.463	604	4.900
100.000	4.616	665	5.130

Figuur 7.5 toont de werklijnen met en zonder statistische onzekerheid voor de Maas bij Lith. Figuur 7.6 illustreert de verschillen tussen enerzijds de werklijn voor HR-2006 en anderzijds de werklijnen van GRADE, met en zonder statistische onzekerheid. Het uit-integreren en verwerken van de statistische onzekerheid resulteert in hogere afvoeren. Een afvoer met een gemiddelde terugkeertijd van 1.250 jaar gaat met ca. $160 \text{ m}^3/\text{s}$ omhoog, van $3.653 \text{ m}^3/\text{s}$ naar $3.820 \text{ m}^3/\text{s}$; dit komt overeen met een verhoging van ruim 4%. Voor een gemiddelde terugkeertijd van 100.000 jaar bedraagt de verhoging ten opzichte van de gemiddelde waarde uit de werklijn zonder statistische onzekerheid in WTI-2011 $514 \text{ m}^3/\text{s}$ ofwel 11%. De afvoer gaat namelijk omhoog van $4.616 \text{ m}^3/\text{s}$ naar $5.130 \text{ m}^3/\text{s}$, zie Tabel 7.4. De werklijn van GRADE inclusief statistische onzekerheid ligt boven de werklijn uit HR-2006. Naar verwachting zal de werklijn van GRADE met onzekerheden resulteren in hogere waterstanden langs de Maas, vooral voor herhalingstijden van 100 jaar zal de verhoging het grootst zijn.



Figuur 7.5 Werklijnen Maas bij Lith: zonder onzekerheid (blauw) en met onzekerheid (rood), inclusief 95%-betrouwbaarheidsbanden (blauw gestippeld) bij Lith.



Figuur 7.6 Werklijn HR-2006/WTI-2011 en werkljn van GRADE met en zonder statistische onzekerheid voor station Lith.

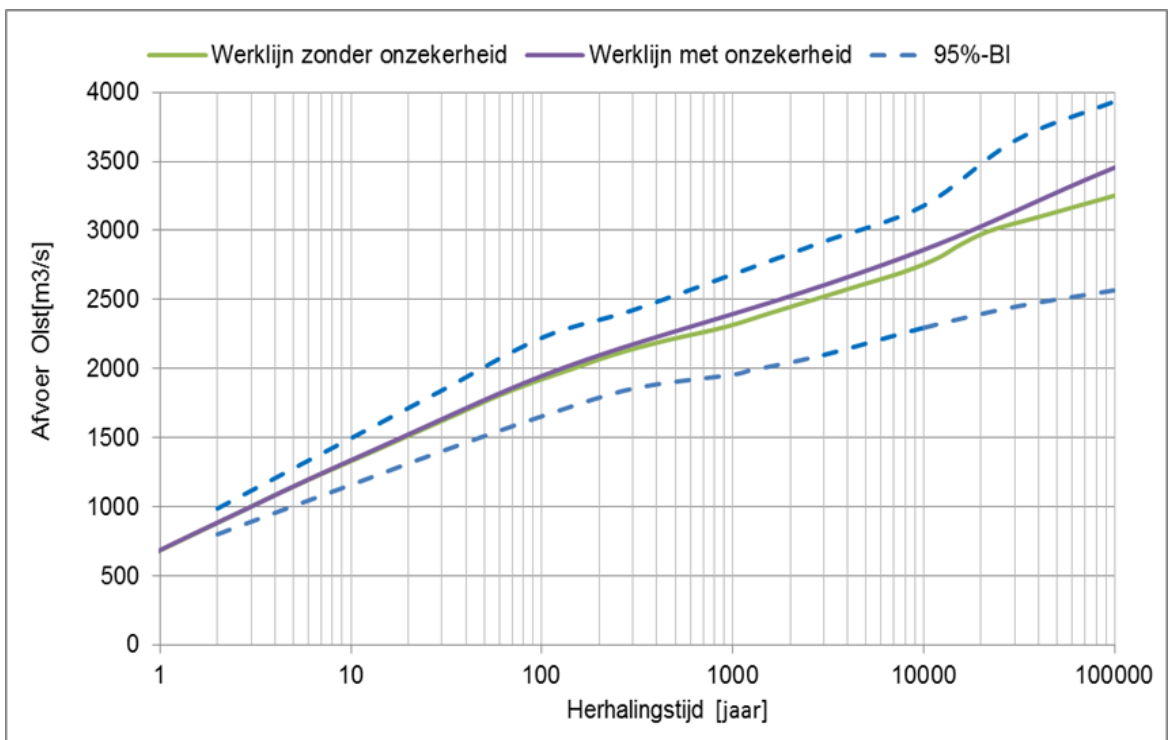
7.3.4 IJsselafvoer bij Olst

De statistische onzekerheid van de IJsselafvoer bij Olst is gemodelleerd door middel van een normale verdeling, met een gemiddelde en een standaardafwijking die afhangen van de herhalingstijd. De statistische onzekerheid in de afvoerstatistiek van de IJsselafvoer bij Olst is in Hydra-Ring als een additief model geïmplementeerd. Tabel 7.5 toont de parameters van de normale verdeling, evenals de afvoeren waarin deze normale verdeling uit-geïntegreerd is. Een uitgebreide beschrijving van de statistische onzekerheid van de IJsselafvoer bij Olst is te vinden in Chbab en Eilander (2017).

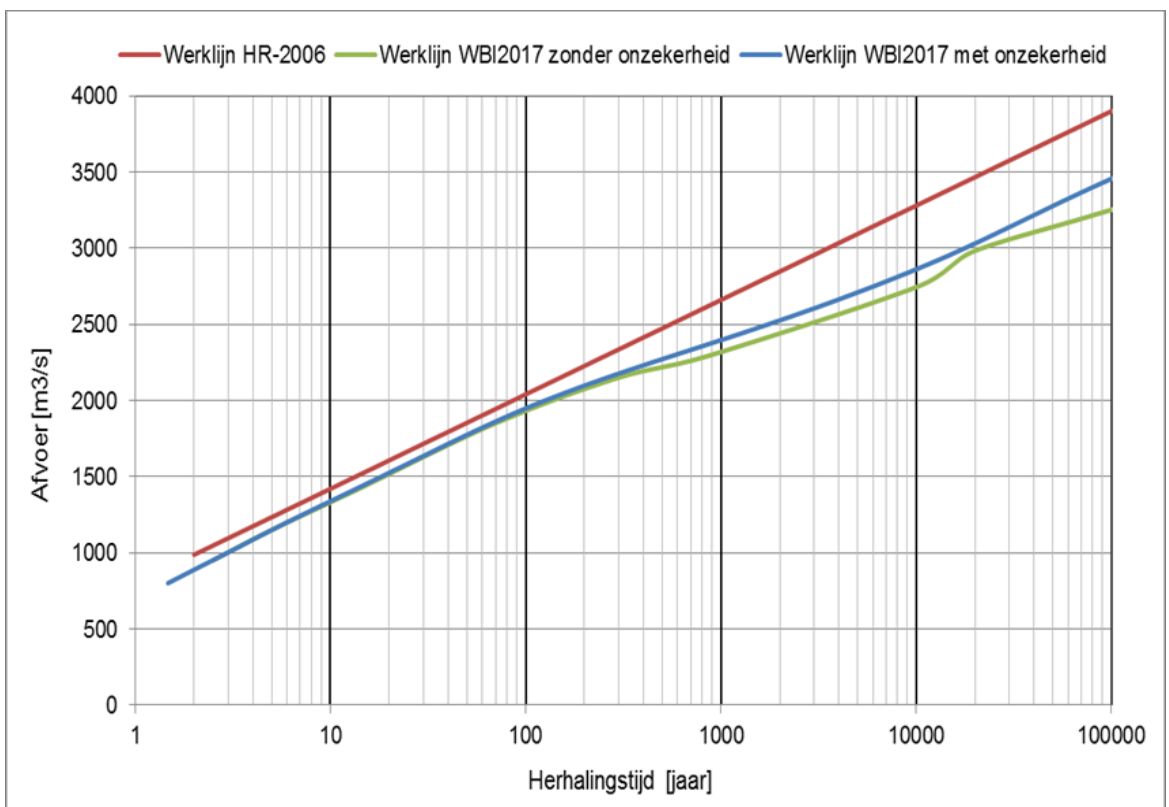
Tabel 7.5 Statistische onzekerheid afvoerstatistiek van de IJssel bij Olst: additief model, normale verdeling met $\mu = 0 \text{ m}^3/\text{s}$ en σ afhankelijk van herhalingstijd (kolom 4).

Herhalingstijd [jaar]	Afvoer Olst [m^3/s]	Standaard afwijking [m^3/s]	Afvoer Olst incl. stat. onzek. [m^3/s]
2	896	47	897
5	1.143	69	1.145
10	1.329	86	1.345
30	1.624	112	1.635
100	1.940	145	1.950
300	2.140	145	2.180
1.000	2.320	185	2.395
1.250	2.360	189	2.443
3.000	2.510	209	2.600
10.000	2.738	225	2.860
30.000	3.049	307	3.147
100.000	3.251	348	3.450

Figuur 7.7 toont de werklijnen van de IJssel bij Olst met en zonder statistische onzekerheid. Beide werklijnen van GRADE (met en zonder statistische onzekerheid) liggen onder de werklijn in HR-2006. Verdisconteren (uit-integreren) van de statistische onzekerheid resulteert voor een herhalingstijd van 1.250 jaar in een afvoer van $2.443 \text{ m}^3/\text{s}$; dit is ca. $83 \text{ m}^3/\text{s}$ dan de berekende afvoer zonder onzekerheid. Dit is een verhoging met ca. 3,5%. Voor een gemiddelde herhalingstijd van 100.000 jaar gaat de afvoer omhoog met ca. $200 \text{ m}^3/\text{s}$ als gevolg van het meenemen van de statistische onzekerheid; dit is een verhoging van ruim 6%. Zoals te zien in Figuur 7.8 liggen beide werklijnen van GRADE (met en zonder statistische onzekerheid) onder de werklijn uit HR-2006. Het verschil tussen de drie werklijnen is het kleinst voor herhalingstijden tussen 1 en 100 jaar. Tussen de werklijn uit HR-2006 en de werklijn van GRADE met onzekerheid bedraagt het verschil ca. $95 \text{ m}^3/\text{s}$; dit verschil geldt voor herhalingstijden tot 100 jaar. Vanaf herhalingstijden van 100 jaar loopt het verschil tussen deze twee werklijnen gestaag op, tot ca. $450 \text{ m}^3/\text{s}$ voor $T = 100.000$ jaar.



Figuur 7.7 Werklijn (groen) en uit-geïntegreerde werklijn (paars) van de IJssel bij Olst.



Figuur 7.8 Werklijn HR-2006/WTI-2011 en werklijnen van GRADE (met en zonder statistische onzekerheid) bij Olst.

7.3.5 Vechtafvoer bij Dalfsen

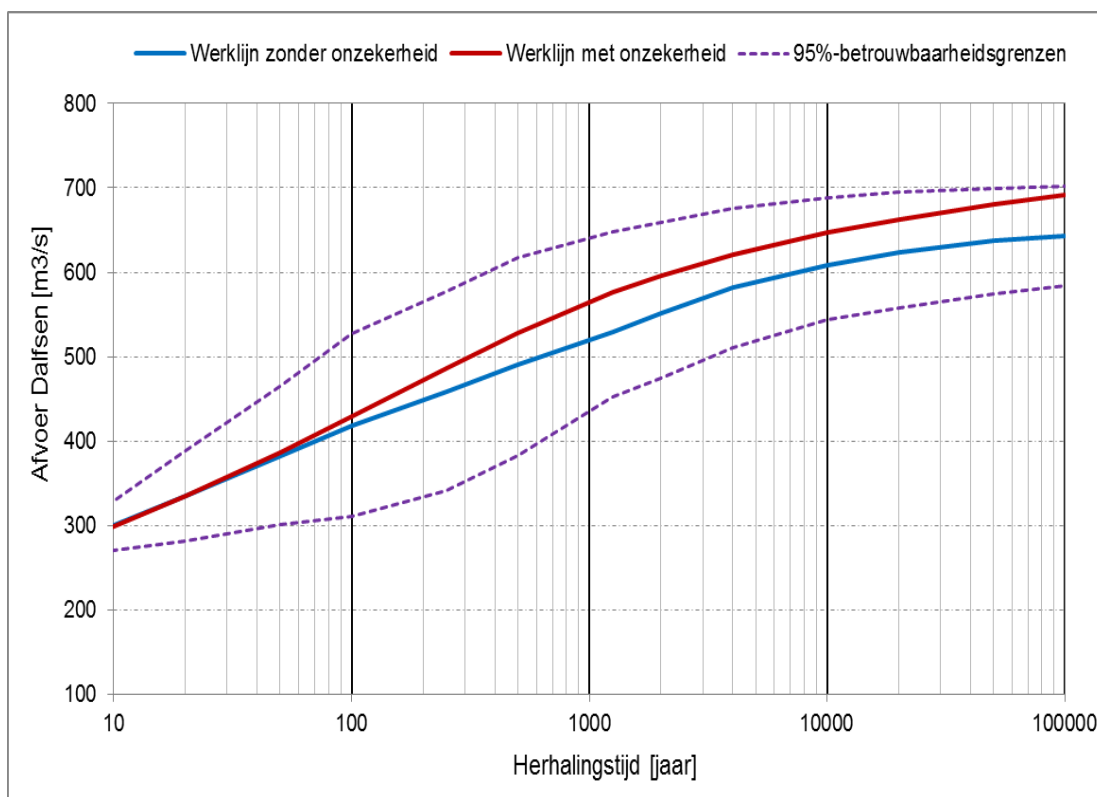
De statistische onzekerheid van de Vechtafvoer bij Dalfsen is in WBI-2017 gemodelleerd door middel van een normale verdeling. De statistische onzekerheid in de afvoerstatistiek van de Vechtafvoer bij Dalfsen is in Hydra-Ring als een additief model geïmplementeerd. De parameters van de normale verdeling zijn weergegeven in Tabel 7.6. Als basis voor de schatting van de parameters van deze normale kansverdeling zijn de 95%-betrouwbaarheidsintervallen voor de situatie met overstromen gebruikt, gegeven in Tabel 6.9. Een uitgebreide beschrijving van de aanpak om tot een schatting te komen van de parameters van de normale verdeling is te vinden in (Geerse, 2017). Tabel 7.6 omvat de parameterschattingen van de normale kansverdeling voor de statistische onzekerheid van de Vecht bij Dalfsen. De werklijnen, met en statistische onzekerheid, zijn afgebeeld in Figuur 7.9. Hierin is ook het geschatte 95%-betrouwbaarheidsinterval afgebeeld.

Als gevolg van het meenemen van de statistische onzekerheid gaat de afvoer van de Vecht bij Dalfsen omhoog. Voor een terugkeertijd van 1.250 jaar gaat de afvoer omhoog van 530 m³/s naar (afgerond) 575 m³/s. Door rekening te houden met overstromen neemt de onzekerheid en het effect ervan niet toe. De twee werklijnen lopen nagenoeg parallel voor herhalings tijden langer dan 1.000 jaar.

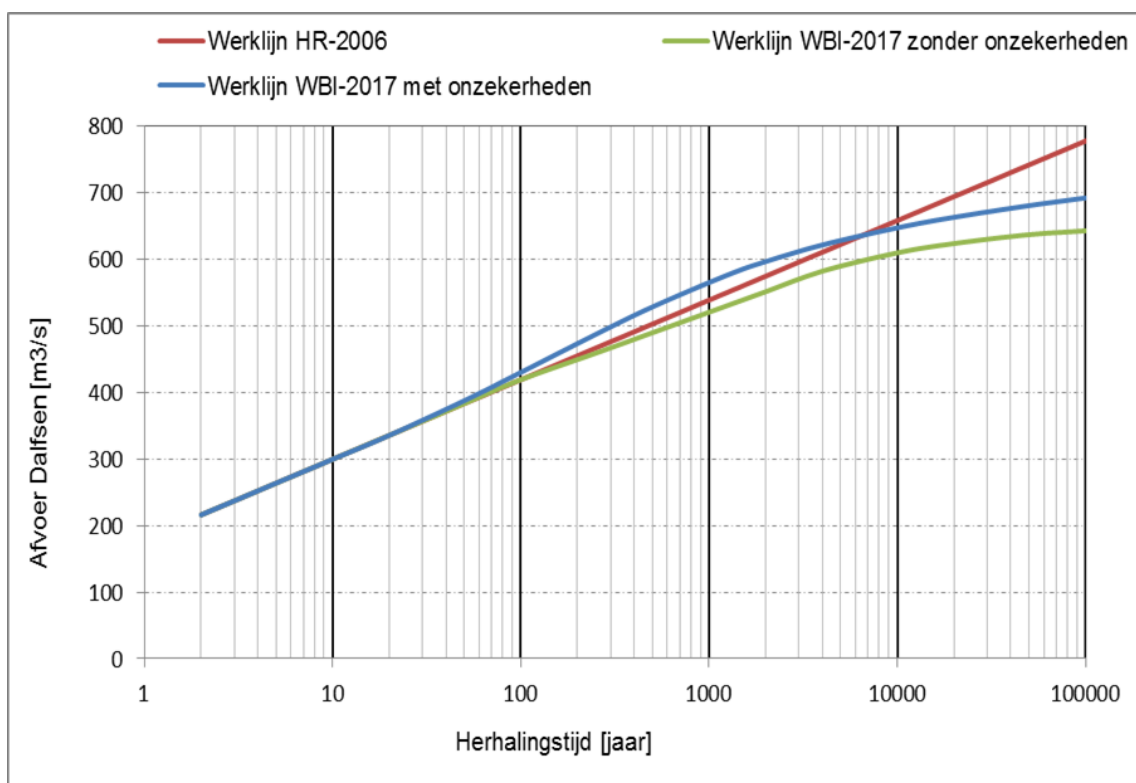
Figuur 7.10 toont een vergelijking tussen enerzijds de werklijn uit HR-2006 en anderzijds de werklijnen met en zonder statistische onzekerheid in WBI-2017. De werklijn met statistische onzekerheid in WBI-2017 ligt tot herhalings tijd van ca. 7.000 jaar op of boven de werklijn uit HR-2006 en voor herhalings tijden vanaf 7.000 jaar daaronder. Dit betekent dat, ten opzichte van HR-2006, de situatie met overstromen in combinatie met rekeninghouden met onzekerheden een verhogend effect heeft op de waterstanden tot herhalings tijden tot ca. 7.000 jaar en verlagend voor herhalings tijden daarboven. Het grootste effect treedt op voor herhalings tijden van rond 1.000 jaar.

Tabel 7.6 Statistische onzekerheid afvoerstatistiek van de Overijsselse Vecht bij Dalfsen: additief model, normale verdeling met gemiddelde μ en standaardafwijking σ afhankelijk van herhalings tijd

Herhalings-tijd [jaar]	Afvoer Vecht bij Dalfsen [m ³ /s]	Gemiddelde μ [m ³ /s]	Standaardafwijking σ [m ³ /s]	Afvoer Dalfsen incl stat. Onzekerheid [m ³ /s]
2	216	0	8	216
5	264	0	12	264
10	300	0	15	299
20	335	0	27	335
50	383	0	42	387
100	419	0	55	430
250	459	0	60	487
500	490	10	60	528
1250	530	20	50	576
2000	551	16	47	596
4000	582	11	42	621
10000	609	7	37	647
20000	623	4	35	663
50000	637	0	32	680
100000	643	0	30	692



Figuur 7.9 Werklijnen Vecht bij Dalfsen: zonder statistische onzekerheid (blauw) en met statistische onzekerheid (rood). Gestreepte paarse lijnen beschrijven het 95%-betrouwbaarheidsinterval



Figuur 7.10 Werklijnen Vecht bij Dalfsen met (blauwe lijn) en zonder statistische onzekerheid (groene lijn), inclusief de werkljn uit HR-2006 (rode lijn).

7.4 Statistische onzekerheid windsnelheid

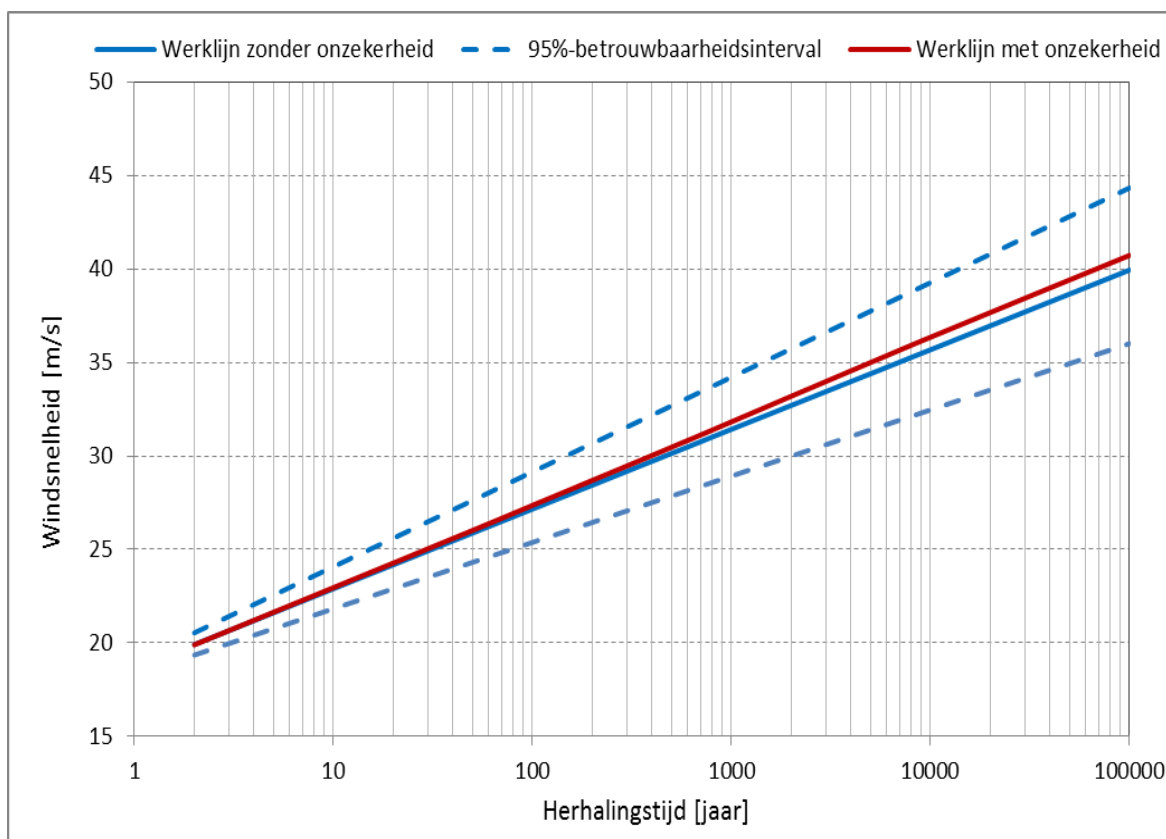
De windstatistiek voor de verschillende windstations is beschreven in Paragraaf 6.3. Per station zijn zowel de omni-directionele als de richtingsafhankelijke frequentieverdelingen van de windsnelheid beschikbaar, inclusief de bijbehorende 95%-betrouwbaarheidsintervallen. Per windstation zijn schattingen gemaakt van de statistische onzekerheid en in Hydra-Ring als (extra stochast in de vorm van een) begrensd multiplicatief model toegevoegd aan de basisstochast windsnelheid.

De betrouwbaarheidsintervallen en percentielen van de windsnelheid zijn nagenoeg symmetrisch. Daarom is voor het schatten van de statistische onzekerheid gekozen voor de (symmetrische) normaalverdeling. Het gemiddelde van de verdeling is vastgesteld op 1 m/s, de parameter σ hangt af van de herhalingsperiode. De waarden zijn geschat met behulp van de 'maximum likelihood' methode. Zie voor een uitgebreide beschrijving Chbab en Eilander (2017).

Tabel 7.7 toont de parameters van de beschouwde normale verdeling, inclusief de windsnelheid met onzekerheid voor verschillende herhalingsperiodes. Figuur 7.11 toont de werklijnen (met en zonder onzekerheid) van de windsnelheid bij Schiphol. Uit Tabel 7.8 blijkt overigens dat het verschil tussen de werklijn mét en zonder onzekerheden kleiner dan 2% (windsnelheid) is voor herhalingsperiodes tot en met 10.000 jaar; de verwachte doorwerking in waterstanden en benodigde kruinhoogtes zal daarom naar verwachting ook relatief beperkt zijn, evenals het effect van de geactualiseerde windstatistiek zoals beschreven in par. 7.3.1.

Tabel 7.7 Modelparameters statistische onzekerheid bij Schiphol, omni-directioneel. Begrensd en multiplicatief model met gemiddelde $\mu = 1$ en standaardafwijking σ volgens kolom 5 in Tabel 7.7.

Herhalings- tijd [jaar]	Windsnelheid [m/s]	2,5% grens [m/s]	97,5% grens [m/s]	Standaardafwijking σ [-]	Windsnelheid incl. onzek. [m/s]
2	19,91	19,35	20,54	0,015	19,90
10	22,90	21,83	24,08	0,025	22,96
50	25,88	24,31	27,62	0,032	26,02
100	27,16	25,38	29,15	0,035	27,36
500	30,14	27,86	32,69	0,040	30,47
1.000	31,43	28,93	34,22	0,042	31,83
10.000	35,69	32,47	39,28	0,047	36,36



Figuur 7.11 Werklijn (blauw) en uit-geïntegreerde werklijn (rood) van de windsnelheid bij Schiphol, omni-directioneel.

De statistische onzekerheid van de windsnelheid is afhankelijk van de herhalingstijd, zie Tabel 7.7. Verkennende berekeningen met Hydra-Ring hebben laten zien dat het verschil tussen een constante spreiding en een spreiding die afhankelijk is van de herhalingstijd op de hydraulische belasting marginaal is (verschil van enkele millimeters). Om die reden is besloten om voor het schatten van de statistische onzekerheid een constante spreiding te hanteren. Daar de statistische onzekerheid van de richtingsafhankelijke windstatistiek groter is (vanwege relatief minder data dan bij de omni-directionele windstatistiek) dan de statistische onzekerheid van de omni-directionele statistiek, is er voor gekozen de standaardafwijking behorende bij het 1/10.000-kwantiel te gebruiken voor alle herhalingstijden. Ter illustratie: voor Schiphol gelden voor de statistische onzekerheid de spreidingen gegeven in kolom 5 van Tabel 7.7. Voor het 1/10.000-kwantiel geldt uit deze tabel een spreiding van 0,047. De spreiding van 0,047 is gebruikt voor alle kwantielen (herhalingstijden), dus niet alleen van de omni-directionele maar ook voor de richtingsafhankelijke windstatistiek. Een overzicht van de in Hydra-Ring gehanteerde standaardafwijkingen voor alle windstations is gegeven in Tabel 7.8.

Tabel 7.8 Windstations en bijbehorende parameters (μ en σ) voor de statistische onzekerheid van zowel de omnidirectionele als de richtingsafhankelijke situaties.

Windstation	Regio's	Gemiddelde μ [-]	Standaardafwijking σ [-]
Schiphol	3 t/m 8 en 17	1	0,047
Deelen	1, 2 en 18	1	0,046
West Terschelling	9, 10	1	0,048
De Kooy/Texelhors	11	1	0,046
IJmuiden	12	1	0,040
Hoek van Holland	13	1	0,036
Vlissingen	14 en 15	1	0,042

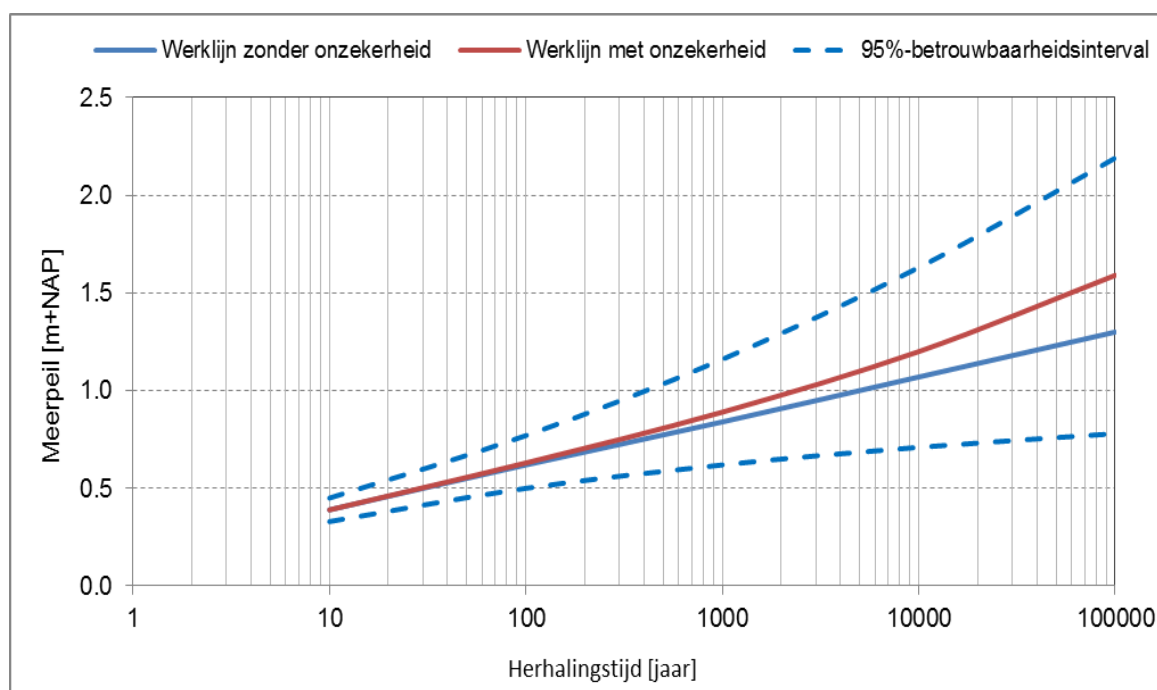
7.5 Statistische onzekerheid meerpeil

7.5.1 IJsselmeerpeil

De statistische onzekerheid van het IJsselmeerpeil is gemodelleerd door middel van een lognormale verdeling met parameters zoals weergegeven in Tabel 7.9. De statistische onzekerheid in de meerpeilstatistiek is in Hydra-Ring als additief model geïmplementeerd. De afleiding van het gemiddelde μ , de standaardafwijking σ , de parameter epsilon, de locatieparameter en de vormparameter (de laatste drie parameters zijn extra in een shifted log-normale verdeling) is uitgebreid beschreven in Chbab en Eilander (2017). Deze parameters zijn gebaseerd op de 95%-betrouwbaarheidsintervallen die in het kader van WBI-2017 zijn bepaald met bootstrapmethode. De afleiding van de betrouwbaarheidsintervallen is beschreven in Geerse en Wojciechowska (2014). Tabel 7.9 toont de parameters van deze lognormale kansverdeling, evenals de resulterende werklijn na uit-integreren van de statistische onzekerheid. Figuur 7.12 toont de werklijn en de uit-geïntegreerde werklijn van het IJsselmeerpeil in grafische vorm. Tot herhalingstijden van ca. 1.000 jaar is het effect van het meenemen van de statistische onzekerheid beperkt tot nihil. Voor een herhalingstijd van 1.000 jaar bedraagt het effect van het meenemen van de statistische onzekerheid op de werklijn 0,05 m; het effect neemt meer dan evenredig toe voor langere herhalingstijden. Voor $T = 100.000$ jaar bedraagt het effect ca. 0,30 m. Voor locaties in het IJsselmeer waar de hydraulische belasting bepaald wordt door het meerpeil, zal het effect van dezelfde orde grootte zijn als op de werklijn; bij locaties die gedomineerd worden door de wind zal het effect naar verwachting klein zijn.

