



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Milieu

Deltares

Achtergrondrapportage hydraulische belasting voor de Benedenrivieren

Augustus 2012

Dit rapport is opgesteld in opdracht van RWS Waterdienst

Achtergrondrapportage hydraulische belasting voor de Benedenrivieren

Houcine Chbab

1204143-003

© Deltares, 2012

Voorwoord

Ter voorbereiding op de vierde toetsronde is in de periode 2006 tot 2011 veel onderzoek uitgevoerd om de kennis over de sterkte van en de belastingen op waterkeringen te vergroten. Dit is grotendeels gedaan binnen het onderzoeksprogramma Sterkte en Belastingen van Waterkeringen (SBW). De resultaten van dit onderzoek zijn vastgelegd in (onderzoeks)rapporten en instrumenten, waaronder dit rapport. De onderzoeksresultaten worden gebruikt voor het ontwikkelen van het Wettelijk Toetsinstrumentarium voor de vierde ronde toetsen op veiligheid (WTI 2017).

Titel

Achtergrondrapport WTI-2011 voor de Benedenrivieren

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
RWS Waterdienst	1204143-003	1204143-003-ZWS-0030	131

Trefwoorden

Benedenrivieren, WTI-2011, hydraulische randvoorwaarden, toetspeilen

Samenvatting

Dit rapport beschrijft de achtergronden bij het berekenen van de concept hydraulische randvoorwaarden voor het Benedenriviereengebied. Deze randvoorwaarden zijn in het kader van het Wettelijke Toetsinstrumentarium WTI-2011 bepaald.

Bij de berekeningen is zoveel mogelijk gebruik gemaakt van de nieuwe inzichten in de HR-keten. De waterstanden zijn bepaald met een nieuwe tweedimensionale modelschematisatie met WAQUA in plaats van het reeds beschikbare eendimensionale SOBEK model. De golfparameters in de bredere wateren van het Benedenriviereengebied (Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch) en het gebied van de Europoort zijn bepaald met een tweedimensionaal SWAN model in plaats van de benadering volgens Bretschneider. De seiches toeslagen in het gebied buiten de stormvloedkeringen zijn geactualiseerd. De probabilistische berekeningen zijn uitgevoerd met Hydra-Zoet in plaats van Hydra-B. De productieberekeningen met WAQUA en SWAN zijn uitvoerig gecontroleerd en blijken voldoende betrouwbaar te zijn.




De berekende concept toetspeilen laten een consistent en logisch beeld zien. Het beeld is dat er ten opzichte van de vigerende toetspeilen zowel verlaging als verhoging optreedt. De verlaging van de toetspeilen treedt vooral op in het gebied dat bovenstrooms van de Biesbosch ligt. De maximale verlaging bedraagt -0,38 m en treedt op langs de Boven Merwede. Langs de Bergsche Maas treedt een soortgelijke verlaging op. De verlaging op de Boven Merwede en de Bergsche Maas wordt veroorzaakt door de tweedimensionale modellering van het gebied rondom de Biesbosch. De verhoging treedt op in de bredere wateren van de Benedenrivieren en bedraagt ca. 0,2 m. De oorzaak ligt voornamelijk in de verlengde stormopzetduur bij Hoek van Holland. De maximale verhoging van 0,28 m treedt op langs het Wantij, en wordt veroorzaakt door een combinatie van stormopzetduur en modellering met WAQUA.

In het Europoortgebied zijn de berekende concept toetspeilen hoger dan die van HR2006 en de geactualiseerde seiches toeslagen lager. De maatgevende waterstanden voor de hoogtetoets (toetspeil + seiches toeslag) zijn lager.

Algemeen genomen ogen de SWAN resultaten met Hydra-Zoet realistischer dan die van Bretschneider. Gemiddeld genomen leidt het SWAN model in de bredere wateren tot hogere hydraulische belastingniveaus dan Bretschneider. Dit beeld is echter niet eenduidig en hangt af van lokale omstandigheden. In de smalle wateren, waar Bretschneider is aangehouden sluiten de verschillen, veroorzaakt door de geactualiseerde strijklengtes en gemiddelde waterdieptes, in het algemeen aan bij de verschillen in toetspeilen en waterstanden. De verschillen zijn beperkt tot ongeveer een decimeter met enkele individuele uitschieters.

Referenties

WTI-2011, HR zoet, Benedenrivieren, concept HR2011

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	aug. 2012	Houcine Chbab		Chris Sprengers		Gerard Blom	

Status

definitief

Titel

Achtergrondrapport WTI-2011 voor de
Benedenrivieren

Opdrachtgever	Project	Pagina's
RWS Waterdienst	1204143-003	112

- Figuur 1.1 Dijkkringgebieden in Nederland en bijbehorende veiligheidsnormen.
- Figuur 2.1 Overzicht van de dijkkringgebieden in het Benedenrivierengebied
- Figuur 2.2 Geografisch overzicht van de riviertakken in de Benedenrivieren.
- Figuur 2.3 Het Benedenrivierengebied, onderverdeeld in zeegebied Z, het overgangsgebied O en het rivierengebied R.
- Figuur 2.4 Schematische weergave van de HR-keten voor de Benedenrivieren uit Van der Klis et al. (2010).
- Figuur 3.1 Overzicht van het interessegebied van het WAQUA model Rijn- en Maasmonding
- Figuur 3.2 Schematisatie gebied van WAQUA-RMM inclusief modelranden beneden- en bovenstrooms. De benedenstroomse rand wordt gegeven door de gele lijn langs het zeedomein.
- Figuur 3.3 Overzicht van de bodemligging in de modelschematisatie van het rivierendomein van WAQUA-RMM.
- Figuur 3.4 WAQUA-RMM bestaand uit een zeedomein (geel) en een rivierendomein (rood)
- Figuur 3.5 Het rekenrooster van het verkleinde WAQUA-RMM ter plaatse van de benedenstroomse open randen. Het rode rooster is het overgebleven deel van het zeedomein, het zwarte rooster is het rivierendomein van WAQUA-RMM. De zwarte bollen geven de SOBEK randlocaties weer.
- Figuur 3.6 Uitsnede van het rivierendomein van WAQUA-RMM waarin de roosterlijnen het zomerbed zoveel mogelijk volgen.
- Figuur 3.7 Overzicht ligging kunstwerken in het Benedenrivierengebied.
- Figuur 3.8 Flowdiagram schematische weergave aansturing van de Maeslant- en Hartelkering.
- Figuur 3.9 Ligging en hoogtegegevens verbindende Hartelkering zoals geschematiseerd in WAQUA (bron Legger).
- Figuur 3.10 Vorm windverloop in de tijd voor een storm met maximale windsnelheid van 30 m/s; rood = verloop HR2006 en blauw = verloop WTI-2011.
- Figuur 3.11 Variabele windschuifspanningscoëfficiënt zoals toegepast voor de productieberekeningen van Benedenrivieren
- Figuur 3.12 Vorm en duur stormopzet binnen WTI-2011.
- Figuur 3.13 Relatie tussen stormopzet , getij voor de benedenrand locatie Maasmond en de wind
- Figuur 3.14 Gehanteerde 50% relaties voor Rijnafvoer en Maasafvoer.
- Figuur 3.15 Overzicht van de as locaties in de Benedenrivieren

Titel

Achtergrondrapport WTI-2011 voor de Benedenrivieren

Opdrachtgever	Project	Pagina's
RWS Waterdienst	1204143-003	112

- Figuur 3.16 Overzicht van de verschillende typen uitvoerlocaties voor delen van het Benedenrivierengebied (Haringvliet, Hollandse Diep en de Biesbosch). Zwart = basisset, rood = natte set.
- Figuur 3.17 Twee detail secties van Figuur 3.16. Links een doorsnede met alleen locaties uit de basisset en rechts een doorsnede met locaties uit de basis- en natte set
- Figuur 3.18 Ligging aanpassingen in de SOBEK modelschematisatie voor de Benedenrivieren binnen WTI-2011.
- Figuur 3.19 Geselecteerde locaties voor testberekeningen WAQUA-RMM.
- Figuur 3.20 Voorbeeld verschil in waterstand voor een bepaald tijdstip met de gemiddelde waterstand van de twee omliggende tijdstappen.
- Figuur 3.21 Verdeling van de berekeningen over verschillende toestanden van de keringen.
- Figuur 3.22 Verdeling van de uitvoerlocaties op basis van het aantal berekeningen met afkeuring op instabiliteit
- Figuur 3.23 Verdeling van de uitvoerlocaties op basis van het aantal berekeningen met afkeuring op droogval.
- Figuur 3.24 Grafische weergave van de verschillen tussen berekende waterstanden met SOBEK en vigerende toetspeilen uit HR2006.
- Figuur 4.1 Voorbeeld strijklengtes en gemiddelde bodemdieptes voor locatie DR35 Bergsche Maas.
- Figuur 4.2 Omhullende SWAN model Haringvliet, Hollandsch Diep en Biesbosch
- Figuur 4.3 Schematische weergave bodemligging Haringvliet, Hollandsch Diep en Biesbosch.
- Figuur 4.4 Overzicht basisrekenrooster Haringvliet, Hollandsch Diep en Biesbosch, inclusief de primaire waterkering (rode lijn).
- Figuur 4.5 Gedefinieerde controlepunten en raaien studie resolutie rekenrooster.
- Figuur 4.6 Ruimtelijke verdeling van de grootte van de roostercellen van het SWAN model Haringvliet, Hollandsch Diep en Biesbosch.
- Figuur 4.7 Verband tussen waterstand en de berekende golfhoogte, stapgrootte 2 m en 1 m voor de controle locatie 5.
- Figuur 4.8 Performance van SWAN m.b.t. $T_{m-1,0}$ voor de meren (o: IJsselmeer; x: Slotermeer)
- Figuur 5.1 schematische kaart van het Europoortgebied inclusief relevante locaties voor bepaling van seiches.
- Figuur 5.2 Voorbeeld van een gemeten (rood) en bijbehorende gefilterde tijdreeks (blauw), inclusief het netto-seiche-effect en seiche-amplitude.
- Figuur 5.3 Voorbeeld schematische weergave van de conditionele kansverdeling van het NSE gegeven de waterstand

Titel

Achtergrondrapport WTI-2011 voor de
Benedenrivieren

Opdrachtgever	Project	Pagina's
RWS Waterdienst	1204143-003	112
Figuur 5.4	Waterstand met en zonder NSE, en NSE bij ROZ als functie van de terugkeertijd	
Figuur 5.5	Schematische weergave modelgebied Europoort	
Figuur 5.6	Overzicht bodemligging Europoortgebied.	
Figuur 5.7	Overzicht rekenrooster SWAN modellering Europoort.	
Figuur 6.1	Illustratie trapeziumvormige afvoergolven in Hydra-Zoet	
Figuur 6.2	Overschrijdingskans piekafvoeren Rijn bij Lobith, in Hydra-Zoet en Hydra-B.	
Figuur 6.3	Trapezia van Rijnafoer bij Lobith in Hydra-zoet, tezamen met de standaard golfvormen uit Hydra-B.	
Figuur 6.4	Topduur $b(q)$ van het trapezium voor de Rijn afvoer bij Lobith.	
Figuur 6.5	Overschrijdingskans piekafvoeren Maas bij Lith, in Hydra-Zoet en Hydra-B	
Figuur 6.6	Trapezia van Maasafvoer bij Lith in Hydra-zoet, tezamen met de standaard golfvormen uit Hydra-B	
Figuur 6.7	Topduur $b(q)$ van het trapezium voor de afvoer van de Maas bij Lith.	
Figuur 7.1	Overzicht van de verschillen tussen de berekende concept toetspeilen en vigerende HR2006	
Figuur 7.2	Overzicht van de verschillen tussen de berekende getallen (toetspeil +toeslag) in WTI-2011 en HR2006.	
Tabel 2.1	Dijkkringgebieden in de Benedenrivieren	
Tabel 2.2	Verbindende waterkeringen in de Benedenrivieren	
Tabel 3.1	Afzink- en stijgsnelheid van de Maeslantkering en Hartelkering	
Tabel 3.2	Toestanden van de Maeslant- en Hartelkering in het keringscript	
Tabel 3.3	Verschillen in modelschematisaties met SOBEK en WAQUA-RMM	
Tabel 3.4	Stochastcombinaties productieberekeningen Benedenrivierengebied	
Tabel 3.5	Windsnelheden productieberekeningen Benedenrivierengebied	
Tabel 3.6	De bij de productieberekeningen toegepaste windrichtingen (sectoren).	
Tabel 3.7	Parameters voor de zeeranden productieberekeningen	
Tabel 3.8	Ligging bovenranden van WAQUA en SOBEK modelschematisaties	
Tabel 3.9	Afvoerniveaus productieberekeningen met de verdeling over de Rijntakken en de Maas bij Rijndominantie	
Tabel 3.10	Afvoerniveaus productieberekeningen met de verdeling over de Rijntakken en de Maas bij Maasdominantie	
Tabel 3.11	Ligging locaties laterale instroom in WAQUA voor de Benedenrivieren	

Titel

Achtergrondrapport WTI-2011 voor de Benedenrivieren

Opdrachtgever	Project	Pagina's
RWS Waterdienst	1204143-003	112

Tabel 3.12	Laterale lozingen op de Lek bij Rijn- en Maasdominantie
Tabel 3.13	Laterale lozingen op de Maas bij Rijndominantie
Tabel 3.14	Laterale lozingen op de Maas bij Maasdominantie
Tabel 3.15	Overzicht van de 108 MHW-p stochastcombinaties. De windsnelheid en de Maasafvoer (weergegeven in grijs) worden niet als onafhankelijke stochasten beschouwd maar worden gekoppeld aan de zeewaterstand en de Rijnafvoer respectievelijk.
Tabel 4.1	Testcondities voor de bepaling van geschikt rekenrooster
Tabel 4.2	Stochastcombinaties SWAN berekeningen Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch
Tabel 5.1	NSE waarden behorende bij verschillende terugkeertijden zoals gebruikt in HR2006 en WTI-2011
Tabel 5.2	Stochastwaarden SWAN berekeningen Europoort en de bijbehorende HR2006 stochastwaarden die de golfrandvoorwaarden op de Noordzee leveren. De niet exact bij elkaar passende WTI-2011 en HR2006 waarden zijn cursief weergegeven
Tabel 7.1	Verschillen concept toetspeilen met seiches toelagen t.o.v. HR2006 per buitenwater

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Achtergrond	1
1.2	Hydraulische Randvoorwaarden en veiligheidsnormen	2
1.3	Doelstelling	3
1.4	Doelgroep	3
1.5	Proces en organisatie	3
1.6	Leeswijzer	4
2	Systeem- en ketenbeschrijving	5
2.1	Systeembeschrijving	5
2.2	Ketenbeschrijving Benedenrivieren	9
3	Schematisatie en productie waterstanden	13
3.1	Inleiding	13
3.2	WAQUA-RMM model	13
3.2.1	Modelgebied WAQUA-RMM	13
3.2.2	Brongegevens	15
3.2.3	Modelschematisatie en rekenrooster WAQUA-RMM	15
3.2.4	Kalibratie en validatie WAQUA-RMM	19
3.2.5	Kunstwerken en aansturing binnen WAQUA	20
3.2.6	Verschillen SOBEK en WAQUA schematisaties Benedenrivieren	27
3.3	Randvoorwaarden en productieberekeningen	28
3.3.1	Randvoorwaarden Benedenrivieren	28
3.3.2	Randvoorwaarde wind	29
3.3.3	Randvoorwaarde windrichting	31
3.3.4	Benedenrand: zeewaterstand	31
3.3.5	Bovenranden: afvoeren	34
3.3.6	Kunstwerken en stuwen	36
3.4	Uitvoerlocaties	37
3.4.1	Type uitvoerlocaties	37
3.4.2	Conversie van RD-coördinaten naar roostercoördinaten	40
3.4.3	Naamgeving uitvoerlocaties	40
3.5	Uitvoeren productieberekeningen WAQUA-RMM	41
3.5.1	Software	41
3.5.2	Hardware	41
3.5.3	Testberekeningen en vergelijking met SOBEK	41
3.6	Resultaten en controle productieberekeningen WAQUA	44
3.6.1	Controle productieberekeningen	44
3.6.2	Resultaat controle productieberekeningen WAQUA-RMM	47
3.6.3	Vergelijking resultaat WAQUA-RMM met SOEBK	50
4	Schematisatie en productie golven	53
4.1	Inleiding	53
4.2	Bretschneider formulering in de smalle wateren van het Benedenrivierengebied	53
4.3	SWAN model Haringvliet, Hollandsch Diep en Biesbosch	54
4.3.1	Gebiedsbeschrijving	54
4.3.2	Versie en instellingen	55

4.3.3	Bodemligging SWAN schematisatie Haringvliet, Hollandsch Diep en Biesbosch	57
4.3.4	Rekenrooster	58
4.4	Productieberekeningen SWAN Haringvliet, Hollandsch Diep en Biesbosch	59
4.4.1	Waterstandsvelden en resolutie wind in SWAN	59
4.4.2	Randvoorwaarden SWAN berekeningen	61
4.5	Uitvoeren en controleren productieberekeningen SWAN	62
4.6	Keuze golfparameters uit SWAN en vullen databases	63
4.6.1	Keuze golfparameters uit SWAN berekeningen	63
4.6.2	Vullen databases	65
5	Europoort	66
5.1	Inleiding	66
5.2	Aanpak Europoort in WTI	66
5.3	Inconsistenties kust en Benedenrivierengebied	67
5.4	Seiches toeslagen	68
5.4.1	Inleiding	68
5.4.2	Vigerende seiches toeslagen	69
5.4.3	Actualisatie seiches WTI-2011	69
5.4.4	Actualisatie referentiestatistiek te ROZ	69
5.4.5	Actualisatie seiches toeslagen	72
5.5	SWAN Europoort: lokale golven en deining	72
5.5.1	Modelgebied SWAN Europoort	72
5.5.2	Versie en instellingen	73
5.5.3	Bodemligging SWAN Europoort	74
5.5.4	Rekenrooster SWAN Europoort	75
5.6	Productierandvoorwaarden SWAN Europoort	77
5.7	Uitvoeren en controle productieberekeningen SWAN Europoort	78
5.8	Keuze golfparameters uit SWAN berekeningen en vullen databases	78
6	Statistiek en probabilistisch rekenen	79
6.1	Inleiding	79
6.2	Probabilistisch model Hydra-Zoet	79
6.3	Marginale statistiek stochasten Benedenrivieren	80
6.3.1	Afvoerstatistiek Rijn en Maas in Hydra-Zoet	80
6.3.2	Windstatistiek	85
6.3.3	Zeewaterstand	86
6.3.4	Maeslant en Hartelkering	86
7	Concept hydraulische randvoorwaarden	87
7.1	Berekeningen	87
7.2	Vergelijking en verschilanalyse toetspeilen	88
7.3	Vergelijking en verschilanalyse belastingniveaus	90
8	Samenvatting en conclusies	93
8.1	Samenvatting	93
8.2	Conclusies	94
9	Aanbevelingen voor de toekomst	97
	Bijlage A: lijst seiches toeslagen WTI-2011	103

Bijlage B: berekende maatgevende waterstanden WTI-2011 voor verschillende terugkeertijd.
107

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

De Waterwet (2009) bepaalt dat waterkeringbeheerders iedere zes jaar de primaire waterkeringen moeten toetsen op de geldende veiligheidsnormen. De toetsing dient inzicht te verschaffen in de actuele veiligheid van de primaire waterkeringen en de resultaten geven al dan niet aanleiding voor het initiëren van verbeteringswerken. Het wettelijke toetsinstrumentarium (WTI) bestaat uit het Voorschrift Toetsen op Veiligheid (VTV) en de Hydraulische Randvoorwaarden (HR). Het VTV is het voorschrift hoe de toetsing dient te worden uitgevoerd en bestaat uit een omschrijving van de toetsmethoden voor verschillende faalmechanismen. De HR vormen in principe de getalsmatige verzameling van de toetspeilen en de maatgevende hydraulische belastingen, in termen van waterstanden en golfparameters als significante golfhoogte, golfperiode en golfrichting, voor alle locaties waar zich primaire waterkeringen bevinden.

Ten behoeve van deze vaststelling is per watersysteem onderzocht of en wat volgens de nieuwste inzichten in de HR-keten de concept hydraulische randvoorwaarden zouden zijn. Voor elk watersysteem is zo'n project gedefinieerd. Onderhavig rapport beschrijft de werkzaamheden voor het Benedenrivierengebied.

Dit rapport heeft tot doel het inzichtelijk en navolgbaar vastleggen van de gegevens waarmee en de wijze waarop de concept hydraulische randvoorwaarden 2011 (concept HR2011) voor de Benedenrivieren zouden kunnen worden opgenomen in een nieuwe versie van het Randvoorwaardenboek. Het rapport beoogt geen uitgebreide beschrijving van alle aspecten van de concept HR2011 te geven maar geeft slechts een beknopte beschrijving van de belangrijkste informatie en gemaakte keuzes. Meer detailinformatie is te vinden in separate documenten behorende bij de WTI-2011 projectdocumentatie. In de lopende tekst zal hier naar verwezen worden.

Door de Waterdienst is bij de aanvang van het WTI-2011 project besloten om voor de IJsseldelta, het Markermeer en de Bovenrivieren geen nieuwe randvoorwaarden af te leiden. Voor het IJsselmeer, de Vechtdelta en de Benedenrivieren was wel besloten om nieuwe randvoorwaarden af te leiden. Voornamelijk de continuïteit van het beleid en de projectkaders spelen een rol bij het maken van deze keuzes. De volgende criteria zijn hierbij toegepast.

- Haalbaarheid,
- Betrouwbaarheid (scherp toetsen),
- Robuustheid,
- Technisch draagvlak,
- Beleidsmatig draagvlak,
- Consistentie en uniformiteit.

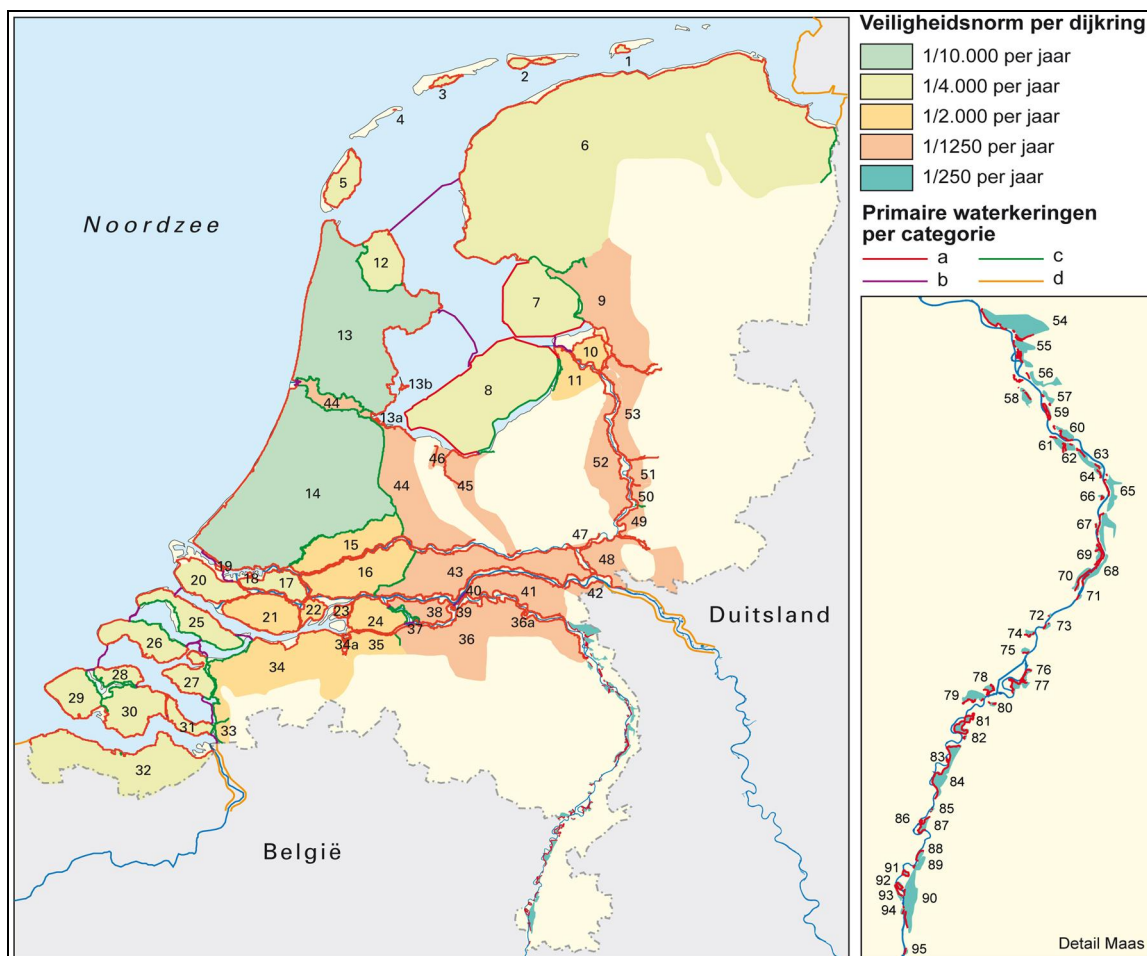
In het licht van deze criteria zijn er drie redenen waarom de hydraulische randvoorwaarden voor de Benedenrivieren in het kader van WTI-2011 opnieuw zijn bepaald. De eerste reden is dat in de verbeterde toetsingsmethodiek waarschijnlijk uitgegaan moet worden van een langere stormopzetduur bij Hoek van Holland. Er is namelijk geen inhoudelijk en beleidsmatig draagvlak meer voor de vigerende stormopzetduur van 29 uur; die is simpelweg te kort. De tweede reden komt voort uit de behoefte om de vigerende eendimensionale SOBEK modellering te vervangen door een meer geavanceerde tweedimensionale modellering met WAQUA. Verwacht wordt dat deze twee verbeteringen effect hebben op de toetspeilen in het gehele Benedenrivierengebied.

De derde reden komt voort uit recente inzichten in de seichestoelagen op de waterstanden zoals beschreven in [de Jong, 2004]. Deze nieuwe inzichten hebben betrekking op het opwekkingsmechanisme, maar ook op het versterkingsgedrag van seiches in de haven. Dit derde aspect heeft specifiek betrekking op het gebied buiten de stormvloedkeringen: het Europoortgebied.

1.2 Hydraulische Randvoorwaarden en veiligheidsnormen

De Hydraulische Randvoorwaarden worden door de minister van Infrastructuur en Milieu vastgesteld ten behoeve van de toetsing van de primaire waterkeringen in Nederland in het kader van de Waterwet.

In de praktijk geven de Hydraulische Randvoorwaarden die waterstanden en golfparameters, waartegen een waterkering volgens de wettelijke veiligheidsnorm nog bestand moet zijn. De wettelijke veiligheidsnorm heeft de vorm van een overschrijdingskans of -frequentie, die per dijkkring is toegekend en vastgesteld in de Waterwet. Deze overschrijdingsfrequenties zijn klein: ze variëren van 1/250 per jaar langs de onbedijkte Maas tot 1/10000 per jaar langs de Hollandse kust, afhankelijk van de beschouwde dijkkring. Voor elke dijkkringgebied in Nederland is zo'n veiligheidsnorm vastgesteld, zie onderstaande Figuur 1.1.



Figuur 1.1 Dijkkringgebieden in Nederland en bijbehorende veiligheidsnormen.

De hydraulische omstandigheden die bij deze frequenties behoren zijn vrij extreem en zeldzaam. De Hydraulische Randvoorwaarden kunnen dan ook niet rechtstreeks afgeleid worden uit

metingen. Daarvoor in de plaats moeten de wel beschikbare meetgegevens, die de hydraulische belastingen op de dijken bepalen, op een verstandige wijze geïnterpreteerd worden en vervolgens geëxtrapoleerd worden naar de gewenste kleine overschrijdingsfrequenties. Daarbij speelt enerzijds kennis van het fysisch gedrag van de verschillende watersystemen in Nederland een rol (rekenmodellen voor waterstanden en golven) en anderzijds kennis van de statistiek van extreme waarden (statistische en probabilistische rekenmethoden). Uiteraard is ook informatie over de dijk zelf nodig.