Tabel 7.9 Parameters statistische onzekerheid IJsselmeerpeil, inclusief meerpeil met onzekerheid

Herhalings tijd [jaar]	Meerpeil [m+NAP]	Gem. μ [m]	St. afw σ [m]	Eps [m]	Location [m]	Shape [-]	Meerpeil incl. stat onz. [m+NAP]
10	0,39	0	0,031	-0,79	-0,236	0,039	0,39
100	0,62	0	0,067	-1,02	0,018	0,066	0,63
1.000	0,84	0	0,136	-1,24	0,209	0,110	0,89
10.000	1,07	0	0,231	-1,47	0,373	0,156	1,20
100.000	1,30	0	0,350	-1,70	0,510	0,204	1,59



Figuur 7.12 Werklijn (blauw) en uit-geïntegreerde werklijn (rood) van het IJsselmeerpeil, inclusief het 95%-betrouwbaarheidsinterval

7.5.2 Markermeerpeil

De statistische onzekerheid in de meerpeilstatistiek van het Markermeer is evenals het IJsselmeer gemodelleerd door een lognormale verdeling en als additief model geïmplementeerd in Hydra-Ring (Chbab en Eilander, 2017). De parameters van deze lognormale verdeling zijn weergegeven in Tabel 7.10 en zijn gebaseerd op de 95%-betrouwbaarheidsintervallen (Paragraaf 6.4.2). In Tabel 7.10 zijn ook de werklijnen, met en zonder statistische onzekerheid, weergegeven. Figuur 7.13 toont de werklijn en de uit-geïntegreerde werklijn (met onzekerheden) van het Markermeerpeil. Tot herhalingstijden van ca. 1.000 jaar is het effect van het meenemen van de statistische onzekerheid beperkt tot nihil. Voor een herhalingstijd van 1.000 jaar bedraagt het effect van het meenemen van de statistische onzekerheid op de werklijn 0,05 m; het effect loopt onevenredig toe voor langere herhalingstijden. Voor $T = 100.000$ jaar bedraagt het effect 0,30 m. Voor meerpeil gedomineerde locaties in het Markermeer zal het effect van dezelfde orde grootte zijn als op de werklijn; het effect bij de wind-gedomineerde locaties zal naar verwachting klein tot nihil zijn.

Tabel 7.10 Parameters statistische onzekerheid Markermeerpeil, inclusief meerpeil met onzekerheid

Herhalings tijd [jaar]	Meerpeil [m+NAP]	Mean μ [m]	St. afw σ [m]	Eps [m]	Location [m]	Shape [-]	Meerpeil incl. stat onz [m+NAP]
10	0,00	0	0,024	-0,40	-0,918	0,059	0,00
100	0,22	0	0,069	-0,62	-0,484	0,111	0,23
1.000	0,44	0	0,136	-0,84	-0,187	0,161	0,49
10.000	0,66	0	0,226	-1,06	0,036	0,211	0,80
100.000	0,89	0	0,348	-1,29	0,220	0,265	1,19



Figuur 7.13 Werklijn (blauw) en uit-geïntegreerde werklijn (rood) van het Markermeerpeil, inclusief het 95%-betrouwbaarheidsinterval.

7.6 Statistische onzekerheid zeewaterstand

De zeewaterstandstatistiek op verschillende stations langs de kust is beschreven in paragraaf 6.5. Met de bootstraphmethode zijn betrouwbaarheidsintervallen bepaald in Geerse en Wojciechowska (2015). Hierbij is gebruik gemaakt van statistische parameters uit een GEV³⁴ fit op basis van zeewaterstanden verkregen uit een lange synthetische reeks windgegevens van Hoek van Holland van het KNMI. Deze windgegevens beslaan een periode van 3.439 jaren en zijn afgeleid van seizoensverwachtingen van het European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF (Van den Brink, 2015). Op analoge wijze als voor meerpeilen zijn op basis van de percentielen van de zeewaterstanden voor elk station schattingen gemaakt van de statistische onzekerheid en in Hydra-Ring als begrensd additief model toegevoegd aan de basisstochast zeewaterstand.

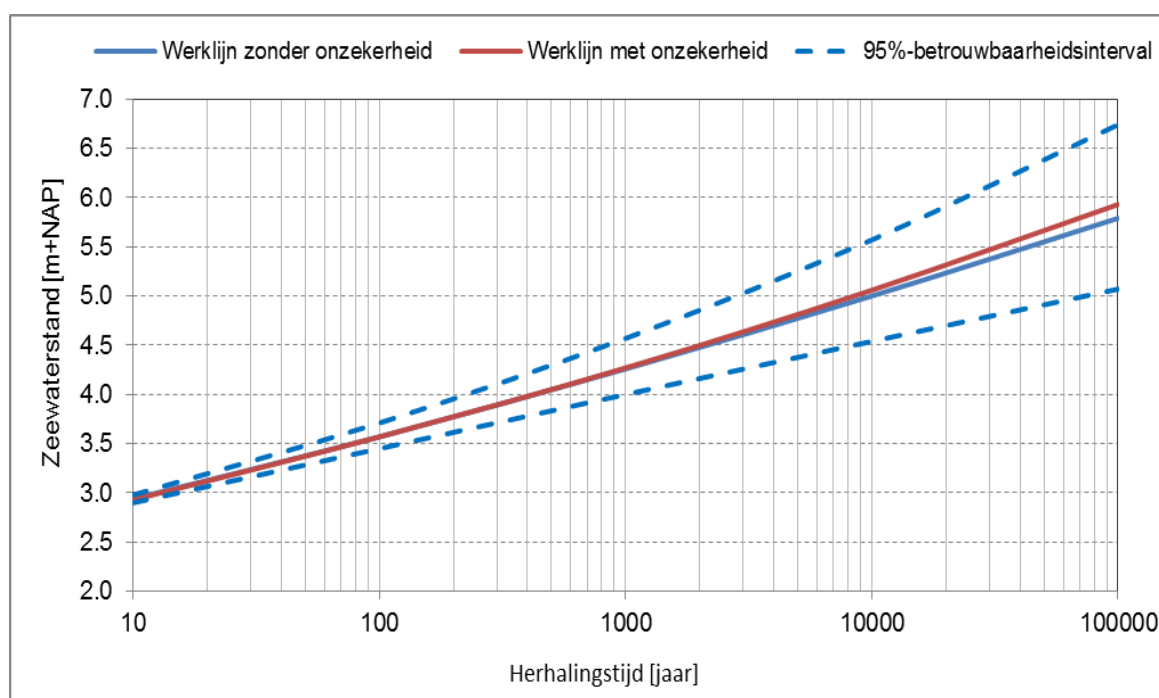
Voor elk station zijn op basis van de percentielen van de zeewaterstand schattingen gemaakt van de statistische onzekerheid, door middel van het fitten van een normale verdeling. Het gemiddelde van de normale verdeling is vooraf vastgesteld op 0, terwijl de standaardafwijking gefit is met behulp van de 'maximum likelihood' methode. De aldus gevonden parameters van de normale verdeling voor station Hoek van Holland zijn weergegeven in Tabel 7.11.

³⁴ Generalized Extreme Value kansverdeling

Tabel 7.11 Statistische onzekerheid zeewaterstandsstatistiek Hoek van Holland, omni-directioneel.

Herhalings-tijd [jaar]	Werklijn [m+NAP]	2.5% BI [m+NAP]	97.5% BI [m+NAP]	μ [m]	σ [m]	Uit-geïntegreerde werklijn [m+NAP]
10	2,94	2,90	2,98	0	0,0200	2,93
100	3,57	3,45	3,71	0	0,0650	3,57
1.000	4,26	4,00	4,57	0	0,1425	4,27
10.000	5,00	4,54	5,57	0	0,2575	5,06
100.000	5,79	5,07	6,74	0	0,4175	5,93

Figuur 7.14 toont de werklijn en de uit-geïntegreerde werklijn (met onzekerheden) van het station Hoek van Holland. De verschillen tussen beide werklijnen zijn beperkt en bedragen maximaal 0,14 m voor een herhalingstijd van 100.000 jaar (zie ook Tabel 7.11)



Figuur 7.14 Werklijn (zwart) en uit geïntegreerde werklijn (groen) van de omni-directionele zeewaterstand bij Hoek van Holland.

Tabel 7.12 toont het verhogend effect van de statistische onzekerheid op de 1/1.000 en 1/100.000 kwantielen. Zoals te zien is het verhogend effect van het meenemen van de statistische onzekerheid klein voor de herhalingstijd van 1.000 jaar; dit effect bedraagt slechts enkele centimeters voor alle kuststations in Hydra-Ring. Voor de herhalingstijd van 100.000 jaar varieert het verhogend effect tussen 0,11 m voor Den Helder en Lauwersoog en 0,17 m voor Hansweert en Oosterschelde buiten. Meer details met betrekking tot de effecten van de statistische onzekerheid zijn te vinden in Chbab en Eilander (2017).

Tabel 7.12 Verhogend effect van statistische onzekerheid op 1/1.000 en 1/100.000 kwantiel van de zeewaterstand bij verschillende kuststations.

Station	Effect statistische onzekerheid [m] voor	
	T = 1.000 jaar	T = 100.000 jaar
Hoek van Holland	0,012	0,15
Vlissingen	0,022	0,16
IJmuiden	0,019	0,15
Den Helder	0,015	0,11
Den Oever	0,030	0,15
Harlingen	0,020	0,12
Terschelling	0,029	0,14
Delzijl	0,024	0,13
Huibertgat	0,025	0,16
Hansweert	0,019	0,17
Lauwersoog	0,018	0,11
Oosterschelde buiten	0,020	0,17

7.7 Onzekerheid seichetoeslag

Het seiches-effect is in WBI-2017 meegenomen als een zeewaterstands-afhankelijke toeslag voor het hele bereik van herhalingstijden. Dit wil zeggen dat het seiche effect is gekoppeld aan de zeewaterstand bij Maasmond, zie Beckers (2014) voor details. Om dit te realiseren zijn voor 9 herhalingstijden en bijbehorende zeewaterstand bij Maasmond, variërend tussen +2,40 m+NAP en +6,40 m+NAP, seichetoeslagen bepaald. Hierbij is gebruik gemaakt van PHAROS (Deltares, 2014g). In deze toeslagen zijn onzekerheden in bijvoorbeeld de PHAROS-resultaten echter niet meegenomen.

Omdat de statistische onzekerheid in de zeewaterstanden bij Maasmond bij langere herhalingstijden (orde 10.000 jaar) groter kunnen zijn dan de onzekerheden in de seichetoeslag is de verwachting dat de seiche-onzekerheid bij hogere herhalingstijden een zeer geringe invloed zal hebben op de resulterende waterstanden. Dit kan een argument zijn om de onzekerheden voor seichetoeslag buiten beschouwing te laten. Omdat dit echter niet geldt voor kortere herhalingstijden (orde 100 jaar), waar de onzekerheden van de seiches wel degelijk grote invloed hebben, is besloten om deze mee te nemen in WBI-2017. De onzekerheid in seichetoeslag is in Hydra-Ring geïmplementeerd als een multiplicatief en begrensd model van het gemiddelde berekende seichetoeslag. Het model is een (extra) stochast met een normale verdeling met gemiddelde 1 en standaardafwijking 0,3. Deze standaardafwijking komt voort uit een onzekerheid van 25% in de referentiestatistiek van de seiches bij ROZ en 15% in de vertaling van ROZ naar andere locaties in het Europoortgebied (PHAROS berekeningen), zie Beckers (2014) voor meer details.

7.8 Onzekerheid golfparameters H_s en T_p voor duinen

Voor regio 16 gelden de golfparameters H_s en T_p als basisstochasten. Zoals al beschreven in paragraaf 6.8 is de golfhoogte H_s gekoppeld aan de zeewaterstand en de golfperiode T_p aan de golfhoogte H_s . In het belastingmodel voor duinen en in Hydra-Ring wordt rekening gehouden met de onzekerheid in de golfparameters op de volgende manier:

- De *verwachtingswaarde* van de golfhoogte H_s is zoals beschreven in paragraaf 6.8 een deterministische functie van de waterstand inclusief statistische onzekerheid. Merk op

dat lokale waterstanden bij de kustlocaties tot stand komen door middel van triangulaire interpolaties van waterstanden op de hoofdstations (Tabel 7.12). In de waterstanden op de hoofdstations is statistische onzekerheid verwerkt. Om de verwachtingswaarde heen wordt de golfhoogte verondersteld normaal verdeeld te zijn met een standaarddeviatie van 0,6 m.

- De *verwachtingswaarde* van de piekperiode T_p is, evenals zoals beschreven in paragraaf 6.8, een deterministische functie van de golfhoogte H_s . Om deze verwachtingswaarde heen is de piekperiode verondersteld normaal verdeeld te zijn met een standaarddeviatie van 1 s.

N.B. Naast de onzekerheid in zeewaterstand, golfhoogte H_s en golfperiode T_p , kent het belastingmodel voor duinen nog drie extra stochasten, namelijk de korreldiameter, de toeslag op het afslagvolume door effecten van de stormduur en de toeslag voor het afslagvolume. Deze onzekerheden vallen echter buiten de scope van dit rapport; voor een beschrijving van deze onzekerheden wordt verwezen naar Deltares (2015i).

8 Statistiek: modelonzekerheid lokale waterstand en golfparameters

8.1 Inleiding

De hydraulische belastingen bij de teen van de waterkering worden verkregen door middel van verschillende modelberekeningen (Hoofdstuk 4 en 5). Deze modelberekeningen gaan gepaard met onzekerheden. Vooral onder extreme omstandigheden kan deze onzekerheid groot zijn. WBI-2017 houdt rekening met deze modelonzekerheden. We onderscheiden modelonzekerheid in de lokale waterstand en modelonzekerheid in de golfparameters. Dit hoofdstuk beschrijft summier hoe modelonzekerheid in lokale waterstand en golfparameters is verwerkt in WBI-2017 en welke waarden daarvoor zijn gebruikt. Achtergronden en nadere informatie zijn te vinden in het hoofdrapport Modelonzekerheid Belastingen (Chbab en Groeneweg, 2017) en de daaraan ten grondslag liggende deelrapporten: (Chbab, 2015a), (Deltares, 2015b)..

Modelonzekerheid in de lokale waterstand is in WBI-2017 meegenomen voor de regio's 1 t/m 8, regio 14 en de regio's 17 en 18. Voor de kustwateren met uitzondering van Europoort en Oosterschelde (regio's 9 t/m 13 en de regio's 15 en 16) is de modelonzekerheid in lokale waterstand achterwege gelaten omdat voor die regio's de waterstanden niet door middel van modelberekeningen maar door interpolaties van waterstanden op relevante hoofdstations worden verkregen (Hoofdstuk 3.3.2 en 5). De onzekerheid van deze interpolaties is verwaarloosbaar ten opzichte van andere onzekerheden. De onzekerheid in de golfparameters is in WBI-2017 voor alle regio's meegenomen.

Paragraaf 8.2 behandelt de wijze waarop modelonzekerheid is gemodelleerd. Gemaakte schattingen van modelonzekerheid in de lokale waterstand komen aan de orde in paragraaf 8.3. In Paragraaf 8.4 volgen de schattingen van modelonzekerheid in de golfparameters.

8.2 Modelling modelonzekerheid lokale waterstand

8.2.1 Modelling modelonzekerheid in lokale waterstand

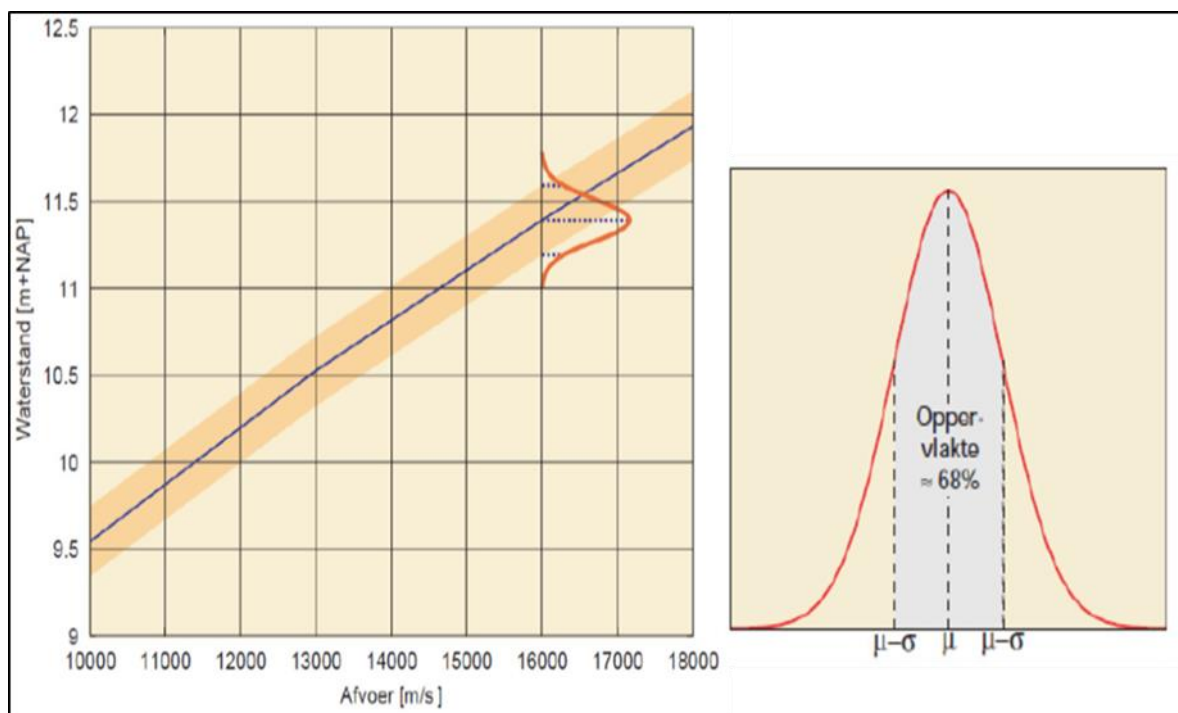
De waterstanden in WBI-2017 op de uitvoerlocaties volgen uit de basis-stochastwaarden en berekeningen met WAQUA, met uitzondering van de kustgebieden waar de waterstanden door middel van interpolaties zijn verkregen. Modelonzekerheid in de berekende lokale waterstand is tot stand gekomen aan de hand van expert judgement op basis van de resultaten van de kalibratie en validatie van de WAQUA modellen (vergelijking tussen gemeten en berekende waterstanden) en de resultaten van gevoeligheidsberekeningen uitgevoerd met WAQUA. Bij het bepalen van de modelonzekerheid ligt de nadruk op de extreme omstandigheden. Per watersysteem zijn de belangrijkste onzekerheidsbronnen geïdentificeerd; hierbij is onderscheid gemaakt tussen drie typen onzekerheden:

1. Onzekerheid als gevolg van onzekere modelrandvoorwaarden of invoer; dit type onzekerheid ontstaat doordat modelberekeningen uitgevoerd worden met geschematiseerde/vereenvoudigde randvoorwaarden of invoer. De vorm van de afvoer als bovenrand voor de modelberekeningen voor het rivierengebied is hiervan een voorbeeld,

2. Onzekerheid als gevolg van vereenvoudigde modellering van fysische processen, schematisaties en kalibratie. Deze onzekerheid ontstaat doordat verschillende fysische processen niet exact beschreven worden maar slechts bij benadering. Een model is immers slechts een benadering van de werkelijkheid,
3. Niet-gemodelleerde aspecten en/of grootheden in de productieberekeningen. Deze onzekerheid ontstaat doordat enkele minder relevante aspecten niet meegenomen worden in de modelberekeningen. Denk aan de sedimentstop van beweegbare keringen of aan het springtij.

Bovengenoemde drie typen onzekerheden vormen samen de modelonzekerheid die doorwerkt in de berekende lokale waterstanden. Modelonzekerheid in de lokale waterstand heeft in de WBI rapportage daardoor een breder begrip: het is modelonzekerheid inclusief de onzekerheid als gevolg van onzekere modelinvoer.

Van elk type onzekerheid zijn vervolgens de belangrijkste bronnen geïdentificeerd en is vervolgens de bijbehorende onzekerheid geschat. Waar nodig is het beschouwde watersysteem opgesplitst in deelgebieden. Deze splitsing is vooral nodig in watersystemen waar verschillende fysische aspecten in wisselende samenstelling een rol spelen. Opdeling in deelgebieden is gebaseerd op enerzijds informatie uit WTI-2011/HR-2006, zoals illustratiepunten, en anderzijds op de resultaten van gevoeligheidsberekeningen en expert judgement. Illustratiepunten leveren informatie over de kansbijdragen van verschillende basisstochasten in extreme omstandigheden. Deze informatie is gebruikt om de voor de waterstanden relevante stochasten en bijgevolg daardoor de belangrijke onzekerheidsbronnen te identificeren, zie Chbab (2015a) en Chbab (2015b).



Figuur 8.1 Illustratie van onzekerheid in waterstand (als functie van afvoer). In de linker figuur is een 95% betrouwbaarheidsband van 1 m aangehouden: 0,5 m hoger en 0,5 m lager voor het hele bereik.

Modelonzekerheden in lokale waterstanden worden als extra onafhankelijke stochasten toegevoegd in Hydra-Ring (Diermanse et al, 2016). Als eerste uitgangspunt geldt hierbij dat

de onafhankelijke stochast die de modelonzekerheid in lokale waterstand beschrijft normaal verdeeld is; dit is geïllustreerd in Figuur 8.1. Modelonzekerheid kan daardoor uitgedrukt worden in een bias (μ) en een standaardafwijking (σ). Omdat de modelberekeningen (productieberekeningen) uitgevoerd worden met gekalibreerde en gevalideerde modellen, waarbij de kalibratie als doel heeft een bias te minimaliseren, is de keuze gemaakt om de modelonzekerheid in lokale waterstand de bias gelijk aan nul te stellen. Het tweede uitgangspunt is dat er één standaardafwijking wordt gebruikt voor het hele bereik. Dit houdt feitelijk in dat deze standaardafwijking niet afhangt van de herhalingsstijd, zoals geïllustreerd in Figuur 8.1. Bij de vaststelling van de standaardafwijking is wel rekening gehouden met extreme situaties. Voor lage terugkeertijden kan er hierdoor sprake zijn van een overschatting van modelonzekerheid in de lokale waterstand, maar dit bereik is in veel gevallen minder relevant voor de hydraulische belastingen. Het derde uitgangspunt is dat modelonzekerheid in de lokale waterstand ruimtelijk varieert. Dit houdt feitelijk in dat de standaardafwijking van de locatie afhangt. Voor elke uitvoerlocatie (hoofdstuk 4 en 5) geldt in principe één getal voor de standaardafwijking.

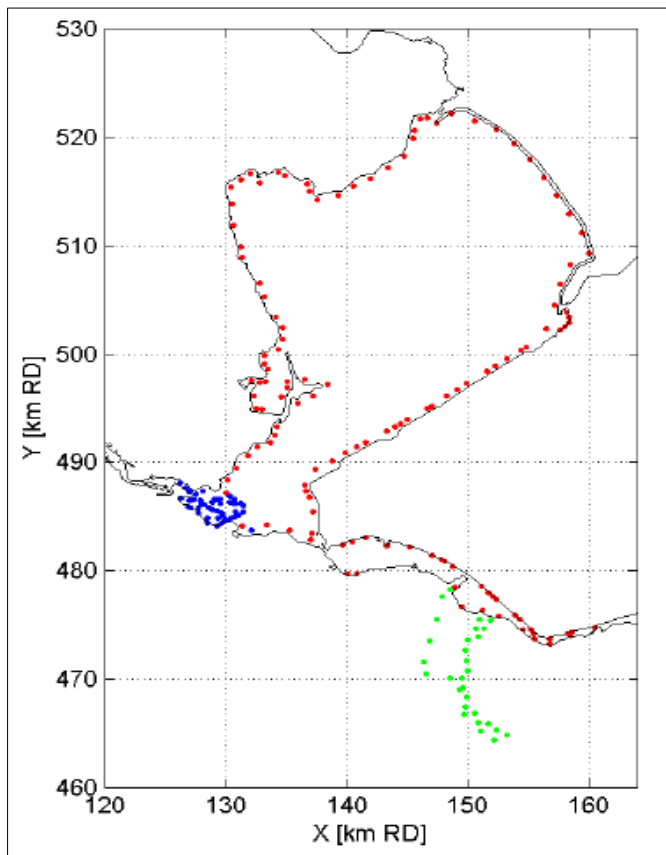
8.2.2 Modelling modelonzekerheid golfparameters

Modelonzekerheid in de golfparameters wordt veroorzaakt door onzekerheden in de relatie tussen de basisstochast wind en de lokale golfcondities. De golfparameters zijn bepaald met SWAN, HISWA of Bretschneider; zie hoofdstuk 5. SWAN is toegepast in de kustgebieden (regio's 9 t/m 15), het IJsselmeer (regio 7) en bredere wateren van het rivierengebied en randmeren (delen van de regio's 3 t/m 6 en 17). De formule van Bretschneider is toegepast in de smalle wateren van het rivierengebied (de regio's 1, 2 en 18 en delen van de regio's 3 t/m 6). Het Markermeer vormt een uitzondering. Daar zijn de golfparameters bepaald met drie verschillende golfmodellen: SWAN voor IJburg, HISWA voor Markermeer inclusief Gooi- en Eemmeer en Bretschneider voor de Eem. Figuur 8.2 toont de gebieden waarvoor de genoemde drie modellen zijn toegepast.

Voor alle modellen en regio's zijn de belangrijkste bronnen van onzekerheid geïdentificeerd. Vervolgens zijn de resulterende onzekerheden in termen van bias en standaardafwijking van de mogelijke afwijkingen in de significante golfhoogte en gemiddelde en/of piekperiode bepaald (en dus niet de golfrichting).

Ten aanzien van de golfparameters zijn ruwweg twee onzekerheidsbronnen onderscheiden:

- 1) benadering van fysische processen en
- 2) onzekerheden in modelinvoer (bijv. wind boven open water), onnauwkeurigheden in de schematisatie en het verwaarlozen van fysische aspecten en/of grootheden (bijv. stroming).



Figuur 8.2 Uitvoerlocaties in het Markermeer, uitgesplitst naar het model waarmee ze zijn bepaald (blauw: IJburg-SWAN; groen: Eem-Breschneider; rood: overig-HISWA).

Door middel van een groot aantal hindcasts is inzicht verkregen in de verschillen tussen gemeten en berekende golfparameters op meetlocaties. Deze verschillen zijn gebruikt om een schatting te maken van de modelonzekerheden als gevolg van de genoemde onzekerheidsbronnen, 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 van de totale modelonzekerheid bij het gebruik 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 de implementatie in Hydra-Ring van de modelonzekerheid in de golfparameters gelden dezelfde uitgangspunten als voor de modelonzekerheid in lokale waterstand (Paragraaf 8.2.1), met twee uitzonderingen. Allereerst zijn bias en spreiding bij golven in relatieve termen gedefinieerd, en bij waterstand als absolute waarden. Daarnaast, en in tegenstelling tot lokale waterstand, is naast een standaardafwijking ook een bias

expliciet in rekening gebracht. Verder is de modelonzekerheid in de golfparameters locatieafhankelijk, hangt deze niet af van de herhalingsstijd en is normaal verdeeld. Meer details met betrekking tot modellering van de modelonzekerheid in de golfparameters zijn te vinden in Diermanse et al (2016).

8.3 Modelonzekerheid waterstand

8.3.1 Bovenrivieren (regio 1, 2 en 18)

Modelonzekerheid voor de regio's 1, 2 en 18 is uitvoerig beschreven in Deltares (2013d). Voor deze regio's zijn twee belangrijke onzekerheidsbronnen geïdentificeerd: de bodemruwheid en de morfologische veranderingen onder extreme omstandigheden. De onzekerheid in afvoerverdeling is ten opzichte van deze twee onzekerheidsbronnen klein en het draagt alleen bij in het gebied van de IJssel.

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 waarmee de afvoerstatistiek van de Rijn en de Maas is bepaald, zie Deltares (2015d). Het is aannemelijk dat de bodemruwheden op strekkingen op de Rijn en de Maas aan weerszijden van de grens met Nederland niet veel van elkaar zullen verschillen en dat er dus enige vorm van correlatie is tussen de onzekerheid van beide bodemruwheden, en dus ook tussen de modelonzekerheid voor rivieren en een deel van de statistische onzekerheid van de afvoerstatistiek. Deze correlatie is om praktische redenen niet meegenomen in de rekentechniek van Hydra-Ring maar is verdisconteerd in de modelonzekerheid van de lokale waterstand.