De Hydraulische Randvoorwaarden variëren niet alleen per dijkkring, als gevolg van de dijkkringspecifieke veiligheidsnorm (zie Figuur 1.1) maar rond een afzonderlijke dijkkring kunnen de HR ook variëren. Hetzelfde geldt voor de eigenschappen van de waterkering zelf: ook die variëren langs een dijkkring. Voor het toetsen wordt een dijkkring dan ook opgedeeld in stukjes, dijkvakken genoemd. De HR worden nu gegeven op een set gespecificeerde locaties rond de dijkkring, zodanig dat voor ieder dijkvak een nabijgelegen locatie met HR beschikbaar is. Deze locaties worden uitvoerlocaties genoemd. In het rivierengebied wordt onderscheid gemaakt tussen locaties in de as van de rivier en locaties aan de oever van de rivier. De HR op de uitvoerlocaties in de as van de rivier geven een globaal inzicht in het watersysteem. Meestal wordt op deze locaties alleen naar de toetspeilen gekeken, en niet naar golven. Uitvoerlocaties in de as van de rivier hebben een onderlinge afstand van ca. 1 km. Bij de daadwerkelijke toetsing van de waterkeringen is ook golf informatie nodig. Omdat met name deze golf informatie ruimtelijk gezien relatief sterk kan variëren, bijvoorbeeld als gevolg van de dijkoriëntatie en dijkgegevens, worden de HR ook geleverd aan de teen van de waterkering, met een onderlinge afstand van ca. 100 m.

1.3 Doelstelling

De doelstelling van het WTI-2011 project is het afleiden van een nieuw voorschrift toetsen op veiligheid en een geactualiseerde set concept hydraulische randvoorwaarden 2011. Deze rapportage focust hierbij op de globale verslaglegging van de totstandkoming van de concept HR2011 voor de Benedenrivieren. Dit rapport is een nadere beschrijving van eerder gemaakte en door het Expertise Netwerk Waterveiligheid (ENW) goedgekeurde keuzes ten behoeve van WTI-2011, deze keuzes staan beschreven in [Van der Klis et al, 2010].

1.4 Doelgroep

Deze rapportage is bedoeld voor:

- Gebruikers van de concept HR2011 met inhoudelijke belangstelling,
- Beheerders van deze concept HR2011 (RWS Waterdienst en Deltares),
- Ontwikkelaars van toetsmethoden en ontwerpmethoden, de hydraulische randvoorwaarden en verwante gereedschappen in het kader van de veiligheid tegen overstromen: bijvoorbeeld Hydra-Ring in het kader van WTI-2017 en het Deltamodel.

Voor het lezen van dit rapport is algemene achtergrondkennis nodig van:

- De toetsfilosofie;
- Statistiek en probabilistisch rekenen;
- Waterstanden en golven en productieberekeningen van deze grootheden.

1.5 Proces en organisatie

Het Directoraat Generaal Ruimte en Water (DGRW) van het Ministerie van Infrastructuur en Milieu is formeel de opdrachtgever van het Wettelijk Toetsinstrumentarium. De Waterdienst van Rijkswaterstaat is gedelegeerde opdrachtgever en verantwoordelijk voor de procesbegeleiding. Deltares is verantwoordelijk voor de inhoudelijke projectleiding en uitvoering.

De kwaliteitsborging en inhoudelijke afstemming vonden plaats in de klankbordgroep van het ENW, waarin leden uit verschillende ENW groepen zijn vertegenwoordigd. Wanneer gebruik wordt gemaakt van volledig nieuwe methoden of technieken uit Sterkte en Belastingen waterkeringen (SBW), zijn deze eerst ter beoordeling voorgelegd aan het Hydraulische Review Team (HRT).

Om de waterkeringbeheerders gedurende het project te informeren en zodoende een breed draagvlak te creëren voor de nieuwe concept hydraulische randvoorwaarden zijn er zogenaamde watersysteemgroepen opgericht. Voor de Benedenrivieren was er een aparte watersysteemgroep.

Binnen Deltares is WTI-2011 gesplitst in drie projecten:

- VTV
- HR zoet
- HR zout

Het project HR zoet heeft betrekking op de zoete watersystemen: meren en rivieren. De drie zoete watersystemen waarvoor is besloten om nieuwe concept hydraulische randvoorwaarden af te leiden, zijn in het project HR zoet uitgewerkt.

1.6 Leeswijzer

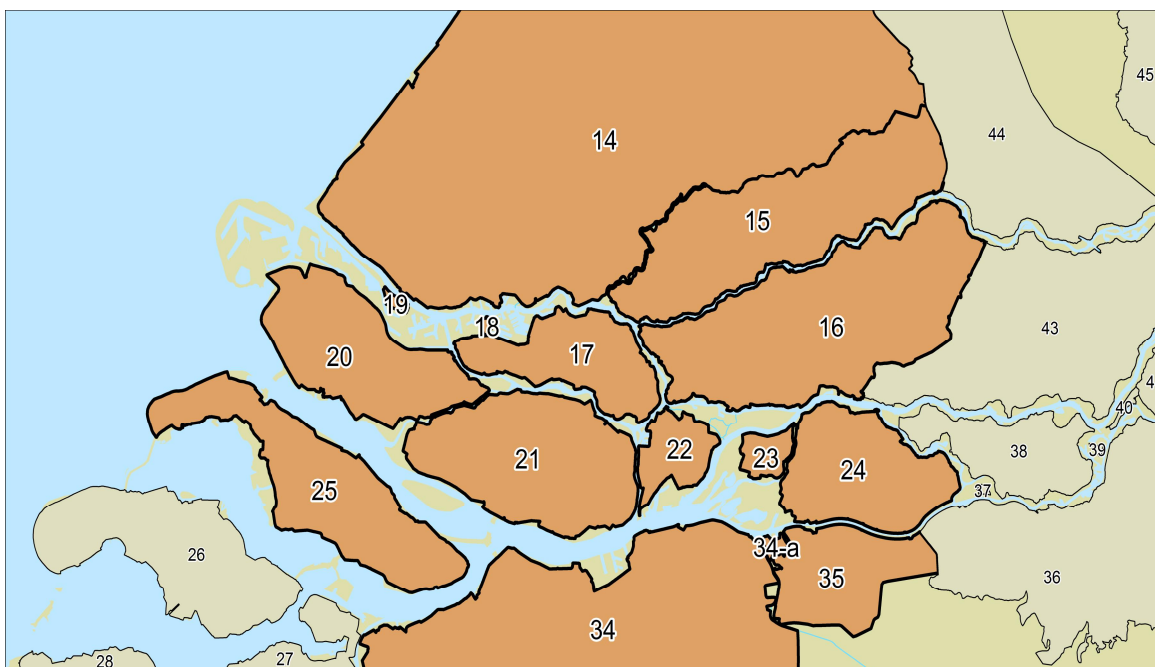
Dit achtergrondrapport is als volgt ingedeeld. Hoofdstuk 2 geeft een beschrijving van het systeem van de Benedenrivieren en de keten om tot hydraulische randvoorwaarden te komen. Vervolgens wordt in hoofdstuk 3 de modellering van de waterbeweging en de productieberekeningen van waterstand behandeld. In hoofdstuk 4 komen de golfmodellering en de productie van de golfparameters aan de orde. Hoofdstuk 5 behandelt de Europoort. Hierin komen specifieke aspecten zoals seiches en golfdoordringing vanuit de zee aan de orde. In dit hoofdstuk wordt ook het SWAN golfmodel Europoort behandeld, evenals de productie van de golfparameters voor dit gebied. In hoofdstuk 6 worden de marginale statistiek en het probabilistische model Hydra-Zoet behandeld. De berekende concept toetspeilen en belastingsniveaus worden kort behandeld in hoofdstuk 7. Het rapport eindigt met conclusies en aanbevelingen in hoofdstuk 8.

2 Systeem- en ketenbeschrijving

2.1 Systeembeschrijving

Onderhavig rapport richt zich op de achtergronden voor de bepaling van de concept hydraulische randvoorwaarden voor het gebied van de Benedenrivieren. Het Benedenrivierengebied bestaat uit dat deel van de benedenstroomse takken van de Rijn en de Maas, waar tijdens grote afvoergolven de waterstanden een significante invloed ondervinden van de stormen op de Noordzee. Aan de westzijde wordt het gebied 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. Het Benedenrivierengebied wordt ook weleens Rijn- en Maasmonding, RMM, genoemd.

Figuur 2.1 geeft een schematisch overzicht weer van de Benedenrivieren.



Figuur 2.1 Overzicht van de dijkringgebieden in het Benedenrivierengebied

De dijkringen 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 34, 34a en 35 grenzen geheel of gedeeltelijk aan de Benedenrivieren. Elke van deze dijkringen heeft een wettelijk vastgestelde frequentienorm, zie Tabel 2.1. Dat wil zeggen dat de concept hydraulische randvoorwaarden die berekend worden voor deze dijkringen de waterstand en/of het hydraulische belastingniveau is die behoort bij de gegeven normfrequentie.

Qua watertakken bestaat het systeem van de Benedenrivieren uit verschillende riviertakken van de Rijn en/of Maas. Een overzicht van de riviertakken in het Benedenrivierengebied is weergegeven in Tabel 2.1 en geografisch in Figuur 2.2.

Tabel 2.1 Dijkkringgebieden in de Benedenrivieren

Dijkring	Normfrequentie	Naam	Buitenwater
14	1/10000	Zuid-Holland	Nieuwe Waterweg, Nieuwe Maas
15	1/2000	Lopiker- en Krimpenerwaard	Nieuwe Maas, Lek
16	1/2000	Alblasserwaard en de vijfheerenlanden	Lek, Boven- en Beneden Merwede, Noord
17	1/4000	IJsselmonde	Nieuwe, Noord, Oude Maas
18	1/10000	Pernis	Nieuwe Maas
19	1/10000	Rozenburg	Nieuwe Waterweg, Calandkanaal
20	1/4000	Voorne-Putten	Hartelkanaal, Oude Maas, Spui, Haringvliet
21	1/2000	Hoekse Waard	Oude Maas, Dordtsche Kil, Hollandsch Diep, Spui, Haringvliet
22	1/2000	Eiland van Dordrecht	Oude Maas, Dordtsche Kil, Hollandsch Diep, Spui, Nieuwe Merwede
23	1/2000	Biesbosch	Nieuwe Merwede, Biesbosch
24	1/2000	Land van Altena	Boven Merwede, Maas, Bergsche Maas, Steurgat, Biesbosch
25	1/4000	Goeree-Overflakkee	Haringvliet
34	1/2000	West-Brabant	Bergsche Maas, Amer, Hollandsch Diep
34a	1/2000	Geerttruidenberg	Bergsche Maas, Amer
35	1/2000	Donge	Bergsche Maas



Figuur 2.2 Geografisch overzicht van de riviertakken in de Benedenrivieren.

Naast deze dijkringen bevindt zich in de Benedenrivieren nog een aantal kunstwerken of verbindende waterkeringen. Dit zijn waterkeringen die voor dijkringgebieden zijn gelegen en buitenwater keren. Een overzicht van de verbindende waterkeringen in de Benedenrivieren is gegeven in Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Verbindende waterkeringen in de Benedenrivieren

Verbindende Kering	Norm	Naam	Verbindt dijkringen
8	1/10000	Stormvloedkering Nieuwe Waterweg / Europoort	14 en 19
9	1/10000	Europoort en Hartelkering	19 en 20
10	1/4000	Stormvloedkering Hollandsch IJssel	14 en 15
11	1/4000	Haringvlietdam	20 en 25
12	1/2000	Biesboschsluis	23 en 24
13	1/2000	Wilhelminasluis	24 en 38
15	1/4000	Hellegatsdam en Volkeraksluizen	25 en 34
26	1/2000	Keersluis Heusdensch Kanaal	24 en 37
27	1/2000	Bergse Maasdijk	37 en 38

In het Benedenrivierengebied bevinden zich in verband met de veiligheid tegen overstromingen vijf kunstwerken, die afhankelijk van de hydraulische omstandigheden bediend worden. Vier van deze keringen, de Maeslantkering, de Hartelkering, de keringen in de Hollandse IJssel en het Heusdensch kanaal (ook de Kromme Nolkering genoemd) bevinden zich in open toestand onder normale hydraulische omstandigheden. De sluitprocedure 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. De kunstwerken komen uitvoering aan de orde in subparagraaf 3.2.5.

Het fysische gedrag van het watersysteem kent geen scherpe grenzen met de watersystemen Hollandse kust en Bovenrivieren. Voor de levering van de concept hydraulische randvoorwaarden HR-2011 zijn de begrenzings uit [de Waal, 2007] aangehouden. Deze zijn:

- Lek km 943
- Boven Merwede km 953
- Bergsche Maas km 231.

Deze begrenzing komt overeen met de overgang naar dijkkringgebieden met een normfrequentie van 1/2000 per jaar of kleiner, zie Figuur 1.1.

De hydraulische belasting op de waterkeringen in het Benedenrivierengebied wordt bepaald door verschillende grootheden, ook stochasten genoemd. Globaal zijn dit rivierafvoeren, zeewaterstanden, wind en beheersituatie van de stormvloedkeringen.

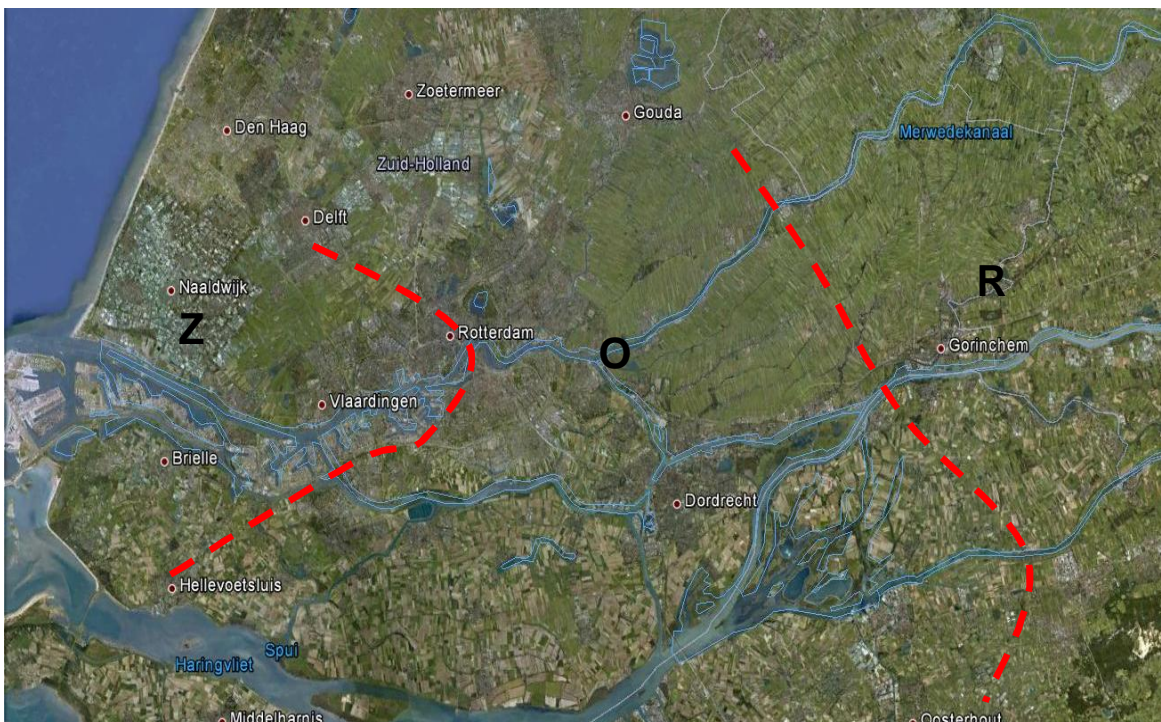
Een hoge afvoer op de Rijn en/of de Maas kan zorgen voor waterstandverhogingen aan de oostelijke randen van de Benedenrivieren. Een dergelijke verhoging van de waterstand en afvoer plant zich als afvoergolf voort in zeewaartse richting. Op de zeerand zijn de volgende fenomenen van belang voor de hydraulische randvoorwaarden/belastingen in het Benedenrivierengebied:

- Zeewaterstand: de zeewaterstand is samengesteld uit het astronomisch getij en een stormopzet. De bijbehorende waterstandverhoging plant zich vanwege de open verbinding met de Noordzee landinwaarts voort in het Benedenrivierengebied maar dempt langzamerhand uit. De mate van doordringing in het gebied is mede afhankelijk van de duur van de stormopzet,
- Seiches. Relatief kleine maar regelmatige waterstandfluctuaties aan de zeerand kunnen in het havengebied, de Europoort, door opslingering verstrekt worden en worden dan seiches genoemd. Dit verschijnsel kan leiden tot significante waterstandverhogingen in het havengebied,

- Zeegolven. Windgolven op zee kunnen het havengebied binnendringen als deining. Daarmee neemt de golfhoogte doorgaans relatief snel af, maar de golfperiode blijft vrij constant. Daarnaast kunnen golven vanuit zee bijdragen aan golfoverslag over de verbindende keringen (Europoort- en Hartelkering) en daarmee enigszins bijdragen aan verhoging van de waterstanden achter de keringen.

De waterbeweging in het Benedenrivierengebied ondervindt niet alleen invloed van fysische fenomenen aan de randen van het systeem maar ook in het gebied zelf kan er een drijvende kracht zijn: de wind boven het systeem. De lokale wind boven het gebied van de Benedenrivieren zorgt enerzijds voor extra doordringing van de (hoge) zeestanden en anderzijds voor interne scheefstand van de waterspiegel en voor opwekking van lokale golven. Voornamelijk in de bredere wateren van het Benedenrivierengebied kunnen de interne scheefstand en lokale golven aanzienlijk zijn en derhalve bijdragen aan de hoge waterstanden aan de teen van en golfoverslag over de dijk.

Het Benedenrivierengebied kan, wat bedreiging door afvoeren, hoge zeewaterstanden/stormvloed en wind betreft, ruwweg in drie deelgebieden worden ingedeeld: het zeegebied waar de invloed van de zee dominant is, het overgangsgebied O waar zowel de rivier- als de zee-invoerd groot, en het rivierengebied waar voornamelijk de invloed van de rivierafvoeren van belang is. Zie ook Figuur 2.3. Met nadruk wordt erop gewezen dat in de figuur gegeven grenzen indicatief zijn en slechts een didactisch doel hebben. In werkelijkheid is er geen sprake van abrupte overgangen.



Figuur 2.3 Het Benedenrivierengebied, onderverdeeld in zeegebied Z, het overgangsgebied O en het rivierengebied R.

Globaal kan de volgende karakterisering van de deelgebieden zoals beschreven in Figuur 2.3 worden gegeven:

Zeegebied

De waterstanden worden hier voornamelijk bepaald door invloeden vanuit zee. De dijken worden hier dan ook vooral bedreigd door stormvloed en, mede door mogelijke falende keringen, vanuit de zee het gebied binnendringen. Deze stormvloed gaan samen met veel wind, waardoor ook deining en lokaal opgewekte windgolven bedreigend zijn. Aan de buitenzijde van de stormvloedkeringen kunnen seiches (die voornamelijk opgewekt worden bij gesloten keringen) bedreigend zijn.

Overgangsgebied

In het overgangsgebied worden de waterstanden bepaald door combinaties van hoge rivierafvoeren en/of hoge zeewaterstanden. Tot dit gebied behoren ook de bredere wateren Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch. De stormvloed gaan samen met veel wind, waardoor windgolven en scheefstanden van het water hier bedreigend kunnen zijn, met name op het Haringvliet en Hollandsch Diep, waar relatief lange strijklengtes voorkomen.

Rivierengebied

Hier bepalen de extreem hoge afvoeren de waterstanden. Tijdens dergelijke afvoeren komen meestal min of meer dagelijkse windsnelheden voor en dus geen extreme stormen en extreem hoge zeewaterstanden. Mede vanwege de over het algemeen vrij korte strijklengtes, zijn de windgolven in dit gebied relatief minder bedreigend voor de dijken dan in het overgangs- en zeegebied.

2.2 Ketenbeschrijving Benedenrivieren

Voor het berekenen van de concept hydraulische randvoorwaarden wordt gebruik gemaakt van een probabilistische aanpak. Deze is principieel gebaseerd op dezelfde aanpak die al eerder is gebruikt voor de bepaling van de HR2006. Ieder watersysteem heeft een eigen kenmerkende combinatie van bedreigingen. Vanuit het verleden is voor ieder watersysteem een apart belastingmodel ontwikkeld en vervolgens uitgewerkt in de vorm van een Hydra programma. Ten behoeve van WTI-2011 zijn in het kader van Beheer en Ontwikkeling, B&O, van de Hydra's alle bestaande belastingmodellen voor de zoete watersystemen geïntegreerd tot één belastingmodel en één Hydra programma: Hydra-Zoet.

Globaal geschiedt de probabilistische aanpak voor de Benedenrivieren in drie belangrijke stappen. Deze stappen komen overeen met de activiteiten van de drie blauwe blokken in Figuur 2.4. De stappen zijn:

1. Statistiek. Specificeren en modelleren van de bedreigingen, ook randvoorwaarden of stochasten genoemd, en bepalen van bijbehorende extreme waarden statistiek, inclusief hun verloop in de tijd en onderlinge samenhang. Een bedreiging 'wind' kan bijvoorbeeld gekarakteriseerd worden met de twee stochasten windsnelheid en windrichting. Zo moeten per watersysteem de bedreigingen vertaald worden naar concrete stochasten. Voor de Benedenrivieren zijn in het verleden 5 bedreigingen gedefinieerd en die worden als stochasten beschouwd: afvoer, zeewaterstand, windsnelheid, windrichting en beheersituatie van de Europoortkeringen. Deze stochasten zijn onveranderd gebleven en komen uitvoering aan de orde in hoofdstuk 5. Nadat de relevante bedreigingen concreet gespecificeerd zijn als stochasten, dienen de bijbehorende marginale statistieken en eventuele onderlinge samenhang evenals de tijdsverlopen ervan afgeleid te worden. Deze eerste stap van de probabilistische aanpak is beschreven in het eerste blauwe blok links, zie Figuur 2.4,
2. Productieberekeningen. Genereren van de maximale waterstanden en golfcondities voor verschillende combinaties van de stochasten op alle uitvoerlocaties, en opslaan van deze gegevens in verschillende databases. Een eendimensionaal of tweedimensionaal

waterbewegingmodel (SOBEK of WAQUA) en een golfvoortplantingsmodel (SWAN of Bretschneider¹) liggen hierbij ten grondslag. Deze stap wordt ook productieberekeningen genoemd.

Het Europoortgebied buiten de stormvloedkeringen maakt onderdeel uit van de Benedenrivieren. Bijzonder aan dit gebied is dat het veel karakteristieken van de kust heeft en het geen bescherming ondervindt van het sluiten van de Europoortkeringen en wordt in tegenstelling tot het gebied binnen de keringen extra belast door het optreden van seiches en deining. Naast voorgenoemde belastingen zijn ook de golfcondities in de Europoort complexer. Hiervoor werden daarom toeslagen berekend en verdisconteerd in de berekende maximale waterstanden en golfcondities,

3. Bepalen van de maatgevende waterstanden (toetspeilen) en golfrandvoorwaarden (hydraulische belastingniveaus) voor een vastgestelde normfrequentie en toelaatbaar golfoverslagdebiet met behulp van Hydra-Zoet, ook Hydra berekeningen genoemd.

Bovengenoemde 3 stappen zijn in detail beschreven in de achtergrondrapportage van HR2006 [de Waal, 2007]. Een schematische weergave van de ketenbeschrijving voor de HR bepaling is beschreven in Figuur 2.4. Voor een gedetailleerde ketenbeschrijving verwijzen we naar [van der Klis et al, 2010].

De kern van een probabilistische aanpak is dat de kansverdelingen van de bepalende bedreigingen/stochasten worden meegenomen in de bepaling van de hydraulische randvoorwaarden. Het resultaat is dan een frequentie of kans waarmee een waterstand of een bepaald hydraulisch belastingniveau wordt overschreden. Het hydraulische belastingniveau wordt gedefinieerd als de kruinhoogte van de waterkering die precies aan de berekende waterstand inclusief de gestelde criteria voor golfoploop of golfoverslag voldoet. Dit is het oranje blok onderdaan Figuur 2.4.

Het schema in Figuur 2.4 geeft een overzicht van de ketenonderdelen en onderlinge samenhang, die nodig zijn voor het bepalen van de hydraulische randvoorwaarden. De keten zal hier in het kort beschreven worden. Later in het rapport volgt, per onderdeel, een uitgebreide beschrijving.

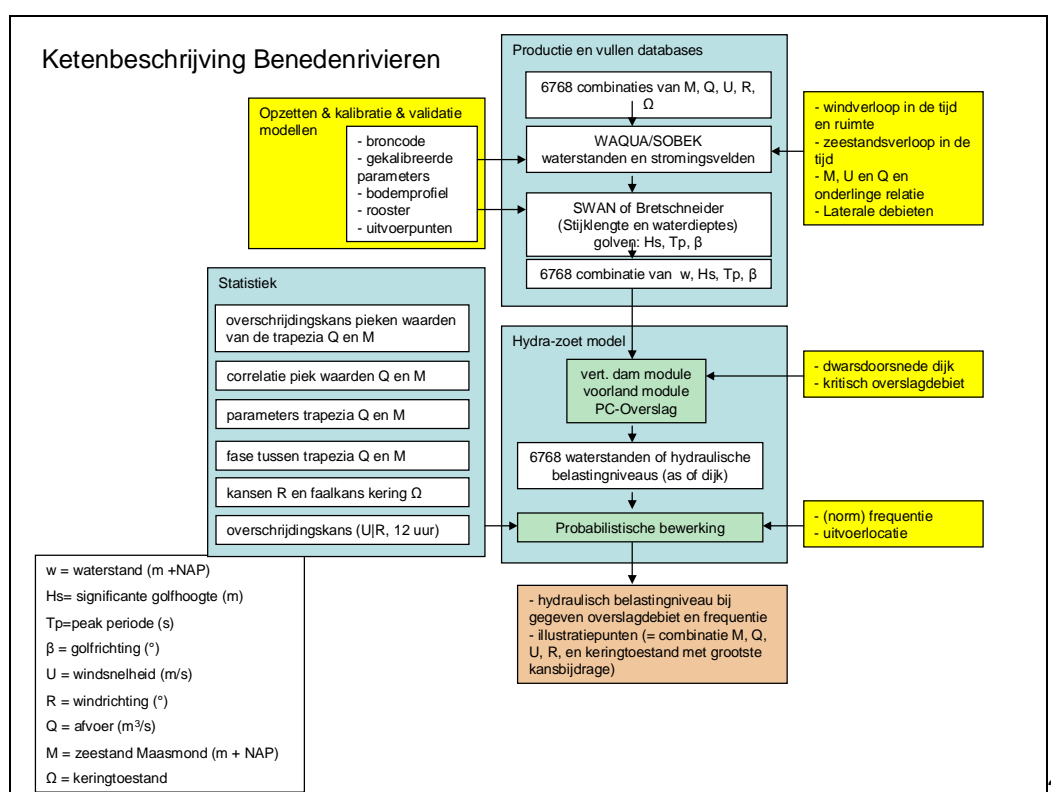
De eerste stap in het bepalen van de hydraulische randvoorwaarden betreft een gebiedsonderzoek. Hierbij wordt in kaart gebracht welke bedreigingen uit het watersysteem bepalend zijn voor (hoge) waterstanden en hydraulische belastingniveaus, welke samenhang (correlaties) bestaat tussen deze bedreigingen en welke statistische parameters en/of kansverdelingen horen hierbij. Voor de Benedenrivieren zijn dit zoals hierboven beschreven de zeewaterstand, de afvoeren van de Rijn en de Maas, de windrichting, de windsnelheid en de beheersituatie van de Maeslant- en Hartelkering, zie ook [Geerse, 2003]. Dit is het blauwe blok links in het schema. Dit zijn dan ook de in de productieberekeningen mee te nemen stochastische grootheden voor de invoer van het waterbewegingmodel (WAQUA-RMM) en het golfvoorspellingsmodel (SWAN of Bretschneider).

Het waterbewegingmodel (WAQUA) en het golfvoorspellingsmodel (SWAN) moeten allereerst met metingen zijn gekalibreerd en gevalideerd, voor wat betreft de instellingen in combinatie met een voldoende fijne roosterschematisatie voor verschillende gebieden. Dit is het blok "Opzetten, kalibratie en validatie modellen" links boven in het schema. Dit is voor WAQUA uitgevoerd in [Zijl et al, 2010a]. Voor SWAN zijn de modelkalibratie en -validatie uitgevoerd in het kader van WTI voor de Waddenzee [Gautier, 2010] en het IJsselmeer [Klein, 2010a]. Hierin zijn vele metingen beschouwd, waaronder ook metingen op het IJsselmeer en het

1. Indien Bretschneider wordt gebruikt, worden de golfcondities niet vooraf maar binnen Hydra-Zoet bepaald.

Slotenmeer. Het SWAN model voor de bredere wateren van het Benedenrivierengebied is gebaseerd op het SWAN model voor Waddenzee en het IJsselmeer.

In totaal worden voor 6768 combinaties van afvoeren, zeewaterstanden, windrichtingen, windsnelheden en beheersituatie van de Maeslant- en Hartelkering op elke locatie de maximale waterstand berekend met het WAQUA model. Naast de maximale waterstanden worden voor elke locatie de maximale golfcondities berekend. Dit betekent dat naast berekeningen met het WAQUA-model ook een groot aantal berekeningen wordt gemaakt met de Bretschneider formulering [TAW, 1985] of het golfvoorspellingsmodel SWAN. De uitkomsten van al deze berekeningen worden opgeslagen in verschillende databases. Dit is rechtsboven in het schema weergegeven. Vanwege de grote hoeveelheid data zijn de databases opgeknipt in aparte databases per dijkkring.



Figuur 2.4 Schematische weergave van de HR-keten voor de Benedenrivieren uit Van der Klis et al. (2010).

Het blok rechts onder met de titel "Hydra-zoet" is de laatste stap in de keten en beschrijft de probabilistische berekeningen en het eigenlijke programma Hydra-Zoet. Hydra-Zoet is geschikt voor alle zoete watersystemen en vervangt de bestaande programma's (Hydra-M voor meren, Hydra-B voor Benedenrivieren, Hydra-R voor Bovenrivieren en Hydra-VIJ voor IJssel en Vechtdelta). Het rekenen met Hydra-Zoet begint met het selecteren van één of meerdere locaties waarvoor de gebruiker het toetspeil en/of het hydraulische belastingniveau wil berekenen. Indien windgolven in de berekening moeten worden betrokken is ook informatie nodig met betrekking tot het kritische golfoverslagdebiet en dijkprofielen. De aan- of afwezigheid van een voorland speelt hierbij ook een rol.

Zoals hierboven is beschreven, kan met het programma Hydra-Zoet voor elke uitvoerlocatie uit de database een berekening worden gemaakt van het toetspeil en/of het hydraulische belastingniveau.

Hydra-Zoet is zoals al hierboven vermeld geschikt voor alle zoete watersystemen, en bevat daarom alle stochastische variabelen die relevant zijn voor alle zoete watersystemen. Voor de Benedenrivieren bevat Hydra-Zoet de volgende stochasten:

- Rivierafvoer van de Rijn en de Maas,
- Zeewaterstanden te Maasmond (afgeleid uit die van Hoek van Holland),
- Windsnelheid te Schiphol,
- Windrichting,
- Beheersituatie Europoort keringen (Maeslant- en Hartelkering) (open of dicht), waarbij de faalkans van de keringen wordt meegenomen.

De stormduur wordt conform HR2006 niet meegenomen als een aparte stochast. Hiermee wordt aangenomen dat het gebruik van één gemiddelde stormduur voor het bepalen van de concept hydraulische randvoorwaarden volstaat, zie [Geerse, 2003]. Voor de productie van de maximale waterstanden is de stormduur wel een belangrijke invoerparameter, zie onderdeel productieberekeningen. In het kader van SBW is uitvoerig onderzoek gedaan naar de stormduur bij Hoek van Holland [Tijssen, 2010ab]. Op basis van het onderzoek is een trapeziumvorm met gemiddelde basisduur van 48 uur en topduur van 2 uur aangenomen. Hiermee is de stormduur aangepast ten opzichte van de HR2006. Meer details ten opzichte van de stormduur zijn te vinden in hoofdstuk 3 van dit rapport.

De met Hydra-Zoet berekende waterstanden en golfparameters gelden in principe voor open water omstandigheden. De geselecteerde locaties liggen niet exact aan de teen van maar op een afstand uit de dijk. Deze bedraagt ca. 50 m; in gebieden waar voorlanden en hoge gronden liggen is de afstand tot de dijk echter groter. Waar sprake is van deze situatie dient de gebruiker de golfgegevens met een rekenmodule zoals voorlandmodule te transformeren van open water naar de teen van de dijk. De gegevens aan de teen van de dijk (golfcondities en lokale waterstanden) vormen dan de invoer van de oploop/overslagmodule, ook vaak dijkmodule genoemd.

Binnen Hydra-Zoet zijn voor het Benedenrivierengebied² de maximale waterstanden en golfcondities voor een groot aantal combinaties van de stochasten zeewaterstand, afvoeren (Rijn of Maas), windrichting en windsnelheid bekend. Door op de juiste manier de kansen op een bepaalde combinatie van zeewaterstand, afvoer (Rijn of Maas), windrichting en windsnelheid te verwerken, levert de probabilistische berekening het toetspeil of het hydraulische belastingniveau als functie van de overschrijdingsfrequentie.

Het blok "hydraulische belastingniveau" toont de belangrijkste uitvoer van Hydra-Zoet. Daartoe behoren de toetspeilen of de hydraulische belastingniveaus die corresponderen met de door de gebruiker gewenste normfrequenties. Ook levert Hydra-Zoet zogenaamde illustratiepunten en uitsplitsingen.

2. Voor andere zoete watersystemen bevat Hydra-Zoet waterstands- en golfgegevens van de stochasten die relevant zijn voor die watersystemen

3 Schematisatie en productie waterstanden

3.1 Inleiding

Zoals beschreven in hoofdstuk 2 zijn databases met maximale waterstanden en golfcondities op de HR locaties behorende bij een set combinaties van de stochasten nodig voor de probabilistische berekeningen met Hydra-Zoet. Het produceren van deze maximale waterstanden en golfcondities gebeurt door middel van het uitvoeren van meerdere numerieke modelberekeningen, waarbij een waterbewegingmodel en een golfvoorspellingsmodel van de Benedenrivieren worden gebruikt. Verschillende combinaties van zeewaterstanden, Rijn- en Maasafvoeren, windsnelheden, windrichtingen en beheersituaties van de van de Europoortkeringen (Maeslant- en Hartelkering) gelden hierbij als invoer. Dit hoofdstuk gaat verder in op de gebruikte modelschematisaties en hoe deze zijn geïkht. Daarnaast worden de productierandvoorwaarden en achtergronden van de modelschematisaties, de productieberekeningen en de uitgevoerde controles beschreven. In verband met de lokale fysische verschijnselen seiches en golfdoordringing vanuit de zee in de Europoort, krijgt dit deelgebied extra aandacht.

Ten behoeve van de HR2006 zijn de maximale waterstanden van Hydra-B databases berekend met SOBEK, een eendimensionaal hydrodynamisch model. Ten behoeve van WTI-2011 zijn berekeningen gemaakt met zowel een SOBEK modelschematisatie als met een tweedimensionale WAQUA modelschematisatie (WAQUA-RMM). Dit is gebeurd omdat enerzijds de ontwikkeling van het WAQUA-RMM model vertraging opliep met onduidelijkheid ten aanzien van de praktische toepasbaarheid ervan tot gevolg en anderzijds als controle en kwaliteitsborging van de productieberekeningen met WAQUA-RMM.

3.2 WAQUA-RMM model

3.2.1 Modelgebied WAQUA-RMM

In opdracht van Rijkswaterstaat³ is door Deltares een WAQUA modelschematisatie ontwikkeld voor het Benedenrivierengebied. Binnen Deltares zijn de betreffende werkzaamheden uitgevoerd binnen de projecten ATLANTIS en Rivierkundig Modelinstrumentarium. Binnen deze projecten wordt gewerkt aan ontwikkeling, beheer en onderhoud van modelschematisaties van Rijkswaterstaat. Rijkswaterstaat zet deze modelschematisaties in ten behoeve van haar primaire processen, zoals vergunningverlening en handhaving, operationeel waterbeheer, planvorming/ beleidsvragen en toetsing-, ontwerp- en risicoberekeningen.

Zoals hierboven beschreven kent het interesse gebied van de Benedenrivieren waarvoor hydraulische randvoorwaarden worden afgeleid fysisch gezien geen scherpe grenzen met de watersystemen Hollandsche kust en Bovenrivieren. In het verleden zijn ten behoeve van de HR grenzen gedefinieerd, zowel benedenstrooms als bovenstrooms. Deze grenzen liggen bij Hoek van Holland (km 1032) en de Haringvlietdam respectievelijk bij km 943 op de Lek, bij km 953 op de Boven Merwede en bij km 231 op de Bergsche Maas. Bij de modelschematisatie is het nodig om de modelranden op enige afstand te leggen van deze grenzen. Vanuit WTI oogpunt is het interesse gebied van de Benedenrivieren voor de schematisatie met WAQUA (WTI-gebied) weergegeven in Figuur 3.1.

3. *Het model is in het kader van de Service Level Agreement (SLA), onderdeel van de overeenkomst tussen de Stichting Deltares en het Ministerie van Infrastructuur en Milieu.*

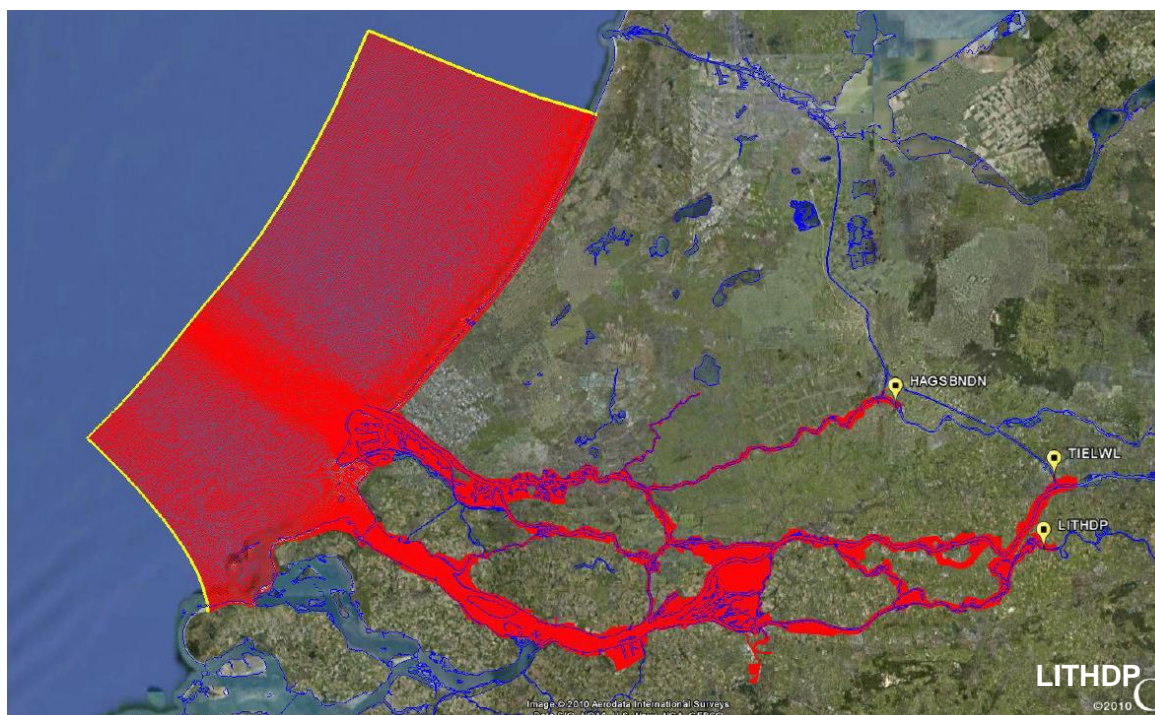


Figuur 3.1 Overzicht van het interessegebied van het WAQUA model Rijn- en Maasmonding

Echter, rekening houdend met andere toepassingen, omvat het modelgebied van WAQUA-RMM naast dit WTI gebied een deel van de Noordzee. De benedenstroomse modelranden van het volledige WAQUA-RMM modelgebied wordt gevormd door een serie steunpunten van in totaal 211 (geel lijn in Figuur 3.2). De betreffende steunpunten liggen op een afstand uit de kust, en dus ook van de benedenstroomse rand van de Benedenrivieren (WTI gebied). Op deze steunpunten liggen dan ook de modelrandvoorwaarden van het volledige WAQUA-RMM model. Bij toepassing dient tussen de steunpunten geïnterpoleerd te worden [Zijl et al, 2010].

Bovenstrooms bevat de WAQUA-RMM modelschematisatie drie modelranden. Deze liggen in de Waal ter plaatse van Tiel, in de Maas ter plaatse van stuw Lith en in de Lek ter plaatse van de stuw te Hagestein. Deze locaties van de bovenstroomse randen worden getoond in Figuur 3.2. Deze bovenstroomse modelranden sluiten aan bij het WTI gebied.

Er zijn verschillen tussen het model zoals toegepast voor de bepaling van de vigerende HR2006 en de omhullende van het volledige WAQUA-MM model. Het verschil betreft hoofdzakelijk het zeegedeelte dat onderdeel uitmaakt van de volledige WAQUA-RMM gebiedsschematisatie, zie Figuur 3.2. We komen hier in paragraaf 3.2.3 nog uitgebreid op terug.



Figuur 3.2 Schematisatie gebied van WAQUA-RMM inclusief modelranden beneden- en bovenstrooms. De benedenstroomse rand wordt gegeven door de gele lijn langs het zeedomein.

3.2.2 Brongegevens

Voor het opzetten, kalibreren en valideren van het volledige WAQUA-RMM model zijn verschillende bronnen beschikbaar gesteld waarin onder andere actuele gegevens zijn opgenomen. Door uit al deze bronnen de juiste data te selecteren, wordt een actueel model gebouwd. De brongegevens bestaan uit, zie voor meer details [Zijl et al, 2010]:

- algemene geografische gegevens die met een bepaalde regelmaat worden ingewonnen
- specifieke gegevens die met een bepaald doel ingemeten zijn
- verwerkte gegevens zoals bestaande modelschematisaties.

Deze gegevens zijn afkomstig van o.a.:

- verschillende directies van Rijkswaterstaat (Waterdienst, Data-Ict-Dienst, Directie Limburg, Directie Zuid-Holland, Directie Oost Nederland,)
- bureaus (HKV, CSO, HbR, kadaster).

Daarnaast is gebruik gemaakt van de meer algemene gegevens zoals het Landelijk Grondgebruiksbestand (LGN5), de Grote basiskaart Nederland (GBKN), het Digitaal Topografische Bestand 2000 nat en droog (DTB-2000-nat, DTB2000-droog), de Top10 Vector, het Algemeen Hoogtebestand Nederland (AHN) en luchtfoto's. Zie voor meer details [Zijl et al, 2010].

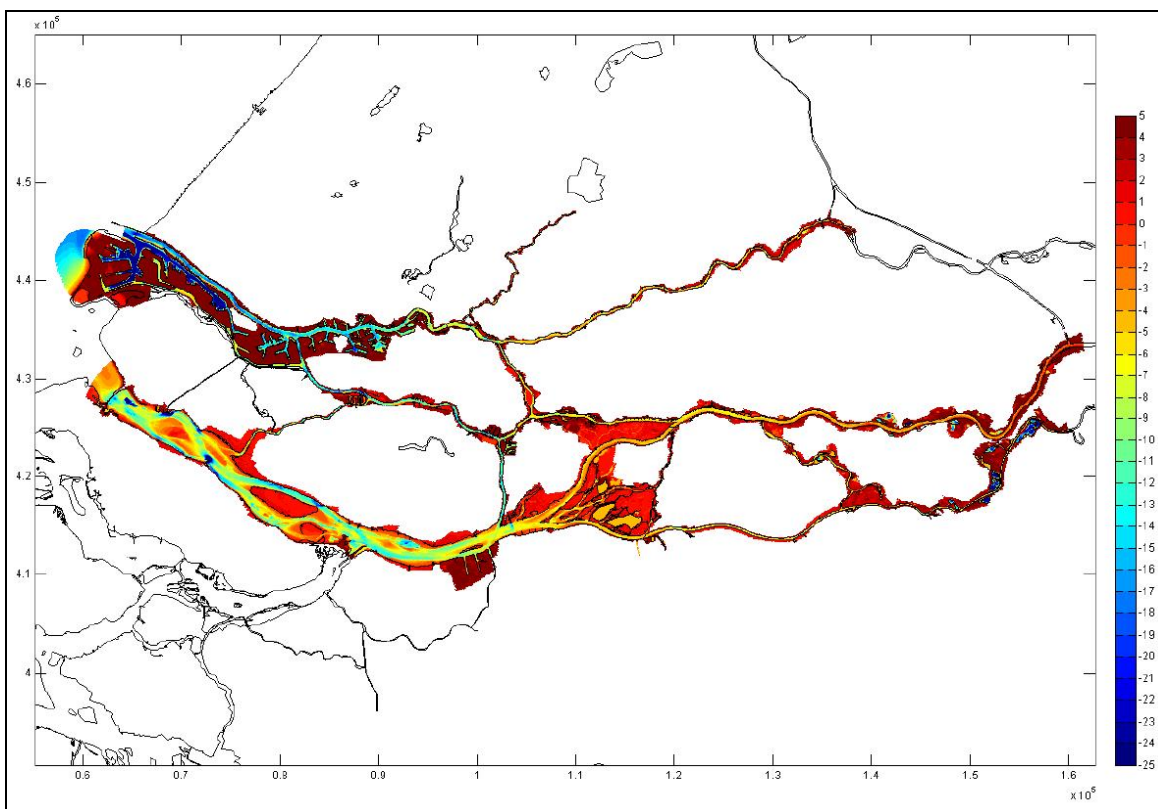
3.2.3 Modelschematisatie en rekenrooster WAQUA-RMM

Het WAQUA-RMM model is gemaakt als applicatie van het software pakket SIMONA, dat door Rijkswaterstaat is ontwikkeld. SIMONA is een pakket ten behoeve van hydrodynamische modellering van vrije oppervlaktewateren. Binnen SIMONA is gebruik gemaakt van WAQUA, de module die geschikt is voor het oplossen van de tweedimensionale ondiepwatervedelijkingen. Tijdens de ontwikkeling van het WAQUA-RMM model is gebruik

gemaakt van verschillende SIMONA versies. De uiteindelijke gebruikte versie is SIMONA-2011-RC. Dit is ook de versie waarmee de productieberekeningen zijn gemaakt.

Voor het opzetten van de WAQUA-RMM modelschematisatie is de 1998-situatie als referentie beschouwd. Op basis van een oude 1998 situatie en het DTB2000 is een nieuwe Baseline database samengesteld voor de 1998 situatie. Het aanbrengen, wijzigen, verbeteren en het inmixen van maatregelen is aanvankelijk op Baseline 4 niveau uitgevoerd: Baseline **versie 4.03**. Vervolgens is de Baseline database geconverteerd naar Baseline 5, **versie 5.0.5.820**. In Baseline 5 zijn de afgeleide Baseline bestanden aangemaakt en is de conversie naar WAQUA uitgevoerd. Voor meer details ten aanzien van dit hele proces wordt verwezen naar [Zijl et al, 2010]. Dit hele proces resulteerde in de referentie schematisatie voor het jaar 1998: RMM-j98_5.

De Rijn-Maasmonding schematisatie voor de situatie 2009 is aangemaakt uitgaande van de referentie schematisatie RMM-j98_5, waarin vervolgens verschillende Baseline maatregelen zijn ingemixt. Dit heeft geresulteerd in versie *j09_5 RMM_HR2011_5*. Deze representeert het gebied van Rijn- en Maasmonding op de peildatum van 1 januari 2010 [Zijl et al, 2010].



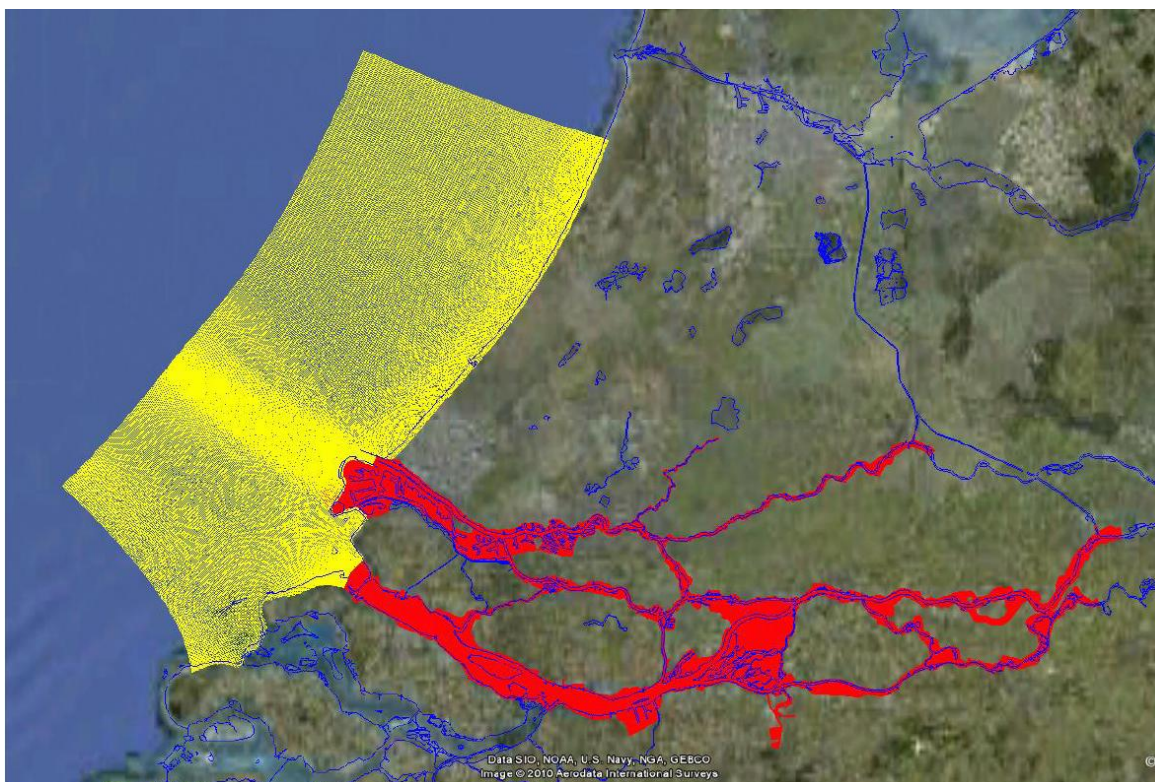
Figuur 3.3 Overzicht van de bodemligging in de modelschematisatie van het rivierendomein van WAQUA-RMM.

Analoog aan het modelgebied bestaat de WAQUA-RMM modelschematisatie uit twee delen of domeinen: een zeedomein en een rivierendomein, zie ook onderstaande Figuur 3.4. Deze twee domeinen worden aan elkaar gekoppeld door middel van zogenoemde domeindecompositie⁴ [Zijl et al, 2010].

4. Domein decompositie is het dynamisch (in twee richtingen) koppelen van meerdere rekenroosters in een berekening

Zoals hierboven is vermeld, is in het verleden voor de bepaling van de HR gebruik gemaakt van een eendimensionale SOBEK modelschematisatie. Vanwege consistentieoverwegingen en de noodzaak van de verschilanalyse en vergelijking met de vigerende HR2006 is het noodzakelijk om bij toepassing van het WAQUA-RMM model dezelfde modelranden en productierandvoorwaarden te gebruiken. Dit betekent dat de benedenrand in WAQUA-RMM (zoveel mogelijk) aan moet sluiten bij die van SOBEK. Om hieraan te kunnen voldoen zouden er (in theorie) twee verschillende aanpakken gevolgd kunnen worden:

- De modelschematisatie van het WAQUA-RMM model ongewijzigd laten en voor de benedenranden randvoorwaarden genereren die ter plaatse van de benedenranden van SOBEK overeenkomen met de SOBEK randvoorwaarden,
- De modelranden van het WAQUA-RMM model zoveel mogelijk verschuiven naar de SOBEK modelranden benedenstrooms. De SOBEK randvoorwaarden kunnen dan ook opgelegd worden voor WAQUA-RMM.



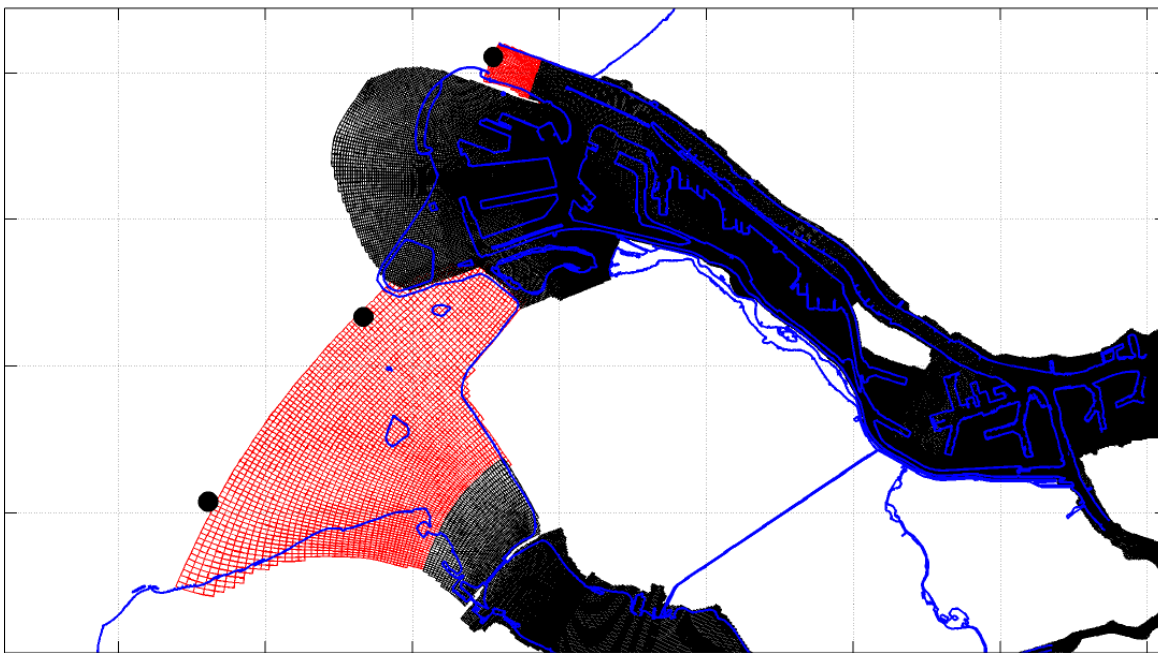
Figuur 3.4 WAQUA-RMM bestaand uit een zeedomein (geel) en een rivierendomein (rood)

Een belangrijk verschil tussen beide opties is het wel of niet meenemen van een deel van het zeedomein. De eerste genoemde optie (meenemen van het zeedomein) is niet triviaal en vereist het aanmaken van afzonderlijke randvoorwaarden voor de productieberekeningen, die afwijken van de SOBEK randvoorwaarden. Voor elke combinatie van getij, wind en windopzet, zie Tabel 3.4, zouden aparte randvoorwaarden gegenereerd moeten worden op de modelranden (geel lijn van het zeedomein in Figuur 3.2). Onder andere vanwege de grote complexiteit van deze eerste optie in combinatie met de verwachting dat de toegevoegde waarde van het meenemen van het zeedomein gering is, is gekozen om binnen WTI verder te werken met de tweede optie.

Het SOBEK model van HR2006 heeft drie benedenstroomse openranden. Deze drie open randen liggen alle drie in het zeedomein van het volledige WAQUA-RMM model. Dit betekent

dat er een klein gedeelte van het zeedomein meegenomen moet worden in het verkleinde rivierendomein van WAQUA-RMM. Meer details ten aanzien van deze aanpak zijn te vinden in [Zijl, 2009ab].

Er is een vergelijking gemaakt tussen het volledige en het verkleinde WAQUA-RMM model. Het verschil tussen de resultaatberekeningen met het volledige en het verkleinde WAQUA-RMM is acceptabel klein, zie voor meer details [Zijl, 2009ab].



Figuur 3.5 Het rekenrooster van het verkleinde WAQUA-RMM ter plaatse van de benedenstroomse open randen. Het rode rooster is het overgebleven deel van het zeedomein, het zwarte rooster is het rivierendomein van WAQUA-RMM. De zwarte bollen geven de SOBEK randlocaties weer.

De WAQUA-RMM roosters zijn orthogonaal curvilineair. Dit betekent dat de roosterlijnen van het model de belangrijkste geometrische vormen zoals het zomerbed en havens, e.d. zoveel mogelijk volgen. Figuur 3.3 geeft een illustratie van het rooster van een deel van het rivierendomein.