In Deltares (2015d) is het mogelijke effect van de keuze voor een correlatie tussen modelonzekerheden in WAQUA-Rijntakkenmodel 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 (coëfficiënt -1) leidt tot lagere waterstanden bij Lobith, orde 0,3 m. In werkelijkheid ligt deze lager omdat de correlatiecoëfficiënt ergens tussen -1 en 0 ligt. Op basis van expert judgement is de keuze gemaakt om het effect van de correlaties in bodemruwheid te verdisconteren in de spreiding van de lokale waterstand. De reducerende bijdrage van de correlatie op deze spreiding is vastgesteld op 0,15 m. Op deze manier is de aanwezige correlatie tussen ruwheid in Duitsland (via de werklijn van de Rijn) en de ruwheid in de Rijntakken in Nederland verdisconteerd.

Naarmate we verder van de grens met Duitsland zijn verwijderd is het 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 bepaald 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, zijn er geen redenen om variaties in de reductie van de modelonzekerheid aan te brengen. In het gebied van de Rijntakken is dit immers de bepalende onzekerheidsbron. Om deze reden is de reductie van de standaardafwijking van de waterstand als gevolg van de correlatie uniform in het hele gebied van de Rijntakken, d.w.z. 0,15 m.

Voor de Rijn werken de bodemruwheden sterk door in de onzekerheidsband van de werklijn bij Lobith, voor de Maas is dit niet het geval en zijn bij het bepalen van de werklijn bij Borgharen alleen de onzekerheden in het neerslagmodel meegenomen. In de werklijn zijn daarom geen effecten van de hydraulische onzekerheden verdisconteerd. Om deze reden is de Maas geen reductie van de standaardafwijking van de waterstand toegepast voor de correlatie in bodemruwheden.

Tabel 8.1 bevat de schattingen voor modelonzekerheid in lokale waterstand voor de Rijntakken en de Maas die gehanteerd zijn in WBI-2017.

Tabel 8.1 Modelonzekerheid bovenrivieren: regio's 1, 2 en 18

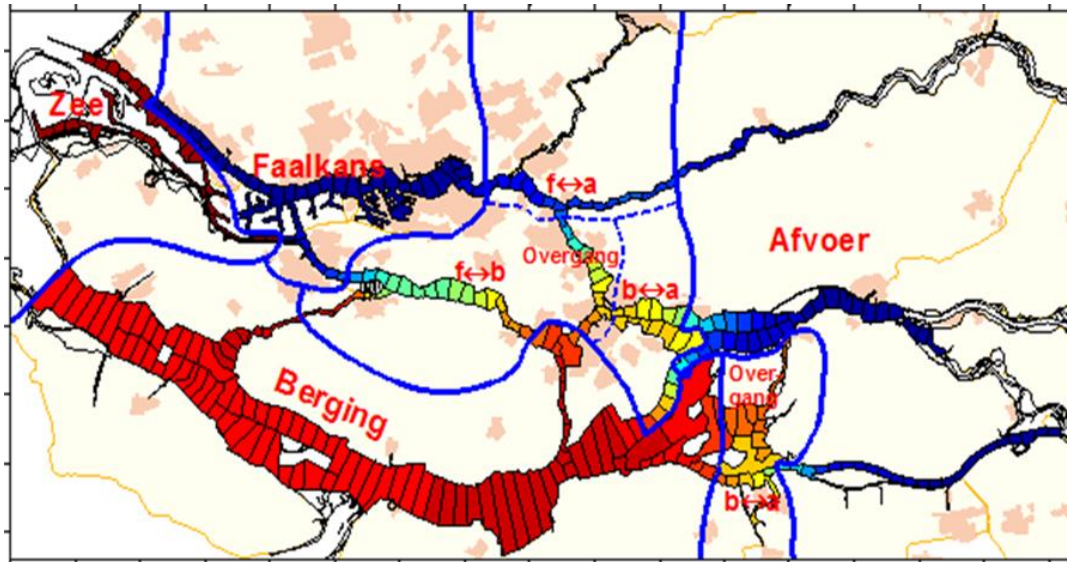
Riviertak	Bias [m]	Standaardafwijking [m]
Waal	0	0,15
Lek/Nederrijn	0	0,15
IJssel	0	0,20
Maas	0	0,30

8.3.2 Benedenrivieren (regio 3 en 4)

In vergelijking met de Bovenrivieren spelen in het Benedenriviereengebied naast afvoeren, zeewaterstanden/getij, wind en de Europoortkering een rol. Daarnaast worden de Benedenrivieren bedreigd door beide rivierafvoeren: Rijn en Maas. Afhankelijk van de locatie spelen al deze aspecten in wisselende samenstelling een rol. Om deze reden is het gebied van de Benedenrivieren opgesplitst in deelgebieden zoals beschreven in Figuur 8.3. De deelgebieden zijn:

- Afvoergebied: De maatgevende situatie wordt in dit gebied (volledig) bepaald door hoge rivierafvoer.
- Zeegebied: De maatgevende situatie wordt in het zeegebied volledig bepaald door hoge stormvloed langs de Hollandse kust. De Europoortkeringen gaan onder extreme omstandigheden dicht en kunnen enige opstuwing veroorzaken, al dan niet in combinatie met seiches.
- Faalkansgebied: De maatgevende situatie in dit gebied is een middelbare storm met een waterstand vanaf 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 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 een situatie met open Europoortkeringen, maar gaande van het faalkansgebied naar het riviereengebied wordt de rol van de afvoer steeds belangrijker en die van de stormopzet minder,
 - f-b: De maatgevende situatie gaat geleidelijk over van een situatie met open naar een situatie met dichte keringen, gaande van faalkansgebied naar bergingsgebied. Onder maatgevende

- b-a: omstandigheden neemt de rol van de afvoer gestaag toe bij vrije constante middelbare stormopzet, De maatgevende situatie gaat gaande van berging naar afvoergebied geleidelijk over van een situatie van dichte naar open stormvloedkeringen waarbij de rol van de afvoer steeds hoger wordt en die van de stormopzet terugloopt.



Figuur 8.3 Deelgebieden van Benedenrivieren (regio's 3, 4 en 17): zee-, faalkans-, afvoer-, bergings- en overgangsgebied.

Modelonzekerheid voor het benedenrivierengebied is beschreven in Chbab (2015a). Per deelgebied in de Benedenrivieren waar de Rijnstatistiek bepalend is voor de hydraulische belasting, varieert de invloed van de relevante onzekerheidsbronnen. In het rivierengebied is de Rijnafvoer de belangrijke stochast en de belangrijke onzekerheidsbronnen zijn de ruwheden en morfologische veranderingen onder extreme omstandigheden. Voor het faalkansgebied vormt de onzekerheid in stormopzetduur de belangrijkste onzekerheidsbron. Andere belangrijke onzekerheidsbronnen zijn het faseverschil tussen de toppen van de stormopzet en het astronomische getij, windmodellering, schematisatie en falen van de keringen. De belangrijkste onzekerheidsbronnen voor het bergingsgebied zijn stormopzetduur, faseverschil tussen stormopzet en getij, windmodellering en ruwheden/morfologische veranderingen. In de overgangsgebieden is sprake van een combinatie van bovengenoemde onzekerheidsbronnen in wisselende samenstelling.

Voor de Bergsche Maas is de situatie met open keringen maatgevend, de situatie met dichte keringen speelt nauwelijks een rol. Daarom is modelonzekerheid in lokale waterstand enkel voor de situatie met open keringen beschouwd. In dit geval bepalen de bodemruwheden en morfologische veranderingen onder extreme omstandigheden de modelonzekerheid.

Verwacht wordt dat het effect van de correlatie tussen de bodemruwheden in Duitsland en Nederland merkbaar doorwerkt in het Benedenrivierengebied en niet abrupt stopt bij de overgang tussen Beneden- en Bovenrivieren. Het bovenstroomse deel van de Benedenrivieren is immers afvoer-gedomineerd en de bodemruwheid hier is een belangrijke onzekerheidsbron. Om een realistische overgang tussen bovenrivieren enerzijds en kust en meren anderzijds te realiseren is de keuze gemaakt om een reductie van de standaardafwijking van de waterstand voor de correlatie in bodemruwheden te hanteren van

0,15 m op de grens met het bovenrivierengebied en 0 m op de grens met kust of merenregio's. Omdat er geen inhoudelijk gefundeerde voorkeur bestaat voor een bepaald verloop, is ervoor gekozen om de standaardafwijking die de onzekerheid van de bodemruwheid beschrijft overal waar de afvoeren effect hebben op de maatgevende condities te verlagen met 0,15 m. Wanneer de geschatte standaardafwijking (als gevolg van de bodemruwheid) al minder dan 0,15 m was, dan wordt deze gelijk gesteld aan 0 m. Zo komen we uiteindelijk automatisch op 0 m reductie op zee en/of meer.

Samengevat is het volgende ruimtelijk verloop van het effect van de correlatie, zoals vertaald in een reductie van de onzekerheid (spreiding) van de bodemruwheid:

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

De definitieve schattingen van de modelonzekerheid in de lokale waterstand voor verschillende deelgebieden van de Benedenrivieren zijn voor beide situaties van de Europoortkeringen, open en gesloten, weergegeven in Tabel 8.2.

Tabel 8.2 Modelonzekerheid Benedenrivieren (regio's 3, 4 en 17) voor open en dichte situaties van de Europoortkeringen.

Deelgebied	Standaard deviatie [m]	
	Open keringen	Gesloten keringen
Riviergebied: Lek bovenstrooms van km 981 Boven Merwede Beneden Merwede bovenstrooms van km 968, Nieuwe Merwede bovenstrooms van km 970	0,15	0,15
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
Bergingsgebied	0,25	0,30
Overgangsgebied: f → a f → b b → a	0,15 0,25 0,25	0,25 0,30 0,30
Beneden Maas (Bergsche Maas)	0,30	-

8.3.3 Vecht- en IJsseldelta (regio 5 en 6)

In de Vecht en IJsseldelta bepalen, evenals in het Benedenrivierengebied, verschillende fysische processen de waterstand. Modelonzekerheid in lokale waterstand voor de Vechtdelta en IJsseldelta is beschreven in Chbab (2015b) en (Deltares, 2017a)

Overeenkomstig het benedenrivierengebied is het effect van de correlatie tussen bodemruwheden in Nederland en Duitsland verdisconteerd in de standaardafwijking van de onzekerheid van de waterstanden voor de IJsseldelta.

De IJsseldelta is vanwege het fysische gedrag en diversiteit in fysische processen, opgesplitst in 3 deelgebieden: een bovenstrooms, een benedenstrooms en een overgangsgebied. Het bovenstroomse deel omvat alle locaties bovenstrooms van km 993 en het benedenstroomse deel alle locaties benedenstrooms van km 996. Het smalle overgangsgebied ligt tussen deze twee deelgebieden in.

In Chbab (2015b) zijn de belangrijkste onzekerheidsbronnen voor de IJsseldelta geïdentificeerd en bijbehorende onzekerheden geschat. Bovenstrooms van de IJsseldelta bepaalt de IJsselafvoer de waterstanden. De bodemruwheid/kalibratie en de mogelijke morfologische veranderingen onder extreme omstandigheden bepalen dan ook de modelonzekerheid in dit deelgebied. De bijdrage van de onzekerheid in windmodellering, bovenrand (permanent rekenen) en Bypass Kampen is relatief klein.

Benedenstrooms van de IJsseldelta geldt voornamelijk de onzekerheid in windmodellering (windstress en waterruwheid, windvelden en transformatie naar open-water wind) als de belangrijkste onzekerheid. De bijdrage van de onzekerheid als gevolg van aansturing en schematisatie van Ramspol evenals de bodemligging is relatief klein. In het overgangsgebied van de IJsseldelta bepalen verschillende onzekerheidsbronnen de totale onzekerheid, maar in wisselende samenstelling. Tabel 8.3 toont de definitieve schattingen voor modelonzekerheid IJsseldelta.

Tabel 8.3 Modelonzekerheid regio 5: IJsseldelta

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

De onzekerheden als gevolg van kalibratie, bodemruwheden en morfologische veranderingen bepalen de modelonzekerheid 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 in deze twee gebieden de onzekerheid in windmodellering en onderloopgedrag van Kampereiland bij aan modelonzekerheid. De bijdrage van de onzekerheid in de bodemligging en falen van Ramspolkering is relatief klein.

Zoals hierboven beschreven spelen de kans-bijdragen van extreme afvoeren een rol op alle locaties langs de Vecht. Bij dergelijke extreme afvoeren treden er overstromingen op bovenstrooms van Dalfsen. Door deze overstromingen vlakt de Vechtafvoer af met als gevolg dat modelonzekerheid in extreme situaties wordt gedempt (Jungermann en Horn, 2016). Op basis van de resultaten uit deze referentie zijn pragmatische keuzes gemaakt voor de waarden voor de standaarddeviatie (σ) van de modelonzekerheid WAQUA. De gemaakte keuze houdt in dat, als gevolg van overstromingen, bovenstrooms van de Vecht een kleinere standaarddeviatie gehanteerd wordt voor modelonzekerheid; deze standaarddeviatie neemt toe in de benedenstroomse richting omdat in dit gebied de effecten van overstromingen dempen en de wind steeds een grotere rol gaat spelen. Meer details met betrekking tot gemaakte keuzes en argumentatie zijn te vinden in (Geerse, 2016a). Daarnaast is bij het kwantificeren van modelonzekerheid voor de Vechtdelta rekening gehouden met de geldende veiligheidsnormen van de dijktrajecten in de Vechtdelta. Dijktrajecten met strengere normen krijgen een grotere modelonzekerheid dan de dijktrajecten met lage veiligheidsnormen.

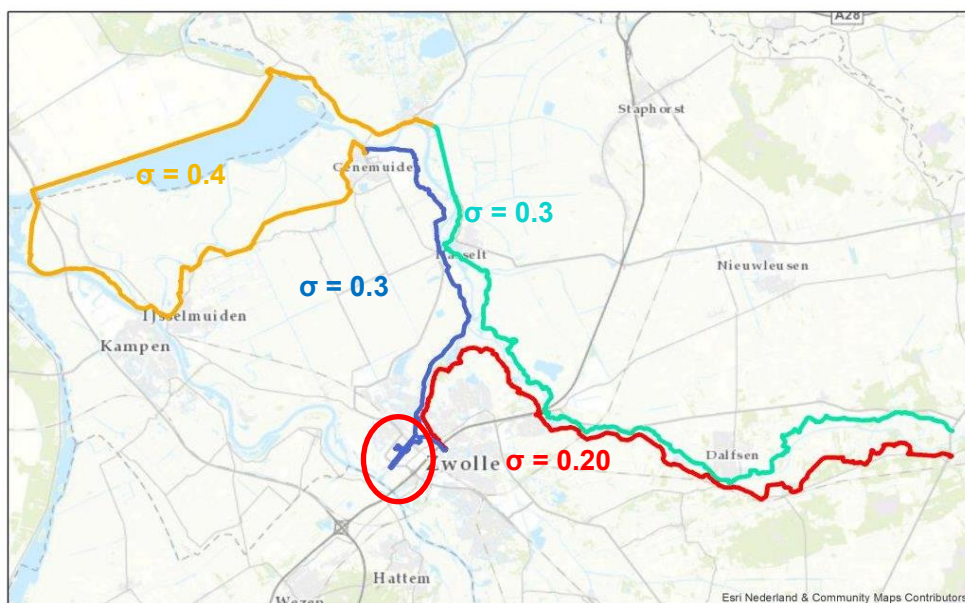
Bovenstaande heeft geresulteerd in de volgende indeling van de Vechtdelta, zie ook Figuur 8.4:

- Zwarte Meer (trajecten Flevoland en Mastenbroek/Kamperzeedijk),
- Zwarte Water (van Genemuiden naar de Spooldersluis),
- Noordoever Vecht van Zwartsluis t/m Ommen,
- Zuidoever Vecht van Spooldersluis naar Ommen met uitzondering van het Zwolle-IJsselkanaal (voorheen dijkkring 53).

Tabel 8.4 toont de modelonzekerheid in lokale waterstand voor de verschillende deelgebieden van de Vechtdelta.

Tabel 8.4 Modelonzekerheid deelgebieden Vechtdelta

Deelgebied	Bias [m]	Standaarddeviatie [m]
Zwarte Meer (trajecten Flevoland en Mastenbroek)	0	0,40
Zwarte Water (Genemuiden naar de Spooldersluis)	0	0,30
Noordoever Vecht van Zwartsluis t/m Ommen	0	0,30
Zuidoever Vecht van Spooldersluis naar Ommen met uitzondering van het Zwolle-IJsselkanaal	0	0,20



Figuur 8.4 Deelgebieden Vechtdelta en bijbehorende modelonzekerheid in lokale waterstand.

Voor de as-locaties is de modelonzekerheid gelijk gesteld aan de grootste onzekerheid voor de oeverlocaties aan weerszijden van het rivier. Langs het Zwolle-IJsselkanaal (rode cirkel in Figuur 8.4) is er slechts een set locaties beschikbaar middenin het kanaal. In dit geval is gekozen voor de grootste onzekerheid/spreiding van aangrenzende trajecten. Voor de as-locaties langs de Vecht geldt bijvoorbeeld $\sigma = 30$ cm, het maximum van de onzekerheden voor de Noordoever ($\sigma = 30$ cm) en de Zuidoever ($\sigma = 20$ cm).

8.3.4 IJsselmeer (regio 7)

Modelonzekerheid in lokale waterstand voor de regio IJsselmeer is beschreven in Chbab, (2015b). Het IJsselmeer is hierbij opgesplitst in 3 deelgebieden (zie ook Tabel 8.5):

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

Een groot deel van het IJsselmeer is windgedreven. De wind is de bepalende factor en vormt dan ook de belangrijkste onzekerheidsbron. De 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 ook een rol. De bijdrage van de bodemligging aan de totale onzekerheid is relatief klein.

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

Tabel 8.5 toont de definitieve schattingen voor de standaardafwijking van de onzekerheid van de waterstand als gevolg van modelonzekerheid voor het IJsselmeer. Figuur 8.5 toont de deelgebieden van het IJsselmeer inclusief bijbehorende schattingen voor de standaardafwijking van de onzekerheid van de waterstand als gevolg van modelonzekerheid.

Tabel 8.5 Modelonzekerheid verschillende deelgebieden van regio 7: het IJsselmeer

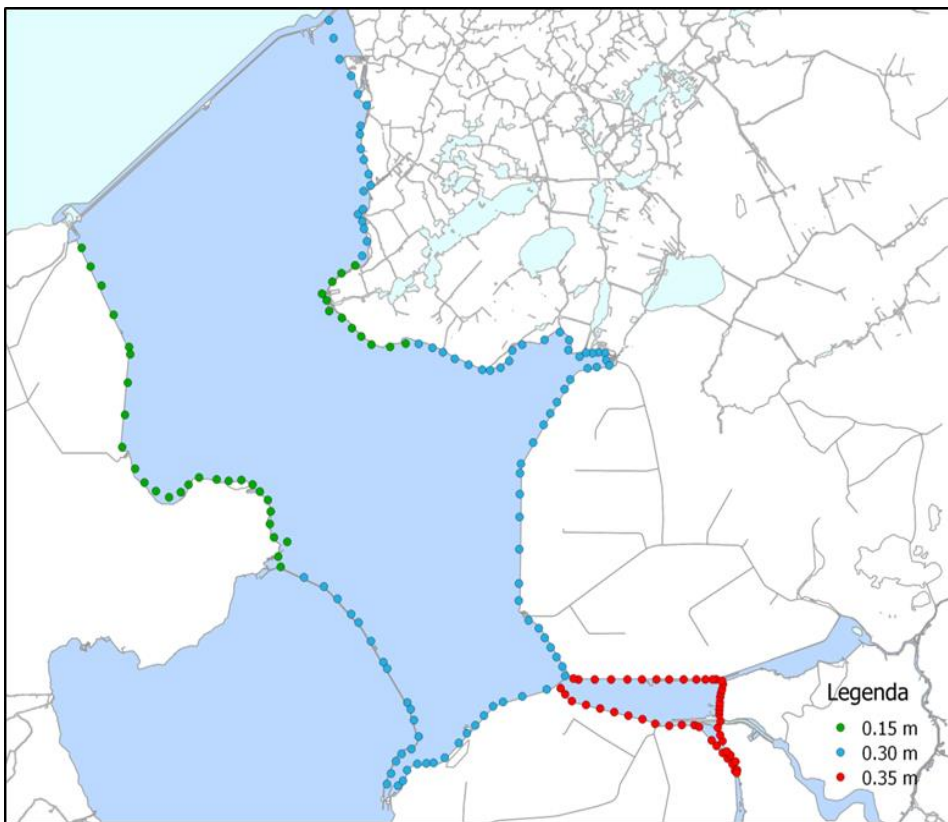
Deelgebied	Bias [m]	Standaardafwijking [m]
Ketelmeer en Vossemeer (alle locaties ten oosten van Ketelbrug)	0	0,35
IJsselmeer winddominant: Locaties langs Noordoostpolder + Flevoland + deel Friesland + deel Houtribdijk	0	0,30
IJsselmeer meerpeildominant: locaties langs de kust van Noord-Holland + deel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

8.3.5 Markermeer (regio 8)

Regio 8 in Hydra-Ring omvat het Markermeer, IJmeer, IJburg, Gooimeer, Eemmeer, Nijkerkernauw en Eem. Modelonzekerheid in de lokale waterstand voor deze regio is beschreven in Chbab (2015b).

Bij het schatten van modelonzekerheid is het Markermeer opgesplitst in vijf deelgebieden. Deze indeling komt overeen met de indeling die al is toegepast voor het bepalen van waterstandsverlopen in Markermeergebied, zie Chbab (2012):

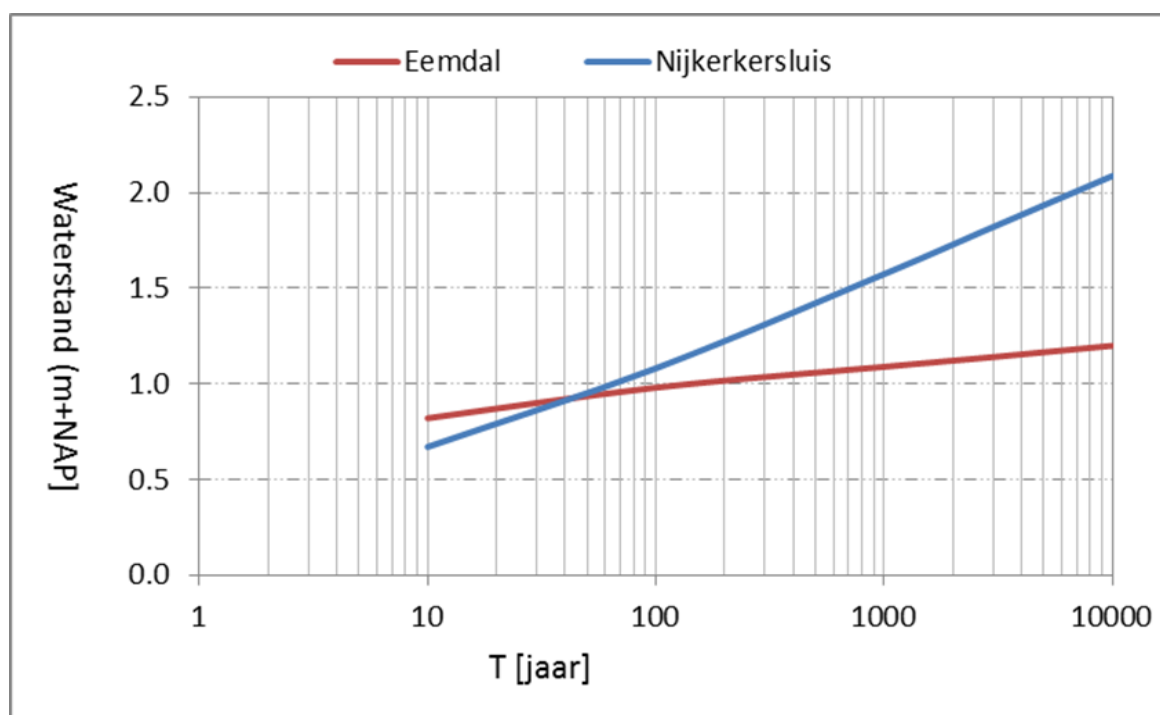
1. Het deelgebied waarbij extreem harde wind in combinatie met laag meerpeil bepalend is,
2. Het deelgebied waarbij hoog meerpeil en hoge windsnelheid bepalend zijn,
3. Het deelgebied waarbij extreem hoge meerpeilen de waterstanden bepalen en waarbij wind nauwelijks een rol speelt en
4. Zuidelijke Randmeren (Gooi- en Eemmeer)
5. Het deelgebied waar de wind, windopzet vanuit het Markermeer samen met afvoer van de Eem de maatgevende waterstanden bepalen.



Figuur 8.5 Modelonzekerheid (in de vorm van spreiding) voor de locaties langs het IJsselmeer (inclusief Ketelmeer en Vossemeer).

Het Markermeer is qua indeling in deelgebieden en onzekerheidsbronnen vergelijkbaar met het IJsselmeer. Wind (windstress, windvelden en transformatie naar open-water wind) is namelijk de belangrijkste onzekerheidsbron voor de brede wateren van het Markermeer. Vanwege o.a. ligging (achter de Hollandse brug), oriëntatie en lange strijklengtes gelden daarnaast de stormduur en winddraaiing als onzekerheidsbronnen voor de zuidelijke randmeren.

Voor het gebied van de Eem gelden dezelfde onzekerheidsbronnen als voor aangrenzende meren (Gooimeer, Eemmeer en Nijkerkernauw). Daarnaast draagt de Eemafvoer nog bij aan de totale modelonzekerheid. Echter, door de aanwezigheid van buitendijkse gebieden en lage kades (vooral ten oosten van de Eem) stijgt de waterstand in de Eem minder snel dan in aangrenzende meren. Figuur 8.6 illustreert voor twee locaties in de Eem en Nijkerkernauw het verschil van het verloop van de waterstand als functie van de herhalingstijd. Het verschil in decimeringshoogtes (helling in Figuur 8.6) voor de locaties van de Eem en de locaties in aangrenzende meren bedraagt ca. een factor 4. Voor de Eem geldt daarom een standaardafwijking die ongeveer een factor 4 kleiner is dan in aangrenzende meren, zie voor meer details (Deltares, 2017a).

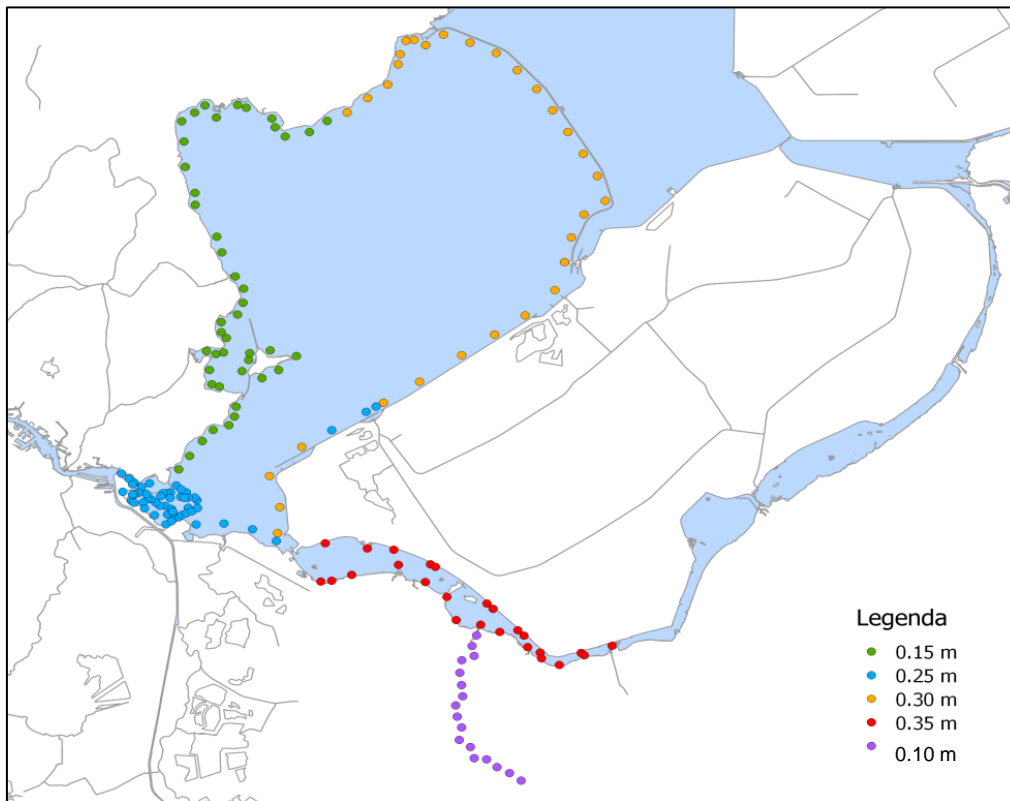


Figuur 8.6 Frequentielijnen locatie Eemdal in de Eem (rood) en locatie Nijkerkersluis in Nijkerkernauw.

De geschatte modelonzekerheid voor het Markermeer is weergegeven in Tabel 8.6. Figuur 8.7 toont de deelgebieden van het Markermeer inclusief bijbehorende schattingen voor modelonzekerheid.

Tabel 8.6 Modelonzekerheid deelgebieden van het Markermeer (regio 8).

Deelgebied	Bias [m]	Standaardafwijking [m]
Markermeer winddominant: locaties langs Flevoland en Gooimeer (deelgebied 1)	0	0,30
Markermeer wind en meerpeil bepalend: locaties langs IJburg (deelgebied 2)	0	0,25
Markermeer meerpeilgedomineerd: locaties langs kust van Noord-Holland (deelgebied 3)	0	0,15
Eemmeer en Nijkerkernauw (deelgebied 4)	0	0,35
Eem (deelgebied 5)	0	0,10



Figuur 8.7 Modelonzekerheid Locaties Markermeer.