Het rekenrooster van WAQUA-RMM heeft de volgende eigenschappen, zie voor details [Hartsuiker, 2010]:

- De roostercellen in het rivierendomein hebben een karakteristieke afmeting van ongeveer 40 m x 40 m. Dit betekent dat er minimaal 8 roostercellen in het zomerbed liggen, dwars op de normaallijn. Voor riviertakken de Oude Maas, de nieuwe Maas en het Beerkanaal geldt een maaswijdte van tussen de 25 m en 35 m,
- Het rooster is zodanig opgezet dat het hele winterbed in het rooster valt,
- Aan de bovenstroomse zijde is er een overlap met het Rijntakkenmodel en het Maasmodel. De rekenroosters zijn hier identiek,
- Voor het rooster in het zeedomein geldt een 3:1 koppeling met het Kuststrook-Fijn model.



Figuur 3.6 Uitsnede van het rivierendomein van WAQUA-RMM waarin de roosterlijnen het zomerbed zoveel mogelijk volgen.

De WAQUA modelschematie zoals opgeleverd door SLA-modellen is in het kader van WTI-2011 uitvoering gecontroleerd. De controle heeft geleid tot enkele aanpassingen in de oorspronkelijke schematisatie. Deze aanpassingen hebben betrekking op de hoogte van de verbindende keringen 8 en 9 en de layout van het havengebied van de Europoort. Daarnaast is de aansturing van de Haringvlietsluizen en het Heusdensch Kanaal (kromme Nolkering) verbeterd.

3.2.4 Kalibratie en validatie WAQUA-RMM

Het WAQUA-RMM model is gekalibreerd en gevalideerd. We beschrijven in dit achtergrondrapport kort de belangrijkste aspecten van deze kalibratie- en verificatieslag, nadere details zijn te vinden in (Deltares, 2010). We vermelden dat de calibratie en validatie is gebaseerd op de volledige modelschematisatie die naast het rivierendomein ook het zeedomein omvat.

Bij de ontwikkeling van het WAQUA-RMM model heeft de nadruk gelegen op de (maximale) waterstanden, met specifieke aandacht voor de representatie van fysische fenomenen zoals getij, verhang (als functie van rivierdebieten), lokale wind, windopzet en zoutindringing. De zoutindringing heeft aandacht voor zover het de waterstanden beïnvloedt. Ten behoeve van de calibratie en validatie is gebruik gemaakt van meetgegevens op 14 MSW stations.

De calibratie en validatie van het WAQUA-RMM model zijn gebaseerd op de volgende meetperiodes.

- Calibratie: 1 augustus tot 15 november 1998 (circa 3,5 maand)
- Validatie: 1 oktober 2002 tot 1 februari 2003 (circa 4 maanden)

Beide perioden omvatten een grote hoeveelheid aan omstandigheden met betrekking tot rivierafvoeren, lokale wind en windopzet.

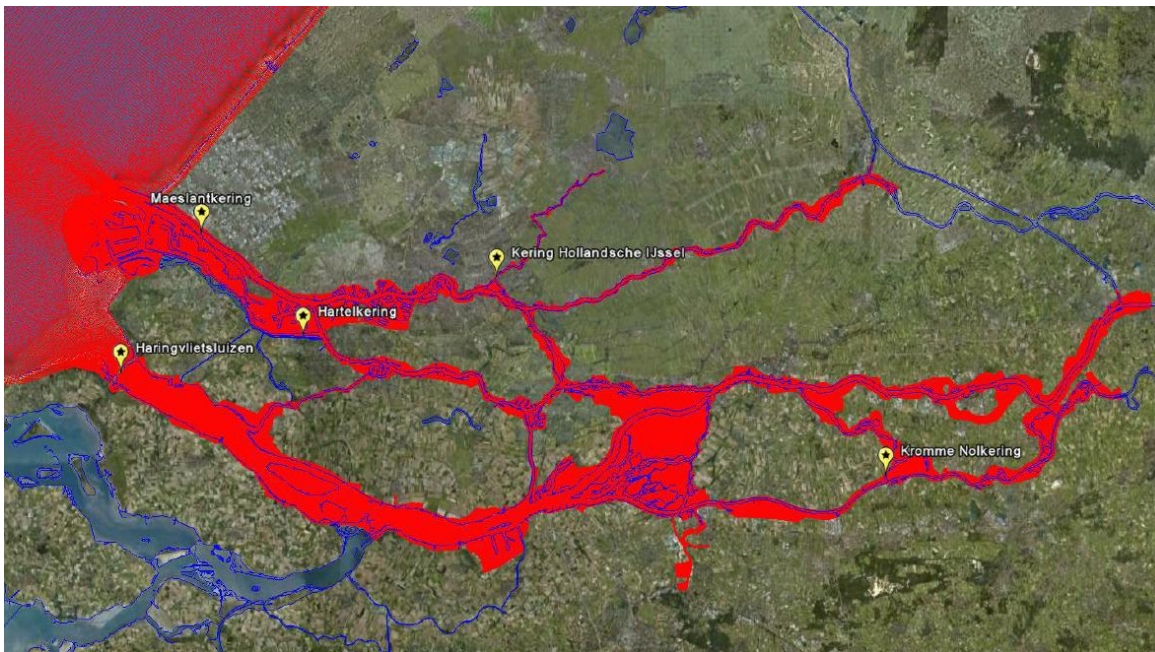
De calibratie en validatie is succesvol verlopen; de belangrijkste bevindingen zijn (voor details wordt verwezen naar [Zijl et al, 2010]):

- De algemene kwaliteit van WAQUA-RMM is qua resultaten vergelijkbaar met SOBEK. De verschillen in waterstand tussen modelresultaten en metingen zijn op vergelijkbare wijze terug te vinden in zowel WAQUA-RMM als SOBEK,
- Het getij wordt zeer goed gerepresenteerd. De getijvoortplanting en de windrespons is zelfs beter dan in SOBEK,
- Het volledige waterstandsignaal (opzet en getij) wordt zeer goed gerepresenteerd, dit geldt voor zowel de hoog- als de laagwaterperioden,
- De validatie van WAQUA-RMM laat vergelijkbare of zelfs betere resultaten dan de calibratie zien.

Tot slot wordt opgemerkt dat het WAQUA-RMM model gekalibreerd en gevalideerd is voor het gebied dat bovenstrooms begrensd is door de stations Krimpen aan de Lek, Werkendam buiten en Keizersveer. Voor het gebied bovenstrooms van deze stations zijn de instellingen overgenomen uit de reeds bestaande WAQUA modellen voor de Rijntakken en de Maas [Zijl et al, 2010].

3.2.5 Kunstwerken en aansturing binnen WAQUA

Zoals hierboven beschreven bevindt zich in verband met de veiligheid tegen overstromingen in het Benedenrivierengebied een vijftal kunstwerken, dat afhankelijk van de hydraulische omstandigheden bediend moet worden. Zie voor een overzicht onderstaande Figuur 3.7.



Figuur 3.7 Overzicht ligging kunstwerken in het Benedenrivierengebied.

Vier van deze kunstwerken, de Maeslantkering, de Hartelkering, de kering in de Hollandsche IJssel en de Kromme Nolkering bevinden zich in open toestand gedurende normale omstandigheden. Deze keringen sluiten alleen onder extreme omstandigheden. Het vijfde kunstwerk in het gebied, de Haringvlietsluizen, opent en sluit ook tijdens normale omstandigheden. Doel daarvan is onder andere het zoute zeewater, buiten het Haringvliet te houden, maar waar nodig ook overtollig water van het Haringvliet af te kunnen voeren richting Noordzee. Een uitgebreide beschrijving van deze kunstwerken is te vinden in [de Deugd, 2007]. In onderstaande subparagrafen geven we per kering een beknopte beschrijving van

het werkelijke functioneren en het functioneren zoals geïmplementeerd in WAQUA. Voor een uitgebreide beschrijving van deze twee aspecten wordt verwezen naar [Zijl et al, 2010].

3.2.5.1 Haringvlietsluizen

De Haringvlietsluizen liggen in de mond van het Haringvliet en vormen met de Haringvlietdam een (verbindende) waterkering. Het complex bestaat uit 17 openingen elk voorzien van een verticaal beweegbare rivier- en zeeschuif. Het beheer van de Haringvlietsluizen is vastgesteld in het Lozingsprogramma Haringvlietsluizen 1984 (kortweg LPH-'84).

In het LPH-'84 is de in te stellen openingen van de sluisen afhankelijk van het afvoerniveau van de Rijn te Lobith dat circa twee dagen voor de spuiperiode optreedt. De opening wordt ingesteld tijdens de ebperiode. In de vloedperiode zijn de schuiven dicht. 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 -5,50 m t.o.v. NAP. Het openen en sluiten van de schuiven gaat zeer snel en is afhankelijk van de gewenste opening. De schuiven hebben een maximale hefhoogte van 11,50 m, die binnen 20 minuten bereikt kan worden. Bij volledig geopende Haringvlietsluizen bevindt de onderzijde van de deuren zich op maximaal 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 hefhoogte⁵ 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. De beweegsnelheid van de deuren is in het model gezet op 0,0088 m/s (in 20 minuten van -5,50 m+NAP naar 5,00 m+NAP). Nadere details met betrekking tot de implementatie van de Haringvlietsluizen in WAQUA zijn te vinden in [Zijl et al, 2010].

3.2.5.2 Maeslantkering

De Maeslantkering (SVKW) ligt in de Nieuwe Waterweg ter plaatse van kmr 1026.03. De constructie bestaat uit twee drijvende, halfronde, waterkerende deuren, die bij stormvloed de ter plaatse 360 m brede Nieuwe waterweg afsluiten. Bij normale weersomstandigheden staan de deuren geparkeerd in afsluitbare dokken in de oevers. Bij stormvloed worden de deuren na het invaren afgezonken door de ballasttanks van de deuren vol met rivierwater te laten lopen. In de bodem van de rivieren ligt op -17,00 m t.o.v. NAP een drempel, waarop de deuren neergezet worden. De bovenzijde van de geheel afgezonken deuren bevinden zich op 5,00 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].

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 6000 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

5. De maximale hoogte van de onderzijde van de sluisdeur bedraagt 6,00 m+NAP. Echter, in de praktijk worden tijdens het operationele beheer de sluisdeuren meestal net boven het wateroppervlak gehangen.

de kering. Dit is het moment waarop het zeewater het Noordelijke Deltabekken gaat binnenstromen.

Vanaf het sluitmoment begint de sluitoperatie. Eerst wordt de kering vrijwel geheel afgezonken. Vervolgens wordt een sedimentstop ingelast, om het sediment van de drempel op de bodem te laten verwijderen. Daarna wordt de kering geheel gesloten. De snelheid van het afzinken is afhankelijk van de waterstanden op de rivier en het waterniveau in de ballasttanks van de kering, maar duurt ongeveer 90 minuten. Als de waterstand aan de binnenzijde van de kering 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. Samengevat gelden de volgende toestanden voor de Maeslatkering, zie [de Deugd, 2007].

Sluiten

De peilsluiting van de Maeslantkering begint als de daadwerkelijke gemeten waterstand bij de kering het niveau van 2,00 m + NAP overschrijdt. Bij het sluiten worden eerst de halfronde sectordeuren drijvend ingevaren. Eventueel wordt gewacht op voldoende waterniveau om de duren uit de doken te varen. Het dichtvaren van de deuren duurt een halfuur, waarna direct het afzinken begint.

Afzinken

De snelheid van het afzinken is afhankelijk van de waterstanden op de rivier en het waterniveau in de ballasttanks van de kering, maar duurt ca. 90 minuten. Het eerste gedeelte van het afzinken gaat sneller dan het laatste gedeelte. Tijdens het afzinken wordt voortdurend het verval over de kering gecontroleerd. Als de gemeten waterstand op de meetpalen aan de binnenzijde van de kering 0,05 m hoger wordt dan de gemeten waterstand op de meetpalen aan de buitenzijde van de kering wordt het agfzinkproces gestopt, waarna direct weer gestart wordt met opdrijven, totdat de deuren weer drijven op de rivier. De procedure wordt daarna vervolgd bij de spuitoestand.

Sedimentstop

Tijdens het afzinken wordt het stromingspotentiaal (verval over de kering maal de tijd) als maat voor erosie van slib op de drempel bijgehouden. Bij een spleet van 5 m wordt eventueel gestopt totdat het criterium gehaald is.

Gesloten, dynamisch voorspanbeheer en opdrijven

Het dynamisch voorspanbeheer start als de onderzijde van de deuren de drempel bereiken. Afhankelijk van de gemeten waterstanden aan de binnen- en buitenzijde van de kering wordt de hoeveelheid ballastwater in de tanks gereguleerd, zodanig dat de kering direct kan opdrijven als de waterstand aan de binnenzijde gelijk of groter wordt dan die aan buitenzijde van de kering. Het opdrijven van de deuren tot drijvend op de rivier (spuitoestand) duurt ca. 90 minuten.

Spuitoestand

Vanuit deze spuitoestand worden de deuren weer afgezonken als het criterium bij Rotterdam en/of Dordrecht naar verwachting de komende 24 uur nog overschreden wordt. De afzinkoperatie start dan weer als de gemeten waterstand aan de buitenzijde van de kering 0,05 m hoger is dan aan de binnenzijde.

Openen

Als de verwachte waterstanden de sluitcriteria de komende 24 uur niet meer overschrijden, worden de deuren weer in de dokken gevaren. Het invaren van de deuren duurt een halfuur. Daarna worden dokdeuren weer gesloten. Meer details met betrekking tot de standen van de Maeslant kering zijn te vinden in [de Deugd, 2007].

De sluit- en openprocedures zijn geautomatiseerd in een Beslissingsondersteunend Systeem (BOS). Het modelleren van de sluit- en openprocedures in WAQUA-RMM vraagt echter om vereenvoudigingen van de schematisatie, o.a. vanwege de rekentijd en beschikbare functionaliteit binnen SIMONA. Voor een overzicht van de belangrijkste vereenvoudigingen in de schematisatie wordt verwezen naar paragraaf 3.2.5.6.

De open- en sluitprocedures voor de Maeslantkering zijn, samen met die voor de Hartelkering (paragraaf 3.2.5.3), geïmplementeerd in een set Matlabscripts, gezamenlijk aangeduid als het Keringscript [Zijl et al, 2010]. Dit keringscript werkt per scenario: een set berekeningen met in principe falende en niet falende keringen voor een bepaalde combinatie van stochasten of randvoorwaarden. In dit keringscript worden met behulp van interactie tussen de WAQUA berekeningen en een Matlab programma dat de berekeningen aanstuurt, de bewegingen van de schuiven van de keringen aangestuurd. Het keringscript is nader beschreven in subparagraaf 3.2.5.6 van dit rapport.

3.2.5.3 Hartelkering

De Hartelkering ligt in het Hartelkanaal, 40 m ten westen van de Hartelbrug. Dit is 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 bevinden 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. Nadere details met betrekking tot de besturing van de kering wordt verwezen naar [Rozemuller, 2006].

Het sluitcriterium, en de criteria voor de peil- of kenteringsluiting zijn gelijk aan die van de Maeslantkering. De sluitprocedure voor de Hartelkering heeft veel overeenkomsten met de Maeslantkering. Voor overeenkomsten en verschillen in sluitprocedures van beide keringen wordt verwezen naar [de Deugd, 2007]. Na een periode gesloten te zijn, gaat de kering over in geopende toestand.

3.2.5.4 Hollandsche IJssel

De stormvloedkering Hollandsche IJssel ligt bij Krimpen aan de IJssel, nabij de monding van de Hollandsche IJssel. De kering bestaat uit een stuw met twee deuren en een sluis.

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 feite betekent dit dat de kering opengaat als er water van de Hollandsche IJssel naar de Nieuwe Maas geloosd kan worden.

In ruststand bevindt de onderkant van de schuiven zich op 12,00 m+NAP. Voor nadere details met betrekking tot de sluitprocedure voor de Hollandsche IJssel wordt verwezen naar het Waterakkoord Hollandsche IJssel [Janse en Burgdorffer, 1999]

Voor de implementatie en aansturing van de stormvloedkering Hollandsche IJssel in WAQUA is alleen rekening gehouden met de stormvloedkeringfunctie en niet met de overige functies van

de kering. In WAQUA is slechts een van de twee stuwdeuren gemodelleerd. De sluis is gemodelleerd als een permanent gesloten kunstwerk met een kerende hoogte van 5,0 m t.o.v. NAP. De stuw heeft in WAQUA een oneindige kerende hoogte. Nadere details met betrekking tot de implementatie van de stormvloedkering Hollandsche IJssel in WAQUA zijn te vinden in [Zijl et al, 2010].

3.2.5.5 *Kromme Nolkering*

De kromme Nolkering ligt ter plaatse van kmr 231, nabij het splitsingspunt Heusdensch Kanaal en Maas. De keersluis bestaat uit een 50 m brede en 10 m hoge beweegbare schuif. In geopende toestand bevindt de onderzijde van de schuif zich op 11,40 m+NAP. De drempel ligt op -4,00 m t.o.v. NAP. De keersluis zal gesloten worden als op de Maas een hoge afvoergolf passeert. Dit wordt bepaald met de gemeten waterstand bij Heesbeen. Bij overschrijding van een waterstand van 3,50 m+NAP bij Heesbeen gaat de keersluis dicht en bij onderscheiding van die stand gaat deze weer open. Het sluiten van de keersluis duurt ongeveer één uur. Het openen duurt ook circa één uur.

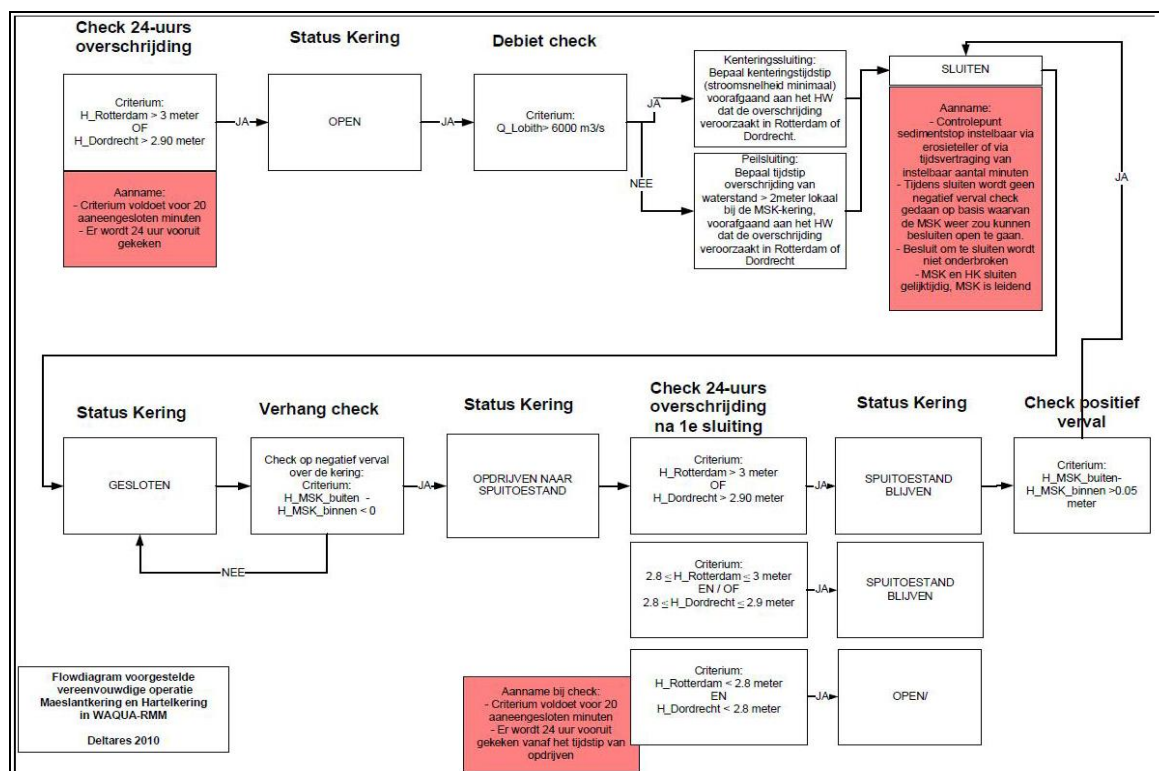
De sluitprocedure zoals hierboven beschreven is geïmplementeerd in WAQUA. Nadere details met betrekking tot de implementatie in WAQUA zijn te vinden in [Zijl et al, 2010].

3.2.5.6 *Keringscript*

In SOBEK, het model dat ten grondslag ligt aan de HR2006, worden de bovenbeschreven keringen aangestuurd door het programma PRIS [Goederen, 1999]. Vanwege o.a. rekentijd van WAQUA en complexiteit van het functioneren van de keringen was het onmogelijk om gebruik te maken van PRIS voor de berekeningen met WAQUA. De aansturing van de Haringvlietsluizen, de stormvloedkering Hollandsche IJssel en de Kromme Nolkering zijn geïmplementeerd in WAQUA. Voor de aansturing van de Maeslant- en Hartelkering is een keringscript ontwikkeld dat buiten WAQUA werkt.

Zowel de Maeslantkering als de Hartelkering zijn in de WAQUA modelschematisatie gedefinieerd als een zogenaamde dubbele barrier. Dit is een combinatie van een "culvert of onderdoorlaat" en een "weir of overstort". Zowel de culvert als de weir hebben een "gate height" en een "sill depth". Dit is de eerste keer dat deze wijze van implementatie van keringen in WAQUA plaatsvindt. Om onverwachte zaken in de schematisatie zoveel mogelijk vooraf te voorkomen, wordt binnen de WAQUA schematisatie mede vanwege de tijdsdruk, wel een dubbele barrier gedefinieerd, maar tijdens de berekeningen wordt via de aansturing van de culvert en de weir voorkomen dat er een situatie optreedt waarin beide gelijktijdig actief zijn. Dit betekent dus dat er een gesloten situatie van een kering of alleen een lekopening onder de kering is en geen overstort, of dat er alleen overstort over de kering is en geen lekopening. Om dit te realiseren zijn in het keringscript zowel de aansturing van de culvert als van de weir opgenomen. De afzink- en stijgsnelheden van de keringen zijn weergegeven in Tabel 3.1. Voor nadere details wordt verwezen naar [Zijl et al, 2010].

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. De kern van dit proces staat beschreven in Figuur 3.8. Nadere details zijn te vinden in [Zijl et al, 2010].



Figuur 3.8 Flowdiagram schematische weergave aansturing van de Maeslant- en Hartelkering.

Feitelijk stuurt het keringscript een serie opeenvolgende WAQUA_RMM berekeningen (tussen berekeningen) aan, waarbij op basis van elke tussenberekening de stuurfiles voor de keringen voor de volgende tussenberekening in de reeks wordt aangemaakt. De serie tussenberekeningen start met een berekening, waarbij de keringen geforceerd openblijven. Door vergelijking met de optredende waterstanden en de sluitcriteria bepaalt het script of er een tussenberekening moet komen, waarbij de keringen sluiten. Ook het tijdstip waarop de keringen beginnen met de sluitprocedure wordt bepaald. De kering gaat in de tweede tussenberekening niet meer open. Op basis van de optredende waterstanden aan de binnen- en buitenzijde van de kering wordt bepaald wanneer de kering van de gesloten naar de drijvende toestand opengaat, wat weer opgelegd wordt aan de derde tussenberekening. In de daarop volgende tussenberekening kan de kering zowel volledig opengaan als opnieuw dichtgaan, uiteraard afhankelijk van de optredende waterstanden en de sluitcriteria. Op deze manier wordt het voorspellen van toekomstige waterstanden nagebootst met WAQUA. Dit proces kan afhankelijk van de hydraulische omstandigheden herhaald worden. De toestanden van de Maeslant- en Hartelkering in het keringscript zijn beschreven in Tabel 3.2.

Tabel 3.1 Afzink- en stijgsnelheid van de Maeslantkering en Hartelkering

Kering	Zink-/stijgsnelheid [mm/s]	Afzinkduur [minuten]
Maeslantkering	05.45	≈ 75
Hartelkering Noord	04.40	≈ 50
Hartelkering Zuid	22.50	≈ 10

Tabel 3.2 Toestanden van de Maeslant- en Hartelkering in het keringscript

Toestand	Maeslantkering	Hartelkering
Open	Geheel geopend	geheel geopend
Closed	Gesloten - lekopening van 0.28 m, overstort > 5.00 m+NAP	Gesloten - geen lekopening, wel overstort > 3.00 m+NAP
Float	Drijvend (spleelhoogte 10m)	Open
Sedimentstop	Drijvend op de hoogte van de sedimentstop (spleelhoogte 5 m)	Open
Finished	Open drijvend of gesloten	Open of gesloten

Voor een uitvoerige beschrijving van de toestanden zoals beschreven in Tabel 3.2 wordt verwezen naar [Zijl et al, 2010]. De toestand finished wordt bereikt indien geen toestand open, closed of foat meer wordt gevonden. Dit is het einde van de berekening.

Het keringscript zoals hierboven beschreven is een vereenvoudiging van PRIS. De belangrijkste verschillen zijn:

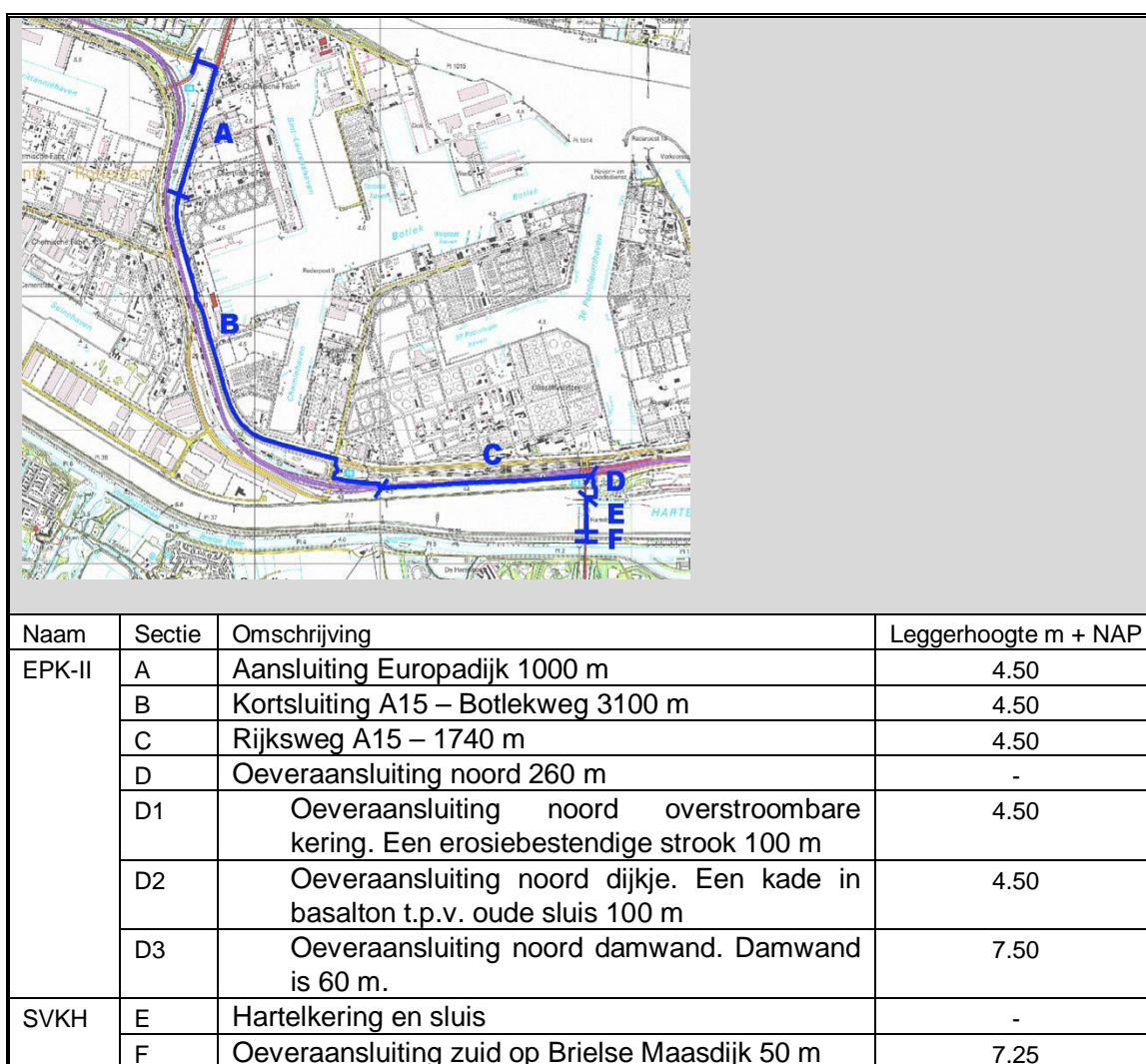
- Ontbreken van processtappen zoals stremmen, invaren en uitvragen van de deuren, voorspanbeheer,
- Het script heeft geen trigger op het debiet bij Lobith, maar op een crossectie op de Waal waarbij een bij 6.000 m³/s te Lobith behorende criterium van 4.000 m³/s op de Waal wordt gehanteerd,
- Waterstandsverval wordt gemiddeld over meerdere tijdstappen voordat het gebruikt wordt als criterium dat tot een verandering van toestand kan leiden,
- De sedimentstop is zodanig geïmplementeerd dat die constant kan worden gekozen in minuten of bepaald worden via een erosieteller,
- Als de Maeslantkering eenmaal besluit te sluiten of te openen, dan maakt deze de sluiting of opening af en blijft ten minste 30 minuten is gesloten of opgedreven toestand,
- Indien de Maeslantkering op basis van verval besluit op te drijven, terwijl de Hartelkering op basis van verval nog gesloten dient te blijven, dan zal de Hartelkering toch gelijktijdig met het opdrijven van de Maeslantkering openen. Dit is niet conform de werkelijke aansturing van de Hartelkering, waarbij het hefmoment ingaat op het moment dat het verval over de Hartelkering overgaat van positief naar negatief,
- Voor de Hartelkering ontbreekt de lekopening en voor de Maeslantkering de overstort van de kering.