8.3.6 Oosterschelde

Aan de waterstanden in de Oosterschelde liggen IMPLIC modelberekeningen ten grondslag. Ook bij de IMPLIC resultaten bestaat een mate van modelonzekerheid. Deze modelonzekerheid is niet overal gelijk, daarom heeft elk IMPLIC station een eigen waarde voor de standaarddeviatie (zie Tabel 8.7). De bias is voor alle IMPLIC stations gelijk aan nul gesteld; zie voor meer details (Deltares, 2015f). De IMPLIC stations in Tabel 8.7 worden gebruikt als steunpunten voor de triangulaire interpolatie (paragraaf 4.8) van de waterstanden inclusief onzekerheden. Dit interpolatieproces leidt tot waterstand met onzekerheid op elke willekeurige uitvoerlocatie.

Tabel 8.7 Modelonzekerheid waterstand op IMPLIC locaties.

IMPLIC station	X RD [m]	Y RD [m]	Standaarddeviatie [m]
Roompot Binnen (RPBI)	37187,7	403288,5	0,15
Burghsluis (BURG)	42682,4	410889,2	0,15
Wemeldinge (WEME)	60270,6	394085,3	0,15
Rattekaai (RALA)	73535,1	384166,6	0,20
Marollegat (MRG)	71654,3	388541,9	0,20
Stavenisse (STAV)	59063,0	402222,1	0,15
Philipsdam West (PW)	69456,7	410101,6	0,20
Colijnsplaat (CP)	50094,6	402677,5	0,15
Zeelandbrug Noord (ZN)	51777,4	405073,0	0,15

8.3.7 Overige watersystemen

Voor de overige watersystemen (Kust - harde keringen en Duinen) zijn geen modelberekeningen voor de waterstand aan de orde. Daarom zijn voor die watersystemen geen modelonzekerheden in de waterstand gedefinieerd.

8.4 Modelonzekerheid golfparameters

Modelonzekerheid is alleen voor de golfparameters hoogte en periode gekwantificeerd. De modelonzekerheid in de golfrichting is verwaarloosd.

Voor het schatten van modelonzekerheid in de golfparameters is onderscheid gemaakt in 5 hoofdsystemen. Deze opsplitsing is bepaald door het golfmodel dat is toegepast voor het bepalen van de golfparameters, zie hoofdstuk 5:

- Hoofdsysteem I omvat de kust, de Oosterschelde en het IJsselmeer met uitzondering van het Ketelmeer en het Vossemeer,
- Hoofdsysteem II omvat de bredere wateren van het rivierengebied. De bredere wateren bestaan uit:
 - Haringvliet, Hollandsch Diep, Biesbosch
 - Ketelmeer en Vossemeer,
 - Zwarte Meer (gedeelte),
 - Europoortgebied.
- Hoofdsysteem III omvat de smalle wateren in het rivierengebied. De smalle wateren bestaan uit:
 - Rijntakken,
 - Maas,
 - Benedenrivieren, met uitzondering van Haringvliet, Hollandsch Diep en Biesbosch
 - IJsseldelta, met uitzondering van het Ketelmeer en Vossemeer,
 - Vechtdelta, met uitzondering van het Zwarte Meer,
 - Eemvallei.
- Hoofdsysteem IV omvat IJburg.
- Hoofdsysteem V omvat Markermeer met uitzondering van IJburg en Eemvallei.

De bepaling van modelonzekerheid in de golfcondities 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 (2013c) zijn de modelonzekerheden bepaald voor SWAN in de kustgebieden en het IJsselmeer. In Deltares (2013b) en Deltares (2014b) is de SWAN modelonzekerheid bepaald voor typisch korte strijklengtes, zoals deze in de brede wateren van het rivierengebied en randmeren voorkomen. Hierbij is onder meer gebruik gemaakt van resultaten van hindcasts van een aantal recente stormen.

In Deltares (2015c) zijn schattingen van SWAN modelonzekerheid voor hoofdsysteem IV bepaald. Daarbij is gebruik gemaakt van reeds eerder uitgevoerde hindcaststudies en gevoeligheidsanalyses met een oudere SWAN versie (40.31). 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 schatting van de relatieve bias en relatieve standaard afwijking voor IJburg.

In Deltares (2015c) is ook de SWAN modelonzekerheid afgeleid voor die delen van het Markermeer waar HISWA is gebruikt (hoofdsysteem V). De resultaten van een drietal reeds

uitgevoerde studies zijn 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 de Bretschneider formule toegepast voor het bepalen van de golfparameters. De modelonzekerheden als gevolg van de toepassing van Bretschneider zijn in eerste instantie gekwantificeerd in (Deltares, 2015a) en een aanvullende studie van Rijkswaterstaat (RWS, 2015); de toegepaste onzekerheden zijn gebaseerd op laatstgenoemd rapport.

De modelonzekerheid in golfparameters voor bovengenoemde watersystemen is weergegeven in onderstaande Tabel 8.8.

Tabel 8.8 Modelonzekerheden significante golfhoogte H_{m0} en periodematen $T_{m-1,0}$ en T_p voor vijf 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, Oosterschelde, 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

Daar waar voor een periodemaat geen schattingen zijn gegeven, is in Hydra-Ring de onzekerheidswaarde van de andere periodemaat geïmplementeerd.

9 Probabilistische berekeningen

9.1 Probabilistisch model: Hydra-Ring

9.1.1 Inleiding

Hydra-Ring is het (nieuwe) probabilistisch instrumentarium dat gebruikt wordt voor de probabilistische berekeningen binnen WBI-2017. Hydra-Ring omvat alle watersystemen en vervangt daarmee de oude Hydra's. In tegenstelling tot Hydra-K, Hydra-Zoet en Hydra-NL, waar de probabilistische berekeningen met één rekentechniek zijn uitgevoerd (methode de Haan in Hydra-K en numerieke integratie in Hydra-Zoet en Hydra-NL) zijn in Hydra-Ring meerdere rekentechnieken als keuze-opties geïmplementeerd. Hoewel alle rekentechnieken in theorie tot dezelfde resultaten zouden moeten leiden heeft in veel gevallen één rekentechniek de voorkeur. Door het meenemen van kennisonzekerheden heeft het belastingmodel nu veel meer stochasten dan Hydra-Zoet. Dat maakt dat de rekentechniek "numerieke integratie" meestal geen aantrekkelijk alternatief is, omdat de rekentijd bij deze techniek exponentieel toeneemt met het aantal stochasten.

9.1.2 De grenstoestandsfunctie

De centrale bouwsteen van de rekenkern Hydra-Ring is de grenstoestandsfunctie. Deze functie beschrijft de kritieke situaties waarin de sterkte van de kering voor een gegeven toetspoot net genoeg is om weerstand te bieden aan de hydraulische belasting. Van 'falen' is sprake wanneer de kritieke situatie wordt overschreden, dus wanneer de belasting groter is dan de sterkte. De grenstoestandsfunctie kan zeer eenvoudig zijn, zoals voor overloop, maar ook zeer complex, zoals bij diverse geotechnische mechanismen.

9.1.3 Rekenen met kansverdelingen

De variabelen die voorkomen in de grenstoestandsfunctie hebben een bepaalde kansverdeling. Op basis van de kansverdelingen van de variabelen en het functievoorschrift van de grenstoestand, berekent Hydra-Ring de kans op gebeurtenissen waarbij de belasting de sterkte overschrijdt (de faalkans). De diverse variabelen die een rol spelen bij het al dan niet falen van de kering kunnen onderling gecorreleerd zijn. Dit maakt de faalkansberekening complex. Hydra-Ring houdt rekening met correlatie van *belasting*-variabelen (niet van *sterkte*-variabelen). Voor de belastingvariabelen van de diverse watersystemen zijn correlatiemodellen gedefinieerd en voorgeschreven, zie Paragraaf 6.7 van onderhavig rapport; meer details zijn te vinden in o.a. (Diermanse et al, 2016) en (Deltares, 2016k).

9.1.4 Berekeningen met Hydra-Ring

Hydra-Ring berekent de 'faalkans' in eerste instantie voor *een enkel element (dijkvak en faalmechanisme) op jaarbasis*. Hierbij hanteert Hydra-Ring een aparte rekentechniek voor het aspect 'betrouwbaarheid van een element' en een aparte rekentechniek voor het aspect 'op jaarbasis'. In het vervolg van dit hoofdstuk wordt de eerste rekentechniek simpelweg aangeduid als 'rekentechniek' en wordt de tweede rekentechniek aangeduid als

'tijdsintegratiemethode'. Naast deze twee aspecten bevat Hydra-Ring de functionaliteit om de faalkansen voor diverse dijkvakken én voor diverse faalmechanismen te combineren tot één gecombineerde faalkans, daarbij rekening houdend met correlaties en lengte-effecten. Deze combinatietechnieken worden in dit hoofdstuk achterwege gelaten. Voor uitgebreide toelichting, zie het Technical Reference Manual voor Hydra-Ring (Diermanse et al, 2016) en WBI overzichtsrapport over onzekerheden (Deltares, 2016k).

9.1.5 Rekentechnieken in Hydra-Ring

Voor het berekenen van de betrouwbaarheid van een enkel element (dijkvak en faalmechanisme) waarvan de grenstoestandsfunctie afhangt van meerdere variabelen zijn in Hydra-Ring diverse rekentechnieken geïmplementeerd, namelijk:

- First Order Reliability Methode, FORM;
- Monte Carlo Directional Sampling, DS;
- Crude Monte Carlo;
- Numerieke Integratie;
- Importance Sampling.

Omdat de methodes FORM en DS veruit de meest gebruikte methodes zijn, worden deze twee methodes kort toegelicht.

FORM is een wijdverbreide en algemene methode om de betrouwbaarheid van een element te berekenen. De methode is erop gebaseerd dat de zogenoemde grenstoestandsfunctie behorende bij een bepaald faalmechanisme wordt gelineariseerd in het ontwerp punt en dat eventuele niet-normaal verdeelde variabelen worden getransformeerd naar normaal verdeelde variabelen, het zogenoemde u-domein. Een uitgebreide beschrijving van FORM is te vinden in de Technical Reference Manual Hydra-Ring (Diermanse et al, 2016).

Directional Sampling is een methode uit de Monte Carlo familie (Ditlevsen & Bjerager, 1987). De methode komt ruwweg op het volgende neer. Bij een standaard (2D) Monte Carlo sampling bestaat elke trekking uit zowel een waarde voor stochast A als voor stochast B. De faalkans wordt geschat door de frequentie te bepalen waarmee deze trekkingen zich in het faalgebied bevinden. Bij Directional Sampling worden, in plaats van de stochasten A en B, waarden getrokken van de verhouding tussen A en B. Vervolgens wordt voor deze verhouding de afstand tot het faalgebied bepaald en deze afstand is bepalend voor de faalkans (gegeven de 'trekking' van de verhouding).

FORM heeft als voordeel dat het relatief weinig rekentijd vergt, maar het heeft als nadeel een beperkte robuustheid; de onderliggende iteratieve methode kan soms niet convergeren. Om het rekenproces van FORM te optimaliseren zijn er in Hydra-Ring verschillende methodes geïmplementeerd: de zogenoemde "startmethodes". Deze methodes zorgen voor een zo optimaal mogelijke zoekproces naar het ontwerp punt voor de linearisatie van de grenstoestandsfunctie. Afhankelijk van watersysteem en (bijdrage) belastingvariabelen kan het itereren bijvoorbeeld verricht worden in de richting van de snelle stochast (startmethode 8), trage stochast (startmethode 4) of combinaties van belastingvariabelen (startmethode 5 en 9). Meer achtergrondinformatie met betrekking tot startmethodes in Hydra-Ring zijn te vinden in (Diermanse et al, 2016) en (Deltares, 2017g). Daarnaast is in Hydra-Ring een combinatie van de rekentechnieken FORM en Directional Sampling geïmplementeerd: Indien een FORM berekening niet convergeert voor een specifieke locatie kan worden overgestapt op de robuuste rekentechniek Directional Sampling. Met deze methode wordt rekentijd

bespaard waar het kan (FORM) en extra rekentijd geïnvesteerd (Directional Sampling) waar het moet.

9.1.6 Tijdsintegratiemethodes in Hydra-Ring

Voor de betrouwbaarheid van een element zijn dus diverse methodes beschikbaar (FORM, DS, etc.). Voor het berekenen van een faalkans *op jaarbasis* is de kans nodig dat twee stochastwaarden gelijktijdig optreden. Voor deze kans is een tweede set van technieken beschikbaar. Hydra-Ring ondersteunt voor de opschaling naar een jaar drie verschillende methodes:

- het rekenschema van Ferry Borges en Castanheta: het FBC-schema,
- de techniek Numerieke Tijdsintegratie: het NTI-schema,
- de techniek Arbitrary Point in Time: het APT-schema.

Het FBC-schema is een iteratieve methode die gebruik maakt van duurlijnen (gemiddelde overschrijdingsduur van een bepaalde stochastwaarde): iteratief wordt gezocht naar de juiste blokduur (zie volgende paragraaf) voor een basisstochast. Het NTI-schema is geen iteratieve methode; in plaats daarvan, maakt het NTI-schema gebruik van de directe integratie van de blokform van de afvoergolf. Het APT-schema beschouwt de blokduur van een basisstochast als een afzonderlijke stochast die integraal wordt meegenomen in de rekenmethode voor de analyse van de betrouwbaarheid van een enkel element. Voor een uitgebreide toelichting op deze methodes wordt verwezen naar de Technical Reference Manual Hydra-Ring (Diermanse et al, 2016).

De statistiek van de basisstochasten is uitgebreid beschreven in hoofdstuk 7. Deze statistiek heeft betrekking op de extreme waardenstatistiek. Hydra-Ring combineert de extreme waardenstatistiek van de basisstochasten met een correlatiemodel dat de eventuele afhankelijkheid tussen de basisstochasten beschrijft. Het tijdsverloop van de variabelen, die ten grondslag liggen aan de basisstochasten, wordt in de productieberekeningen meegenomen (bijvoorbeeld de golfafvoervorm voor een piekafvoer). Echter, ook voor de correlatie tussen de basisstochasten speelt het tijdsverloop een belangrijke rol. Deze bepaalt namelijk de kans op samenvallen of gelijktijdig optreden van pieken.

9.1.7 Modelleringsverloop basisstochasten in Hydra-Ring

Hydra-Ring onderscheidt net als Hydra-Zoet³⁵ twee typen stochasten voor de belasting: trage en snelle stochasten. Deze karakterisering is van belang voor het bepalen van de kans op samenvallen van piekwaarden. Een trage stochast vertegenwoordigt een variabele die langzaam varieert in de tijd. Afvoer is een voorbeeld van een trage stochast. Een snelle stochast is een stochast die snel varieert in de tijd. Wind is hier een voorbeeld van.

De trage stochasten in Hydra-Ring zijn rivierafvoer en meerpeil; concreet betreft het de volgende basisstochasten:

- Afvoer van de Rijn bij Lobith

³⁵ In tegenstelling tot Hydra-zoet speelt in Hydra-K het tijdsverloop van de basisstochasten geen rol.

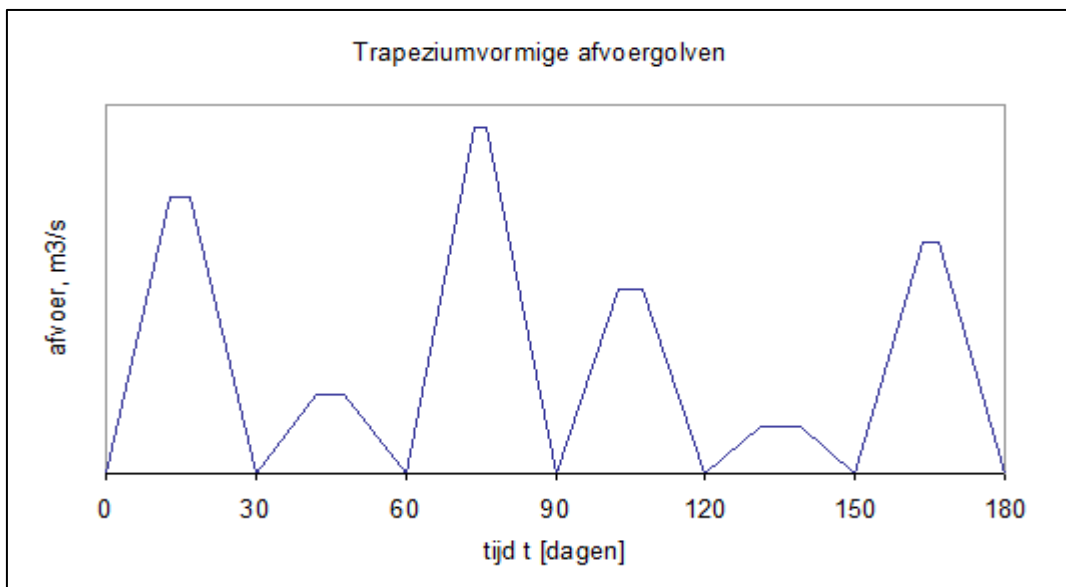
- Afvoer van de IJssel bij Olst
- Afvoer van de Maas bij Borgharen
- Afvoer van de Maas bij Lith
- Afvoer van de Vecht bij Dalfsen
- Meerpeil IJsselmeer
- Meerpeil Markermeer

De snelle stochasten in Hydra-Ring zijn:

- Zeewaterstand (op de stations zoals genoemd in Bijlage A)
- Windsnelheid (op de stations zoals genoemd in Bijlage A)

Afhankelijk van de keuze voor de tijdsintegratiemethode, wordt het tijdsverloop van een trage stochast in Hydra-Ring gemodelleerd door middel van een trapezium of door een FBC model. De modellering in Hydra-Ring van het tijdsverloop van de trage stochasten door trapezia is onveranderd ten opzichte van Hydra-Zoet, zie Geerse (2006). Een trapezium heeft in Hydra-Ring een basisduur B en topduur b . Figuur 9.1 geeft een illustratie van een trapeziummodel, voor afvoer in dit geval. Een gedetailleerde beschrijving is te vinden in Diermanse et al (2016).

Voor de meeste trage stochasten bedraagt de basisduur B van het trapezium 30 dagen. Alleen voor het Markermeerpeil geldt een trapezium van 60 dagen in de basis. In een winterhalfjaar zijn er 6 afvoer- en meerpeiltrapezia van 30 dagen. Voor het Markermeerpeil gelden er 3 trapezia van 60 dagen. De topduur hangt af van de betreffende basisstochast. Tabel 9.1 toont de gehanteerde basisduren en topduren van de trage stochasten in Hydra-Ring.

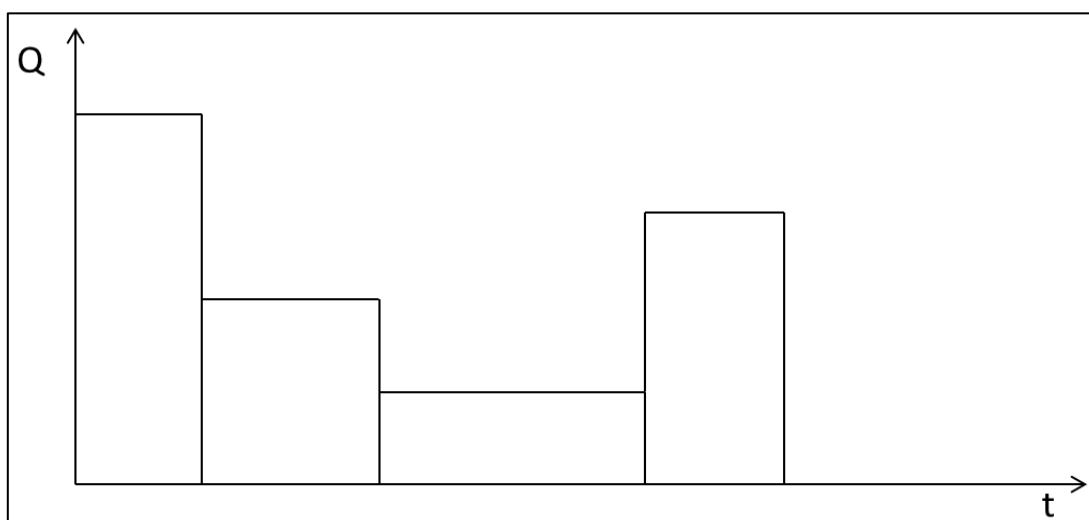


Figuur 9.1 Modellering afvoeren door trapezia, basisduur 30 dagen.

Tabel 9.1 Basisduur en topduur trage stochasten in Hydra-Ring

Basisstochast	Basisduur [dagen]	Topduur [dagen]
Afvoer Rijn bij Lobith	30	0,5
Afvoer IJssel bij Olst	30	1,0
Afvoer Maas bij Borgharen	30	0,5
Afvoer Maas bij Lith	30	0,5
Afvoer Vecht bij Dalfsen	30	2,0
IJsselmeerpeil	30	4,0
Markermeerpeil	60	4,0

Naast modellering door trapezia is in Hydra-Ring het FBC model geïmplementeerd. Een FBC model voor de afvoer bestaat uit onafhankelijke afvoerblokken zoals geïllustreerd in Figuur 9.2. Binnen elk blok is de afvoer constant; de duur van de blok hangt af van de hoogte, zie voor details Diermanse et al (2016).



Figuur 9.2 Schematische afbeelding FBC voor afvoeren.

De snelle stochasten zijn in Hydra-Ring net als in Hydra-Zoet gemodelleerd door onafhankelijke FBC blokken van 12 uur. De blokduur is constant en hangt niet af van de hoogte van een realisatie van de betreffende stochast.

Het tijdsverloop speelt geen rol in de belastingmodellen voor de kustgebieden. De stochasten voor die gebieden zijn in Hydra-Ring net als in Hydra-K gekoppeld aan het maximum van de waterstand.

9.2 Bepaling van rekeninstellingen voor Hydra-Ring

9.2.1 Werkwijze

Zoals in de vorige paragraaf is aangegeven is er een palet aan rekentechnieken en tijdsintegratiemethoden beschikbaar in Hydra-Ring. Voor alle regio's zijn de optimale combinatie van rekentechnieken en tijdsintegratiemethoden bepaald. Daarbij zijn de volgende criteria gehanteerd: 1) er moet een rekenresultaat uit de berekening volgen (convergentie); 2) het resultaat moet voldoende nauwkeurig zijn en 3) de berekening moet binnen redelijke tijd gereed zijn.

Recente verbeteringen aan de Hydra-Ring code hebben er voor gezorgd dat berekeningen van waterstand, golfhoogte, hydraulische belastingniveau (HBN) en golfcondities voor bekledingen binnen acceptabele tijd gereed zijn (criterium 3). Nadat Hydra-Ring met bijbehorende databases en instellingen werd opgeleverd, is gecontroleerd of op alle locaties een resultaat gevonden kon worden. Locaties waarvoor dat om enige reden niet het geval bleek zijn verwijderd (criterium 1). In deze paragraaf richten we ons op de betrouwbaarheid van Hydra-Ring (criterium 2). Voor details wordt verwezen naar Deltares (2017g).

Voor het bepalen van de beste rekeninstellingen voor Hydra-Ring zijn de rekenresultaten van berekeningen met een set aan instellingen vergeleken met de resultaten uit Hydra-NL. Deze vergelijking heeft plaats gevonden voor een selectie van representatieve locaties per watersysteem (zie Figuur 9.3) en omvat berekeningen voor waterstand, golfhoogte en HBN. De verschillen tussen Hydra-Ring en Hydra-NL moeten beperkt dan wel verklaarbaar zijn. De afleiding van rekeninstellingen en de vergelijking van rekenresultaten verkregen met Hydra-Ring en Hydra-NL per watersysteem is uitgebreid beschreven in Deltares (2017g). Hier beperken we ons tot de aanbevolen rekentechnieken met een korte argumentatie waarom deze gekozen zijn.



Figuur 9.3 Selectie van testlocaties over alle watersystemen

9.2.2 Bovenrivieren: Rijntakken en Maas

Omdat er enerzijds veel locaties langs de rivieren zijn waar pas bij hoge afvoerdebieten water komt te staan of kades onderlopen en FDIR-FBC potentieel tot minder betrouwbare resultaten kan leiden en anderzijds de berekening met DSFI-FBC langs de rivieren nog relatief goedkoop zijn ten opzichte van bijvoorbeeld IJssel-Vechtdelta en Benedenrivieren,

adviseren we om DSFI-FBC als rekentechniek voor zowel waterstand als HBN als de golfhoogte te gebruiken.

Op alle testlocaties gaf deze rekeninstelling het meest betrouwbare antwoord. De verschillen tussen met Hydra-NL en Hydra-Ring berekende waterstand en golfhoogte zijn veelal kleiner dan 10 cm, voor HBN veelal kleiner dan 15 cm. Uitzondering vormen de Bypass van Veessen-Wapenveld, waar droogval optreedt voor lage afvoerdebieten op de IJssel en voor enkele locaties achter de Maaswerken, en locaties langs de IJssel en Lek die ook pas vanaf een zeker afvoerdebit onderlopen. Hydra-NL en Hydra-Ring gaan over het algemeen iets anders om met de situatie van droogval. Voor hogere afvoerdebieten nemen de verschillen weer snel af tot minder dan een dm.

9.2.3 Benedenrivieren

In het afvoergebied (zie Figuur 8.3) zijn de verschillen tussen de rekentechnieken DSFI-NTI en FDIR-NTI zijn klein. DSFI-NTI geeft waterstanden die nauwelijks verschillen van de waterstanden berekend met Hydra-NL liggen. Het snellere alternatief FDIR-NTI geeft vergelijkbare resultaten met kleine, acceptabele verschillen t.o.v. DSFI-NTI. Omwille van de rekentijd wordt voor FDIR-NTI gekozen voor het Rijndominante gebied (Lek, Waal). Voor de Bergsche Maas geeft DSFI-NTI in een aantal gevallen toch significant betere resultaten, daarom wordt daar deze techniek gehanteerd. Voor HBN en golfhoogte geldt hetzelfde. Enkel FORM is niet altijd stabiel, daarom is FDIR respectievelijk DSFI noodzakelijk.

In het faalkansgebied (zie Figuur 8.3) is voor herhalingstijden tussen 100 en 1000 jaar de kering gesloten (voor zeer korte herhalingstijden van minder dan 10 jaar is de kering uiteraard weer open maar dit zijn niet de relevante situaties voor de HR). Voor lange herhalingstijden van orde 10,000 jaar is de maatgevende situatie die van falen van de kering. Met open kering is de decimeringshoogte groter dan met gesloten kering. De overschrijdingsfrequentiecurve voor de waterstand zal hierdoor een knik vertonen. Datzelfde effect wordt veroorzaakt door onderlopende kades. Door deze sprongen en knikken in de grenstoestandsfunctie kunnen rekentechnieken die werken op basis van linearisatie (bijvoorbeeld FORM) minder goed een oplossing vinden. Daarom wordt in dit gebied ingezet op DSFI. Omdat de trage stochast afvoer hier een kleine rol speelt, kan worden volstaan met FBC als tijntegratiemethode. Datzelfde geldt ook voor het HBN en de golfhoogte. De verschillen tussen Hydra-Ring en Hydra-NL zijn klein.

De maatgevende situatie in het bergingsgebied (zie Figuur 8.3) is een middelbare afvoer van 6.000 à 10.000 m³/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. Omdat wind (snelle stochast) en afvoer (trage stochast) beide dominant zijn, is NTI noodzakelijk voor de bepaling van waterstand. De FORM resultaten verschillen nauwelijks van DSFI en niet van FDIR. Om de kans op onregelmatigheden bij locaties buiten de hier beschouwde testset te verkleinen wordt toch gekozen voor FDIR-NTI. Voor HBN en golfhoogte verschillen de FDIR en DSFI resultaten weinig. FORM lijkt met name voor HBN dikwijls niet te convergeren. Daarom wordt voor FDIR-NTI gekozen. Ook hier zijn de verschillen tussen Hydra-NL en Hydra-Ring met FDIR-NTI klein.

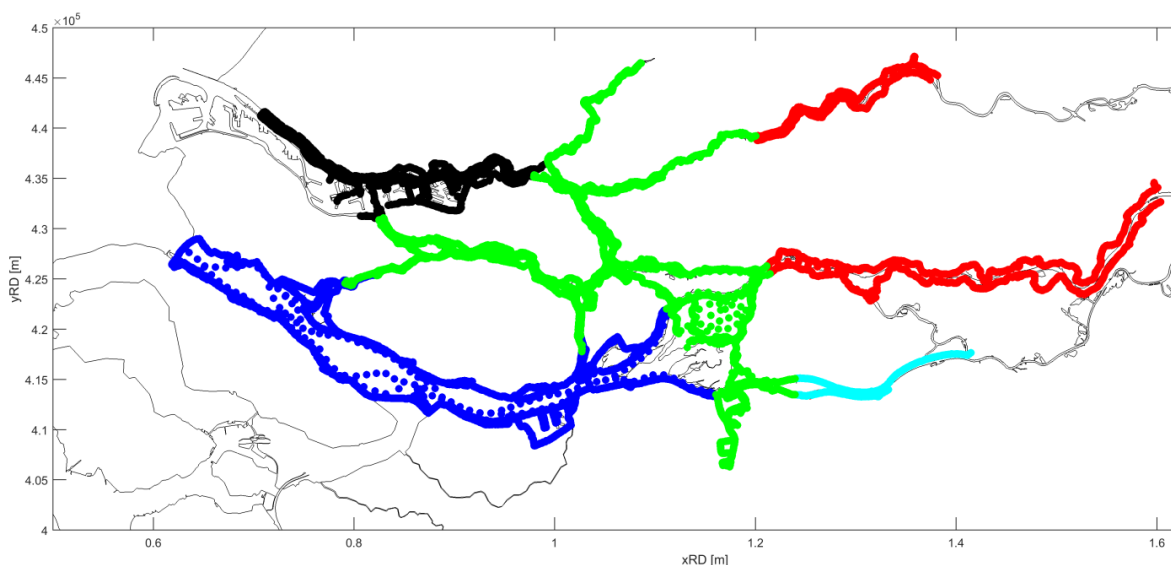
In het overgangsgebied hebben we een duidelijke overgang van afvoergedomineerd naar wind/faalkans gedomineerd bij toenemende herhalingstijd. Dat maakt het noodzakelijk om

NTI toe te passen voor alle belastingparameters. Door de gemengde dominantie is er mogelijk sprake van meerdere illustratiepunten. FORM komt hier niet goed uit. Voor alle drie belastingparameters adviseren we FDIR-NTI, zodat wanneer nodig wordt overgeschakeld op Directional Sampling.

In Tabel 9.2 wordt het advies voor het Benedenrivieren gebied samengevat. In Figuur 9.4 worden de verschillende gebieden weergegeven.

Tabel 9.2 Overzicht aanbevolen Hydra-Ring instellingen voor BER.

System	Deel van systeem	Waterstand	HBN	Golfhoogte
BER (3, 4)	Afvoergedomineerd (Lek, Waal)	FDIR-NTI	FDIR-NTI	FDIR-NTI
	Afvoergedomineerd (Bergsche Maas)	DSFI-NTI	DSFI-NTI	DSFI-NTI
	Faalkansgedomineerd	DSFI-FBC	DSFI-FBC	DSFI-FBC
BER (3, 4)	Bergingsgebied	FDIR-NTI	FDIR-NTI	FDIR-NTI
	Overgangsgebied	FDIR-NTI	FDIR-NTI	FDIR-NTI



Figuur 9.4 Ruimtelijk overzicht van verschillende instellingen uit Tabel 9.2 in het Bergingsgebied (blauw), Overgangsgebied (groen), Faalkansgedomineerd gebied (zwart), Afvoergedomineerd deel van de Bergsche Maas (lichtblauw) en Afvoergedomineerd delen van de Waal en Lek (rood). In de figuur is ook de overlap tussen de watersystemen meegenomen, in de praktijk ligt een deel van de weergegeven punten in de Bovenrijn.

9.2.4 Meren

Zowel in het IJsselmeer als het Markermeer wordt onderscheid gemaakt tussen meerpeil-gedomineerde locaties en wind-gedomineerde locaties. Als vuistregel geldt dat hoe verder weg gelegen bij het zwaartepunt van het meer, hoe groter de dominantie van de wind ten opzichte van het meerpeil.

Voor wind-gedomineerde locaties is de waterstand berekend door Hydra-Ring met FDIR-FBC ongeveer 1-2 dm lager dan die berekend door Hydra-NL, zowel met als zonder onzekerheden. Wanneer FORM-NTI wordt gebruikt dan verdwijnen de verschillen, met

uitzondering van de lage herhalingstijden. Omdat voor deze locaties zowel de snelle stochast wind als de trage stochast meerpeil van belang zijn, leidt de tijdsintegratiemethode NTI tot een betrouwbaarder resultaat. De onderschatting van de Hydra-NL resultaten met onzekerheden bij lage herhalingstijden worden wellicht veroorzaakt door de verschillende wijze waarop met modelonzekerheden wordt omgegaan. In Hydra-Ring worden deze volledig gecorreleerd verondersteld in de tijd. Waarom verschillen ook bij berekeningen zonder onzekerheden optreden is onduidelijk. Omdat het om herhalingstijden tot 100 jaar gaat is niet verder onderzocht wat de verschillen heeft kunnen veroorzaken.

De golfhoogtes berekend door Hydra-Ring met FDIR-FBC verschillen minder dan 10 cm met de golfhoogtes berekend door Hydra-NL op alle locaties.

Voor HBN zien we het omgekeerde beeld als voor waterstanden. Voor wind-gedomineerde locaties speelt het meerpeil geen rol. Dat maakt dat de duurdere techniek NTI niet noodzakelijk is. De Hydra-Ring HBN resultaten met FDIR-FBC en Hydra-NL resultaten verschillen minder dan 20 cm. Als voor de waterstand onderschat Hydra-Ring op een aantal locaties het HBN berekend door Hydra-NL voor de lage herhalingstijden.

Op de meerpeil-gedomineerde locaties zorgt het meerpeil voor een hoge waterstand en wind voor hoge golven. Omdat beide stochasten een rol spelen dient voor HBN berekeningen op deze locaties NTI te worden gebruikt. De verschillen met Hydra-NL zijn minder dan 20 cm.

Voor het merengebied blijkt de keuze van de startmethode voor de FORM of FDIR rekentechniek van belang. Bij een dominante trage stochast hanteren we startmethode 4; is de snelle stochast dominant dan hanteren we startmethode 8. Als voor de bepaling van de hydraulische belasting zowel een trage als een snelle stochast relevant zijn, dan moet daar in de tijdintegratie rekening mee worden gehouden en moet niet FBC maar NTI worden gekozen.

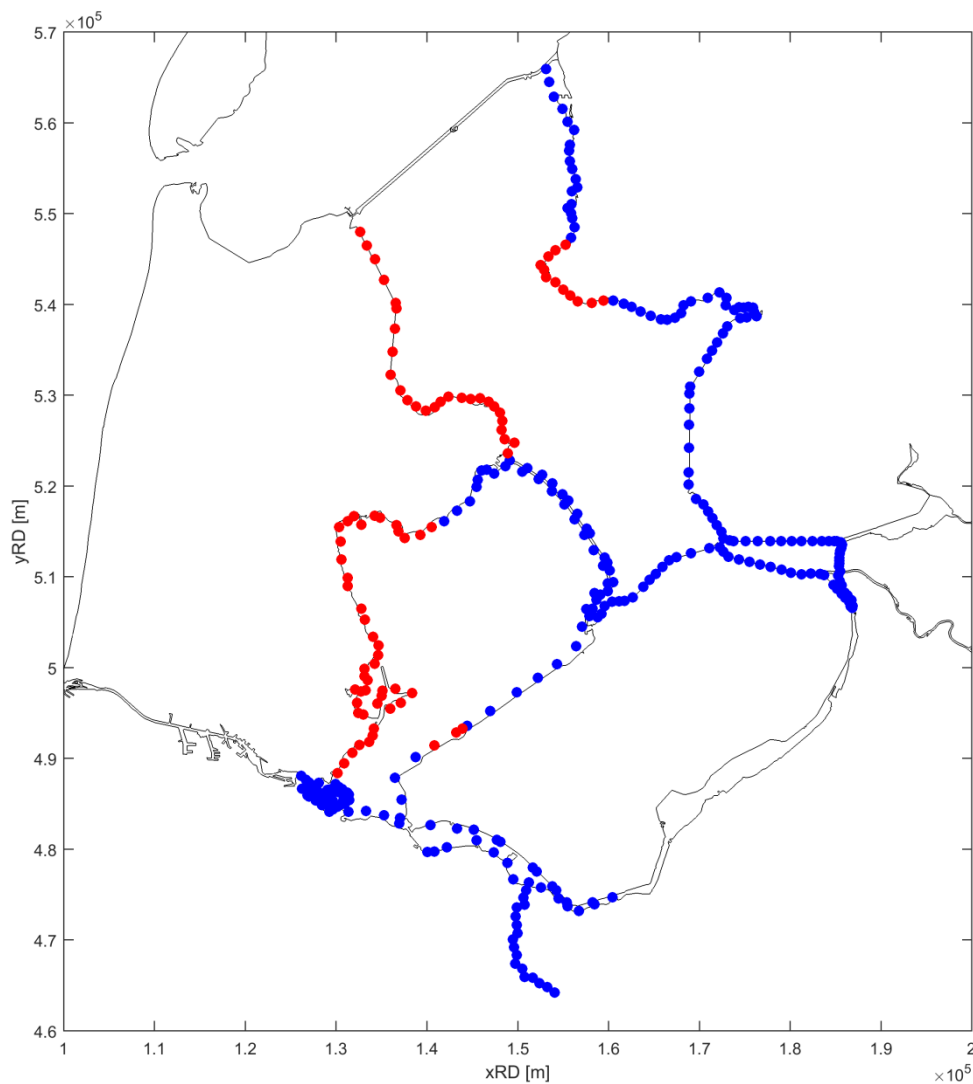
Dat leidt tot het volgende advies:

- Waterstand
 - Voor meerpeil-gedomineerde locaties: FDIR4 – FBC (wind speelt geen rol)
 - Voor wind-gedomineerde locaties: FORM8 – NTI (naast wind speelt ook meerpeil nog een belangrijke rol)
- HBN:
 - Voor meerpeil-gedomineerde locaties: FORM4 – NTI (ook wind nodig om golven te krijgen)
 - Voor wind-gedomineerde locatie: FDIR8 – FBC (meerpeil speelt geen rol)
- Golfhoogte: FDIR8 – FBC

In Tabel 9.3 zijn de instellingen samengevat. De ruimtelijke verdeling van de twee in deze tabel genoemde deelsystemen is weergegeven in Figuur 9.5.

Tabel 9.3 Overzicht aanbevolen Hydra-Ring instellingen voor het Merengebied

Systeem	Deel van systeem	Waterstand	HBN	Golfhoogte
Meren (7, 8)	Wind-gedomineerd	FORM8-NTI	FDIR8-FBC	FDIR8-FBC
	Meerpeil-gedomineerd	FDIR4-FBC	FORM4-NTI	FDIR4-FBC



Figuur 9.5 Ruimtelijk overzicht van wind-gedomineerde (blauw) en meerpeil-gedomineerde (rood) locaties.

Voor zowel het Markermeer als het IJsselmeer convergeert de Hydra-Ring berekening van HBN met FORM-NTI niet voor alle locaties voor alle herhalingstijden. Het gebruik van NTI is hier noodzakelijk, maar in combinatie met Directional Sampling kan dit tot zeer lange rekestijden leiden. Voor de meerpeil-gedomineerde locaties zijn er voor de HBN berekening drie opties:

- Accepteren van "geen resultaat" (Hydra-Ring geeft melding) bij toepassing van FORM-NTI
- Accepteren van een onnauwkeurig resultaat (fout kan oplopen tot enkele dm's), bij toepassing FDIR-FBC
- Geen HBN berekeningen uitvoeren

Wij adviseren hier te accepteren dat op een aantal locaties geen convergentie optreedt en raden aan in die gevallen de HB van een naastgelegen locatie te gebruiken.

9.2.5 IJssel- en Vechtdelta

Net als voor de meren moeten we ook in de IJssel- en Vechtdelta in principe startmethode 4 kiezen als de afvoer (trage stochast) dominant wordt. Omdat de duurlijnen van de afvoer korter zijn dan die van met name het Markermeerpeil, hoeft geen onderscheid gemaakt te worden tussen methode 4 of 8 als startmethode. We zullen hier de keuze voor een rekentechniek laten afhangen van consistentie tussen en binnen de watersystemen.

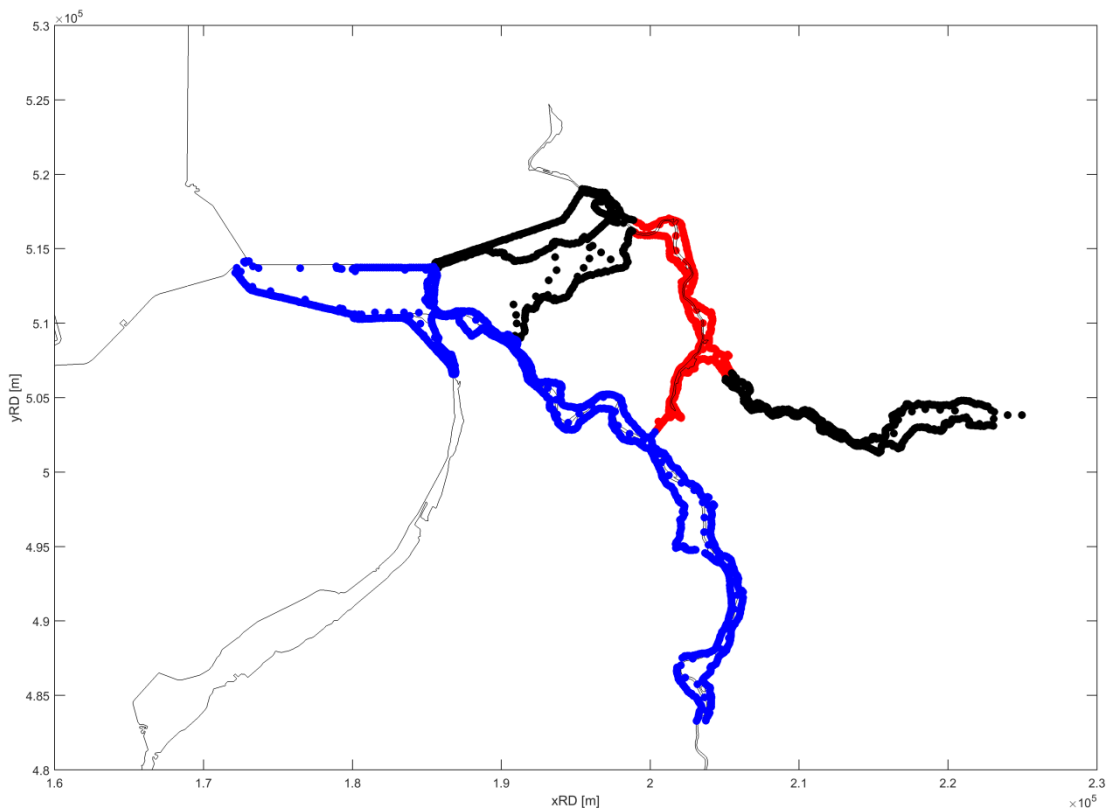
In de IJsseldelta is het benedenstroomse deel wind-gedomineerd en wordt voor de berekening van alle belastingparameters geadviseerd FDIR8-FBC te gebruiken. De bovenstroomse locaties zijn afvoer-gedomineerd en daar speelt de wind nauwelijks een rol. Ook daar adviseren we FDIR-FBC te gebruiken en vanuit consistentie-overwegingen met het benedenstroomse deel de startmethode 8.

Ook in de Vechtdelta adviseren we om vanuit consistentie-overwegingen voor waterstand, golfhoogte en HBN dezelfde rekentechniek te hanteren. Net als voor het IJsselmeer bevelen we aan om FDIR4-FBC voor het Zwarte Meer te hanteren. Omdat golven aanmerkelijk kleiner zijn dan op het IJsselmeer en Markermeer en daardoor de wind een minder grote rol speelt voor HBN, is het niet nodig NTI te hanteren. De combinatie met FORM is ook geen gelukkige op de vele droogvallende locaties. Ook op de afvoer-gedomineerde Vecht bevelen we FDIR-FBC aan. Daar kiezen we de startmethode 4, consistent met het Zwarte Meer. Tenslotte zijn we genoodzaakt om in het overgangsgebied van het Zwarte Water de dure combinatie van DSFI-FBC te adviseren, vanwege de overgang van meerpeil-gedomineerd bij korte herhalingstijden naar wind-gedomineerd bij lange herhalingstijden. Hydra-Ring voorziet nog niet in een goede startmethode om terug te kunnen vallen op FDIR voor dergelijke omstandigheden.

In Tabel 9.4 zijn de aanbevolen instellingen samengevat. De ruimtelijke verdeling van de drie in deze tabel genoemde deelsystemen is weergegeven in Figuur 9.6.

Tabel 9.4 Overzicht aanbevolen Hydra-Ring instellingen voor IJVD

System	Deel van systeem	Waterstand	HBN	Golfhoogte
IJVD (5, 6)	IJsseldelta	FDIR8-FBC	FDIR8-FBC	FDIR8-FBC
	Zwarte Meer, Vecht	FDIR4-FBC	FDIR4-FBC	FDIR4-FBC
	Zwarte Water	DSFI-FBC	DSFI-FBC	DSFI-FBC



Figuur 9.6 Ruimtelijk overzicht van verschillende instellingen uit Tabel 9.4 in de IJsseldelta (blauw), Zwarte Water (rood) en Zwarte Meer en Vecht (zwart). In de figuur is ook de overlap tussen de watersystemen meegenomen, in de praktijk ligt een deel van de weergegeven punten in de Bovenrij danwel het IJsselmeer.

9.2.6 Kust

De kust wordt bedreigd door de wind en getij en is daarmee een relatief eenvoudig systeem. Wind en zeewaterstand zijn beiden snelle stochasten. Daarnaast bevat dit systeem, met uitzondering van de Oosterschelde, geen stormvloedkeringen of andere maatregelen, die leiden tot onregelmatige grenstoestandfuncties. Dat maakt dat voor de bepaling van waterstand, golfhoogte en HBN de snelle rekentechniek FDIR4-FBC gebruikt kan worden in de watersystemen Waddenzee, Hollandse Kust, Westerschelde en Europoort. Voor de Oosterschelde krijgen we betrouwbare resultaten met de 'duurdere' rekentechniek DSFI en wordt daarom geadviseerd de combinatie DSFI-FBC te gebruiken.

Voor alle belastingparameters zijn de verschillen tussen Hydra-NL en Hydra-Ring met deze instelling acceptabel klein.

9.2.7 Hydraulische Belastingen voor bekledingen

Voor de semi-probabilistische beoordeling op vakniveau van bekledingen zijn golfcondities bij een aantal waterstanden benodigd. Deze worden berekend met Hydra-Ring met behulp van de zogenaamde Q-variant. In Deltares (2017g) is beschreven hoe de Q-Variant in Hydra-Ring

presteert en hoe zich dat verhoudt tot de resultaten verkregen met Hydra-NL. Dit is gedaan door een drietal locaties per watersysteem te beschouwen.

Voor de Q-variant in Hydra-Ring dient Directional Sampling toegepast te worden. Dit maakt dat de berekeningen relatief lang duren ten opzichte van berekeningen waar FORM of FDIR als rekentechniek volstaat.

Uit de analyses blijkt dat de resultaten van de Q-Variant berekeningen voor Hydra-Ring goed overeen komen met de Hydra-NL resultaten. Dit geeft vertrouwen in de Q-Variant in Hydra-Ring. Eventuele verschillen kunnen ontstaan door verschillen in karakteristieken van probabilistische rekentechnieken.

9.2.8 Samenvatting

In voorgaande paragrafen zijn rekeninstellingen bepaald voor berekeningen met Hydra-Ring van waterstand, golfhoogte, HBN en golfcondities voor bekledingen. In onderstaande tabel zijn de adviezen voor alle deelsystemen samengevat.

Tabel 9.5 Rekentechnieken en tijdsintegratiemethoden voor gebruik in Hydra-Ring per watersysteem

Systeem	Deel van systeem	Waterstand	HBN	Golfhoogte
BOR (1, 2, 18)	Alle locaties	DSFI-FBC	DSFI-FBC	DSFI-FBC
BER (3, 4)	Afvoer gedomineerd (Lek, Waal)	FDIR4-NTI	FDIR4-NTI	FDIR4-NTI
	Afvoer gedomineerd (Bergsche Maas)	DSFI-NTI	DSFI-NTI	DSFI-NTI
	Faalkansgedomineerd	DSFI-FBC	DSFI-FBC	DSFI-FBC
	Bergingsgebied	FDIR4-NTI	FDIR4-NTI	FDIR4-NTI
	Overgangsgebied	FDIR4-NTI	FDIR4-NTI	FDIR4-NTI
IJVD (5, 6)	IJsseldelta	FDIR8-FBC	FDIR8-FBC	FDIR8-FBC
	Zwarte Meer, Vecht	FDIR4-FBC	FDIR4-FBC	FDIR4-FBC
	Zwarte Water	DSFI-FBC	DSFI-FBC	DSFI-FBC
Kust (9-15, 17)	Oosterschelde	DSFI-FBC	DSFI-FBC	DSFI-FBC
	Waddenzee, Westerschelde, Hollandse Kust, Europoort	FDIR4-FBC	FDIR4-FBC	FDIR4-FBC
Meren (7, 8)	Wind-gedomineerd	FORM8-NTI	FDIR8-FBC	FDIR8-FBC
	Meerpeil-gedomineerd	FDIR4-FBC	FORM4-NTI	FDIR4-FBC

Voor golfcondities op bekledingen adviseren we Directional Sampling in combinatie met FBC te gebruiken.

10 Waterstandsverlopen

10.1 Inleiding

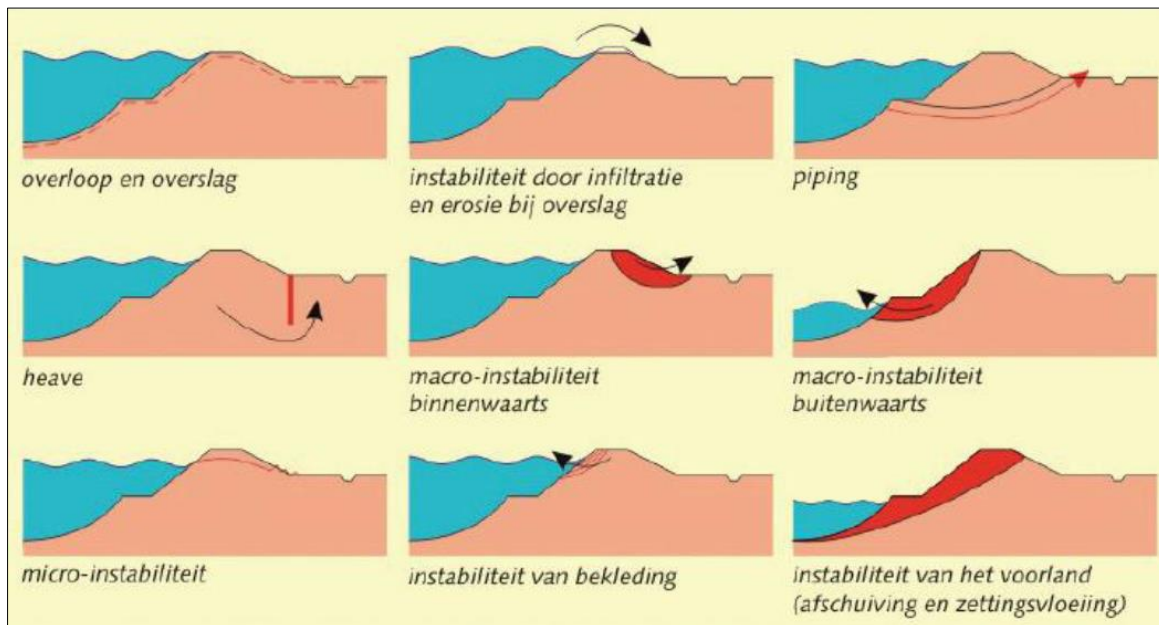
De Hydraulische Belastingen zoals beschreven in Hoofdstuk 9 zijn met uitzondering van de golfparameters voor bekledingen feitelijk alleen geschikt voor het beoordelen van waterkeringen op het faalmechanisme overloop en overslag (hoogte). De duur van de belasting speelt bij dit faalmechanisme geen of een ondergeschikte rol. Bij het beoordelen van waterkeringen op geotechnische-faalmechanismen waarbij langdurige aanhoudende hoge waterstanden bedreigend zijn, wordt gebruik gemaakt van waterstandsverlopen. Het gaat specifiek om geotechnische faalmechanismen, zoals microstabiliteit, macrostabiliteit en piping. Bij de beoordeling van duinen, bekledingen en kunstwerken worden toetsspoor-specifieke duren en verlopen aangenomen, zie de schematiseringshandleidingen voor die sporen. Een waterstandsverloop geeft voor een locatie de tijdsafhankelijke waterstand tijdens het passeren van een storm of hoogwatergolf (of combinatie van beiden). De top van deze waterstand is gelijk aan de waterstand behorende bij de normfrequentie.

In WBI-2017 zijn waterstandsverlopen afgeleid of geactualiseerd voor alle watersystemen. Uitzondering hierop vormt de Oosterschelde. Vanwege afwijkende tijdsverlopen als gevolg van sluitingen door de Oosterscheldekering, is nog geen methode beschikbaar voor het bepalen van de waterstandsverlopen voor dit watersysteem. Daarnaast is een Tool ontwikkeld om voor elke willekeurige locatie het waterstandsverloop behorende bij de waterstand bij de normfrequentie te visualiseren en exporteren.

In dit hoofdstuk worden de afgeleide/geactualiseerde waterstandsverlopen behandeld. Paragraaf 10.2 behandelt het toepassingsgebied van waterstandsverlopen. In Paragraaf 10.3 komen aan de orde de waterstandsverlopen voor achtereenvolgens: het Bovenrivierengebied, het Benedenrivierengebied, de Vecht- en IJsseldelta, de meren en het kustgebieden. Paragraaf 10.4 behandelt de waterstandsverlooptool. Details met betrekking tot de methode en afleiding van waterstandsverlopen zijn te vinden in verschillende rapporten: Chbab en Stuparu (2016), Chbab (2015c), Chbab (2015d) en Deltares (2016j).

10.2 Toepassingsgebied waterstandsverlopen

In de Voorschriften bepaling sterkte en veiligheid primaire waterkeringen (*Bijlage III Sterkte en Veiligheid*) komen diverse geotechnische faalmechanismen voor die bedoeld zijn om de stabiliteit van dijken te beoordelen. Figuur 10.1 illustreert de belangrijkste faalmechanismen.



Figuur 10.1 Faalmechanismen uit Bijlage III Sterkte en Veiligheid.

De waterstandsverlopen in dit hoofdstuk mogen voor de beoordeling worden toegepast voor de volgende faalmechanismen:

- Instabiliteit door infiltratie en erosie bij overslag
- Piping en Heave,
- Macro-instabiliteit binnenwaarts,
- Micro-instabiliteit binnentalud
- Kombergend vermogen bij kunstwerken

De waterstandsverlopen uit dit rapport zijn niet geschikt voor het beoordelen van:

- Overloop en overslag
- Macro-instabiliteit buitenwaarts,
- Instabiliteit van bekleding,
- Instabiliteit van het voorland.

10.3 Waterstandsverlopen

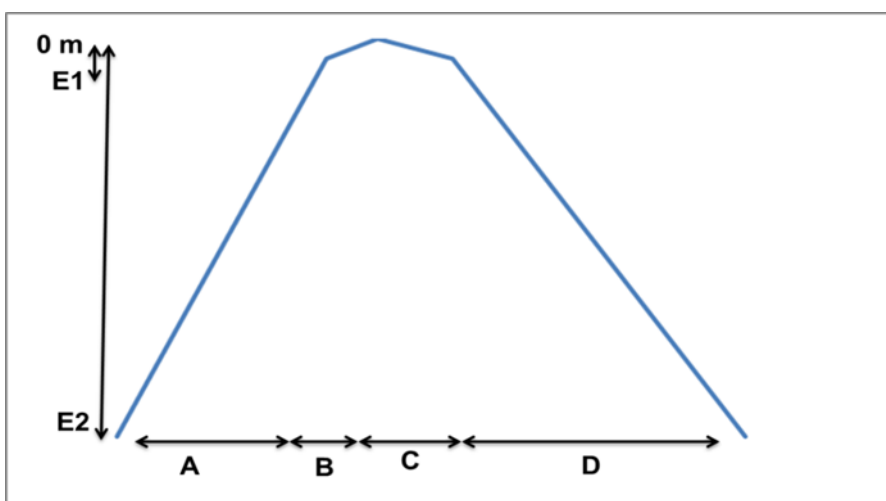
10.3.1 Bovenrivieren: Rijntakken en Maas

Voor het gebied van de Rijntakken en de Maas (regio 1, 2 en 18) zijn in het WBI-2017 nieuwe waterstandsverlopen afgeleid. Deze zijn gebaseerd op de resultaten van een deel van de productieberekeningen zoals beschreven in Paragraaf 4.2 en 4.3. De productieberekeningen zijn op hun beurt gebaseerd op de gemiddelde golfvormen van de Rijn bij Lobith en van de Maas bij Borgharen die uit GRADE volgen. Onzekerheden in de afvoergolfvorm zijn niet beschouwd in de productieberekeningen en bijgevolg ook niet bij het afleiden van de waterstandsverlopen. Onzekerheden (model- en statistische onzekerheid) zijn achteraf en enkel in de piekwaarde van de waterstand bij de normfrequentie verdisconteerd. De afgeleide waterstandsverlopen worden namelijk aan deze piekwaardes gekoppeld. De waterstandsverlopen voor de Rijntakken en de Maas zijn uitgebreid beschreven in Chbab (2015d).

Bij het afleiden van de waterstandsverlopen voor het gebied van de Rijntakken en Maas zijn de volgende uitgangspunten en criteria gebruikt:

- Waterstandsverlopen zijn benaderd door standaard trapezia; deze aanpak is consistent met de wijze waarop stormopzettingen langs de kust zijn geschematiseerd, ook is deze aanpak consistent met de wijze waarop afvoergolfvormen en meerpeilen (trage stochasten) zijn geschematiseerd in Hydra-Ring,
- Waar nodig en mogelijk zijn de Rijntakken en de Maas ingedeeld in deelgebieden; voor elk deelgebied is één standaard trapeziumverloop afgeleid,
- Het trapeziumverloop dient het waterstandsverloop goed te benaderen; vooral het bovenste gedeelte en het gedeelte rondom de top van de waterstand dient voldoende nauwkeurig te worden beschreven.

Voor het hele gebied van de Rijntakken zijn op basis van de productieberekeningen geschematiseerde waterstandsverlopen afgeleid. Hierbij is het gebied van de Rijntakken opgesplitst in 7 deelgebieden. Het waterstandsverloop heeft een trapeziumvorm zoals geïllustreerd in Figuur 10.2. De parameters van het trapezium zijn per deelgebied verschillend, en zijn weergegeven in Tabel 10.1.



Figuur 10.2 Schematische weergave trapezium voor waterstandsverloop Rijn en Maas.

Tabel 10.1 Parameters trapeziumverloop voor het schematiseren van het waterstandsverloop langs de Rijntakken.

Riviertak Rijn	Niveau	Niveau	Duur [uur]			
	E1 [m]	E2 [m]	A	B	C	D
Bovenrijn	-0,2	-6	200	46	52	305
Pannerdense Kop	-0,2	-4	164	52	44	310
Waal	-0,2	-3,5	165	66	66	285
Lek bovenstrooms van locatie 962.00_LE	-0,2	-3,5	100	50	50	250
Neder-Rijn bovenstrooms van locatie 901.00_NR	-0,2	-4	180	50	50	320
Neder-Rijn benedenstrooms van locatie 901.00_IJ	-0,2	-4	165	55	55	305
IJssel bovenstrooms van locatie 940.00_IJ	-0,2	-3	140	50	80	270
IJssel benedenstrooms van locatie 940.00_IJ	-0,2	-2,5	140	50	80	270

De Maas is ingedeeld in 6 deelgebieden; deze deelgebieden zijn weergegeven in Tabel 10.2. De parameters van het trapezium zijn weergegevens in Tabel 10.3. In deelgebied 1 beïnvloedt de topvervlakking de vorm van het waterstandsverloop. Het waterstandsverloop voor een willekeurige locatie in dit gebied is geconstrueerd uit het waterstandsverloop dat volgt uit de productieberekeningen.