De werking van het keringscript is uitvoering getest en vergeleken met SOBEK/PRIS. Hierbij zijn 108 testberekeningen gemaakt met zowel SOBEK als WAQUA-RMM; dit betreft de 108 condities van de MHW-processor⁶. Er wordt opgemerkt dat deze condities de hele matrix van condities dekken die nodig zijn voor Hydra-zoet; en worden vaak gebruikt voor gevoeligheidsanalyses en beleidsonderzoeken. De resultaten van de uitgevoerde testberekeningen met WAQUA-RMM en het keringscript hebben laten zien dat er grote overeenkomsten zijn met die met SOBEK. De sluit- en openmomenten evenals de totale sluitduur van de keringen in WAQUA-RMM bleken overeen te komen met die in SOBEK. Hetzelfde geldt voor het verhang en de gegenereerde tijdreeksen. Op basis hiervan is geconcludeerd dat het keringscript de keringen goed aanstuurt in WAQUA-RMM. Zie verder subparagraaf 3.5.3.

6. De 108 condities van de MHW-processor bestaan uit 9 afvoeren, 6 zeestanden, 2 keringtoestanden (open en dicht) en 1 windrichting.

3.2.6 Verschillen SOBEEK en WAQUA schematisaties Benedenrivieren

Er zijn verschillen in de modelschematisaties van SOBEEK en WAQUA-RMM. Het Europoortgebied is tweedimensionaal gemodelleerd in WAQUA-RMM; de kades daar hebben de werkelijke hoogte gekregen in de modelschematisatie en kunnen daarom overstromen. Het hele havengebied kan onder extreme omstandigheden onderlopen. Dit in tegenstelling tot de schematisatie binnen SOBEEK waarin de kades onder andere vanwege instabiliteiten oneindig hoog zijn gemodelleerd en daarom niet overstroombaar. De verbindende stormvloedkering Nieuwe Waterweg en de verbindende Hartelkering, met een totale lengte van 13.8 km, hebben ook de werkelijke leggerhoogte gekregen in de WAQUA-RMM schematisatie, terwijl deze oneindig hoog worden geschematiseerd in SOBEEK. Dit betekent dat beide verbindende stormvloedkeringen overstroombaar zijn. Dit geldt voornamelijk voor de Hartelkering vanwege de beperkte werkelijke hoogte. Figuur 3.9 geeft de hoogtegegevens volgens de Legger weer van de verbindende Hartelkering.



Figuur 3.9 Ligging en hoogtegegevens verbindende Hartelkering zoals geschematiseerd in WAQUA (bron Legger).

Een ander belangrijk verschil tussen de schematisaties van SOBEEK en WAQUA betreft de Haringvlietssluisen. Ze zijn oneindig hoog geschematiseerd in SOBEEK terwijl in WAQUA-RMM de daadwerkelijke kerende hoogte van 5,0 m t.o.v. NAP is aangehouden. Onderstaande Tabel

3.3 vat de belangrijkste verschillen samen in de modelschematisaties met SOBEK en WAQUA-RMM..

Tabel 3.3 *Verschillen in modelschematisaties met SOBEK en WAQUA-RMM*

Onderwerp	SOBEK	WAQUA-RMM
Verbindende keringen 8 en 9 (totale lengte 13.8 km)	Niet overstroombaar (oneindig hoog)	Wel overstroombaar (werkelijke hoogte: legger)
Kades Europoort	Niet overstroombaar (oneindig hoog)	Wel overstroombaar (werkelijke hoogte: WAQUA bodem)
Haringvlietsluizen	Oneindige kerende hoogte ⁷	Werkelijke kerende hoogte (5 m+ NAP)
Maeslantkering <ul style="list-style-type: none"> • Aansturing • Overstort • Lek 	<ul style="list-style-type: none"> • Via PRIS⁸ • Ja • Nee 	<ul style="list-style-type: none"> • Keringscript⁹ • Nee • Ja
Hartelkering <ul style="list-style-type: none"> • Overstort • Lek 	<ul style="list-style-type: none"> • Nee • Ja 	<ul style="list-style-type: none"> • Ja • Nee
Sedimentstop	Ja	Nee ¹⁰
Modellerings wind	Via hidingfactoren	Uniform, geen hidingfactor

Het laatst belangrijke verschil betreft het gebied rondom de Biesbosch, dit is tweedimensionaal gemodelleerd in WAQUA-RMM en kan afhankelijk van de hydraulische omstandigheden overstromen. SOBEK houdt hier geen rekening mee.

3.3 Randvoorwaarden en productieberekeningen

3.3.1 Randvoorwaarden Benedenrivieren

Na het maken, actualiseren en controleren/testen van de WAQUA-RMM schematisatie zijn productieberekeningen gemaakt. Voor de productieberekeningen WTI-2011 zijn evenals in HR2006 een groot aantal combinaties van de bedreigingen/stochasten zeewaterstand, Maasafvoer, Rijnafvoer, windsnelheid, windrichting en beheersituaties van de Maeslant- en Hartelkering. Iedere stochast kan verschillende waarden aannemen: niet alleen waarden in het 'meetbereik = voorkomend', maar ook waarden in het extreme (zeldzame) bereik. Voor de waterstanden en golven in het Benedenrivierengebied zijn de combinaties van de stochastwaarden van belang. Hogere waterstanden en golven treden overigens niet alleen op bij combinaties waarin alle stochasten een extreme waarde aannemen. Daarom zijn ook combinaties relevant waarbij enkele stochasten een veel voorkomende waarde aannemen; vooral in het overgangsgebied, zie Figuur 2.3.

Het relevante bereik van de stochasten moet dus het grote gebied van stochastwaarden tussen 'meetbereik' en 'zeer zeldzaam' omvatten. De bijbehorende getallen kunnen per stochast afgeleid worden uit de behandeling van de statistiek, o.a. in relatie tot de geldende norm. Een

⁷ Effect kerende hoogte reeds onderzocht en blijkt marginaal te zijn (Systeemanalyse Rijn- en Maasmonding)

⁸ SOBEK en stormvloedkeringen worden aangestuurd door PRIS, hierbij worden veel iteraties/berekeningen gebruikt

⁹ De keringtoestanden worden vanwege rekentijd bepaald middels WAQUA tussenberekeningen

¹⁰ Het keringscript houdt wel rekening met sedimentstop; echter de productieberekeningen zijn uitgevoerd zonder sedimentstop. Effect op de toetspeilen is onderzocht en bedraagt maximaal 2 cm

overzicht van de waarden van de stochasten voor het Benedenrivierengebied is weergegeven in Tabel 3.4.

Merk op dat de stochast zeewaterstand is beschouwd als een onafhankelijke stochast en niet gecorreleerd met de windsnelheid. De afvoeren van de Rijn en de Maas worden niet als twee afzonderlijke stochasten beschouwd, zie subparagraaf 3.3.5.

Tabel 3.4 Stochastcombinaties productieberekeningen Benedenrivierengebied

Stochast		Variatie		Aantal
Westelijke sector				
Windsnelheid	m/s	0, 11.1, 21.6, 31.7, 43.3		1+ 4
Windrichting		ZW, WZW, W, WNW, NW, NNW,N		7
Afvoer	m ³ /s	Rijn gedomineerd	600, 2000, 4000, 6000, 8000, 10000, 13000, 16000, 18000	9
		Maas gedomineerd	600, 2000, 4000, 6000, 8000, 10000, 13000, 14790, 18000	
Zeewaterstand	m+NAP	1.14, 2.00, 3.00, 4.00, 5.00, 6.00		6
Keringsituatie		open, dicht		2
Type som		Rijn-gedomineerd met 50%-Maas, Maas-gedomineerd met 50%-Rijn		2
Totaal aantal sommen westelijke sector: $(1+ 4*7) * 9 * 6 * 2 * 2 =$				6264
Oostelijke sector				
Windsnelheid	m/s	0, 11.1, 21.6, 31.7		1+ 3
Windrichting		NNO, NO, ONO, O, OZO, ZO, ZZO, Z, ZZW		9
Afvoer	m ³ /s	Rijn gedomineerd	600, 2000, 4000, 6000, 8000, 10000, 13000, 16000, 18000	9
		Maas gedomineerd	600, 2000, 4000, 6000, 8000, 10000, 13000, 14790, 18000	
Zeewaterstand	m+NAP	1.33		1
Keringsituatie		open		1
Type som		Rijn-gedomineerd met 50%-Maas, Maas-gedomineerd met 50%-Rijn		2
Totaal aantal sommen oostelijke sector: $(1+ 3*9) * 9 * 1 * 1 * 2 =$				504
Totaal aantal sommen westelijke+oostelijke sector =				6768

3.3.2 Randvoorwaarde wind

Wind is een randvoorwaarde voor zowel de berekening van het langsverhang (opwaaiing in de as richting) als voor de berekening van het dwarsverhang (lokale dwarsopwaaiing). De toepassing van de wind als invoer is voor de productieberekeningen ten behoeve van WTI-2011 echter wel aangepast ten opzichte van HR2006. Voor WTI-2011 wordt namelijk gebruik gemaakt van de openwater windsnelheid in plaats van de potentiële wind. De omzetting van de potentiële windsnelheid naar openwater windsnelheid gebeurt volgens de methodiek zoals beschreven in de [de Waal, 2003, 2010]. Een andere aanpassing betreft de ruimtelijke variabiliteit van de wind. In het WAQUA-RMM model is de wind over het gehele gebied ruimtelijk uniform verondersteld [de Waal, 2010]. Voor de productieberekeningen met SOBEK is de wind echter ruimtelijk variërend; de zogenoemde hidingfactoren zijn toegepast [de Deugd, 2007]. Deze aanpak is inherent aan de modellering met SOBEK en is derhalve onveranderd ten opzichte van HR2006.

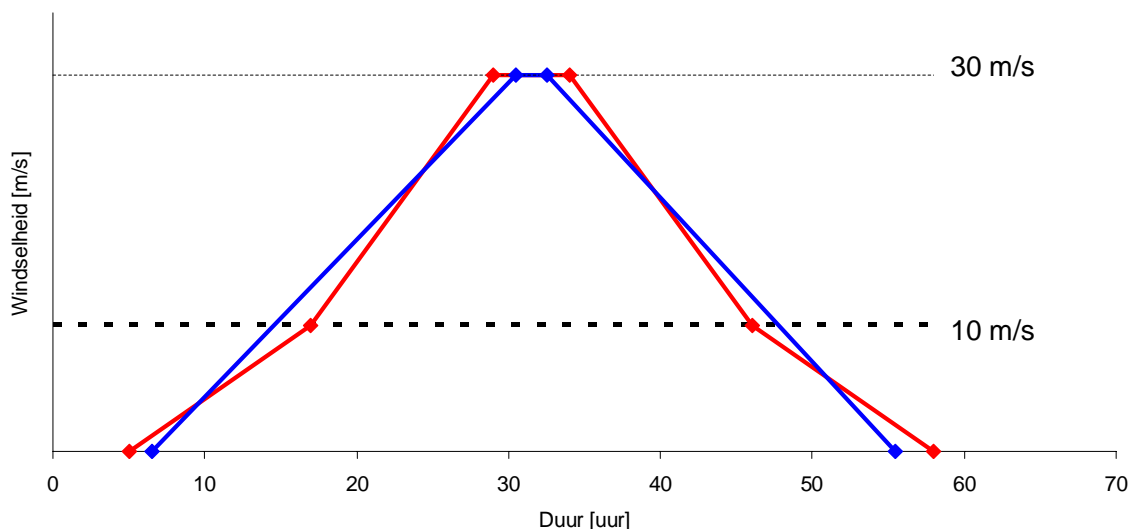
Voor het Benedenrivierengebied zijn behalve een windsnelheid gelijk aan nul vier windsnelheden gekozen voor de westelijke sectoren en drie windsnelheden voor de oostelijke sectoren, zie Tabel 3.5. Het aantal waarden van de wind dat beschouwd is voor de berekeningen van WTI-2011 is ongewijzigd ten opzichte van HR2006.

Tabel 3.5 Windsnelheden productieberekeningen Benedenrivierengebied

Segment	Potentiele windsnelheid [m/s]	Openwater windsnelheid [m/s]
Oostelijk	0	0
	10	11.1
	20	21.6
	30	31.7
Westelijk	0	0
	10	11.1
	20	21.6
	30	31.7
	42	43.3

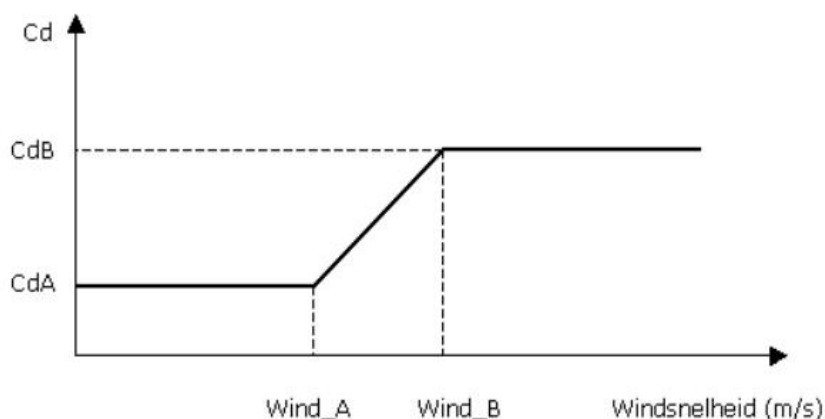
Ook het windverloop is uit uniformiteitoverweging aangepast. De in het kader van WTI-2011 gebruikte stormduur in het Benedenrivierengebied is identiek aan de voor de Vecht- en IJsseldelta en het IJsselmeer toegepaste stormduur. Het in het kader van HR2006 toegepaste windverloop heeft een trapeziumvorm met basisduur van 29 uur op het niveau van 10 m/s met flanken van 12 uur naar het niveau van 0 m/s. In het kader van WTI-2011 is gebruik gemaakt van een trapeziumvormige stormduur van 48 uur op het 0 m/s niveau. In 23 uur loopt de windsnelheid lineair op van nul naar de maximale waarde. De maximale windsnelheid treedt vervolgens gedurende 2 uur op. Daarna neemt de windsnelheid in opnieuw 23 uur lineair af naar nul. Details met betrekking tot de nieuwe stormduur voor de Benedenrivieren zijn te vinden in [Tijssen, 2010ab]. Figuur 3.10 geeft beide stormverlopen, van HR2006 en WTI-2011, schematisch weer.

Zoals weergegeven in Tabel 3.5 wordt voor het westelijke segment een extra windsnelheid doorgerekend ten opzichte van het oostelijke segment.



Figuur 3.10 Vorm windverloop in de tijd voor een storm met maximale windsnelheid van 30 m/s; rood = verloop HR2006 en blauw = verloop WTI-2011.

De schuifpanning die de wind op het wateroppervlak uitoefent, is berekend met behulp van een variabele windschuifspanningscoëfficiënt C_d [Bak en Vlag, 1999]. Zie Figuur 3.11, waarin $C_{dA} = 0,0014$, $C_{dB} = 0,039$, $wind_A = 7,8$ m/s en $wind_B = 50,0$ m/s.



Figuur 3.11 Variabele windschuifspanningscoëfficiënt zoals toegepast voor de productieberekeningen van Benedenrivieren

3.3.3 Randvoorwaarde windrichting

Bij de productieberekeningen worden zowel de windrichting als de maximale windsnelheid gevarieerd en gecombineerd met de andere randvoorwaarden. Er is onderscheid gemaakt tussen wind uit het oostelijke segment en wind vanuit het westelijke segment. De segmenten zijn onderverdeeld in richtingsectoren van 22,5 graden. De bij de productieberekeningen toegepaste richtingsectoren zijn weergegeven in Tabel 3.6. De windrichting is in WTI-2011 verder onveranderd ten opzichte van HR2006.

Tabel 3.6 De bij de productieberekeningen toegepaste windrichtingen (sectoren).

Segment	Richting (sector)	Richting [graden]
Oostelijk	NNO	22,5
	NO	45
	ONO	67,5
	ONO	90
	OZO	112,5
	ZO	135
	ZZO	157,5
	Z	180
	ZZW	202,5
Westelijk	ZW	225
	WZW	247,5
	WZW	270
	WNW	292,5
	NW	315
	NNW	337,5
	N	360

3.3.4 Benedenrand: zeewaterstand

SOBEK kent drie randvoorwaarden locaties [de Deugd, 2007]. Voor de productieberekeningen met WAQUA-RMM gelden dezelfde randvoorwaarden locaties, met dien verstande dat de

benedenrand uit een tweedimensionale waterstand bestaat. In WAQUA-RMM wordt lineair geïnterpoleerd tussen de twee zuidelijke SOBEK randvoorwaardenpunten. Voor meer details wordt verwezen naar [Zijl et al, 2010] en [Vuik et al, 2011ab].

Een benedenrandvoorwaarde bestaat uit een waterstandsverloop die uit een combinatie bestaat van stormopzetverloop, astronomisch getij en faseverschil tussen beide, vermeerderd met een component voor de zeespiegelstijging.

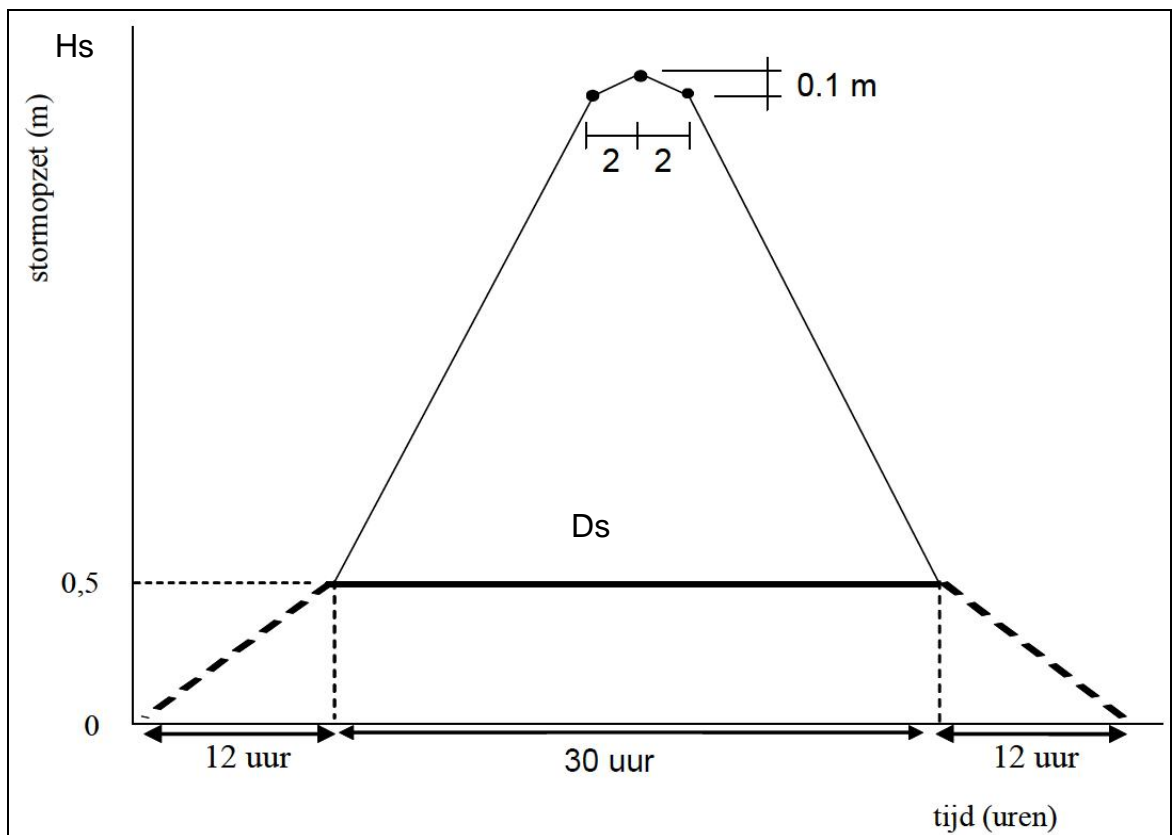
De westelijke windrichtingen worden in de productieberekeningen anders behandeld dan de oostelijke windrichtingen. De berekeningen met de oostelijke windrichtingen worden namelijk uitgevoerd voor het springtij zonder rekening te houden met een stormopzet. Het faseverschil tussen stormopzet en getij is daardoor niet relevant. De enige verandering binnen WTI-2011 voor de oostelijke windrichtingen betreft de zeespiegelstijging. Voor de WTI-2011 berekeningen is rekening gehouden met een zeespiegelstijging van 0,08 m ten opzichte van het referentiejaar 1985 (basispeilen).

Voor de zeven westelijke windrichtingen ZW, WZW, ..., N worden, zoals aangegeven in Tabel 3.4, zes zeewaterstanden doorgerekend. Hierbij worden op het gemiddelde getijverloop wel stormopzetten (H_s) gesuperponeerd, waarbij bovendien rekening wordt gehouden met een faseverschil tussen stormopzet en astronomisch hoogwater. Ten opzichte van de HR2006 is het stormopzetverloop gewijzigd [Tijssen, 2010ab]. In de HR2006 berekeningen is gebruik gemaakt van een stormopzetduur van 29 uur op het nul meter niveau. In het kader van WTI-2011 is voor de Benedenrivieren is een stormopzetduur (D_s) van 30 uur op het 0,5 meter niveau gebruikt, met flanken van 12 uur (T_s flank) naar het nul meter niveau. Het verloop van en rondom de top van stormopzet blijft onveranderd. De vorm van de nieuwe stormopzet is afgebeeld in Figuur 3.12.

Het faseverschil (F_s), dit is het tijdsverschil tussen het astronomische hoogwater en de maximale stormopzet, wordt constant gehouden op -4,5 uur. Dit is onveranderd ten opzichte van HR2006, zie [Chbab, 2011]. In Tabel 3.7 zijn de parameters die de randvoorwaarde zeewaterstand bepalen weergegeven.

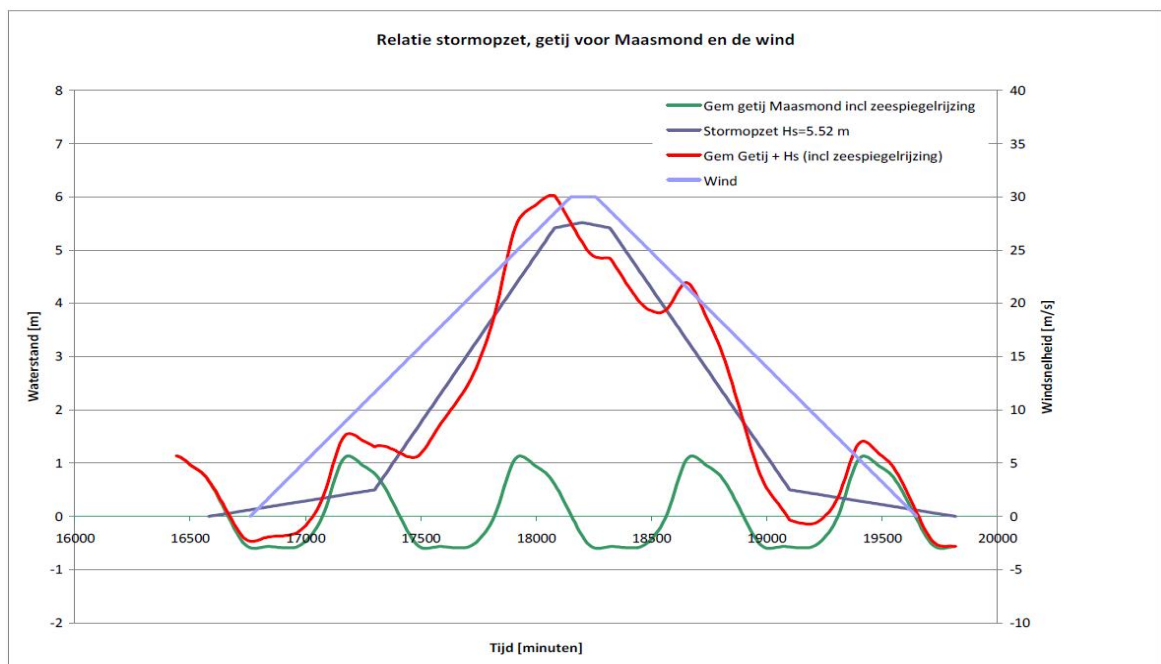
Tabel 3.7 Parameters voor de zeeranden productieberekeningen

Windsector	Basisreeks incl. 8 cm zeespiegelstijging [m tov NAP]	H_s [m]	D_s op 0,5 m niveau	T_s flank [uur]	F_s [uur]	Zeestand bij MaasMond [m tov NAP]
Oostelijk	springtij	0	0	12	0	+1.33
Westelijk	gemiddeld tij	0	30	12	-4.5	+1.14
		1.05	30	12	-4.5	circa +2.00
		2.28	30	12	-4.5	circa +3.00
		3.44	30	12	-4.5	circa +4.00
		4.49	30	12	-4.5	circa +5.00
		5.52	30	12	-4.5	circa +6.00



Figuur 3.12 Vorm en duur stormopzet binnen WTI-2011.

In onderstaande Figuur 3.13 wordt de relatie tussen stormopzet, getij voor benedenrand locatie Maasmond en wind, zoals gebruikt voor de productieberekeningen, getoond.



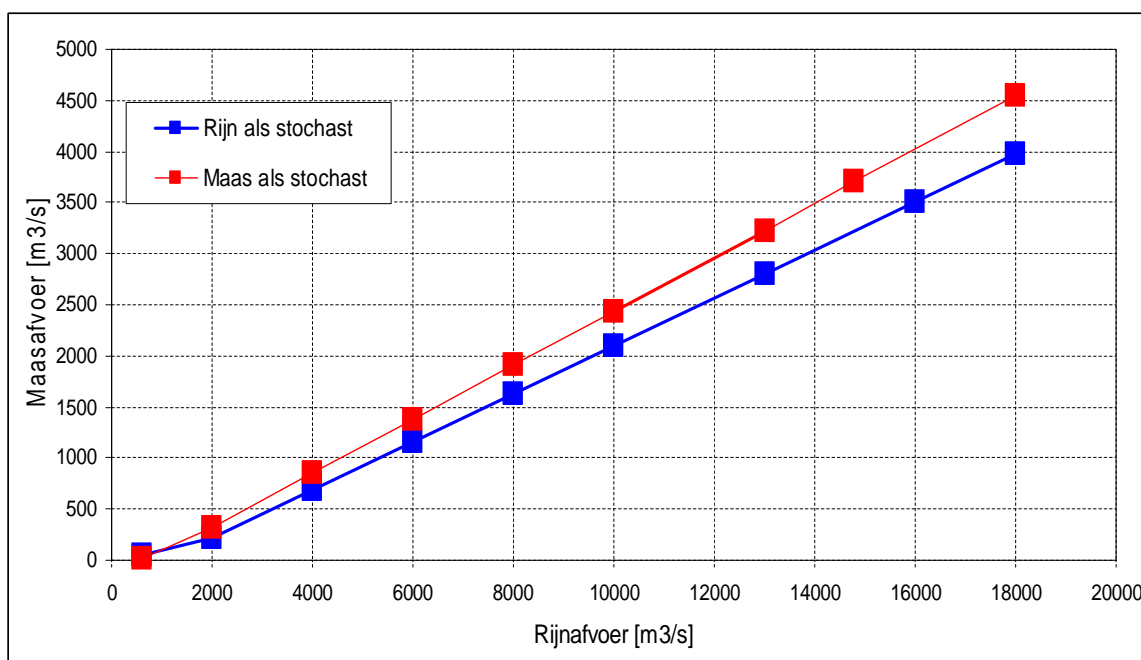
Figuur 3.13 Relatie tussen stormopzet , getij voor de benedenrand locatie Maasmond en de wind

3.3.5 Bovenranden: afvoeren

Aan de oostzijde van het WAQUA-RMM model bevinden zich drie open rivierranden. Het WAQUA model wordt daar aangestuurd door debieten. Deze rivierranden liggen in de Waal bij Tiel, in de Maas bij de stuw te Lith en in de Lek bij de stuw te Hagestein. De debieten op de rivierranden worden afgeleid met gebruik van de zogenoemde 50% relaties van de Rijn en de Maas en de afvoerverdeling over de Rijntakken.

De productieberekeningen worden uitgevoerd voor diverse afvoerniveaus, waarbij enerzijds uitgegaan van de afvoer van de Rijn bij Lobith met de daarbij behorende afvoer van de Maas bij Lith die met een kans van 50% wordt overschreden (Rijngedomineerd) en anderzijds wordt uitgegaan van de afvoer van de Maas bij Lith met de daarbij behorende 50%-Rijnafvoer (Maasgedomineerd). De voor de productieberekeningen gehanteerde 50% relaties staan afgebeeld Figuur 3.14. Deze relaties zijn in WTI-2011 onveranderd ten opzichte van HR2006.

Elk afvoerniveau van de Rijn te Lobith leidt tot bepaalde afvoerniveaus bij Hagestein (Lek) en Tiel (Waal). Per berekening wordt gerekend met permanente afvoerniveaus van de Rijn en de Maas. Merk op dat de WAQUA modelranden verschillen van die van SOBEK, zie Tabel 3.8. Omdat de productieberekeningen met constante afvoeren worden uitgevoerd, zijn de op te leggen debieten op de modelranden van zowel WAQUA-RMM als SOBEK identiek.



Figuur 3.14 Gehanteerde 50% relaties voor Rijnafvoer en Maasafvoer.

De ligging van de bovenrandlocaties in WAQUA-RMM verschillen van die SOBEK. In onderstaande Tabel 3.8 zijn de bovenrandlocaties van beide modelschematisaties weergegeven.

Tabel 3.8 Ligging bovenranden van WAQUA en SOBEK modelschematisaties

Riviertak	Bovenrand	
	WAQUA	SOEBK
Nederrijn/Lek	Hagestein	IJsselkop
Waal	Tiel	Pannerdense kop
Maas	Lith	Mook

Voor het bepalen van de afvoer op de Nederrijn/Lek en Waal is de beleidsmatige gewenste afvoerverdeling gehanteerd, net zoals in de HR2006. De afvoerniveaus met de verdeling volgens de beleidsmatige gewenste afvoerverdeling over de Rijntakken zijn weergegeven in Tabel 3.9.

Tabel 3.9 Afvoerniveaus productieberekeningen met de verdeling over de Rijntakken en de Maas bij Rijndominantie

Afvoer Bovenrijn [m ³ /s]	Afvoer Nederrijn/Lek [m ³ /s]	Afvoer Waal [m ³ /s]	Afvoer Maas (50%) [m ³ /s]
600	25	550	55
2000	308	1401	217
4000	750	2697	687
6000	1158	3997	1156
8000	1572	5296	1626
10000	2077	6473	2095
13000	2747	8285	2800
16000	3376	10165	3504
18000	3798	11435	3974

Tabel 3.10 Afvoerniveaus productieberekeningen met de verdeling over de Rijntakken en de Maas bij Maasdominantie

Afvoer Maas [m ³ /s]	Afvoer Nederrijn/Lek (50%) [m ³ /s]	Afvoer Waal (50%) [m ³ /s]	Afvoer Rijn (50%) te Lobith [m ³ /s]
10	25	550	600
327	308	1401	2000
855	750	2697	4000
1382	1158	3997	6000
1909	1572	5296	8000
2437	2077	6437	10000
3228	2747	8285	13000
3700	3119	9401	14790
4546	3798	11435	18000

Naast debietrandvoorwaarden aan de modelranden wordt het WAQUA-RMM model nog aangestuurd door laterale toestromingen.

De ligging van de lozinglocaties is weergegeven in onderstaande Tabel 3.11.

Tabel 3.11 Ligging locaties laterale instroom in WAQUA voor de Benedenrivieren

Lozing	Rivierlocatie
Getymas1	kilometerraai 207.0
Getymas2	kilometerraai 210.0
Getymas3	kilometerraai 220.1
Getymas4	kilometerraai 235.3
Wilheminkanaal	kilometerraai 250.7
Lek__1	kilometerraai 965.0
Lek__2	kilometerraai 986.9

De laterale lozingen op de Lek bij de Rijn- en Maasdominantie zijn weergegeven in Tabel 3.12. De laterale lozingen op de Maas bij Rijndominantie respectievelijk Maasdominantie zijn weergegeven in Tabel 3.13 respectievelijk Tabel 3.14.

Tabel 3.12 Laterale lozingen op de Lek bij Rijn- en Maasdominantie

Dominantie	Afvoer Rijn [m ³ /s]	Afvoer Nederrijn/Lek [m ³ /s]	LEK_1 [m ³ /s]	LEK_2 [m ³ /s]
Rijn gedomineerd	600	25	0.0	0.0
	2000	308	0.5	0.8
	4000	750	1.2	2.1
	6000	1158	1.8	3.3
	8000	1572	2.4	4.3
	10000	2077	3.3	5.3
	13000	2747	4.5	6.6
	16000	3376	5.0	7.2
	18000	3798	5.8	8.3
Maas gedomineerd	600	25	0.0	0.0
	2000	308	0.5	0.8
	4000	750	1.2	2.1
	6000	1158	1.8	3.3
	8000	1572	2.4	4.3
	10000	2077	3.3	5.3
	13000	2747	4.5	6.6
	14790	3119	5.4	7.7
	18000	3798	5.8	8.3

Tabel 3.13 Laterale lozingen op de Maas bij Rijndominantie

Afvoer Maas (m ³ /s)	Getymas1 (m ³ /s)	Getymas2 (m ³ /s)	Getymas3 (m ³ /s)	Getymas4 (m ³ /s)	Wilhelmina-kanaal (m ³ /s)
55	0.1	0.0	5.2	5.2	0.0
217	0.3	0.0	9.2	9.2	0.0
687	0.8	0.0	20.6	20.6	0.0
1156	1.2	0.0	25.6	34.0	0.0
1626	1.7	3.0	17.5	51.4	0.0
2095	2.1	8.7	0.4	68.7	0.0
2800	2.8	16.6	0.0	75.3	0.0
3504	3.7	18.6	0.0	103.5	0.0
3974	4.2	19.9	0.0	117.9	0.0

Tabel 3.14 Laterale lozingen op de Maas bij Maasdominantie

Afvoer Maas (m ³ /s)	Getymas1 (m ³ /s)	Getymas2 (m ³ /s)	Getymas3 (m ³ /s)	Getymas4 (m ³ /s)	Wilhelmina-kanaal (m ³ /s)
10	0.1	0	4.1	4.1	0.0
327	0.4	0	11.9	11.9	0.0
855	0.9	0	24.7	24.7	0.0
1382	1.5	0.6	21.7	42.4	0.0
1909	2.0	6.4	4.5	64.7	0.0
2437	2.5	12.7	0.0	76.2	0.0
3228	3.4	18.0	0.0	92.1	0.0
3700	3.9	19.1	0.0	108.9	0.0
4546	4.7	20.9	0.0	140.9	0.0

3.3.6 Kunstwerken en stuwen

Zoals hierboven beschreven bevindt zich in het Benedenriviereengebied een vijftal kunstwerken die relevant zijn voor het bepalen van de HR. De Haringvlietsluizen, de

stormvloedkering Hollandsche IJssel en de kromme Nolkering zijn geïmplementeerd in het WAQUA-RMM model en worden hierdoor aangestuurd, zie voor de aansturing subparagraaf 3.2.5.

De Maeslantkering en Hartelkering worden aangestuurd door middel van een keringscript dat buiten WAQUA-RMM werkt. De onzekerheid over de beheersituatie van deze twee keringen wordt als meegenomen in de berekeningen. Hierbij is gekozen voor een aanpak met slechts één stochast die slechts twee mogelijke realisaties kent: 1) dichte situatie (of niet-falen) waarin beide keringen sluiten en openen volgens de hiervoor vastgestelde procedures en 2) open situatie (of falen) waarin beide keringen blijven geheel (los van de vraag of gedrag in overeenstemming is met de vastgestelde procedures). Dit betekent dat er een set berekeningen met randvoorwaarden zoals hierboven beschreven uitgevoerd wordt, waarbij de keringen ondanks de hoge stormvloed niet bestuurd worden en derhalve open blijven en een set berekeningen waarbij de keringen wel bestuurd en gesloten worden. De sluiting bij niet-falen dient ook plaats te vinden als de sluitcriteria niet gehaald worden. Er worden daarom zogenaamde geforceerde sluitingen uitgevoerd.

Bij een geforceerde sluiting komt de werkwijze in het kort op neer dat de stochastcombinaties die het sluitcriterium niet halen opnieuw uitgerekend zijn met een aangepast verlaagd sluitcriterium. De sluiting komt dan geforceerd tot stand. Bij de peilsluitingen is er een uitzondering, want als een bepaalde stochastcombinatie het sluitpeil bij de kering van 2,00 m+NAP niet haalt en omdat de peiloverschrijding in werkelijkheid op de peilmeetstations geschiedt, zullen in die situatie de keringen open blijven. De stochastcombinaties zonder windopzet op zee, dus alle combinaties met gemiddeld getij op zee, worden ook niet geforceerd gesloten. De resultaten uit de 'gesloten' set zijn dan gelijk aan die van de open set.

Het keringscript voor de aansturing van de Maeslant- en Hartelkering zoals beschreven in 3.2.5.6 houdt conform PRIS voor SOBEK rekening met de sedimentstop, zie subparagraaf 3.2.5.2. Echter, de productieberekeningen met WAQUA zijn zonder sedimentstop uitgevoerd.

3.4 Uitvoerlocaties

Deze paragraaf beschrijft allereerst de verschillende uitvoerlocaties die zijn gedefinieerd, waar uitvoer van waterstands- en golfberekeningen (voor golfberekeningen wordt verwezen naar de hoofdstukken 4 en 5) wordt gegenereerd en waar bovendien Hydra-Zoet berekeningen voor kunnen worden uitgevoerd. Daarna volgen de conversie van RD-coördinaten naar roostercoördinaten.

3.4.1 Type uitvoerlocaties

De locaties (of een deel daarvan) waar uiteindelijk met Hydra-Zoet de hydraulische randvoorwaarden worden bepaald zijn in het WAQUA_RMM model opgenomen en van deze locaties is tijdens de productie berekeningen de maximale waterstand bepaald. De uitvoerlocaties kunnen verdeeld worden in twee verschillende soorten:

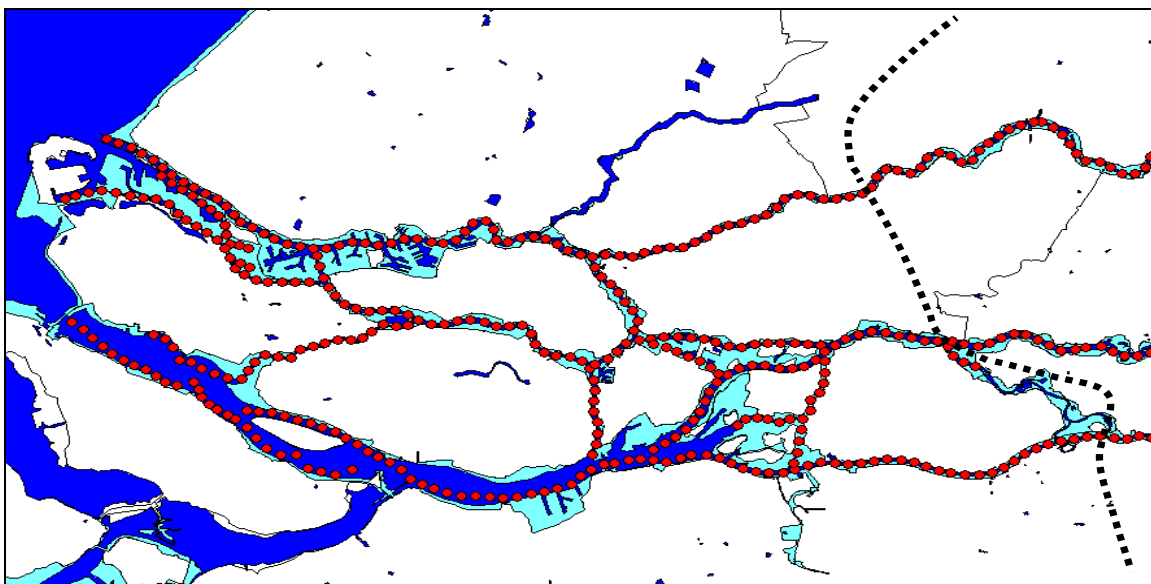
- Aslocaties: locaties die in het midden van de rivier liggen
- Oeverlocaties: locaties die aan de teen van de dijk liggen.

Aslocaties

Een overzicht van de uitvoerlocaties in de as van de riviertakken van de Benedenrivieren is weergegeven in onderstaande Figuur 3.15. De aslocaties in WAQUA zijn identiek aan de aslocaties in SOBEK, en zijn verder onveranderd ten opzichte van HR2006.

Oeverlocaties

De oeverlocaties die ten grondslag liggen aan de vigerende HR2006 zijn gebaseerd op het eendimensionale SOBEK model. De vertaling van de as van de rivier naar de teen van de dijk geschiedt in de SOBEK modellering door middel van de TAW formule [TAW, 1985]. In de productieberekeningen met SOBEK wordt het TOF programma gebruikt [de Goederen, 1999].



Figuur 3.15 Overzicht van de as locaties in de Benedenrivieren

In het kader van WTI-2011 wordt voor de productieberekeningen van de maximale waterstanden en golfparameters respectievelijk het tweedimensionale WAQUA-RMM model en het SWAN model gebruikt. Deze modellen stellen zware eisen aan de ligging van de uitvoerlocaties. Zo moeten alle locaties buitendijks binnen de modelschematisaties liggen en bovendien binnen de rekenroosters van de modellen vallen. De SOBEK locaties voldoen hier niet aan.

In het kader van WTI-2011 zijn daarom nieuwe oeverlocaties gedefinieerd. Uitgangspunt hierbij is de nieuwe dijkkringlijn versie 3-2 van Rijkswaterstaat. Vervolgens zijn de volgende criteria toegepast om te komen tot een basisset uitvoerlocaties aan de oever.

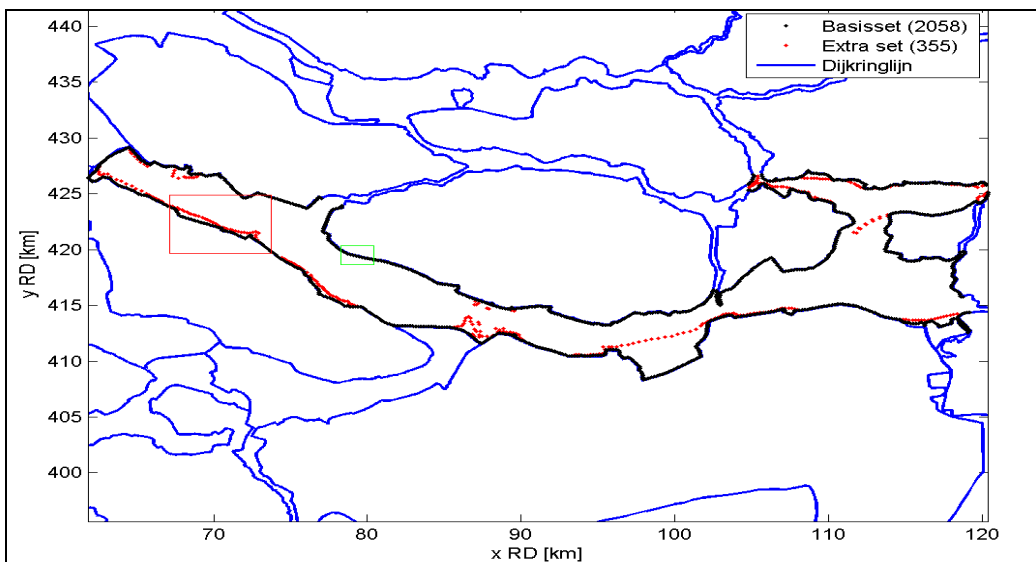
- Uitvoerlocaties liggen zo dicht mogelijk bij de dijk, maar in ieder geval niet in de eerste roostercel uit de rand,
- Hooggelegen gebieden zoals uiterwaarden worden niet ontweken tenzij deze hooggelegen gebieden de primaire kering betreffen. Dit is bijvoorbeeld het geval langs de noordwestelijke oever van het Haringvliet waar de dijkkringlijn door de duinen loopt; hier zijn de uitvoerlocaties vóór de duinen gelegd,
- Uitvoerlocaties worden gedefinieerd met een onderlinge afstand van ca. 100 m in de richting langs de dijk.

De oeverlocaties worden op een vaste afstand uit de dijkkringlijn gelegd, zodanig dat er minimaal één actieve roostercel van hetzij het WAQUA-RMM model hetzij het SWAN model (zie Hoofdstuk 4) tussen het uitvoerpunt en de dijkkringlijn ligt. Aangezien de roosterresolutie van beide modellen niet uniform is, is ook de gehanteerde afstand niet uniform. De gehanteerde afstand varieert grofweg tussen 30 en 60 m. Voor meer details wordt verwezen naar [Chbab, 2010b]. De aldus samengestelde basisset oeverlocaties is opgenomen in de

modellen voor de productie van maximale waterstanden en golfparameters. De basisset oeverlocaties bestaat uit ruim 6800 locaties.

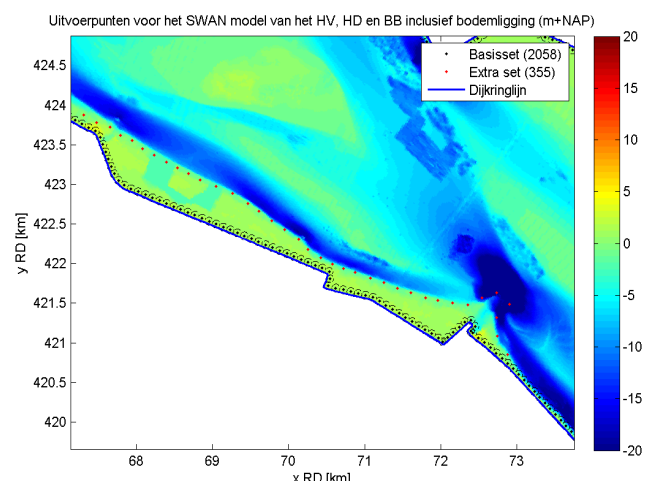
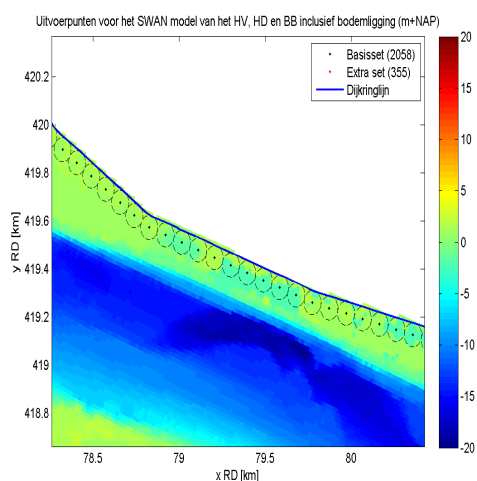
Naast de basisset uitvoerlocaties zoals hierboven beschreven en analoog aan andere watersystemen zijn voor het Benedenrivieren twee aanvullende sets uitvoerlocaties gedefinieerd: een back-up puntenset (HR50m) en een natte puntenset (HRextra).

De back-up set uitvoerlocaties is verkregen door de basisset 50 m verder van de dijk te leggen in de richting van de rivier. Indien na afloop van de productieberekeningen mocht blijken dat voor een bepaalde dijksectie de basisset uitvoerlocaties niet goed gekozen is en dat die locaties niet geschikt zijn voor de HR bepaling, dan is er op 50 m afstand van de basisset nog een volledige set uitvoerlocaties met WAQUA-RMM uitvoer beschikbaar. Uitvoerlocaties uit deze set worden dus slechts bij hoge uitzondering als vervanging van de basisset opgenomen in de databases voor Hydra-Zoet.



Figuur 3.16 Overzicht van de verschillende typen uitvoerlocaties voor delen van het Benedenriviereengebied (Haringvliet, Hollandse Diep en de Biesbosch). Zwart = basisset, rood = natte set.

Uit eerste verkennende berekeningen met WAQUA-RMM en SWAN is gebleken dat veel locaties uit de basisset (en ook de HR50m set) onder veel hydraulische omstandigheden droog blijven; voor bepaalde uitvoerlocaties was dit zelfs het geval voor extreme omstandigheden. Om toch de beschikking te hebben over uitvoerlocaties die veelal 'nat' zijn, zijn locaties gedefinieerd die de hooggelegen gronden zoals voorlanden vermijdt. Concreet betekent dat deze extra set uitvoerlocaties om de dammen, voorlanden e.d. heen is gelegd.



Figuur 3.17 Twee detail secties van Figuur 3.16. Links een doorsnede met alleen locaties uit de basisset en rechts een doorsnede met locaties uit de basis- en natte set

3.4.2 Conversie van RD-coördinaten naar roostercoördinaten

Alle uitvoerlocaties zijn aanvankelijk gedefinieerd in RD coördinaten. Er is daarom een conversie nodig van deze RD-coördinaten naar de m,n-coördinaten van het rekenrooster van WAQUA.

De conversie bestond uit de volgende stappen:

- Globale visuele controle van de RD-coördinaten,
- Automatische conversie van de uitvoerlocaties naar m,n-coördinaten van WAQUA met behulp van ArcGIS,
- Plotten van de coördinaten in RD en m,n-coördinaten en controle of de uitvoerlocaties met elkaar overeenkomen.

Voor meer details met betrekking tot de conversie wordt verwezen naar [Vuik et al, 2011ab].

3.4.3 Naamgeving uitvoerlocaties

Zoals hierboven beschreven zijn ten behoeve van WTI-2011 voor het hele Benedenrivierengebied, met uitzondering van de aslocaties, nieuwe oeverlocaties gedefinieerd. Bij de naamgeving van de verschillende locaties is de volgende codering gebruikt:

Langs de dijkringen heeft een uitvoerlocatie uit de basisset de naam DRA naam B-C_D waarin:

- A = nummer van de dijkkring volgens de waterwet
- naam = code van de betreffende riviertak
- B-C = gebied tussen rivierkilometer B en C
- D = nummer locatie in het gebied tussen rivierkilometer B en C

Voorbeeld: DR17 Nieuwe Maas 1011-1012_03 is de derde locatie in het rivierkilometer vak 1011-1012 op de Nieuwe Maas langs dijkkring 17.

Langs de verbindende keringen heeft een uitvoerlocatie uit de basisset de naam VKA naam B-C_D waarin:

- A = nummer verbindende waterkering volgens de waterwet;
- Overige coderingen voor de verbindende waterkeringen zijn gelijk aan de codering langs de dijkringen.

Bij de aslocaties is de naamgeving gelijk aan Naam km R waarin:

- Naam = code (naam) van de betreffende riviertak
- R = rivier kilometerraai

Voorbeeld: Beneden Merwede km 973 is de locatie van de rivier kilometerraai 973 langs de Beneden Merwede.

De benaming langs de locaties langs verbindende waterkering en andere sets uitvoerlocaties geschiedt conform dit principe.

3.5 Uitvoeren productieberekeningen WAQUA-RMM

3.5.1 Software

Voor de productieberekeningen met WAQUA-RMM is gebruik gemaakt van de release kandidaat SIMONA_2011_RC. In deze SIMONA_2011_RC versie zijn vooral ten aanzien van de barrierformuleringen diverse onnauwkeurigheden verbeterd en uitbreidingen gedaan. Deze versie verschilt van de versie waarmee het WAQUA-RMM model is gekalibreerd; de verschillen zijn echter klein en betreffen voornamelijk de werking van de stormvloedkeringen. De werking van de stormvloedkering, die geen rol speelt bij de kalibratie van WAQUA-RMM, is uitvoerig getest en vergeleken met die in SOBEK.

Voor de productieberekeningen is gebruik gemaakt van de Linux 32 bits ethernet SIMONA versie, de voor de domeindecompositie gebruikte MPI versie is: mpich2 versie 1.0.8p gecompileerd met de 32 bits intelcompiler versie 11.1.059.

3.5.2 Hardware

De productieberekeningen met WAQUA-RMM voor WTI-2011 zijn uitgevoerd op het externe cluster van Svasek Hydraulics. De volgende machines zijn gebruikt:

- 6 machines met 8 processoren (Intel Xeon's, 2 sockets, 4 cores), met een kloksnelheid van 3 GHz en een geheugen van 16 GB.
- 6 machines met 12 processoren (Intel Xeon's, 2 sockets, 6 cores), met een kloksnelheid van 2.95 GHz en een geheugen van 24 GB.
- Tijdens het uitvoeren van de productieberekeningen is het cluster uitgebreid met nog 2 extra machines met 12 processoren (Intel Xeon's zelfde type als hierboven).

Voor de berekeningen met WAQUA zijn in eerste instantie alleen de 6 machines met 12 processoren gebruikt. Halverwege de productieberekeningen is vanwege de enorme rekentijd besloten om de resterende 2 machines met 12 processoren en de 6 machines met 8 processoren ook in te zetten.

De circa 12.000 berekeningen (inclusief tussenberekeningen, zie subparagraaf 3.3.1) zijn in ongeveer 17 weken afgerond.

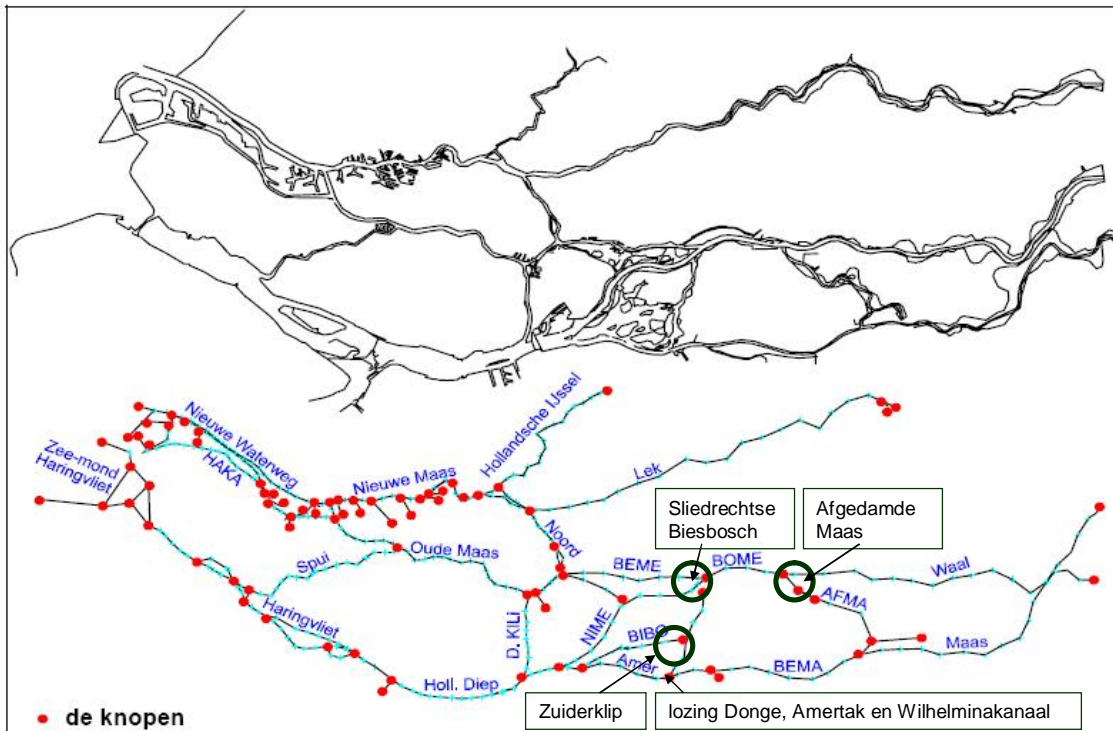
3.5.3 Testberekeningen en vergelijking met SOBEK

3.5.3.1 SOBEK schematisatie WTI-2011

Voorafgaand aan de productieberekeningen is het WAQUA-RMM model uitvoerig getest en vergeleken met een back-up SOBEK modelschematisatie die in het kader van WTI-2011 is ontwikkeld. Het betreft de SOBEK modelschematisatie versie 2.50.038. Dit is een aangepaste versie van het TMR-2006 model waarin enkele aanpassingen zijn doorgevoerd [van der Klis et al, 2010]. Het betreft de volgende aanpassingen, zie ook onderstaande Figuur 3.18.