Tabel 10.2 Indeling Maas in 6 deelgebieden

Deelgebied	Locaties
1	Alle locaties die bovenstrooms van locatie 84.00_WA liggen en tussen 104.00_WA t/m 119.00_WA
2	Locaties 84.00_WA t/m 104.00_WA
3	Locaties 120.00_WA t/m 144.00_WA
4	Locaties 145.00_WA t/m 180.00_WA
5	Locaties 181.00_WA t/m 220.00_WA
6	Locaties 221.00_WA t/m 235.00_WA

Tabel 10.3 Parameters trapeziumverloop voor het schematiseren van het waterstandsverloop langs de Maas

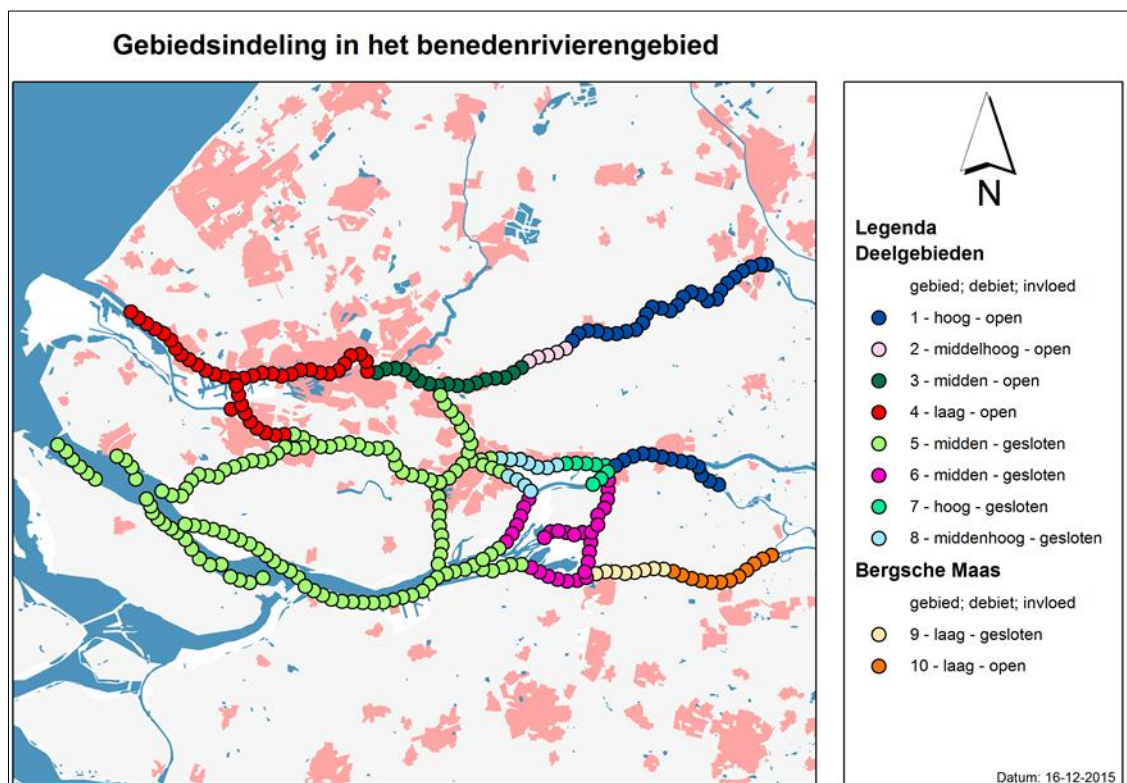
Deelgebied Maas	Niveau E1	Niveau E2 [m]	Duur [uur]			
	[m]		A	B	C	D
1	'Werkelijk' waterstandsverloop uit productieberekeningen					
2	(-0,1; -0,1)	-6	145	25	25	250
3	(-0,3; -0,1)	-4	130	40	35	245
4	(-0,3; -0,1)	-3,5	100	50	25	220
5	(-0,5; -0,1)	-3	55	60	30	170
6	(-0,3; -0,1)	-3	65	50	30	200

10.3.2 Benedenrivieren

In WBI-2017 zijn nieuwe waterstandsverlopen afgeleid voor het gebied van de Benedenrivieren en beschreven in Deltares (2016j). Hierbij is het Benedenrivierengebied opgesplitst in 10 deelgebieden. Deze indeling is weergegeven in Figuur 10.3.

Deze indeling van het Benedenrivierengebied in deelgebieden is mede gebaseerd op de bijdrage van de basisstochasten aan de waterstanden bij de normfrequenties, en bijgevolg de bijbehorende waterstandsverlopen. Door middel van een aantal WAQUA berekeningen is het waterstandsverloop per deelgebied bepaald.

Bij het bepalen van deze waterstandsverlopen is ervoor gezorgd dat de trage stochast afvoer relatief hoge waarden krijgen, de 90%-percentielen van de afvoer (q90%), terwijl de snelle stochasten windsnelheid en zeewaterstand een relatief lage waarde (gemiddelde waarde) toegekend krijgt. Daarbij is de gemiddelde afvoergolfvorm van GRADE gehanteerd. Er is niet gevarieerd in de afvoergolfvorm.



Figuur 10.3 Gebiedsindeling Benedenrivieren voor het bepalen van de waterstandsverlopen.

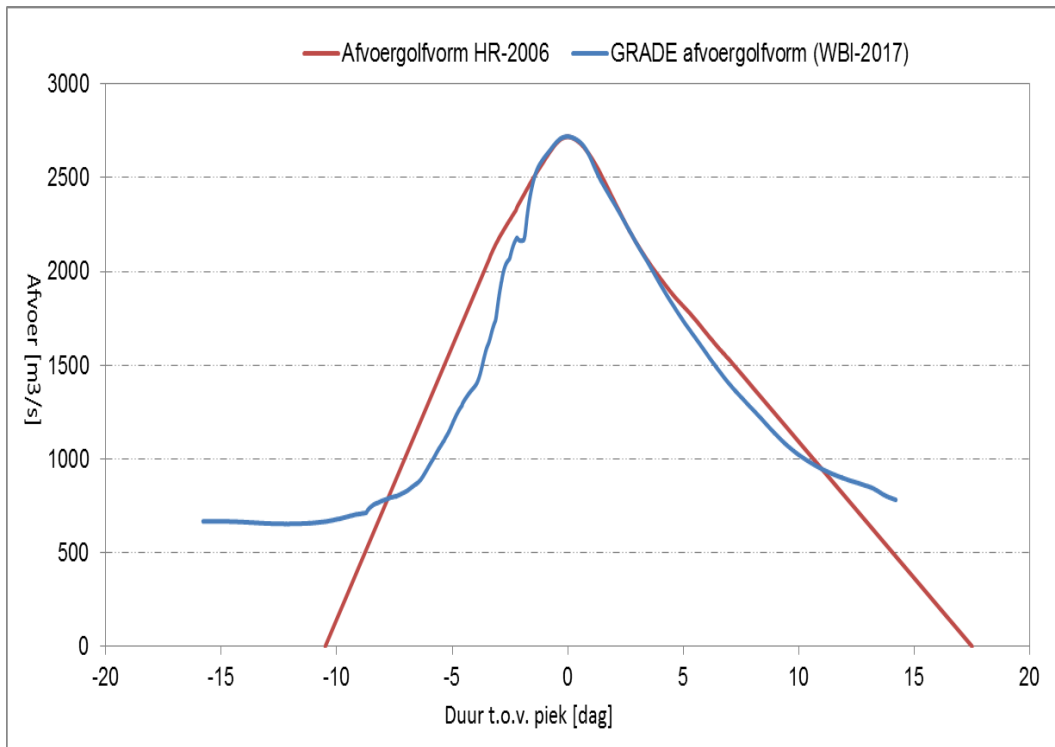
10.3.3 IJsseldelta

In het kader van WTI-2011 zijn waterstandsverlopen afgeleid voor de IJsseldelta (Deltares, 2011). Hierbij is dezelfde methode gebruikt als voor de Vechtdelta. Hiertoe werd de IJsseldelta opgesplitst in vier deelgebieden. Op basis van WAQUA berekeningen uit de database is voor elk deelgebied het gemiddelde waterstandsverloop bepaald. Met een kleine aanpassing van de gebiedsindeling zijn de waterstandsverlopen uit WTI-2011 aangehouden in WBI-2017.

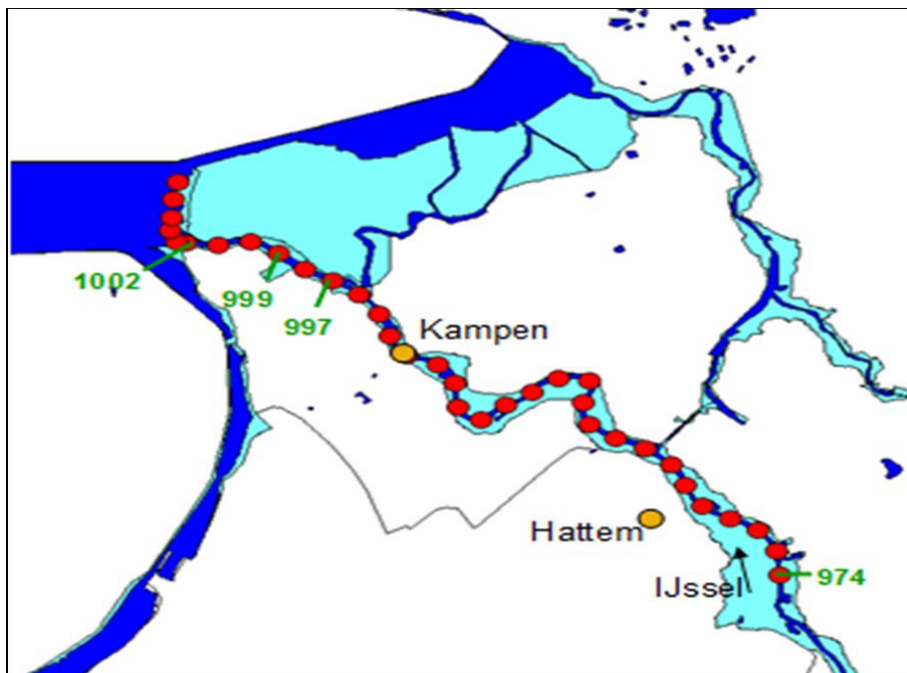
In het WBI-2017 is onderzocht of de veranderingen zoals beschreven in Paragraaf 2.5 aanleiding zouden geven voor aanpassingen van de gebiedsindeling en waterstandsverlopen van de IJsseldelta (Chbab en Stuapru, 2016). Het blijkt dat de nieuwe afvoerstatistiek van de IJssel bij Olst (gebaseerd op GRADE van de Rijn bij Lobith, zie ook Figuur 10.4 voor de golfvorm bij Olst) leidt tot een verschuiving van de grenzen van de gebiedsindeling van IJsseldelta. De nieuwe afvoerstatistiek resulteert overall in de IJsseldelta namelijk in lagere 90%-percentielen van de afvoer. De invloed van de wind beperkt zich hierdoor niet alleen tot de meest benedenstroomse locaties maar breidt zich verder uit tot delen van het overgangsgebied in de IJsseldelta. Op basis hiervan is de volgende nieuwe indeling gemaakt voor de IJsseldelta, zie ook Figuur 10.5:

- Deelgebied 1, omvat de locaties 957-993 (traject Olst - Kampen). Dit deelgebied komt overeen met de indeling van WTI-2011,
- Deelgebied 2, omvat de locaties km 994-995. Dit deelgebied is ten opzichte van de WTI-2011 kleiner geworden,

- Deelgebied 3, omvat de locaties km 996-997. Dit deelgebied is ten opzichte van de WTI-2011 verschoven en uitgebreid,
- Deelgebied 4, omvat de locaties km 998-1002. Dit gebied is in vergelijking met de indeling met WTI-2011 uitgebreid.

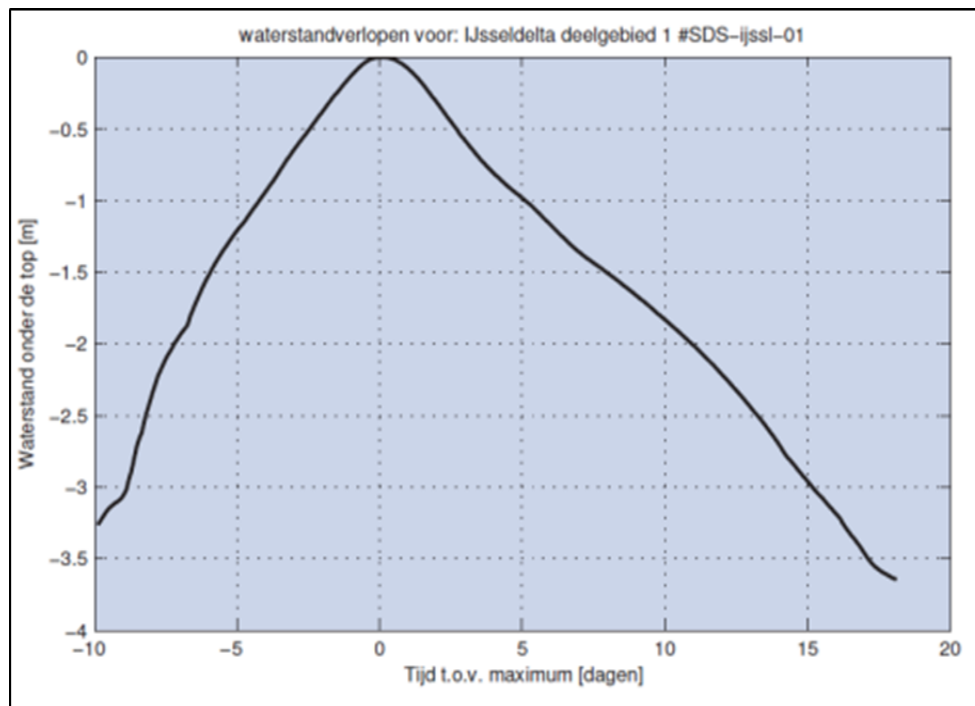


Figuur 10.4 Afvoergolfvormen IJssel bij Olst: rood = afvoergolfvorm WTI-2011 (en HR2006) en blauw = afvoergolfvorm die uit GRADE volgt.



Figuur 10.5 Locaties IJsseldelta

Mede op basis van de resultaten van de productieberekeningen van WTI-2017, is besloten om de waterstandsverlopen voor de IJsseldelta uit WTI-2011 aan te houden in WBI-2017. Deze waterstandsverlopen zijn enigszins conservatief maar passender voor de beoordeling dan stationaire waterstandsverlopen, zie voor nadere onderbouwing Chbab en Stuparu (2016). Figuur 10.6 toont het waterstandsverloop voor deelgebied 1 van de IJsseldelta.



Figuur 10.6 Waterstandsverloop deelgebied 1 (bovenstrooms deel) van de IJsseldelta.

10.3.4 Vechtdelta

De waterstandsverlopen voor het gebied van de Vechtdelta volgen uit WTI-2011 (Deltares, 2011). De gebruikte methode en de hiermee afgeleide waterstandsverlopen in WTI-2011 zijn goedgekeurd door ENW. In WBI-2017 is onderzocht of actualisatie van die waterstandsverlopen nodig is en dat blijkt niet het geval te zijn (Chbab en Stuparu, 2016).

Indien een hoge waterstand bij een bepaalde normfrequentie in de Vechtdelta bereikt of overschreden wordt, kan dit bij veel verschillende combinaties van afvoer, meerpeil, windsnelheid en windrichting gebeuren. Een hoge waterstand kan bijvoorbeeld veroorzaakt worden door een lage afvoer in combinatie met extreme hoge wind, een extreme hoge afvoer in combinatie met weinig wind, maar ook door allerlei combinaties daar tussenin.

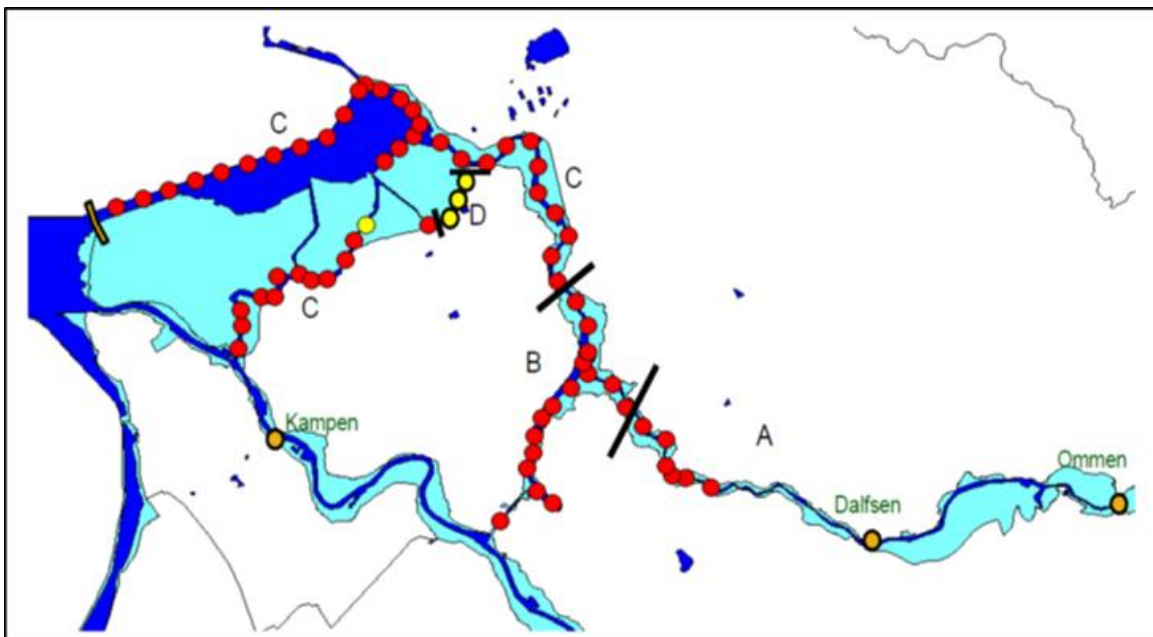
Omdat hoge afvoeren veel langer aanhouden dan hoge windsnelheden, zal in dit voorbeeld het breedste waterstandsverloop zich voordoen bij de extreme afvoer in combinatie met weinig wind. Een dergelijk verloop is voor de beoordeling op faalmechanismen waarbij langdurig aanhoudende waterstanden een rol spelen het meest relevant.

Bij het bepalen van de waterstandsverlopen voor de Vecht- en IJsseldelta is ervoor gezorgd dat, analoog aan het IJsselmeer en het Markermeer, de trage stochastische afvoer en meerpeil relatief hoge waarden krijgen, de 90%-percentielen van de afvoer ($q_{90\%}$) en het meerpeil ($m_{90\%}$) terwijl de snelle stochastische windsnelheid een relatief lage waarde toegekend krijgt.

Omdat de trage stochasten hoge waarden krijgen, en de snelle stochast een lage waarde, resulteert dat in een relatief breed waterstandsverloop. Als windrichting wordt de waarde genomen die het meest waarschijnlijk is indien de waterstand bij de normfrequentie wordt overschreden. Hier kan nog bij worden vermeld dat hoge (extreme) afvoeren altijd worden gecombineerd met hoge (extreme) meerpeilen, wat gerechtvaardigd wordt door de sterke correlatie tussen (piekwaarden van) afvoer en meerpeil, zie Paragraaf 4.5.

Bij het vaststellen van de waterstandsverlopen is de Vechtdelta opgesplitst in vier deelgebieden. Dit zijn (zie ook Figuur 10.7):

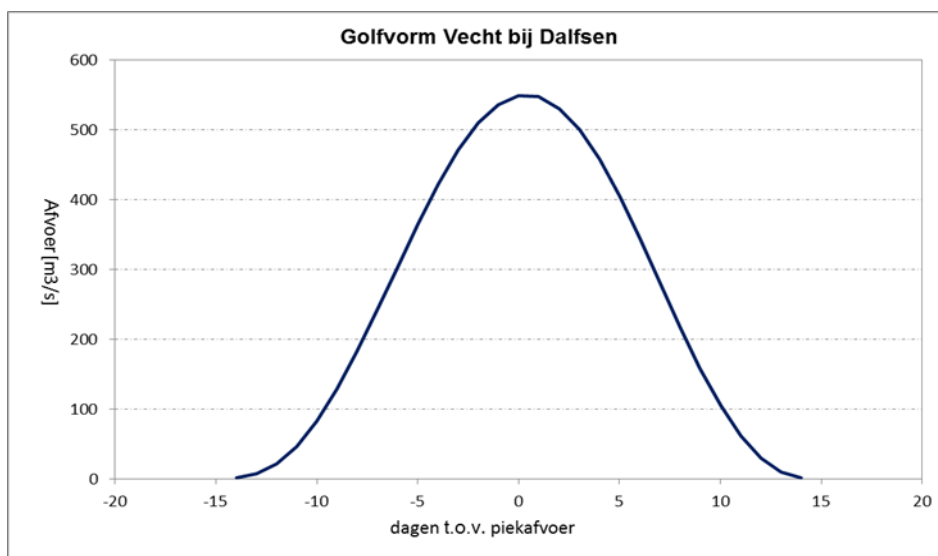
- Deelgebied A: omvat de bovenstroomse locaties Vecht 36-57³⁶ langs de Vecht,
- Deelgebied B: omvat de locaties 1-9 langs het Zwarte Water en de locaties Vecht 58-60 langs de Vecht,
- Deelgebied C: omvat de locaties 10-20 langs het Zwarte Water, de locaties Zwarte Meer 38-54 en de locaties ZMGS13-14, Ganzendiep GDGS1-9, Goot GOGS1-5 en Veneriete Vegs01.
- Deelgebied D: omvat de locatie ZMR 15, 16 en 17.



Figuur 10.7 Gebiedsindeling van de Vechtdelta voor het afleiden van de waterstandsverlopen

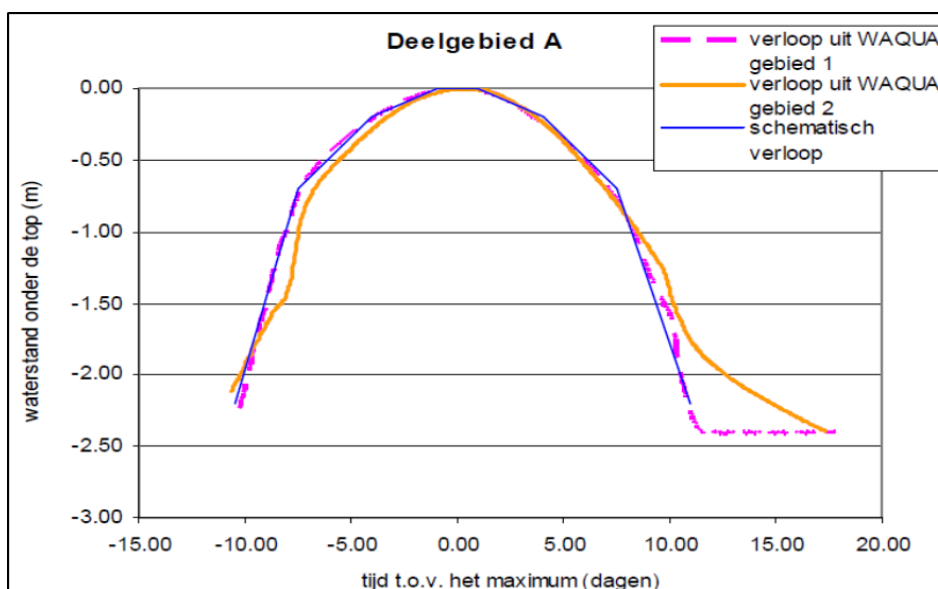
Deze indeling is mede gebaseerd op de bijdrage van de stochasten aan de waterstanden bij de normfrequenties, en bijgevolg de bijbehorende waterstandsverlopen. Vervolgens is per deelgebied met behulp van WAQUA-berekeningen het waterstandsverloop bepaald. Ten behoeve van de WAQUA berekeningen zijn afvoergolven opgelegd waarvan de hoogtes gelijk zijn aan de 90% percentielen. Hierbij is de gemiddelde afvoergolfvorm gehanteerd; deze is afgebeeld in Figuur 10.8 (Geerse, 2006). Er is niet gevarieerd in deze afvoergolfvorm.

³⁶ De locatienummering is gebaseerd op de naamgeving uit WTI-2011.



Figuur 10.8 Standaard (gemiddelde) vorm van de Overijsselse Vecht bij Dalfsen

De veranderingen in WBI-2017 ten opzichte van WTI-2011 voor het gebied van de Vechtdelta zijn beperkt. De belangrijkste verandering betreft de invoering van de nieuwe veiligheidsnormen. Deze verandering geeft echter geen aanleiding tot aanpassing van de gebiedsindeling en de waterstandsverlopen voor de Vechtdelta uit WTI-2011 blijven gehandhaafd, zie voor een nadere onderbouwing (Chbab en Stuparu, 2016). Figuur 10.9 toont het waterstandsverloop voor deelgebied A.



Figuur 10.9 Waterstandsverloop deelgebied A van de Vechtdelta (Deltares, 2011).

10.3.5 Meren: IJsselmeer en Markermeer

Voor WBI-2017 zijn waterstandsverlopen voor het IJsselmeer en het Markermeerovergenomen uit WTI-2011.

De in het kader van WTI-2011 afgeleide waterstandsverlopen voor het IJsselmeer en het Markermeer zijn uitgebreid beschreven in Chbab (2012). De methode die hierbij is gebruikt, is beschreven in Geerse (2007). De methode maakt gebruik van de zogenoemde 90%-percentielen van het meerpeil, de trage basisstochast voor de meren. Een 90%-percentiel van het meerpeil correspondeert met de 90% bovengrens van de conditionele kansverdeling van het meerpeil gegeven dat de opgetreden waterstand overschreden is (anders gezegd: een 90% percentiel is de waarde van het meerpeil dat tijdens falen met 90% kans wordt overschreden, waarbij falen hier staat voor overschrijden van de waterstand behorende bij de normfrequentie). De waarde van het 90%-percentiel hangt af van locatie, wordt bepaald met Hydra-NL en wordt als invoer gebruikt voor het Waterstandsverlooptool.

Naast het meerpeil speelt de wind ook een rol. De bijdrage van de wind aan de waterstand bij de normfrequentie en het tijdsafhankelijke ervan hangt net als het 90%-percentiel meerpeil af van de ligging van de locatie. Voor de locaties die windgedomineerd zijn, is het tijdsverloop van de waterstand voornamelijk bepaald door windopzet en voor locaties die meerpeil gedomineerd zijn door het verloop van het meerpeil. Op deze manier wordt recht gedaan aan de fysische aard van de hydraulische systemen IJsselmeer en Markermeer.

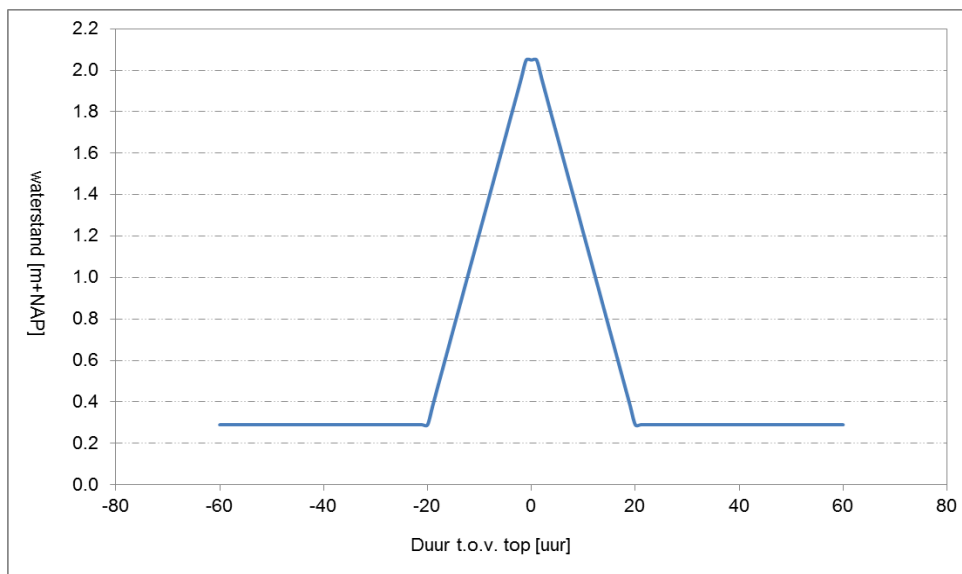
Op basis van de resultaten van een aantal WAQUA berekeningen op verschillende locaties verspreid over het IJsselmeer en het Markermeer is het waterstandsverloop voor een aantal stormen bepaald. Hierbij zijn twee stormverlopen beschouwd:

- 1) het trapeziumvormige stormverloop voor het IJsselmeer; dit verloop heeft een basisduur van 48 uur en een topduur van 2 uur en is beschreven in Figuur 4.21,
- 2) een trapeziumvormig stormverloop met basisduur van 35 uur en topduur van 4 uur. Dit verloop heeft veel overeenkomsten met het verloop van de storm die gebruikt wordt voor de productieberekeningen voor het Markermeer (Paragraaf 4.6.2).

Uit de resultaten van de uitgevoerde WAQUA berekeningen blijkt dat het tijdsverloop van de waterstand mede wordt bepaald door het tijdsverloop van de storm. Een langer respectievelijk korter stormverloop leidt namelijk tot een breder respectievelijk spitzer tijdsverloop van de waterstand. Uit uniformiteit- en consistentieoverwegingen is ervoor gekozen om de windopzet te baseren op de voor het IJsselmeer vastgestelde trapeziumvormige stormduur van 48 uur. Het bijbehorende waterstandsverloop is trapeziumvormig met een basisduur van 40 uur en topduur van 2 uur. Deze vorm geldt voor alle locaties langs zowel het IJsselmeer als het Markermeer.

In WBI-2017 wordt rekening gehouden met onzekerheden en de windstatistiek is aangepast. Daarom zijn de 90%-percentielen van het meerpeil (zowel IJsselmeer als Markermeer) opnieuw berekend. In de nieuwe 90%-percentielen zit de statistische onzekerheid van het meerpeil en de wind dus verwerkt. De berekeningen zijn uitgevoerd met Hydra-NL (HKV, 2016a).

De waterstandsverlopen voor het IJsselmeer en het Markermeer worden beschreven door een trapeziumvormig verloop van de windopzet gesuperponeerd op een stationair verloop van het meerpeil op het niveau van het 90%-percentiel. De windopzet heeft een trapeziumvorm met basisduur van 40 uur en topduur van 2 uur. Figuur 10.10 illustreert het tijdsverloop van een waterstand met hoogte 2,06 m+NAP bestaande uit een stationair meerpeil op het niveau van 0,3 m+NAP (het 90% percentiel) en een stormopzet van 40 uur in de basis en 2 uur in de top.



Figuur 10.10 Voorbeeld waterstandsverloop meren voor een waterstand van 2,06 m+NAP, bestaande uit een stationair meerpeil op het niveau van 0,3 m+NAP en stormopzet van 40 uur in de basis en 2 uur in de top.

10.3.6 Kustgebieden

Voor de kustgebieden zijn in WBI-2017 nieuwe waterstandsverlopen afgeleid. Het waterstandsverloop op een willekeurige locatie langs de kust bestaat uit het tijdsverloop van de stormopzet en de tijdreeks van het gemiddelde astronomische getij. De top van de opzet en de top van het astronomische getij vallen niet samen. De faseverschuiving hangt af van de locatie. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen enerzijds de Hollandse Kust en de Zeeuwse kust inclusief de Westerschelde en anderzijds de Waddenzee. De waterstandsverlopen voor de kustgebieden zijn uitgebreid beschreven in Chbab (2015c).

De stormopzet heeft een trapeziumverloop voor alle locaties langs de kust. De parameters van het trapezium hangen af van het watersysteem. Er is onderscheid gemaakt tussen:

- De Hollandse en Zeeuwse kust,
- Hoek van Holland
- Waddenzee

Het tijdsverloop van de stormopzet bij station Hoek van Holland blijft uit consistentieoverwegingen onveranderd t.o.v. WTI-2011. Hetzelfde geldt voor de faseverschuiving. Het hieruit resulterende waterstandsverloop geldt namelijk als benedenrand voor de productieberekeningen voor het Benedenrivierengebied, zie Paragraaf 4.4.

Tabel 10.4 toont de parameters van het trapezium voor het stormverloop.

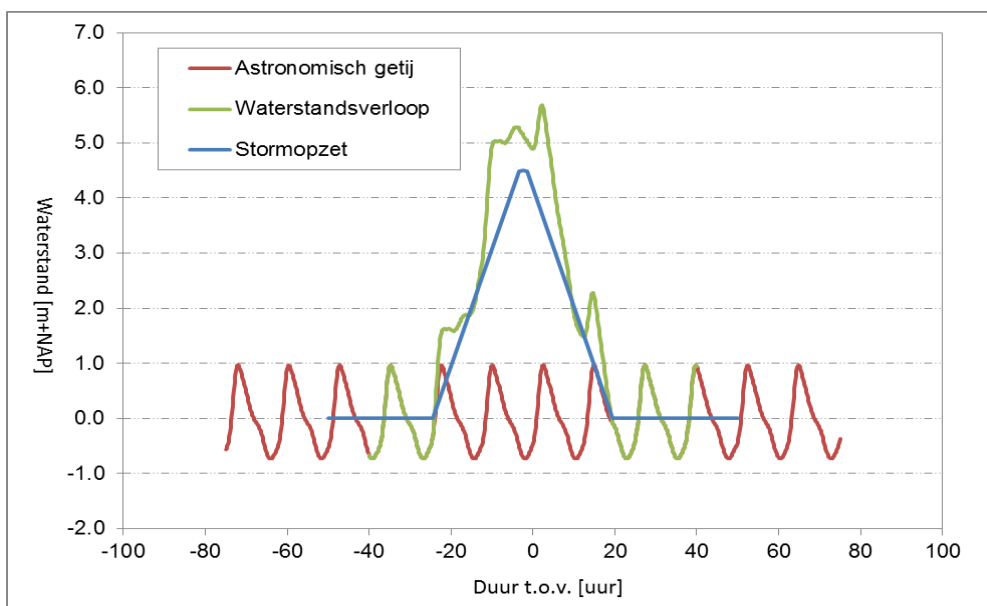
Tabel 10.4 Parameters trapezia tijdsverloop stormopzet en faseverschuiving kustgebieden

Gebied/locatie	Tijdsverloop stormopzet	Faseverschil opzet en getij
Zeeuwse en Hollandse kust	Trapezium, basis duur = 44 uur en topduur = 2 uur	2,5 uur
Hoek van Holland	Trapezium, duur = 30 uur op half meter niveau en flanken van 12 uur naar nul meter niveau	-4,5 uur
Waddenzee	Trapezium, basis duur = 45 uur en topduur = 2 uur	5,5 uur

Het recept om te komen tot het waterstandsverloop op een willekeurige locatie langs de kust luidt:

1. Bepaal met Hydra-Ring voor de beschouwde locatie de waterstand behorende bij de geldende norm,
2. Bepaal voor de beschouwde locatie het gemiddelde astronomische getij,
3. Kies voor de beschouwde locatie uit Tabel 10.4 het tijdsverloop voor de stormopzet en het faseverschil tussen de maxima van de stormopzet en het gemiddelde getij,
4. Bepaal het tijdsverloop van de waterstand voor de beschouwde locatie door het gekozen tijdsverloop voor de stormopzet te superponeren op het gemiddelde astronomische getij, rekening houdend met de faseverschuiving gegeven in Tabel 10.4.

Figuur 10.11 toont ter illustratie het waterstandsverloop voor station IJmuiden. De top van de waterstand is fictief in dit voorbeeld. Dit verloop bestaat zoals de figuur laat zien uit een combinatie van het gemiddelde astronomische getij, een stormopzet en een faseverschil tussen opzet en getij zoals gegeven in Tabel 10.4.



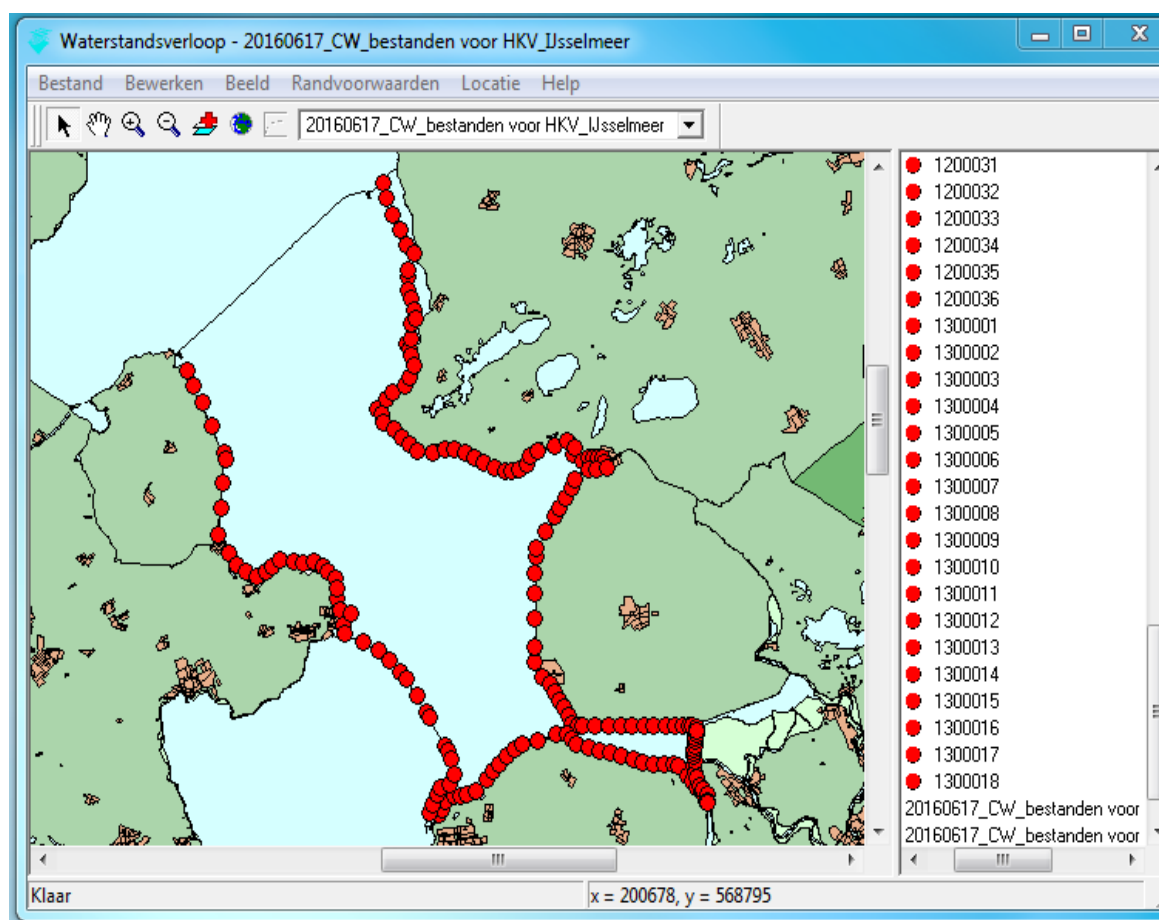
Figuur 10.11 Waterstandsverloop station IJmuiden, bestaande uit een stormopzetverloop (van 44 uur in de basis en topduur van 2 uur), gemiddelde getij en faseverschil van 2,5 uur.

10.4 Tool waterstandsverlopen

In het kader van WBI-2017 is een tool ontwikkeld voor de visualisatie van de waterstandsverlopen (Geerse en Waterman, 2014). Met de tool kan ook het verloop van de waterstand gexporteerd worden naar een tabelvorm. De tool is gebaseerd op de tool die in HR-2006 werd ontwikkeld voor het visualiseren van de waterstandsverlopen voor het benedenrivierengebied (Thonus, 2006). Met de nieuwe 'tool waterstandsverlopen' kunnen waterstandsverlopen worden gevisualiseerd voor alle watersystemen.

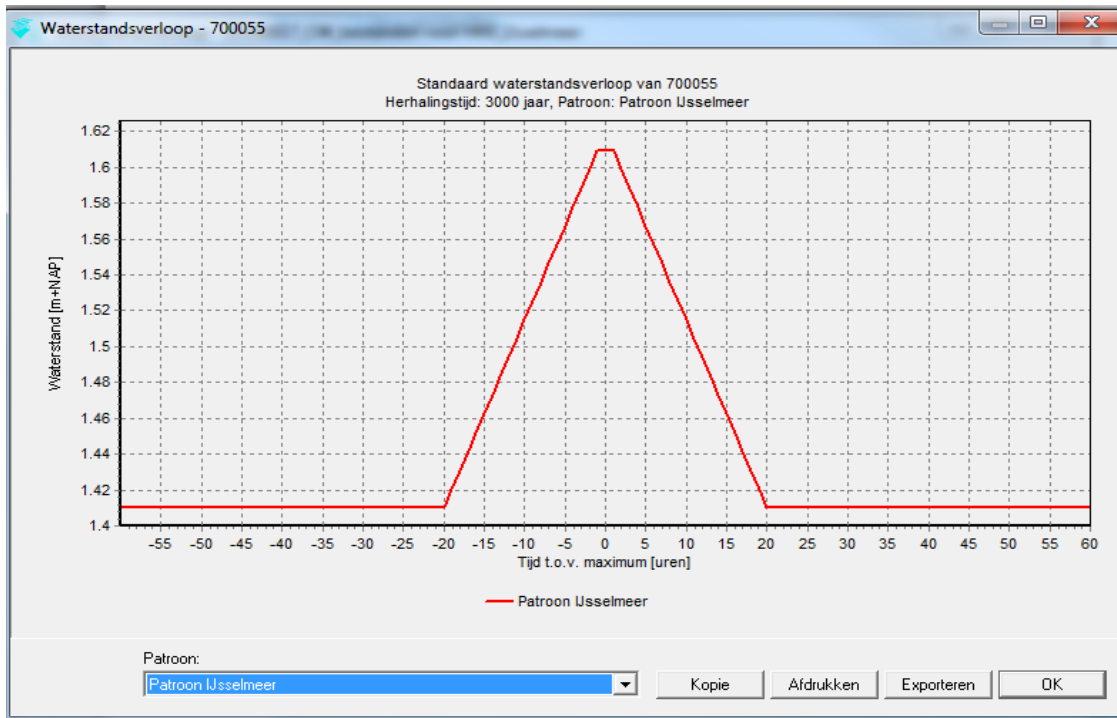
Figuur 10.12 geeft ter illustratie het startscherm voor de visualisatie van de waterstandsverlopen voor het IJsselmeer. De punten op de kaart komen overeen met de uitvoerlocaties uit de actieve database (in dit geval van het IJsselmeer). Databases zijn beschikbaar voor de volgende watersystemen:

- Hollandse Kust, Waddenzee, Westerschelde
- IJsselmeer, Markermeer
- Bovenrijn, Bovenmaas
- Benedenrivieren Rijndominant en Maasdominant
- Vechtdelta, IJsseldelta

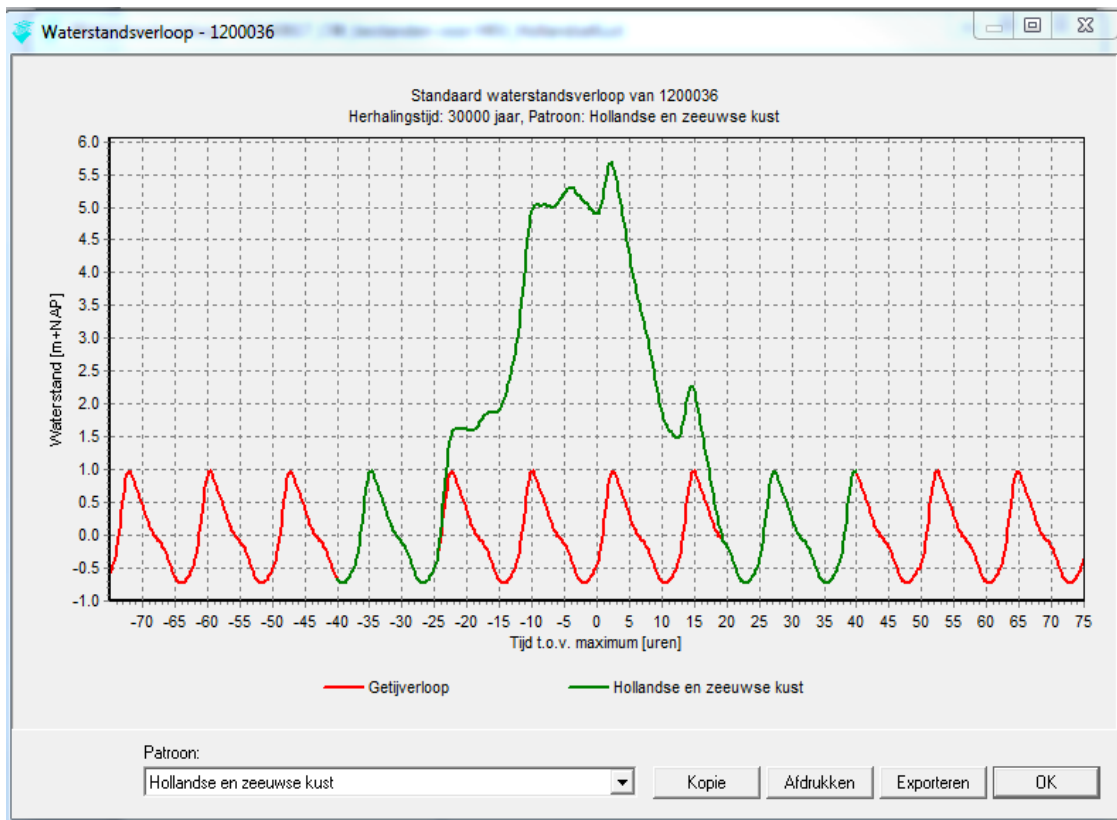


Figuur 10.12 Uitvoerlocaties IJsselmeer, waarvoor waterstandsverlopen beschikbaar zijn en gevisualiseerd kunnen worden.

Figuur 10.13 en Figuur 10.14 laten voor een locatie in het IJsselmeer en één locatie in de Waddenzee visualisaties zien van de waterstandsverlopen.



Figuur 10.13 Waterstandsverloop locatie met nummer 700055 in het IJsselmeer



Figuur 10.14 Waterstandsverloop locatie 1200036 (IJmuiden)

11 Samenvatting en conclusies

Onderhavig rapport is een beschrijving van de achtergronden van de Hydraulische Belastingen in WBI-2017. Het maakt onderdeel uit van de documentatie WBI-2017. Het rapport geeft inzicht in de aanpak van de 'productieketen Hydraulische Belastingen' binnen WBI-2017, met speciale aandacht voor verschillen tussen de aanpak voor de verschillende watersystemen en de belangrijkste verschillen tussen de WBI-2017 en voorgaande toetsrondes. De doelgroep bestaat uit gebruikers en beheerders van WBI-2017 en ontwikkelaars van beoordelingsmethoden, ontwerpmethoden en verwante gereedschappen in het kader van de veiligheid tegen overstromingen.

Een belangrijk verschil met voorgaande edities van WTI, is dat de Hydraulische Belastingen van het rivierengebied in brede zin (inclusief overgangsgebieden Benedenrivieren en IJssel-Vechtdelta) in verband met Ruimte voor de Riviermaatregelen en Maaswerken gebaseerd zijn op nieuwe productieberekeningen van zowel de waterstanden als de golfparameters. De statistiek van de basisstochasten is waar gewenst aangepast of geactualiseerd. Dit betreft voornamelijk de statistiek van de rivierafvoer van de Rijn bij Lobith en de Maas bij Borgharen. De afvoerstatistiek van deze twee rivieren is bepaald met GRADE in plaats van extrapolaties op basis van gemeten afvoerdata. Bijgevolg zijn de afvoerstatistiek van de IJssel bij Olst en de afvoerstatistiek van de Maas bij Lith geactualiseerd. Van de Vecht bij Dalfsen is de afvoerstatistiek opnieuw afgeleid; hierbij is rekening gehouden met overstromingen in de bovenstrooms deel van de Vecht en zijleidingen. Voor de overige watersystemen zijn eveneens (kleine) aanpassingen doorgevoerd, bijvoorbeeld aan windstatistiek en zeewaterstanden. Verder zijn de volgende veranderingen doorgevoerd in WBI-2017:

- De correlatie tussen de afvoer van de Rijn bij Lobith en de afvoer van de Maas bij Borgharen is aangepast; in de productieberekeningen voor het Benedenrivierengebied is uitgegaan van een volledige correlatie in plaats van de zogenoemde 50%-lijnen,
- Voor alle rivierenregio's zijn de golfparameters geactualiseerd door middel nieuwe SWAN berekeningen danwel Bretschneider berekeningen. De voor dit laatste benodigde gemiddelde waterdieptes en effectieve strijklengtes zijn geactualiseerd, gebruik makend van de geactualiseerde modelschematisaties, zie Hoofdstuk 5,
- Het Rijkcoort-Weibull model voor de windstatistiek is vervangen door de nieuwe windstatistiek afgeleid in 2009 door Deltares in samenwerking met het KNMI,
- De wind-waterstandstatistiek voor de kustregio's is geactualiseerd; er zijn nieuwe zogenoemde s-waarden (de parameters die de correlatie tussen wind en zeewaterstand beschrijven) afgeleid op basis van de nieuwe windstatistiek, zie Hoofdstuk 7,
- De faalkans van de Ramspolkering is aangepast van 1/286 naar 1/100 per sluitvraag.

Nieuw in WBI-2017 ten opzichte van WTI-2011 en HR-2006 is ook de mogelijkheid om expliciet rekening te houden met kennisonzekerheid in de probabilistische berekeningen. In WBI-2017 is de statistische onzekerheid van elke basisstochast gekwantificeerd en meegenomen als extra stochast. Daarnaast is modelonzekerheid in de lokale waterstanden en de golfparameters gekwantificeerd en meegenomen in de probabilistische berekeningen.

Hydra-Ring is het probabilistische model waarin de overstromingskansbenadering is geïmplementeerd. Dit model omvat alle watersystemen en vervangt daarmee alle bestaande Hydra modellen. Met Hydra-Ring zijn voor alle watersystemen en voor alle uitvoerlocaties testberekeningen gemaakt van de Hydraulische Belastingen voor verschillende

herhalingstijden. De verschillen tussen de resultaten van WTI-2011 en WBI-2017 zijn geanalyseerd, teneinde het effect van de aanpassingen in kaart te brengen en vertrouwen te krijgen in de HB 2017. Per locatie zijn voor de lokale waterstand en HBN de volgende analyses gemaakt:

1. Vergelijking van de Hydra-Ring resultaten zonder onzekerheden met Hydra-K of Hydra-Zoet referentieberekeningen bij dezelfde normfrequenties. Hiermee wordt het verschil als gevolg van nieuwe modelschematisatie, nieuwe statistiek, ander correlatiemodel (alle onderdeel van belastingmodel) en nieuwe rekentechnieken geduid. In een aantal gevallen zijn ook Hydra-Zoet berekeningen met oude en nieuwe statistiek met elkaar vergeleken, om zo het effect van de aanpassing van de statistiek te isoleren.
2. Vergelijking van de Hydra-Ring resultaten met onzekerheden en zonder onzekerheden. Hiermee wordt het effect van het meenemen van onzekerheden geduid,
3. Vergelijking van Hydra-Ring resultaten met onzekerheden bij de nieuwe normfrequenties met Hydra-K en Hydra-Zoet resultaten bij de oude norm. Hiermee worden het verschil tussen oude en nieuwe HB en de mogelijke consequenties voor de beoordeling inzichtelijk gemaakt.

De resultaten van de berekeningen met Hydra-Ring evenals van de verschilanalyse zijn gedocumenteerd in de volgende rapporten:

- Hydraulische Belastingen Meren. Deltares rapport 1230087-001-HYE-0001,
- Hydraulische Belastingen Kust. Deltares rapport 1230087-002-HYE-0001,
- Hydraulische Belastingen Rijntakken en Maas. Deltares rapport 1230087-003-HYE-0001,
- Hydraulische Belastingen Benedenrivieren. Deltares rapport 1230087-004-HYE-0001,
- Hydraulische Belastingen Vecht- en IJsseldelta. Deltares rapport 1230087-005-HYE-0002,
- Hydraulische Belastingen Oosterschelde. Wettelijk Beoordelingsinstrumentation 2017. Deltares rapport 1230087-006-HYE-0001, november 2016.
- Q-Variant - golfbelasting op bekledingen in Hydra-Ring. Deltares rapport 1230087-000-HYE-0004,
- Aanpassing statistiek Hydra-Ring en analyse overgang watersystemen. Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017. Deltares rapport 1230087-011-HYE-0004. Delft 2017
- Vaststelling van rekeninstellingen voor Hydra-Ring berekeningen van Hydraulische Belastingen. Deltares rapport 1230087-011-HYE-0001.

De conclusie uit de verschilanalyse is dat Hydra-Ring realistische Hydraulische Belastingen berekent. Het ruimtelijke beeld van waterstanden en hydraulische belastingniveaus is consistent. De verschillen met de resultaten van de oude Hydra-modellen (Hydra-K en Hydra-Zoet) hangen af van het watersysteem maar zijn over het algemeen verklaarbaar. Op de meeste locaties berekent Hydra-Ring een hoger hydraulisch belastingniveau, met name als gevolg van strengere normering en door het meenemen van kennisonzekerheden. Voor een uitgebreide beschrijving van de berekeningsresultaten en verschilanalyse verwijzen we naar bovengenoemde rapporten.

Naast waterstand en HBN behorende bij verschillende herhalingstijden zijn voor alle watersystemen (met uitzondering van de Oosterschelde) waterstandsverlopen bepaald. Het waterstandsverloop geeft per locatie het verloop in de tijd van de waterstand bij de normfrequentie en kan gebruikt worden voor het beoordelen van waterkeringen aan geotechnische faalmechanismen. De waterstandsverlopen zijn opgenomen in de tool 'waterstandsverlopen', waarmee de waterstandsverlopen kunnen worden gevisualiseerd.

De afleiding van de waterstandsverlopen voor verschillende watersystemen is beschreven in de volgende rapporten:

- Waterstandsverlopen Rijntakken en Maas. Wettelijk Toetsinstrumentarium WTI-2017. Deltares rapport 1220082-002-HYE-0002. Februari 2016,
- Waterstandsverlopen Benedenrivieren voor WTI-2017. Deltares rapport 1220082-002-HYE-0004. Februari 2016,
- Waterstandsverlopen Vecht- en IJsseldelta. Wettelijk Toetsinstrumentarium WTI-2017. Deltares rapport 1220082-HYE-0005. Februari 2016,
- Waterstandsverlopen Kust. Wettelijk Toetsinstrumentarium WTI-2017. Deltares rapport 1220082-002-HYE-0003. December 2015.

Referenties

- Alkyon, 2006. Operationalisatie WAQUA voor IJsselmeer en Vecht- en IJsseldelta. Alkyon rapport A1591, 2006.
- Alkyon, 2008. Update WAQUA model Vecht- en IJsseldelta. Alkyon rapport A1986, Mei 2008.
- Bak, C.I. en D.P. Vlag, 1999. Achtergronden hydraulische belastingen dijken IJsselmeergebied, deelrapport 5, Modellerings waterbeweging WAQUA. RWS-RIZA rapport 99.042, 1999.
- Beckers, J. 2014. Seiches in WTI-2017. Deltares memo 1209433-006-HYE-0001, 2014
- Beersma, J.J., Buishand, T.A. and Schmeits, M.J., 2014. Technical description of the KNMI rainfall generators for the Rhine and Meuse basins. Technical Report, TR-345, KNMI, De Bilt, The Netherlands.
- Boertien I (Ministerie van verkeer en Waterstaat), 1993. Toetsing uitgangspunten rivierdijkversterkingen, deelrapport 2: Maatgevende belastingen. Den Haag 1993.
- Bottema, M., 2004. Testmemo SWAN40.20a. RWS/RIZA Werkdocument 2004.090.X.
- Caires, S. 2009. Extreme wind statistics for the Hydraulic Boundary Conditions for the Dutch primary water defences. SBW-Belastingen: Phase 2 of subproject "Wind Modelling". Deltares. 1200264-005.
- Chbab, E.H. en D. Eilander, 2017. Basisstochasten WTI-2017. Statistiek en statistische onzekerheid. Deltares rapport 1209433-012-HYE-007, Januari 2016.
- Chbab, E.H. en J. Groeneweg, 2017. Modelonzekerheid Hydra-Ring. Wettelijk toetsinstrumentarium WTI-2017. Deltares rapport 1209433-008-HYE-0007. Delft 2015.
- Chbab, E.H. en D. Stuparu, 2016. Waterstandsverlopen WTI-2017 voor de Vecht- en IJsseldelta. Deltares rapport 1220082-0002-HYE-0005, 2015.
- Chbab, E.H., 2012. Waterstandsverlopen Meren. IJsselmeer en Markermeer. Deltares rapport 1204143-003. Deltares 2012.
- Chbab, E.H., 2015a. Modelonzekerheid in lokale waterstand voor het RMM gebied. Deltares memo.1209433-0002-HYE-0004, 2015.
- Chbab, E.H., 2015b. Modelonzekerheid in lokale waterstand voor IJMVD. Deltares memo1209433-000-HYE-0011.
- Chbab, E.H., 2015c. Waterstandsverlopen WTI-2017 voor de kustgebieden. Deltares rapport 1220082-0002-HYE-0003, 2015
- Chbab, E.H., 2015d. Waterstandsverlopen WTI-2017 voor de Rijntakken en de Maas. Deltares rapport 1220082-0002-HYE-0002, 2015.

- Deltares, 2009a. Herberekening werklijn Rijn in het kader van WTI-2011. Deltares rapport 1200103-044-ZWS-0008 (A. Tijssen).
- Deltares, 2009b. Herberekening werklijn Maas in het kader van WTI-2011. Deltares rapport 1200103-044-ZWS-0007. Delft 2009 (A. Tijssen).
- Deltares, 2009c. Assessment of the still water level 1/10,000 years return values. Deltares report 1200103-041-HYE-0002 (K.L. Roscoe).
- Deltares, 2010a. Update of the seiche allowances for the Rotterdam Europoort area. WTI 2009/2010, input for the Hydraulic Boundary Conditions 2011. De Jong, M.P.C. en de Bont, J.A.M. Deltares rapport 1200103-052ZWS-0005.
- Deltares, 2010b. WAQUA model IJsselmeer, IJsseldelta en Vecht, opbouw, kalibratie en verificatie, Deltares rapport 1202108-000-ZWS-0015. Delft 2010.
- Deltares, 2010c. Spatial wind input for HBC production runs. SBW-Belastingen: Phase 3 and conclusions of subproject "Wind modelling". Deltares report 1200264-005, februari 2010 (J.P. de Waal).
- Deltares, 2010d. Wind input to be used in HBC assessment, Deltares report 1200103-027-HYE, februari 2010 (J.P. de Waal).
- Deltares, 2010e. The evolution of storms on the Wadden Sea. Deltares rapport 1200264-004-HYE-0012 (Lopez).
- Deltares, 2010f. Toets- en Rekenpeilen Kust en Estuaria ten behoeve van de HR2011. Deltares rapport 1202341-002-HYE-0060, dd 9 november 2010 (D. Dillingh en J. de Lima Rego).
- Deltares, 2010g. WAQUA-model Rijn-Maasmonding, opzet, calibratie en verificatie. Deltares rapport 1202199-005. (F. Zijl, D. Kerkhoven, T. Visser en T. van der Kaaij).
- Deltares, 2010h. SWAN Calibration and Validation for HBC2011. Deltares rapport 1200103-020-HYE-0002, 27 mei 2010 (C. Gautier).
- Deltares, 2011. Waterstandsverlopen Vechtdelta. Deltares rapport 1204143-003-ZWS-003 (N. Kramer, M. Youssef, Q. Gao en C. Geerse).
- Deltares, 2012a. Achtergrondrapport WTI-2011 voor de Vechtdelta. Deltares rapport 1204143-003, 2012.
- Deltares, 2012b. Achtergrondrapport WTI-2011 voor de Benedenrivieren. Deltares rapport 1204143-003, 2012.
- Deltares, 2012c. Achtergrondrapport WTI-2011 voor IJsselmeer. Concept hydraulische randvoorwaarden HR2011 voor het IJsselmeer, keelmeer en Vossemeer. Deltares rapport 1204143-003-ZWS-0024, 2012.
- Deltares, 2012d. Achtergrondrapportage HR2011 voor zee en estuaria. Deltares rapport 1204143-002, maart 2012 (C. Gautier en J. Groeneweg).