Autonome ontwikkeling Zuiderklip: er zijn drie takjes als kortsluiting tussen verschillende krekten opgenomen in de schematisatie van de Brabantse Biesbosch;

- Afgedamde Maas: takschematisatie van de afgedamde Maas is toegevoegd;
- Invoegen lozingen Donge, Amertak en Wilhelminakanaal: deze lozingen zaten wel in de het model van 2001 maar niet in het TMR model van 2006. Ze zijn toegevoegd, maar later is besloten om deze lozingen niet mee te nemen in WTI-2011. Het debiet is daarom gelijk gesteld aan 0 m³/s, zie ook [Kramer, 2010].



Figuur 3.18 Ligging aanpassingen in de SOBEK modelschematisatie voor de Benedenrivieren binnen WTI-2011.

Aanvankelijk was de bedoeling om ook de schematisatie van de Sliedrechtse Biesbosch te verbeteren maar het gebied blijkt te complex om in een eendimensionale modelschematisatie op te nemen. Daarom wordt er afgezien van deze aanpassing.

3.5.3.2 Testberekeningen

Het WAQUA-RMM model was niet alleen belangrijk voor WTI-2011 maar ook voor andere processen en projecten binnen Rijkswaterstaat, waarbij het WAQUA-RMM als basismodel/uitgangspunt moet gaan dienen en waarin wordt gestreefd naar een samenhangend en consistent modelinstrumentarium voor de primaire processen van Rijkswaterstaat. Daarbij hoort ook de ontwikkeling van het Deltamodel. De keuze om het ontwikkelde WAQUA-RMM wel of niet te gebruiken binnen WTI-2011 heeft daarom gevolgen voor het modellenbeleid van Rijkswaterstaat. Binnen WTI en het toetsproces is de impact op de toetspeilen van het gebruik van WAQUA-RMM van groot belang. In het licht van deze belangen zijn in de periode voorafgaand aan de productieberekeningen veel testberekeningen uitgevoerd met invoer uit de productierandvoorwaarden zoals beschreven in subparagraaf 3.3.1. De testberekeningen hebben tot doel:

- Inzicht krijgen in de algehele performance van het WAQUA-RMM model (o.a. door middel van een vergelijking met SOBEK) en eventuele fouten uit het model te halen,
- Implementeren van het keringscrist in de productieboom¹¹ en het testen ervan,
- Schatten en indien nodig reduceren van de rekentijd,
- Inzicht krijgen in de mogelijke gevoeligheid van partitionering van WAQUA modelschematisatie.

11. De productieboom is het automatische proces waarmee de productieberekeningen worden uitgevoerd.

Er zijn in eerste instantie 8 testberekeningen uitgevoerd, zie [Vuik, 2011ab]. Uit de resultaten van de testberekeningen bleek dat er nog onduidelijkheid was over de werking van het model en het keringscrist onder verschillende hydraulische omstandigheden. Er werd daarom besloten om het WAQUA-RMM onder verschillende hydraulische omstandigheden uitvoerig te testen.

Er zijn 108 zogenoemde MHW-processor (MHW-p) stochastcombinaties doorgerekend, met zowel SOBEK schematisatie zoals beschreven in subparagraaf 3.5.3.1 als WAQUA-RMM, zie Tabel 3.15. Deze combinaties worden vaak gebruikt voor gevoeligheidsanalyses en beleidsonderzoeken. Verschillende locaties verspreid over het hele Benedenrivierengebied (zie Figuur 3.19), en normfrequenties zijn hierbij beschouwd.

Tabel 3.15 Overzicht van de 108 MHW-p stochastcombinaties. De windsnelheid en de Maasafvoer (weergegeven in grijs) worden niet als onafhankelijke stochasten beschouwd maar worden gekoppeld aan de zeewaterstand en de Rijnafvoer respectievelijk.

Waterstand Maasmond [m+NAP]	Windsnelheid [m/s]	Debiet Rijn en Maas [m3/s]		Richting [grd]	Keringen
1.14	0	600	55	292.5	Open
2.00	11.1	2000	217		Dicht
3.00	21.6	4000	687		
4.00	21.6	6000	1156		
5.00	31.7	8000	1626		
6.00	43.3	10000	2095		
		13000	2800		
		16000	3504		
		18000	3974		



Figuur 3.19 Geselecteerde locaties voor testberekeningen WAQUA-RMM.

De resultaten van zowel SOBEK als WAQUA-RMM berekeningen van de 108 sommen zijn geanalyseerd. Daartoe is het volgende gedaan:

- De maximale waterstanden van de 14 geselecteerde locaties zijn bepaald en onderling vergeleken,
- Voor situaties waarbij SOBEK en WAQUA opvallend veel van elkaar verschillen, zijn de WAQUA tijdreeksen vergeleken met de tijdreeksen uit SOBEK,
- De open- en sluitmomenten inclusief duur van de sluiting van de Maeslant- en Hartelkering zijn in zowel SOBEK als WAQUA-RMM nader beschouwd,

Als gevolg van de uitgevoerde 108 testberekeningen zijn fouten uit het WAQUA-RMM model herkend en opgelost. Deze betreffen:

- Het functioneren van de Haringvlietsluizen,
- Het functioneren van de Kromme Nolkering,
- Instabiliteiten als gevolg van partitionering,
- Instabiliteiten bij de randvoorwaardenlocatie in de Lek.

Een van de doelen van de testberekeningen was het inbouwen van het keringscript in de productieboom en het testen van de productieboom. Als gevolg van de 108 testberekeningen zijn een aantal verbeteringen doorgevoerd in het keringscript en de productieboom, deze betreffen:

- Implementeren van de mogelijkheid om tegelijkertijd meerdere berekeningen op verschillende knopen te draaien,
- Optimalisatie van de snelheid waarmee uitvoer uit de SDS bestanden gehaald wordt,
- Aanpassing en optimalisatie van de start- en stoptijden van de (tussen)berekeningen,
- Oplossen en opvangen van enkele crashproblemen,
- Optimalisatie partitionering binnen WAQUA-RMM.

Nadere details met betrekking tot deze verbeteringen en optimalisaties zijn te vinden in [Vuik et al, 2011ab].

3.6 Resultaten en controle productieberekeningen WAQUA

3.6.1 Controle productieberekeningen

Zoals vermeld in de voorgaande paragrafen zijn er voor de Benedenrivieren eindresultaten van 6768 combinaties van stochasten nodig voor het vullen van de databases. Hiertoe zijn in totaal circa 12000 WAQUA berekeningen, inclusief tussenberekeningen, gemaakt. Voor elke van deze combinaties is per locatie de maximale opgetreden waterstand gedurende de looptijd van de som bepaald en bewaard. Hierbij zijn de instellingen en randvoorwaarden gebruikt zoals beschreven in paragraaf 3.3. De maximale waterstanden zijn, samen met de golfcondities (zie hoofdstuk 6), in verschillende databases opgenomen. Voordat deze databases zijn samengesteld is een uitgebreide controle uitgevoerd op de WAQUA (en SWAN) resultaten. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen automatische controles en handmatige (visuele) controles.

Automatische controles zijn met behulp van Matlabscripts¹² uitgevoerd voor alle productieberekeningen. Het resultaat van een controle is een goedkeuring of een afkeuring van een berekening. Afgekeurde berekeningen zijn aan een nader (handmatig uitgevoerd) onderzoek onderworpen, waarbij gecontroleerd werd of de afkeuring het gevolg was van bijvoorbeeld (ruimtelijk gezien) lokale instabiliteit, of het gevolg was van een structurele fout in

¹² MATLAB™ is een technische softwareomgeving en wordt gebruikt voor wiskundige toepassingen zoals het berekenen van functies, bewerken van matrices, statistiek, tekenen van grafieken en het schrijven en implementeren van algoritmen

de betreffende berekening. De volgende automatische controles zijn voor alle productieberekeningen uitgevoerd:

- Systemmeldingen van WAQUA over het correct voltooiën van een berekening
- Stabiliteit
- Maximale waterstand
- Droogval
- Start- en stoptijdstippen (tussen)berekeningen.

Automatische controles hebben als voordeel dat alle berekeningen binnen een relatief korte tijd kunnen worden gecontroleerd. Met name berekeningen waarvoor één van de automatische controles een afkeuring opleverde, zijn daarnaast ook handmatig gecontroleerd. Handmatige controle wil hierbij zeggen het visueel controleren van bijvoorbeeld stroombeelden, waterstandsvelden en droogval met behulp van figuren, gemaakt met Matlab, WAQVIEW of Quickplot. De volgende handmatige controles zijn voor diverse berekeningen uitgevoerd:

- Stroombeeld
- Waterstandsvelden
- Werking van de stormvloedkeringen

Een nadere beschrijving van de uitgevoerde controles is te vinden in [Vuik et al, 2011b]. In het volgende lichten we de controle op stabiliteit en de controle op de werking van de stormvloedkeringen nader toe.

Controle op stabiliteit

Instabiliteit treedt op in een berekening wanneer schommelingen in onder andere de waterstanden en stroomsnelheden optreden, waarvan de oorzaak ligt in het numerieke rekenschema van WAQUA. Veelal blijft de instabiliteit beperkt tot een relatief klein deel van het rekenrooster. Het doel van de controle op stabiliteit is tweeledig:

- Controleren of een berekening in zijn geheel instabiel is, en daardoor niet geschikt is als productieberekening. Dit is het geval wanneer de maximale waterstand bij een groot deel van de locaties beïnvloed wordt door niet-fysische schommelingen in de waterstand. Een aanpassing in de modelschematisatie is in dit geval een voor de hand liggende oplossing. Normaal gesproken blijft instabiliteit echter beperkt tot kleine delen van het model,
- Het in kaart brengen van delen van het model waarin in veel productieberekeningen instabiliteit optreedt. Afwijkingen in de maatgevende waterstanden waarop uiteindelijk de Hydraulische Randvoorwaarden gebaseerd moeten gaan worden, kunnen dan verklaard en indien nodig gecorrigeerd worden.

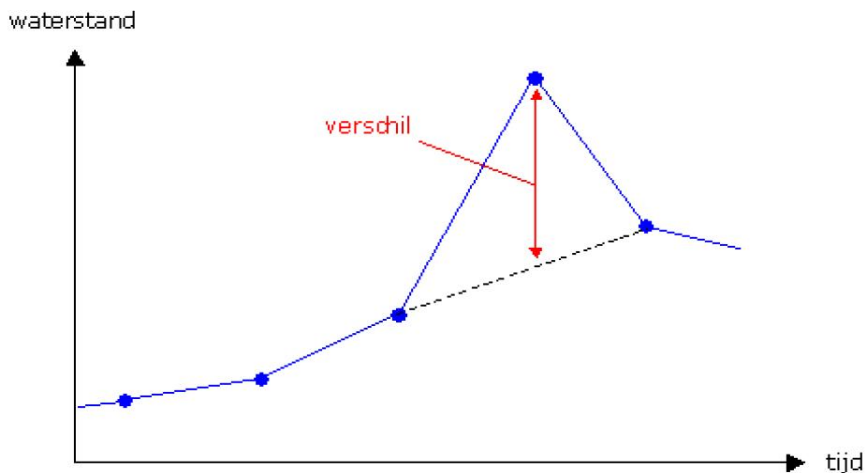
In de controle op instabiliteit wordt bepaald of er voor een uitvoerlocatie een continu verloop van de waterstand in de tijd optreedt. Bij te abrupte veranderingen wordt de berekening afgekeurd. De abrupte verandering wordt uitgedrukt in een maximale sprong in de waterstand per rekentijdstip van 5 minuten.

Een tijdreeks voor één uitvoerlocatie in een berekening wordt afgekeurd als aan de volgende drie voorwaarden wordt voldaan.

- Het maximale verschil van de waterstand op een bepaald tijdstip met de gemiddelde waterstand van het vorige en het volgende tijdstip is groter dan een gedefinieerd criterium. Voor de WAQUA berekeningen in het Benedenrivierengebied is een criterium

van 0,04 m gehanteerd. Dit criterium is tot stand gekomen uit ervaring uit de productieberekeningen voor de Vechtdelta [Vuik et al, 2011b] en de voorafgaande de productie uitgevoerde 108 MHW-p sommen,

- De instabiliteit beïnvloedt het maximum van de gehele tijdreeks voor de betreffende uitvoerlocatie. Het maximum van een tijdreeks wordt binnen Hydra-zoet verder probabilistisch verwerkt en deze moet dus correct zijn. M.a.w. lokale instabiliteit die het maximum van de hele tijdreeks niet beïnvloedt, wordt niet afgekeurd,
- Het maximum van de reeks moet tenminste 0,2 m hoger liggen dan de beginwaarde van de reeks.



Figuur 3.20 Voorbeeld verschil in waterstand voor een bepaald tijdstip met de gemiddelde waterstand van de twee omliggende tijdstappen.

Het laatste criterium geldt voornamelijk voor reeksen met afwaaiing. Bij die reeksen kwam het regelmatig voor dat vanwege een kleine instabiliteit in het begin van de berekening een hele tijdreeks wordt afgekeurd.

Per berekening wordt het aantal afgekeurde uitvoerlocaties bijgehouden. Per uitvoerlocatie wordt het aantal afgekeurde productieberekeningen in kaart gebracht. Op deze manier kunnen mogelijk problematische berekeningen of problematische uitvoerlocaties in kaart worden gebracht.

Controle op werking van de keringen

De werking van de Haringvlietsluizen, de stormvloedkering Hollandsche IJssel en de Kromme Nolkering in het Heusdensch kanaal is gecontroleerd als onderdeel van de 180 MHW-p berekeningen van subparagraaf 3.5.3. Merk op dat vergelijken met SOBEK resultaten onderdeel uitmaakte van de testberekeningen en derhalve ook van de controles. In het kader van de controle van de berekeningsresultaten uit de productie zijn geen extra controles uitgevoerd.

Met betrekking tot de werking van de Maeslant- en Hartelkering zijn naast de in het kader van de uitgevoerde testberekeningen, zie subparagraaf 3.5.3, ook controles uitgevoerd als onderdeel van de productieberekeningen. Er zijn twee controles uitgevoerd. Allereerst is de sluitingsduur van alle berekeningen met dichte keringen geanalyseerd.

De sluitingsduur, zoals aangehouden voor de controle, is gedefinieerd als de duur van de periode tussen:

- Het eerste tijdstip, waarop de kering helemaal dicht is, of het eerste tijdstip waarop de kering de laagste stand bereikt, en

- Het laatste tijdstip waarop de kering nog net niet open is.

In een aantal gevallen gaat de kering alweer open, voordat de kering geheel gesloten is. Voor die situaties moet gerekend worden met het eerste tijdstip waarop de kering de laagste stand bereikt. Voor de Maeslant kering wordt de periode waarin de kering drijft dus inbegrepen in de sluitingsduur.

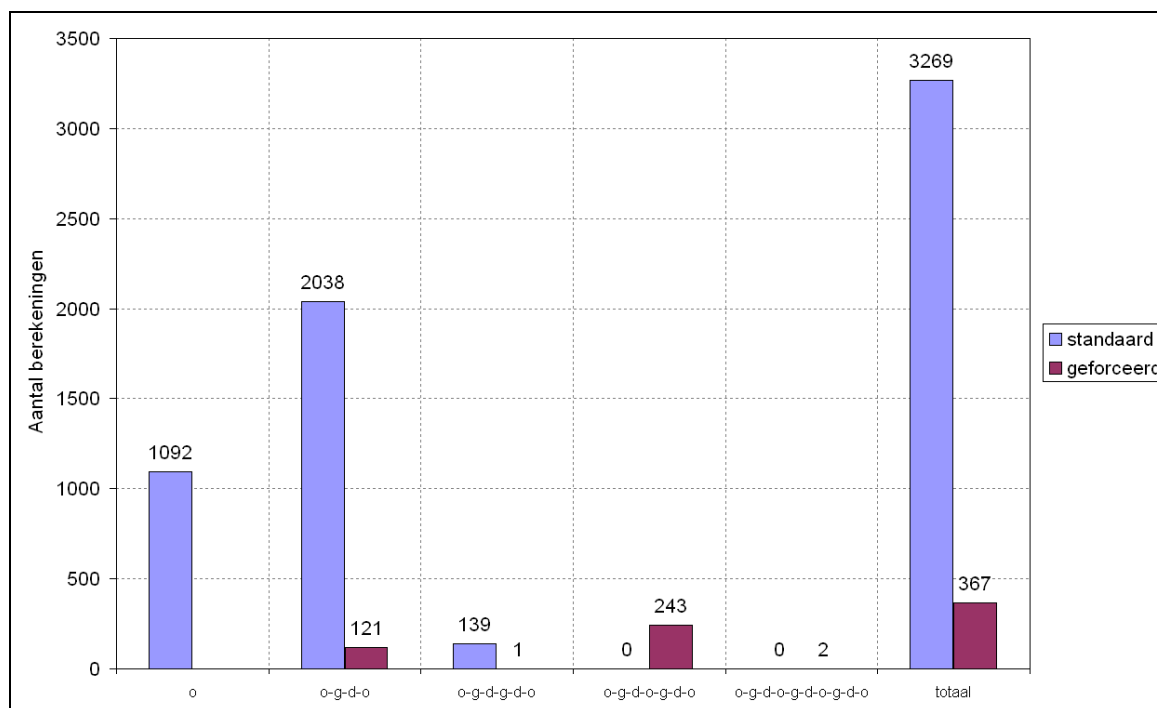
Bij de analyse is de onderlinge verhouding van de sluitingsduur van de Maeslantkering en de Hartelkering onderzocht. Daarnaast is de sluitingsduur uitgezet tegen de waarden van de verschillende stochasten, om te controleren of de sluitingsduur een trendmatig verloop vertoont naarmate bepaalde stochastwaarden in grootte variëren.

Berekeningen met een opvallende sluitingsduur van één of beide keringen zijn aan een nadere controle onderworpen door middel van visuele controle. Hiervoor zijn figuren gebruikt van de werking van de keringen aan de hand van plots van gate height en sill level, waterstanden, debieten en verhang. Met zulke figuren is het gedrag van de keringen vergeleken met de sturingsparameters (waterstand, debiet en waterstandverhang) en gecontroleerd op consistentie. Aan de hand van de waterstanden is gecontroleerd of het sluitcriterium bij Rotterdam en/of Dordrecht wordt overschreden, en op welk moment de keringen dicht zouden moeten gaan in het geval van een peilsluiting. Op basis van het moment van kentering van het debiet is het sluitingsmoment in het geval van een kenteringsluiting gecontroleerd. Het verhang bepaalt tenslotte weer het moment waarop de kering overgaat van gesloten naar drijvende toestand (Maeslantkering) of open toestand (Hartelkering).

3.6.2 Resultaat controle productieberekeningen WAQUA-RMM

Deze paragraaf beschrijft kort de resultaten van de controles. Voor een uitgebreide beschrijving wordt verwezen naar [Vuik et al, 2011b].

Er zijn verschillende typen berekeningen, afhankelijk van het gedrag van de Maeslant- en Hartelkering. Er is onderscheid gemaakt tussen de standaard sluitprocedure en een geforceerde sluiting. Zoals beschreven in 3.3.6 zijn in het tweede geval de peilen behorend bij de sluitcriteria bij Rotterdam en Dordrecht verlaagd, waarna de berekening opnieuw is uitgevoerd. Stochastcombinaties die ook dan nog niet leidden tot sluiting kennen alleen een berekening met open kering. Dit was het geval in 1092 van de 3636 berekeningen. In totaal zijn er dus 2544 berekeningen uitgevoerd waarin de Maeslant- en Hartelkering sloten. De 1092 berekeningen zonder sluiting worden gevormd door de stochastcombinaties voor de oostelijke richtingen, 504 berekeningen, en stochastcombinaties waarbij geen geforceerde sluiting plaatsvond met verlaagde sluitcriteria. Figuur 3.21 geeft een overzicht van de verdeling van de berekeningen over de toestanden van de keringen.



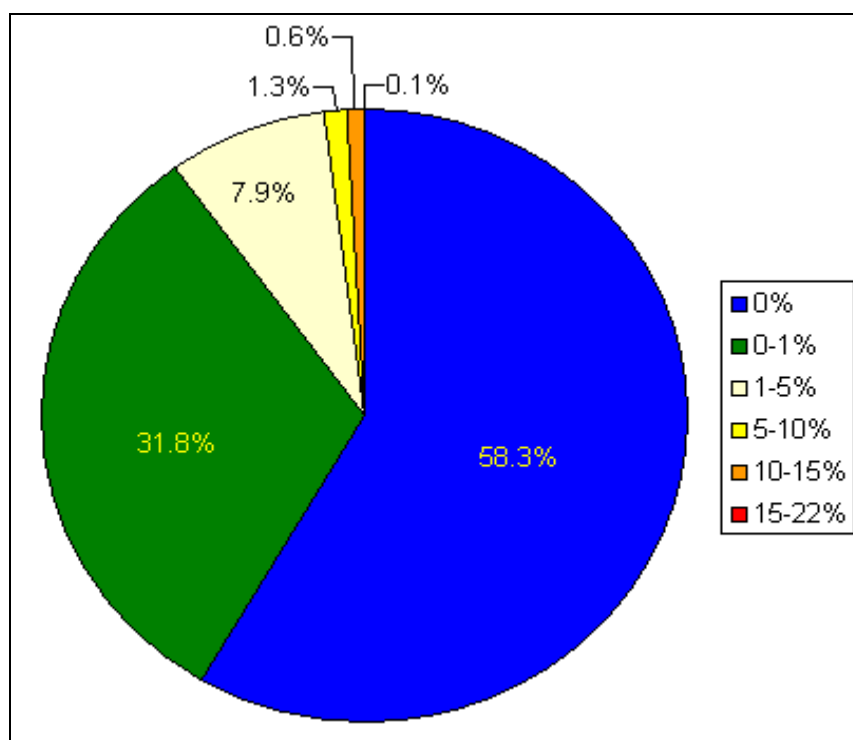
Figuur 3.21 Verdeling van de berekeningen over verschillende toestanden van de keringen.

De eerste groep in Figuur 3.21 betreft de berekeningen met slechts één toestand van de keringen: de open toestand. De tweede groep betreft de berekeningen met één sluiting van de keringen. De opeenvolging van de toestanden is dan open, gesloten, drijvend en open (o-g-d-o). merk op dat drijven alleen van toepassing is van de Maeslantkering. Het derde en vierde blok bevat berekeningen met twee sluitingen. Bij de twee berekeningen in het vijfde blok gaat het om berekeningen met drie (geforceerde) sluitingen van de keringen.

De resultaten van de controles op instabiliteit respectievelijk droogval zijn weergegeven in Figuur 3.22 respectievelijk Figuur 3.23.

Figuur 3.22 laat zien dat de tijdreeksen van berekende waterstanden in bijna 60% van de uitvoerlocaties geen instabiliteit optreedt in geen enkele berekening, en in ruim 30% (31.8%) treedt instabiliteit in minder dan 1% van de berekeningen. In slechts 0.1% van de gevallen is de tijdreeks van de waterstand van een uitvoerlocatie in meer dan 15 % (15%-22%) van de berekeningen afgekeurd vanwege instabiliteit. Verder valt op dat al de locaties in deze categorie (meer dan 15% afkeuringen) in het Rotterdamse havengebied liggen. In het cirkeldiagram is duidelijk zichtbaar dat de mate van instabiliteit over het geheel genomen beperkt is. De controle laat verder zien dat er geen locaties zijn waar de maximale waterstand structureel beïnvloed wordt door instabiliteit. Het algemene beeld komt verder overeen met het beeld van het WAQUA-IJVD model voor het IJsselmeer en Vecht- en IJsseldelta [Chbab, 2011].

Met betrekking tot droogval kan op basis van Figuur 3.23 geconcludeerd worden dat in ruim 40% van de uitvoerlocaties in geen enkele berekening droogval optreedt. 2.2% van de uitvoerlocaties is permanent droog.



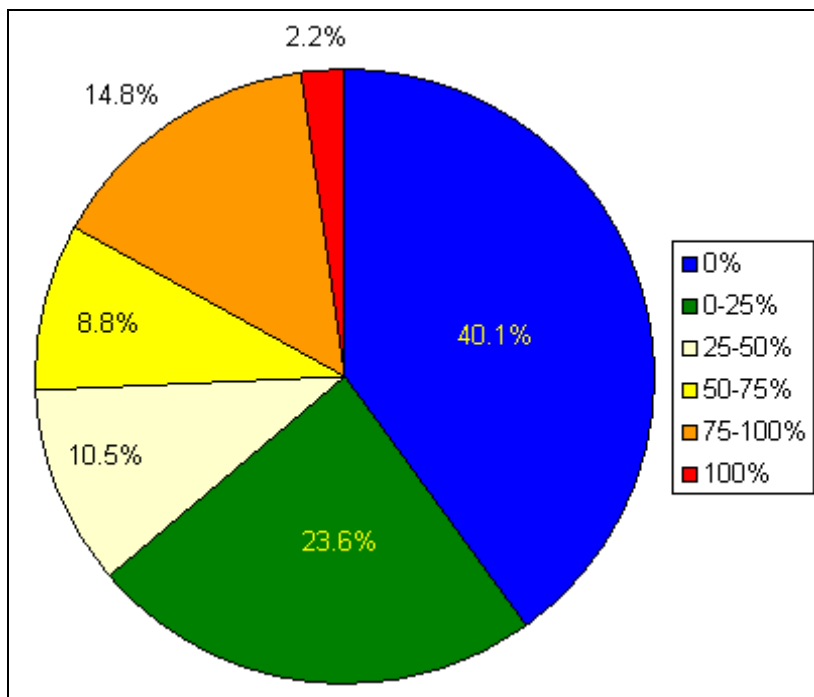
Figuur 3.22 Verdeling van de uitvoerlocaties op basis van het aantal berekeningen met afkeuring op instabiliteit

Uit de controles blijkt dat zowel de hoeveelheid instabiliteit als de hoeveelheid droogval in de berekeningen een logisch trendmatig verloop vertoont met de waarden van de stochasten. Zo blijkt dat droogval afneemt met toenemende zeewaterstand en/of toenemende rivierafvoeren. Ook treedt er veel instabiliteit op bij toenemende zeewaterstanden in combinatie met falende (open) keringen. Onder die omstandigheden lopen veel relatief hooggelegen gronden als havenkades en buitendijkse gebieden onder water. In combinatie met de vele overlaten in die gebieden leidt dit tot veel instabiliteit. Het sluiten van de keringen leidt tot een aanzienlijke reductie van deze instabiliteit.

De controle op start- en eindtijdstip heeft aan het licht gebracht dat het tijdsinterval van enkele tussenberekeningen te kort was gekozen. In vrijwel alle gevallen betreft het berekeningen met de hoogste windsnelheid (43.3 m/s), een rivierafvoer van 6000 m³/s bij Lobith en de hoogste zeewaterstand. De lengte van het rekeninterval van de betreffende tussenberekeningen is groter gemaakt en de berekeningen zijn opnieuw (met succes) uitgevoerd.

Het gedrag van de Maeslant- en Hartelkering is gecontroleerd. Uit deze controles blijkt dat de keringen naar behoren hebben gefunctioneerd. In slechts 12 berekeningen is echter een afwijkend gedrag geconstateerd. In 7 berekeningen is geconstateerd dat de sluitingsduur van de Hartelkering erg lang was. In alle gevallen betreft het berekeningen met de hoogste windsnelheid van 43.3 m/s. De andere 5 berekeningen zijn afgekeurd op de toestandsverandering van de keringen. In dit geval betreft het berekeningen met de hoogste windsnelheid, in combinatie met de hoogste 2 afvoeren: 16.000 en 18.000 m³/s. Uit verkennende analyse blijkt dat deze foutieve toestandverandering mogelijk veroorzaakt wordt door golfbeweging op het Hartelkanaal. Details zijn te vinden in [Vuik et al, 2011ab].

Gezien de combinatie van extreme windsnelheid en extreme rivierafvoeren hebben de berekeningen met een afwijkend gedrag van de keringen geringe invloed op de toetspeilen. De resultaten van de 12 berekeningen zijn dan ook opgenomen in de databases.