- Deltares, 2013a. Uitgangspunten productieberekeningen WTI2017. Aansturing, schematisaties en uitvoerlocaties. Deltares rapport 1207807-009-HYE-0006-v2, oktober 2013 (H. de Waal, A. Spruyt en A.J. Smale).
- Deltares, 2013b. Quantifying uncertainties of SWAN results. Deltares report 1206011-002HYE-0001, februari 2013.
- Deltares, 2013c. SWAN uncertainties for short fetches. Deltares report 1207807-001-HYE-0008, december 2013.
- Deltares, 2013d. Quantification of model uncertainty for WAQUA for the Upper River Area. Deltares report 1207807-002 (A. Tijssen).
- Deltares, 2014a. Uitgangspunten productieberekeningen WTI2017. Aanvulling op uitgangspunten vastgesteld in 2013. Deltares rapport 1209433-001-HYE-0005, juli 2014 (A.J. Smale).
- Deltares, 2014b. SWAN uncertainties based on additional Lake IJssel cases. Deltares report 1209433-007, december 2014.
- Deltares, 2014c. Verbeteringen in baseline-waqua-rmm-beno14_5-v2 ten behoeve van WTI 2017. Deltares memo 1209449-005-ZWS-0016, 23 december 2014 (J.S. de Jong).
- Deltares, 2014d. Addendum uitgangspunten productieberekeningen WTI-2017. Deltares memo 1209433-001-HYE-0006 9 (A. Smale). Delft, 2 juni 2014.
- Deltares, 2014e. Modelschematisaties IJsselmeer-Vecht-IJsseldelta. B&O-model 2014 en WTI2017-model. Deltares rapport 1209449-007-ZWS-0004, versie 2, maart 2014 (A. Becker en M. van der Mheen).
- Deltares, 2014f. Methode voor het bepalen van HR Duinen voor WTI-2017. Deltares rapport 1209433.004 (M. Boers, P. van Geer en J. Groeneweg).
- Deltares, 2014g. Actualisatie seiches Rotterdam WTI2017 Waterstandsafhankelijke seichewaarden. Deltares rapport 1209433-006-HYE-0002 (S.P. Reijmerink en M.P.C. de Jong).
- Deltares, 2014h. Vijfde generatie IJVD WAQUA model. Bouw, kalibratie en verificatie. Deltares rapport 1209449-007-ZWS-0005, versie 6, september 2014 (M. Van der Mheen).
- Deltares, 2014i. Generator of Rainfall and Discharge Extremes (GRADE) for the Rhine and Meuse basins: Final report of GRADE 2.0. Deltares report 1209424-004-ZWS-0018 (M. Hegnauer, J.J. Beersma, H.F.P. van den Boogaard, T.A. Buishand en R.H. Passchier).
- Deltares, 2014j. GRADE final report, Deltares rapport. (Passchier, R., H. van den Boogaard, A. Buishand, J. Beersma en M. Hegnauer)
- Deltares, 2015a. Kwantificering van de onzekerheden van het gebruik van Bretschneider in het bovenrivierengebied. Deltares rapport 1209433-007-HYE-0007, maart 2015.

- Deltares, 2015b. Qh-relatie voor benedenstroomse randvoorwaarden Rijntakken en Maas. Deltares memo 1220082-001-HYE-0001, februari 2015 (A. Smale).
- Deltares, 2015c. Quickscan modelonzekerheden golfbelastingen Markermeer. Deltares rapport 1220082-007-HYE-0002, april 2015
- Deltares, 2015d. Invloed correlatie modelonzekerheden GRADE en bovenrivieren op waterstand. Deltares memo 1220082-001-HYE-0003, d.d. 27 mei 2015.
- Deltares, 2015e. Tests SWAN model for tidal river area. Preparation for SWAN production runs WTI 2017. Deltares rapport 1209433-001-HYE-0035 (J. Morris).
- Deltares, 2015f. Kwantificering van modelonzekerheden in IMPLIC voor de Oosterschelde. Deltares rapport 1209433-008-HYE-0001 (N. Kramer en B. Reijmerink).
- Deltares, 2015g. Tests SWAN model for river delta Vecht-IJssel. Preparation for SWAN production runs WTI2017. Deltares Report 1209433-001-HYE-0036, version 1, 10 January 2015 (J.C.C. Van Nieuwkoop).
- Deltares, 2015h. Input database for the Bretschneider wave calculations for narrow river areas. In preparation for the WTI-2017 production runs. Deltares rapport 1209433-000-HYE-0013, 2015 (A. Calderon, A. Smale en J. van Nieuwkoop).
- Deltares, 2015i. Kalibratie van semi-probabilistisch toetsvoorschrift voor duinen. Deltares rapport 1220080-008-ZWS-0002 (P. Van Geer en F. Diermanse).
- Deltares, 2015j. Onzekerheidsanalyse hydraulica in GRADE. Deltares rapport 1220082-010-ZWS-0001 (G. Prinsen, H. van den Boogaard en M. Hegnauer).
- Deltares, 2016a. WAQUA productieberekeningen bovenrivieren Rijntakken. Deltares rapport 1220082-001-HYE-0013 (R. Agtersloot en A.J. Paarlberg).
- Deltares, 2016c. WAQUA productieberekeningen bovenrivieren Maas. Deltares rapport 1220082-001-HYE-0012 (R. Agtersloot en A.J. Paarlberg).
- Deltares, 2016d. SWAN berekeningen IJVD. Deltares rapport 1220082-0001-HYE-0017.
- Deltares, 2016e. Basisrapport WTI 2017, versie 1. Deltares rapport 1220078-001-GEO-004 (J.P. de Waal).
- Deltares, 2016f. Q-Variant - golfbelasting op bekledingen in Hydra-Ring. Deltares rapport 1230087-000-HYE-0004, augustus 2016 (J. den Bieman).
- Deltares, 2016g. SWAN productieberekeningen Rijn-Maasmondig, WBI 2017. Deltares rapport 1220082-001-HYE-0011 (M.D. Klein en M. Westra).
- Deltares, 2016h. WAQUA productieberekeningen Rijn- en Maasmondig. Deltares rapport 1220082-001-HYE-0015 (R. Agtersloot en A.J. Paarlberg).
- Deltares, 2016i. WAQUA productieberekeningen, IJssel-Vechtdelta. Deltares rapport 1220082-001-HYE-0014, februari 2016.

- Deltares, 2016j. Waterstandsverlopen Benedenrivierengebied voor WT12017. Deltares rapport 1220082-002-HYE-0004 (A. Kieftenburg en D. Stuparu).
- Deltares, 2016k. WBI - Onzekerheden. Overzicht van belasting- en sterkteonzekerheden in het wettelijk beoordelingsinstrumentarium. Deltares rapport 1220080-001-ZWS-0004, juli 2016 (F. Diermanse).
- Deltares, 2016l. GPV verdeling en keuze Weissman drempel in de GRADE onzekerheidsanalyse voor de Maas. Deltares rapport 1230045-006-ZWS-0001 (M. Hegnauer en H. van den Boogaard).
- Deltares, 2016m. SWAN productieberekeningen Ketelmeer en Vossemeer, WBI 2017. Deltares rapport 1220082-001-HYE-0010 (M.D. Klein en M. Westra). Delft 2016.
- Deltares, 2017a. Aanpassing statistiek Hydra-Ring en analyse overgang watersystemen. Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017. Deltares rapport 1230087-011-HYE-0004. E.H. Chbab en J. Beckers. Delft 2017.
- Deltares, 2017b. Hydraulische Belastingen Oosterschelde. Wettelijk Beoordelingsinstrumentation 2017. Deltares rapport 1230087-006-HYE-0001, april 2017.
- Deltares, 2017c. Hydraulische Belastingen Kust. Deltares rapport 1230087-002-HYE-0001, april 2017 2016 (J. Groeneweg, J. den Bieman).
- Deltares, 2017d. Hydraulische Belastingen Rijntakken en Maas. Deltares rapport 1230087-003-HYE-0001, april 2017 (E.H. Chbab, J. den Bieman, J. Groeneweg).
- Deltares, 2017e. Hydraulische Belastingen Benedenrivieren. Deltares rapport 1230087-004-HYE-0001, april 2017 (A. Smale, J. den Bieman, H. Chbab).
- Deltares, 2017f. Hydraulische Belastingen Vecht- en IJsseldelta. Deltares rapport 1230087-005-HYE-0002, april 2017 (T. Botterhuis, J. den Bieman, H. Chbab).
- Deltares, 2017g. Vaststelling van rekeninstellingen voor Hydra-Ring berekeningen van Hydraulische Belastingen. Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium 2017. Deltares rapport 1230087-011-HYE-0001. Delft 2017 (J. Groeneweg en J. den Bieman).
- Deltares, 2017h. Hydraulische Belastingen Meren. Deltares rapport 1230087-001-HYE-0001, april 2017 (N. Kramer, A. Smale, J. den Bieman, J. Groeneweg).
- Deugd, De, H. 2007. Waterloopkundige berekeningen TMR2006 Benedenrivierengebied. RWS RIZA rapport 2007.017. Lelystad 2010.
- Diermanse, F., Roscoe, K., de la Cruz, J. L., Steenbergen, H. en Vrouwenvelder, T. 2016. Hydra-Ring Scientific Documentation. Deltares & TNO-Bouw. Deltares rapport 1206006-004-ZWS-0001. Delft, 2016.
- Dillingh, D., de Haan, L., Helmers, R., Können, G.P. en van Malde J., 1993. De basispeilen langs de Nederlandse kust; statistisch onderzoek, Rijkswaterstaat, Dienst Getijdenwateren /RIKZ, Report DGW-93,023.

- Dillingh, D. en J. de Lima Rego (2010). Toets- en Rekenpeilen Kust en Estuaria ten behoeve van de HR2011. WTI-HRzout. Deltares rapport 1202341-002-HYE-0060, dd 9 november 2010.
- Ditlevsen, O. and Bjerager, P., 1987. Plastic Reliability Analysis by Directional Simulation. Technical University of Denmark, Report no. 353.
- Driesen, T.L.A. 2014. Baseline en WAQUA schematisaties Rijntakken 2014. Rapport RHDHV BD1443-101/R0002/904200/Nijm, 4 september 2014.
- Dulfer, C., 2014. Bepalen overschrijdingskans maximaal meerpeil, rekening houdend met open afwaaiing. Stageverslag HKV. Claire Dulfer, met medewerking van Bastiaan Kuijper, Chris Geerse (HKV) en Dorota Kurowicka.
- Eilander, D. 2014b. Herberekening basispeilen in het kader van WTI-2017. Toeslagen en zeespiegelstijging Deltares memo 1209431-003-ZWS-0003.
- Eilander, D., 2014a. Herberekening basispeilen in het kader van WTI-2017. Deltares memo 1209431-003-ZWS-0002.
- ENW, 2007. Technisch Rapport Duinafslag 2006 (TRDA2006). Leidraad voor de beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering ten behoeve van voorschrift toetsen op veiligheid 2006. WL|Delft Hydraulics (H4357).
- Fioole, A., 1999. De 50%-lijnen van Bovenrijn en Maas. RIZA memo WST 98.113, juli 1998
- Geerse, C.P.M., Duits, M.T., Kalk, H.J. en Lammers, I.B.M. 2002. Wind-waterstandsstatistiek Hoek van Holland. HKV rapport PR456. juli 2002
- Geerse, C.P.M en J.W. Verkaik, 2010. Effect nieuwe windstatistiek op toetspeilen en benodigde kruinhoogten. HKV rapport PR1601.10, februari 2010.
- Geerse, C.P.M. en K. Wojciechowska, 2014. Betrouwbaarheidsintervallen voor kwantielen van de overschrijdingsfrequentie. Toepassing op kuststations en IJsselmeergebied. HKV rapport PR2829.20.
- Geerse, C.P.M. en K. Wojciechowska, 2015. Betrouwbaarheidsintervallen voor kwantielen van de overschrijdingsfrequentie. Toepassing op kuststations en IJsselmeergebied. Aanvullend onderzoek. HKV rapport PR2829.20.
- Geerse, C.P.M. en R. Waterman, 2014. Waterstandsverlopen zoete en zoute wateren. Beschrijving en review gerapporteerde verlopen en uitbreiden van de tool 'Waterstandsverloop'. HKV rapport PR2803.
- Geerse, C.P.M., 2003. Probabilistisch model hydraulische randvoorwaarden benedenrivierengebied. RIZA rapport 2003.128x, 2003
- Geerse, C.P.M., 2006. Hydraulische Randvoorwaarden 2006 Vecht- en IJsseldelta, Statistiek IJsselmeerpeil, afvoeren en stormverlopen voor Hydra-VIJ, RWS RIZA werkdocument 2006.036x, 2006.

- Geerse, C.P.M. 2007. Methode bepalen waterstandsverlopen Vecht- en IJsseldelta. Rapport PR1392.10, december 2007.
- Geerse, C.P.M., 2013. Belastingmodellen WTI-2017. Gevoeligheidsanalyses en adviezen voor eventuele aanpassingen aan Hydra-Ring. HKV rapport PR2647.40, september 2013.
- Geerse, C.P.M., 2016a. Voorstel voor aanpassing Vechtstatistiek en modelonzekerheid waterstand. HKV memorandum PR3280.20. september 2016.
- Geerse, C.P.M., 2016b. Werkwijze uitintegreren onzekerheden basisstochasten voor Hydra-NL Afvoeren, meerpeilen, zeewaterstanden en windsnelheden - Update februari 2016 HKV rapport PR3216.10. Lelystad.
- Geerse, C.P.M. 2017. Memo ten behoeve van de implementatie van nieuwe werklijnen voor Vechtafvoer bij Dalfsen. HKV lijn in water, 2017. In opdracht van Deltares.
- Groeneweg, J., 2010. Aangepaste bodem Westerschelde. Deltares memo 1202341-002-HYE-0014, 18 maart 2010.
- Hartsuiker, G., 2010. Aanpassingen aan rekenroosters riviermodellen. ARCADIS memo, 5 maart 2010.
- HKV, 2005. Diepwaterrandvoorwaarden (ELD, EUR, YM6, SCW en SON). HKV rapport PR841.40. juli 2005.
- HKV, 2016a. Waterstandsverlopen WBI-2017. Berekeningen m90% percentielen voor het IJsselmeer en het Markermeer.
- Holthuijsen, L.H. 1980. Methoden voor golfvoorspelling (deel 1 en 2). TAW.
- Jong, de M.P.C. (2004), Origin and prediction of seiches in Rotterdam harbour basins, Ph.D.Thesis, Delft university of Technology.
- Jungermann, N. en Horn, G. 2016. Afvoer(beperkingen) van de Overijsselse Vecht in extreme omstandigheden. Eindrapport. PR3202.10.Nicole Jungermann en Geerten Horn. HKV Lijn in Water, februari 2016.
- Kerkhoven, D., 2015. Flowdiagram en toestanden keringen RMM - WTI2017. Deltares memo 1220072-005-ZWS-0008, 26 augustus 2015.
- Khandekar, M.L., R. Lalbeharry, and V. Cardone, 1993: The performance of the Canadian Spectral Ocean Wave Model (CSOWM) during the Grand Banks ERS-1 SAR wave spectra validation Experiment. Atmosphere-Ocean, 32, 31-60.
- Klein, M.D. (2011). SWAN productieberekeningen IJsselmeer en Zwarte Meer voor WTI2011: rapportage fase 1 en fase 2. Rapport RP_01_4, HKV Lijn in water en Svašek Hydraulics, maart 2011.
- Klein, M.D. en A. Kroon, 2011c. Productieberekeningen SWAN Europoort voor WTI-2011. Fase 1. Svasek rapport PR1876.10, september 2011.

- Klein, M.D. en A. Kroon, 2011d. SWAN productieberekeningen IJsselmeer en Zwarte Meer voor WTI2011, rapportage fase 2, Rapport RP_02_4, HKV Lijn in water en Svasek Hydraulics, april 2011.
- Klein, M.D. en A. Kroon, 2011a. Productieberekeningen Westerschelde voor WTI-2011: rapportage Fase 1. HKV Lijn in Water / Svasek Hydraulics rapport PR1874.10, februari 2011.
- Klein, M.D. en A. Kroon, 2011b. Productieberekeningen Waddenzee voor WTI-2011: rapportage Fase 1. HKV Lijn in Water / Svasek Hydraulics rapport PR1872.20, mei 2011.
- Klein, M.D., A. Kroon en B. van Leeuwen, 2010. SWAN model van het IJsselmeer. Svasek rapport 1575/U010184/mkl, juli 2010.
- Klopstra, D., Braak, E. van den, Kalk, H. en Termes, P. 2002. Maatgevende afvoer enafvoerstatistiek Overijsselse Vecht bij Dalfsen RVW2006, Deelrapport 8, HKVlijnin water in opdracht van RWS RIZA, Lelystad, december 2002.
- Kors, A.G., Zwol, J.H. van, Franken, A., 1994. Projectnota/MER Ramspol, HydraulischeRandvoorwaarden, Deelrapport van de werkgroep Hydraulica, november 1994.
- Kramer, J., 2016. Software Package: DaF module, Dam and Foreshore module. Theoretical Documentation. Version 5.00, Revision 00. March 2016.
- Kroos, J. 1999. Nauwkeurigheid waterstandsverwachtingen SVSD voor Hoek van Holland.Memo door J. Kroos, gedateerd 16 september 1999, van RIKZ aan Rijkswaterstaat, directie Zuid-Holland t.a.v. dhr. ir. A. van der Wekken
- Leander, R. and T.A. Buishand, 2009. A daily weather generator based on a two-stage resampling algorithm. Journal of Hydrology, 374, 185-195.
- Leander, R., T.A. Buishand, P. Aalders, and M.J.M. de Wit, 2005. Estimation of extreme floods of the Meuse using a stochastic weather generator and a rainfall-runoff model. Hydrological Sciences Journal, 50, 1089-1103.
- Leeuwen, B. van, 2011. SWAN WTI model Europoort. Toepasbaarheidsonderzoek. Svasek rapport 1584/U10148/E/BvL..
- Ministerie I&M, 2014. Synthesedocument deelprogramma Veiligheid, achtergrondrapportage bij Deltaprogramma 2015. Den Haag, 10 juli 2014.
- Ministerie I&M, 2016. Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017. Bijlage II Voorschriften bepaling hydraulische belasting primaire waterkeringen. Rapport Ministerie Infrastructuur en Milieu, versie 22 april 2016.
- Nicolai, R.P., C.P.M. Geerse en E.H.Chbab, 2014. Belastingmodellen WTI-2017, overzicht en benodigde gegevens onzekerheden. HKV Lijn in Water & Deltares, PR2829.10, mei 2014.

- Rego, J.R., 2010. Hydrodynamic production runs with Kuststrook model: 360 surge scenarios. Deltares memo 1200103-024-HYE-0002, 26 March 2010.
- Rogers, W.E., Hwang, P.A. en Wang, D.W. 2002. Investigation of wave growth and decay in de SWAN model: three regional scale applications, J. Phys. Oceanogr. 33., 366-389.
- RHDHV, 2014. Testberekeningen t.b.v. productieberekeningen WTI-2017 voor Benedenrivieren. Rapport Royal Haskoning DHV BD 3957, december 2014.
- Rijkooit en Wieringa, 1983. Windklimaat van Nederland, KNMI.
- Roskam, A.P., J. Hoekema en J.J. Seiffert, 2000. Richtingsafhankelijke extreme-waarden voor HW-standen, golfhoogten en golfperioden. Rapport RIKZ/2000.040. RIKZ Den Haag, december 2000.
- Rozemuller, L., 2006. Basisontwerp keringprocedures Stormvloedkering Nieuwe Waterweg, Stormvloedkering Hartelkering en Hartelsluis, versie 5.3. TE-06-TEC-DOC-088, juli 2006
- RWS, 1994. User's Guide WAQUA, versie 8.4, Rijkswaterstaat, november 1994.
- RWS, 1995. De basispeilen langs de Nederlandse kust. De ruimtelijke verdeling en overschrijdingslijnen. RIKZ-95.008.
- RWS, 2001. Room for the Rhine in the Netherlands. Summary of research results. October 2001.
- RWS, 2009. Nieuwe shape dijkkringlijn, versie 3-2. RWS DID. 2009
- RWS, 2015. Modelonzekerheden Bretschneider Bovenrivierengebied. Rapport RWS-WVL, maart 2015 (M. Bottema en G. van Vledder).
- RWS-Bouwdienst, 2008. Prestatiepeilen Oosterschelde – vervolg, april 2008, Auteur: S. van Manen.
- RWS-DZH, 1999. Waterakkoord Hollandsche IJsselkering.
- RWS-IJG, 2005. Actueel dieptebestand IJsselmeergebied.
- RWS-RIKZ, 2006. SWAN berekeningen voor de Hollandse Kust. Aansturing en controle ten behoeve van de Hydraulische Randvoorwaarden 2006. RWS-RIKZ rapport 2006.027.
- RWS-RIKZ, 2007. Achtergrondrapport HR2006 voor de Zee en Estuaria. RWS-RIKZ rapport 2006.029. Den Haag 2007.
- RWS-RIZA, 2007. Achtergrondrapport HR 2006 voor de Meren. Hydraulische Randvoorwaarden 2006. RWS RIZA rapport 2007.025
- RWS-Zeeland, 2010. Het gebruik van het model IMPLIC bij het bepalen van de prestatiepeilen Oosterschelde – Aanpassing en verificatie van het model, Rapport PO-2010-004, april 2010 (M. Schrijver, K. Saman en P. Lievense)

- TAW, 1989. Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken. Deel 1 - Bovenrivierengebied. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. Staatsuitgeverij. 's Gravenhage, 1985
- Thonus, B., 2006. Waterstandsverlopen en snelle val indicatie. Fase 1: onderzoek methode, invoer en gevoeligheid en Fase 2: uitvoeren van definitieve berekeningen voor benedenrivierengebied. HKV Lijn in Water, juni 2006.
- TU-Delft, 2010. SWAN manual 40.72; zie swan.tudelft.nl.
- Van Balen, W., 2016. Hydra-Ring. Technical Reference Manual. Version 2.0. Deltares WTI2017 software documentation, August 2016.
- Van den Brink, H., 2015. Extrapolatie van de zeewaterstand in het Waddengebied. KNMI memo, 8 juli.
- Van Nieuwenhuijzen, L.W., Geerse, C.P.M., Bosters, R., 2010. Aansluiting Hydra's op VTV-tools voor bekledingen in WTI2011. Royal Haskoning rapport, 9V6063.A0, juli 2010.
- Van Vledder, G.Ph., 2015. Stappenplan aanpassing hydraulische randvoorwaarden op basis van nieuwe inzichten winddrag. Van Vledder Consulting memo vc55m1r3, 10 december 2015.
- Verkaik, J.W., A.J.M. Jacobs, A.B.C. Tijm, 2002: Advies inzake wind boven open water. KNMI
- Vrouwenvelder en Vrijling, 2001. Kansen, onzekerheden en hun interpretatie. Memorandum.2000-CON-DYN/M2107. Delft, 31 januari 2001
- Vrouwenvelder, A.C.W.M., H.M.G.M. Steenbergen en F.L.M. Diermanse, 2003. Belastingmodellen Westerschelde en Waddenzee. Vergelijking Hydra-K en PC-Ring (inclusief resultaten aanvullende studie).
- Vrouwenvelder A.C.W.M., 1994. Statistisch model voor seicheshoogten ten behoeve van dekering in de Nieuwe Waterweg. 4.21.3.8581, Rijkswaterstaat/RIKZ en TU-Delft.
- Volker, W.F, 1987. Statistiek van wind en waterstanden in Hoek van Holland. Tweedeconcept. W.F. Volker. 20 mei 1987.
- Vuik, V., E. Collard, M. Rotsaert en J. da Silva, 2011a. WAQUA-productieberekeningen IJsselmeer en Vecht- en IJsseldelta voor WTI-2011: rapportage fase 1. Svasek/HKV rapport PR1878.10, september 2011.
- Vuik, V., E. Collard, M. Rotsaert en J. da Silva, 2011b. WAQUA-productieberekeningen Benedenrivierengebied voor WTI-2011: rapportage fase 1. Svasek/HKV rapport PR1876.30, september 2011.
- Waal, J.P. de, 2003. Windmodellering voor bepaling van waterstanden en golven. Een analyse van de bouwstenen. Rijkswaterstaat RIZA, RIZA werkdocument 2003.118x, juli 2003.
- Waterwet, 2009, <http://wetten.overheid.nl>.

- Weerts, A. en Diermanse, F., 2004. Golfstatistiek op diepwater 2002. Fase 2: samenstellenbestanden simultane waarnemingen. Rapport Q3770; 2004.
- Witteveen en Bos, 2004. Advies golfrandvoorwaarden IJburg. Rapport Rw1352-1. Oktober 2004.
- Witteveen en Bos, 2010. Hindcast verification of SWAN in the Western Scheldt. Witteveen + Bos report.
- WL | Delft Hydraulics, 1997. Onafhankelijk Onderzoek Markermeer, deelonderzoek meerpeilstatistiek, verslag fase 1A.
- WL | Delft Hydraulics, 1997. Onafhankelijk Onderzoek Markermeer, Bouw Delft2D systeem, verslag fase 1b-2.
- WL | Delft Hydraulics, 1997. Onafhankelijk Onderzoek Markermeer, stormprofiel en windvelden, verslag fase 1b-3.
- WL | Delft Hydraulics, 1997. Onafhankelijk Onderzoek Markermeer, Technisch inhoudelijke en intergrerende studie. H3211, verslag fase 1b-4.
- WL | Delft Hydraulics, 1998. Onafhankelijk Onderzoek Markermeer, Technisch inhoudelijke en intergrerende studie. H3211. Productieberekeningen en controle, verslag fase 1b-4.
- Wu, J., 1982. Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane. *Journal of Geophysical Research* 87 (C12), 9704–9706.
- Zijlema, M., G.Ph. van Vledder, en L.H. Holthuijsen, 2012: Bottom friction and wind drag for wave models, *Coastal Engineering*, 65, 19-26.

A Watersystemen en hun stochasten

Watersysteem	In HydraRing		Watersysteemtype						Stochast					
	Regio nummer	Naam	Bovenrivieren	Benedenrivieren	IJssel- en Vechtdelta	Meren	Kust - harde kerfingen	Oosterschelde	Duinen	Wind	Afvoer	Zee waterstand	Meerpeil	Stormvloedkering
Bovenrivieren (Rijn)	1	bovenrijn	X							Deelen	Lobith	-	-	-
Bovenrivieren (Maas)	2	bovenmaas	X						Deelen	Borgharen	-	-	-	-
Limburgse Maas	18	bovenmaas_hk	X						Deelen	Borgharen	-	-	-	-
Benedenrivieren (Rijn)	3	benedenrijn		X					Schiphol	Lobith	Maasmond	-	-	Europoortkering
Benedenrivieren (Maas)	4	benedenmaas		X					Schiphol	Lith	Maasmond	-	-	Europoortkering
Europoort	17	europoort		X					Schiphol	Lobith	Maasmond	-	-	Europoortkering
IJsseldelta	5	ijsseldelta			X				Schiphol	Olst	-	IJsselmeer	-	-
Vechtdelta	6	vechtdelta			X				Schiphol	Dalfsen	-	IJsselmeer	-	Ramspolkering
IJsselmeer	7	ijsselmeer				X			Schiphol	-	-	IJsselmeer	-	-
Markermeer	8	markermeer				X			Schiphol	-	-	Markermeer	-	-
Waddenzee Oost	9	waddenzee_oost					X		West-Terschelling	-	(zie aparte tabel)	-	-	-
Waddenzee West	10	waddenzee_west					X		West-Terschelling	-	(zie aparte tabel)	-	-	-
Hollandse Kust Noord	11	hollandsekust_noord					X		De Kooy	-	(zie aparte tabel)	-	-	-
Hollandse Kust Midden	12	hollandsekust_midden					X		Urniden	-	(zie aparte tabel)	-	-	-
Hollandse Kust Zuid	13	hollandsekust_zuid					X		Hoek van Holland	-	(zie aparte tabel)	-	-	-
Westerschelde	15	westerschelde					X		Viissingen	-	(zie aparte tabel)	-	-	-
Oosterschelde	14	oosterschelde					X		Viissingen	-	OS11	-	-	Oosterscheldeking
Duinen	16	duinen						X	-	-	(zie literatuur)	-	-	-

Watersysteem	In HydraRing		Stochast zeewaterstand											
	Regio nummer	Naam	Delfzijl	Huibertgat	Lauwersoog	Harlingen	West-Terschelling	Den Oever	Den Helder	IJmuiden	Hoek van Holland	Oosterschelde-buiten	Vlissingen	Hansweert
Waddenzee Oost	9	waddenzee_oost	x	x	x	x	x							
Waddenzee West	10	waddenzee_west		x	x	x	x	x	x					
Hollandse Kust Noord	11	hollandsekust_noord				x	x	x	x	x				
Hollandse Kust Midden	12	hollandsekust_midden							x	x	x			
Hollandse Kust Zuid	13	hollandsekust_zuid							x	x	x	x	x	
Westerschelde	15	westerschelde											x	x