Figuur 3.23 Verdeling van de uitvoerlocaties op basis van het aantal berekeningen met afkeuring op droogval.

Al met al kan gecontroleerd worden dat de productieberekeningen met WAQUA-RMM met succes zijn afgerond. Zowel de invoer als de resultaten zijn grondig gecontroleerd. Uit de controles blijkt dat de berekeningen over het geheel genomen resultaten bevatten met voldoende consistentie en nauwkeurigheid. De combinatie van de resultaten van enerzijds geautomatiseerde controles en anderzijds handmatige en visuele controles heeft geleid tot ruim vertrouwen in de kwaliteit van de productieberekeningen.

3.6.3 Vergelijking resultaat WAQUA-RMM met SOEBK

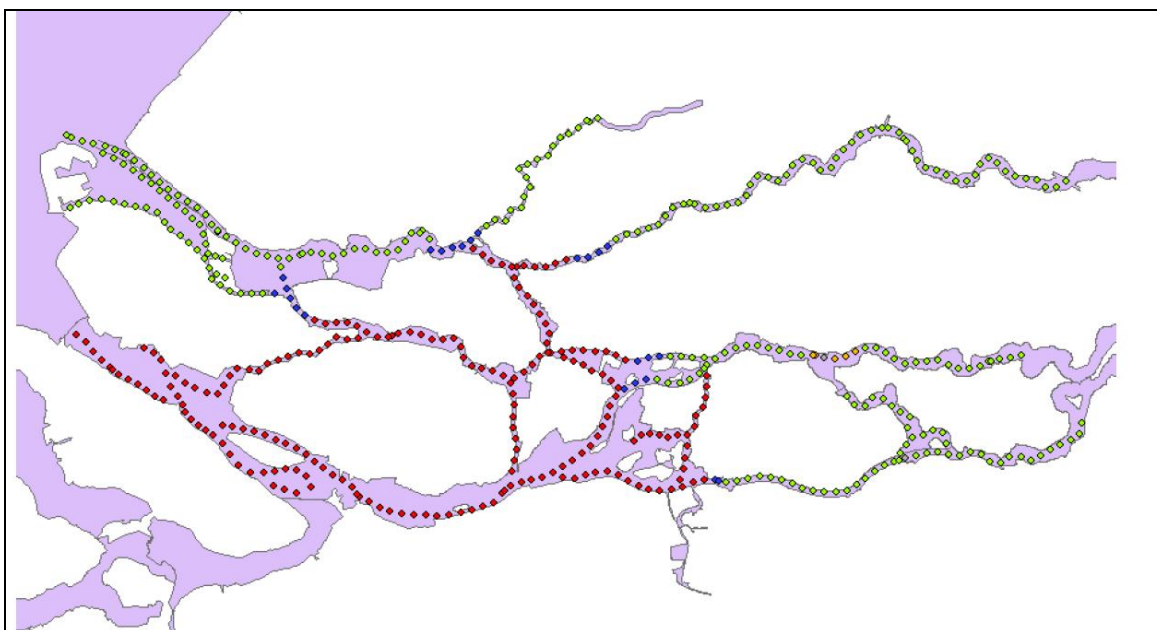
Als onderdeel van de kwaliteitsborging en extra controle van de berekeningen met WAQUA-RMM is een volledige set berekeningen (6768 stochastcombinaties) gemaakt met SOBEK schematisatie en PRIS (Probabilistisch Reken Interface Sobek [de Goederen, 1999]). Er zijn alleen berekeningen gemaakt van de maximale waterstanden in de as van de rivier. De stap waarbij de berekende waterstanden in de as van de rivier vertaald worden naar de teen van de dijk is in dit kader buiten beschouwing gelaten.

De berekeningen met SOBEK zijn uitgevoerd met exact dezelfde randvoorwaarden als WAQUA-RMM zoals beschreven in paragraaf 3.3.1. Na een uitvoerige controle van alle instellingen in PRIS, zijn alle 6768 stochastcombinaties voor de Benedenrivieren doorgerekend en gecontroleerd [Kallen en Udo, 2011]. De resultaten van deze berekeningen zijn in verschillende databases geplaatst. Op deze wijze zijn voor Hydra-Zoet geschikte as databases op basis van SOBEK verkregen. Met de verkregen as databases zijn berekeningen gemaakt met Hydra-Zoet. Hierbij zijn de geldende veiligheidsnormen in het Benedenrivierengebied beschouwd. Vervolgens is een vergelijking gemaakt met de toetspeilen uit de HR2006.

Het resultaat van deze vergelijking is weergegeven in Figuur 3.24. Daarbij geldt voor de kleuren van de as locaties het volgende:

- Rood: verschil > 0,1 m
- Blauw: verschil tussen 0,05 m en 0,1 m
- Groen: verschil tussen -0,05 m en 0,05 m.

Uit de vergelijking valt op dat de verhoging van de berekende maatgevende waterstanden ten opzichte van de vigerende toetspeilen uit HR2006 voornamelijk optreedt in de bredere wateren, waar de verlengde stormopzedeuur effect heeft. In de rest van het Benedenrivierengebied treedt verlaging op of is de verhoging marginaal. Dit beeld komt goed overeen met de op basis van WAQUA-RMM berekende concept toetspeilen, zie en vergelijk met hoofdstuk 7. Naast de controle van de productie- en testberekeningen geeft dit resultaat extra vertrouwen in de berekeningen van WAQUA-RMM.



Figuur 3.24 Grafische weergave van de verschillen tussen berekende waterstanden met SOBEK en vigerende toetspeilen uit HR2006.

4 Schematisatie en productie golven

4.1 Inleiding

Naast waterstanden zijn ook golven van belang bij het bepalen van een veilige dijkhoogte en -sterkte voor de toetsing. De waterstanden behorende bij de normfrequenties worden aangeduid met het toetspeil. Voor de golven gebruikt men voor dijkhoogte het hydraulische belastingniveau. Dat is de benodigde kruinhoogte gebaseerd op het faalmechanisme golfoploop/golfoverslag. Om de belastingniveaus te bepalen zijn golfcondities nodig, evenals dijkgegevens en het kritische overslagdebiet.

Toetspeilen en hydraulische belastingniveaus in het Benedenrivierengebied worden bepaald met Hydra-zoet. Eén onderdeel van de invoer voor Hydra-Zoet is een database; deze bevat per locatie en per stochastcombinatie de bijbehorende maximale waterstand en golfcondities. De stochastcombinaties zijn beschreven in hoofdstuk 3, Tabel 3.4. Het betreft in totaal 6768 combinaties. De berekening van de maximale waterstanden is behandeld in hoofdstuk 3. In dit hoofdstuk komen de golfcondities en de daarvoor gebruikte modellen aan de orde.

Er is in het kader WTI-2011 een studie uitgevoerd naar de golfmodellering in het rivierengebied in het algemeen en de Benedenrivieren in het bijzonder [de Waal, 2008]. Met betrekking tot het Benedenrivierengebied stelt de studie dat het belang van een goede golfmodellering het grootst is in gebieden met relatief grote waarden voor de windsnelheid, strijklengtes en waterdieptes. In de Benedenrivieren betreft het de bredere wateren van het Haringvliet, Hollandsch Diep, de Biesbosch en de Europoort. Overeenkomstig deze studie is binnen WTI-2011 de keuze gemaakt om voor de bredere wateren in het Benedenrivierengebied het geavanceerde SWAN model in te zetten voor de bepaling van de golfcondities [van der Klis et al, 2010]. Een bijkomend voordeel voor de overstap op SWAN is dat in deze gebieden de rol van stroming waarschijnlijk relatief klein is. Er kan dan zonder invloed van stroming gerekend worden met SWAN. Voor meer details wordt verwezen naar [de Waal, 2008]. In de rest van de Benedenrivieren, de smalle wateren, is de huidige methode van Bretschneider aangehouden. Daar is volgens de uitgevoerde studie de winst van een geavanceerde golfmodellering gering.

Het Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch vormen een aaneengesloten gebied. Deze drie deelgebieden worden als een deelsysteem beschouwd, waar een SWAN model voor opgezet is. De Europoort is mede vanwege de golfdoordringing van de zee eigensoortig en is daarom afzonderlijk beschouwd. Voor dit gebied is een apart SWAN model ontwikkeld.

Het Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch enerzijds en de smalle wateren in het Benedenrivierengebied anderzijds komen aan de orde in de volgende paragrafen. Het Europoort gebied wordt behandeld in hoofdstuk 5 van dit rapport.

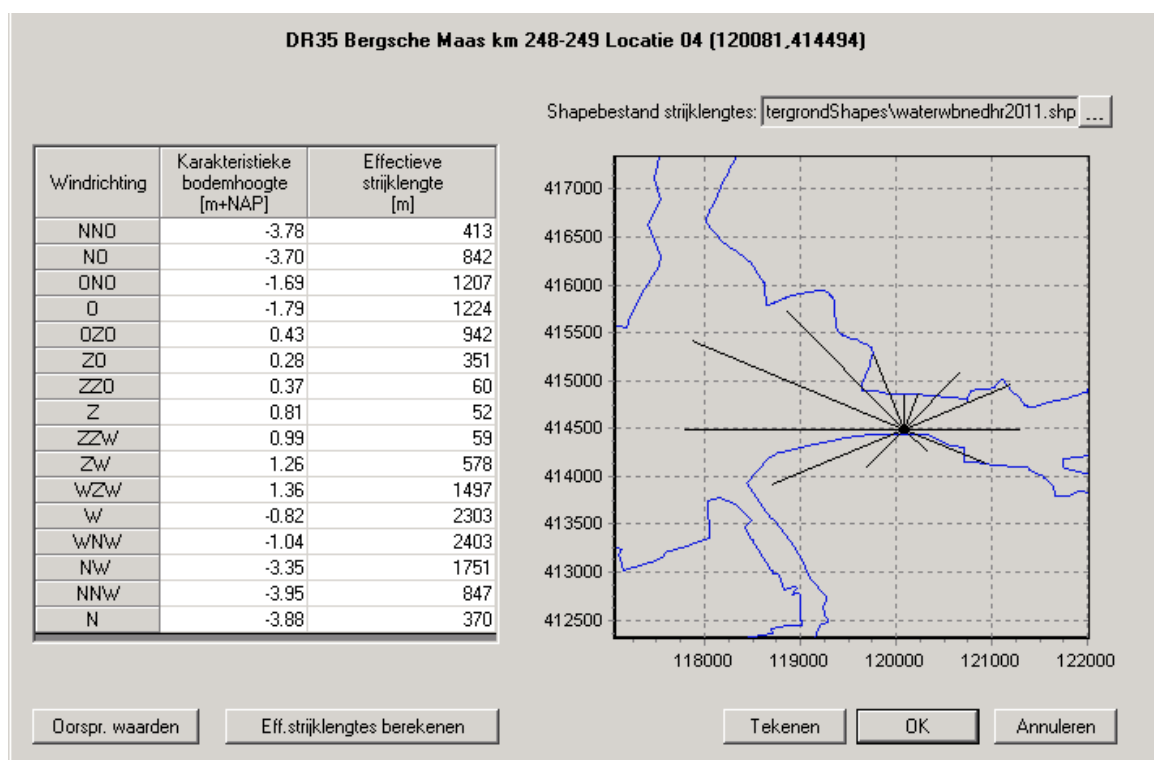
4.2 Bretschneider formulering in de smalle wateren van het Benedenrivierengebied

De smalle wateren in het Benedenrivierengebied zijn gedefinieerd als het hele Benedenrivierengebied exclusief het gebied van het Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch en het gebied van de Europoort. Voor de smalle wateren is voor het berekenen van de golfcondities de huidige methode van Bretschneider gebruikt [TAW, 1995]. Bretschneider rekent de significante golfhoogte H_s en de significante golfperiode T_s als functie van de windsnelheid, de effectieve strijklengte en de gemiddelde waterdiepte. De golfrichting wordt gelijk genomen aan de windrichting.

Golfgroeikrommes als die van Bretschneider zijn ontwikkeld voor een constante waterdiepte. Breking van golven en bodemprocessen als refractie, shoaling en diffractie worden dan ook verwaarloosd. Deze methode geeft dus slechts een schatting van de significante golfperiode

en significante golfhoogte. Opgemerkt wordt dat in Hydra-Zoet gebruik gemaakt wordt van een enkel vak voor de waterdiepte. Het gebruik van meerdere vakken met verschillende waterdieptes zou namelijk een nauwkeurigheid suggereren die er niet is, omdat zoals gezegd breking van golven en bodemprocessen buiten beschouwing worden gelaten [Slomp et al, 2001]. De invloed van een eventueel voorland of een dam voor de dijk kan afzonderlijk in rekening worden gebracht aan de hand van een voorland of dammodule, zie [de Waal, 2007].

Zoals hierboven vermeld zijn voor het berekenen van de significante golfhoogtes en piekperiodes onder andere de effectieve strijklengtes en gemiddelde waterdieptes nodig. Uitgangspunt voor de berekening van de effectieve strijklengtes vormt de Leidraad voor rivierdijken – deel 1 [TAW, 1985]. In het kader van WTI-2011 zijn de effectieve strijklengtes opnieuw bepaald [van den Bosch, 2010] omdat enerzijds een nieuwe modelschematisatie met geactualiseerde bodemligging is gebruikt en anderzijds nieuwe uitvoerlocaties zijn gedefinieerd. Merk op dat de effectieve strijklengtes gekoppeld zijn aan de uitvoerlocaties. Omdat de bodemligging geactualiseerd is ten opzichte SOBEK zijn ook de gemiddelde waterdieptes opnieuw afgeleid, waarbij gebruik is gemaakt van de bodemligging van het WAQUA-RMM model voor het Benedenrivierengebied. Zie voor meer details [van den Bosch, 2010]. De berekende strijklengtes en gemiddelde waterdieptes zijn opgenomen in de databases van Hydra-Zoet.



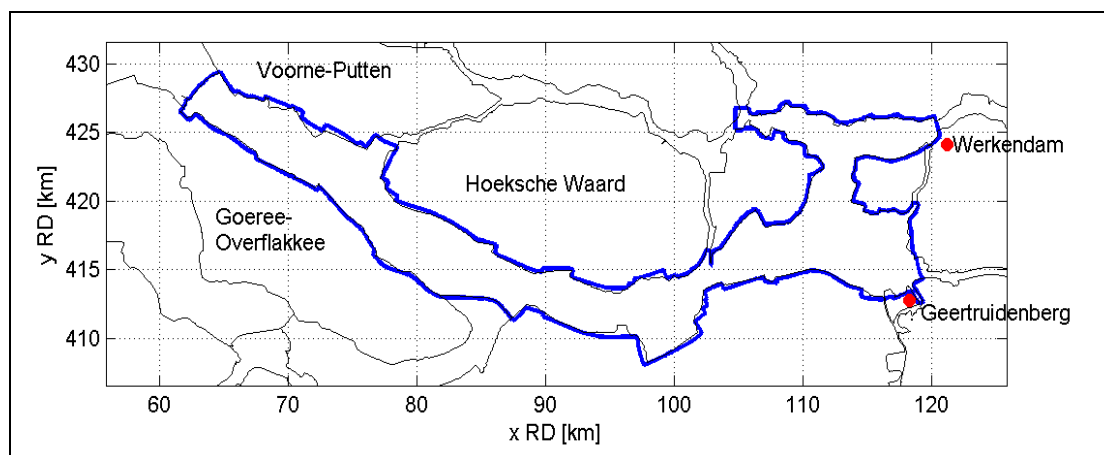
Figuur 4.1 Voorbeeld strijklengtes en gemiddelde bodemdieptes voor locatie DR35 Bergsche Maas.

4.3 SWAN model Haringvliet, Hollandsch Diep en Biesbosch

4.3.1 Gebiedsbeschrijving

Zoals hierboven vermeld is voor het gebied van het bredere water bestaande uit het Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch een SWAN model opgezet. Het Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch vormen één aaneengesloten gebied. In Figuur 4.2 zijn deze drie wateren schematisch weergegeven. In het westen wordt het Haringvliet begrensd

door de Haringvlietdam. Het Hollandsch Diep staat ter hoogte van de Haringvlietbrug met ongeveer één derde van de breedte in verbinding met het Haringvliet. Ten oosten van de Moerdijkbruggen komen de rivier de Nieuwe Merwede en de rivier de Amer samen in het Hollandsch Diep. De Biesbosch, inclusief Sliedrechtse Biesbosch, ligt ingesloten tussen enerzijds deze laatste twee riviertakken en anderzijds tussen de Merwedes (Beneden en Nieuwe) en het Wantij.



Figuur 4.2 Omhullende SWAN model Haringvliet, Hollandsch Diep en Biesbosch

Daar waar op het Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch Bretschneider geïsoleerd werkt, worden de locaties in SWAN beïnvloed door de omgeving. In SWAN kunnen golven die elders worden opgewekt worden bijgebogen, waar dit bij Bretschneider niet aan de orde is. Anderzijds neemt SWAN de ondiep water fysica mee in de berekening terwijl Bretschneider hier geen rekening mee houdt. Golven kunnen dus zowel hoger (strijk lengte) als lager (golfbreking) zijn met de nieuwe methode. SWAN is een spectraal model: het berekent het golfspectrum en leidt daar de golfparameters uit af. Het voorheen (en in sommige gebieden nog steeds) voor de HR bepaling gebruikte golfmodel Bretschneider berekent de golfparameters rechtstreeks (m.b.v. parametrisaties), dus zonder de spectrale vorm te berekenen, zie voor meer details [de Waal, 2008].

Het gebied van het Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch zoals hierboven beschreven is afgesloten van de zee maar staat wel in openverbinding met andere (smalle) riviertakken van het Benedenrivierengebied. Het betreft de riviertakken de Noord, de Oude Maas, de Dordtsche Kil, de Boven Merwede en de Bergsche Maas. Vanuit deze riviertakken kunnen golven doordringen.

4.3.2 Versie en instellingen

In het gebied van het Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch worden de golfcondities voornamelijk bepaald door lokale golfgroei. In dit gebied zijn echter geen golfmetingen beschikbaar. Een specifieke kalibratie en validatie van SWAN voor dit systeem is niet mogelijk.

De broncode voor het SWAN model voor het Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch is afkomstig uit een calibratie- en validatiestudie van SWAN voor de Waddenzee, de Westerschelde en het IJsselmeer [Guatier, 2010] en [Klein, 2010a]. In deze studie zijn de instellingen van het model bepaald en getoetst aan een breed scala aan metingen. De validatie betreft 135 metingen waaronder ook 4 IJsselmeer cases. Deze instellingen zijn overgenomen voor het Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch. Dit betekent dat de gebruikte instellingen consistent zijn met die voor de Waddenzee en het IJsselmeer. Wel is er

rekening gehouden met het feit dat het gebied van het Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch niet in openverbinding staat met de zee.

Het voor het Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch opgezette SWAN model is gebaseerd op versie 40.72ABCDE van SWAN (SWANWTI2011_ABCDE).

Naast de SWAN broncode zijn fysische en numerieke instellingen voor SWAN modelinstrumentarium nodig. Ook deze instellingen volgen uit het SWAN model voor de Waddenzee, de Westerschelde en het IJsselmeer. Alleen de wrijvingscoëfficiënt is aangepast (0,067 i.p.v. 0,038) aangezien het gebied niet in open verbinding staat met de Noordzee en deininggolven dus niet zullen doordringen in dit gebied. De volgende fysische instellingen zijn gehanteerd:

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 = 3,0e+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 = 0,10 cutfr = 2,5

Dit betekent dat de fysica voor golfopwekking en dissipatie door whitecapping zijn geactiveerd op basis van de derde generatie instellingen volgens Westhuysen. Diepte- geïnduceerd breken is ook gemodelleerd volgens Westhuysen. Bodemwrijving is gemodelleerd volgens JONSWAP parameterisatie met een wrijvingscoëfficiënt van 0,067, die wordt aangeraden voor windzee condities [TU delft 2010]. De quadruplet golfinteracties zijn in de berekeningen meegenomen, maar deze worden in het SWAN model automatisch gedeactiveerd als het Ursell nummer groter is dan 10. Daarnaast zijn de Lumped Triad instellingen van Beji toegepast voor de berekeningen van drie-golf interacties. Hierbij is de evenredigheidscoëfficiënt (α_{EB}) gelijk aan 0,1 in plaats van de defaultwaarde van 0,05. Voor meer uitleg van de modelinstellingen en de modelfysica wordt verwezen naar referentie [TU Delft 2010].

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 maximale aantal iteraties dat een SWAN berekening doorloopt is vastgesteld op 80.

Samengevat zijn de volgende processen meegenomen in de SWAN modellering voor het Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch:

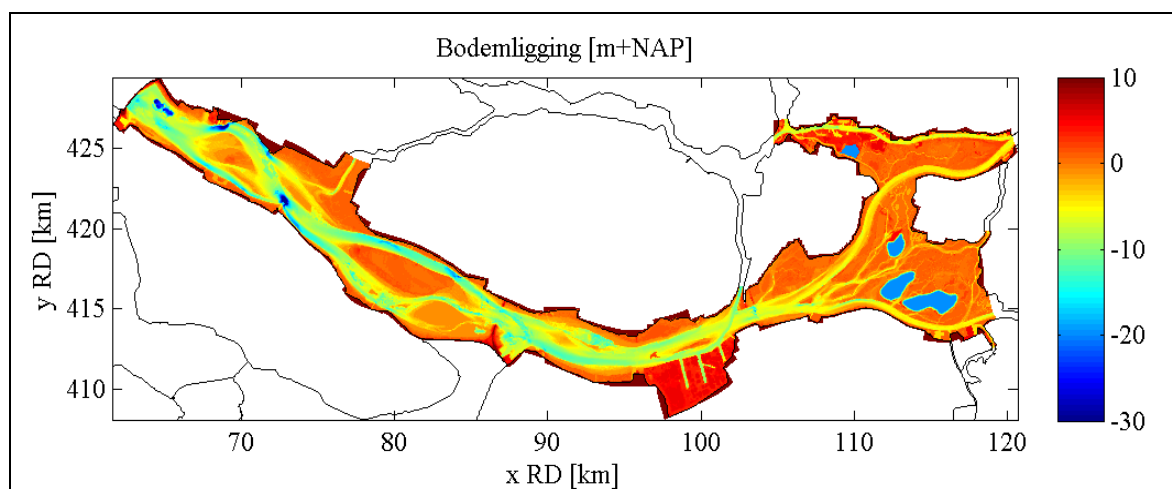
- Golfgroei door wind
- Breking ten gevolge van een te grote golfsteilheid (Whitecapping)
- Breking ten gevolge van een beperkte diepte
- Bodemwrijving
- Triad golfinteracties en
- Quadruplet golinteracties.

Processen die niet zijn meegenomen zijn:

- Diffractie
- Reflectie en
- Golfopzet in de brekerzone.

4.3.3 Bodemligging SWAN schematisatie Haringvliet, Hollandsch Diep en Biesbosch

De bodemligging van het SWAN molde voor het Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch is gerapporteerd in [Boomgaard, 2010] en is afkomstig uit de baseline 2009 die ten grondslag ligt aan het WAQUA-RMM modelschematisatie. Algemeen is bij het samenstellen van de bodem voorrang verleend aan de Baseline-gegevens. Daar waar nodig zijn deze data gecorrigeerd of aangevuld met behulp van de beschikbare waterkaarten. In overige gebieden waar geen of onvoldoende Baseline-data voorradig waren is met behulp van omringende datapunten, waterkaarten en Google Earth een beredeneerde schatting gemaakt. Eventueel geschatte bodemliggingen t.o.v. NAP zijn daarbij altijd naar beneden afgerond (met lagere bodemligging als gevolg) en nooit naar boven. Dit is enigszins conservatief ten behoeve van de SWAN berekeningen van de golfcondities. Een schematische weergave van de definitieve bodemligging is weergegeven in Figuur 4.3.



Figuur 4.3 Schematische weergave bodemligging Haringvliet, Hollandsch Diep en Biesbosch.

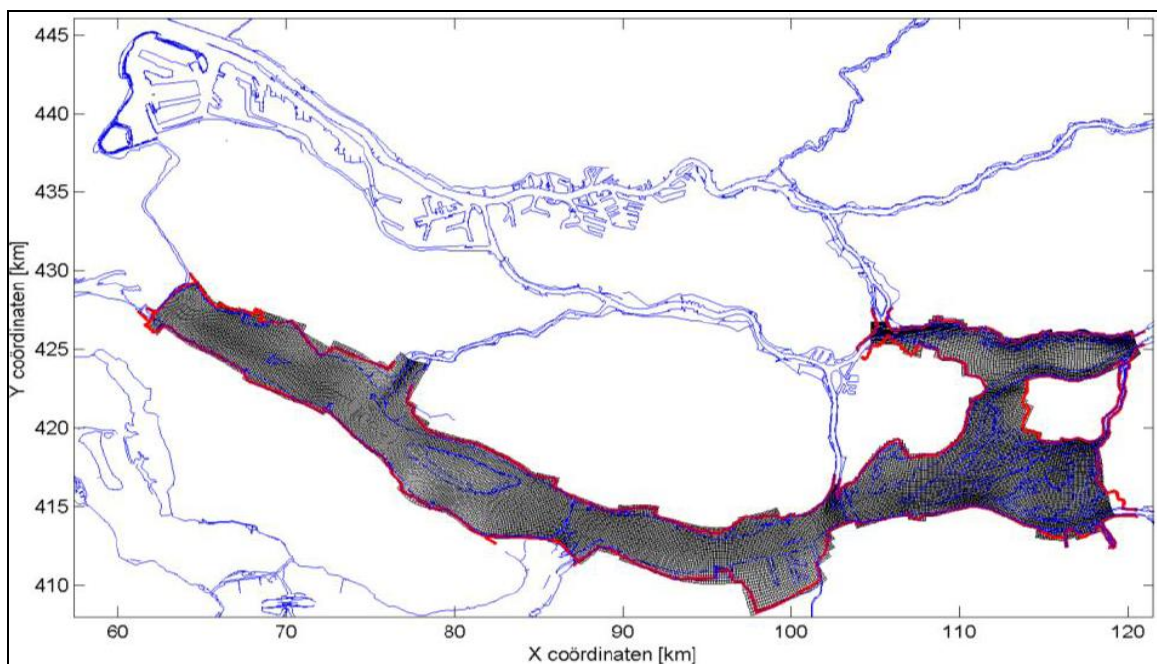
Zoals Figuur 4.3 laat zien zijn de spaarbekkens in de Biesbosch, ondanks gebrek aan gegevens, meegenomen in de SWAN modelschematisatie; de diepte is met behulp van waterkaarten geschat op -20 m t.o.v. NAP en de dijken rondom deze spaarbekkens zijn verwijderd. Hierbij is ervan uitgegaan dat de dijken rondom de spaarbekkens niet standszeker zullen zijn tegen windgolven onder extreme weersomstandigheden. Dit is opnieuw conservatief. Overigens wordt opgemerkt dat de bodemligging van het spaarbekken Grote Rug volkomen onjuist was in Baseline-2009: maar liefst op 5,0 m+NAP.

Alle buitendijkse bebouwing in het modelgebied (onder meer in de omgeving van Dordrecht/Sliedrecht en rondom de industriehaven Moerdijk) is afgekapt op een bodemligging van maximaal 5,0 m t.o.v. NAP, uitgaande van de veronderstelling dat deze buitendijkse bebouwing niet bestand zal zijn tegen de toets- en ontwerpcondities (maar uiteraard niet geheel verdwijnt). Tot slotte, zijn alle steigers, dammen en obstakels uit de bodem die niet bestand zijn tegen de toets- en ontwerpcondities verwijderd uit de bodem en hebben daarom geen golfhoogtereducerende functie in SWAN. Meer details met betrekking tot de bodem zijn te vinden in [Klein et al, 2010b].

4.3.4 Rekenrooster

Alkyon heeft in 2005 al een verkennende studie uitgevoerd over de meerwaarde van SWAN voor het Benedenrivierengebied [Alkyon, 2005]. Hierin is een kromlijinig SWAN model opgezet. Bij het construeren van het SWAN model voor het Haringlviët, Hollandsch Diep en de Biesbosch is gekozen om het rekenrooster uit de studie van Alkyon te gebruiken als basis, en waar nodig aan te vullen. De rand van het uiteindelijke rekenrooster moet minimaal tot op de primaire keringen rondom het interesse gebied lopen. Het resulterende rekenrooster, basisrekenrooster, is schematisch weergegeven in onderstaande Figuur 4.4. Het basisrekenrooster heeft een variabele roosterafstand met een gemiddelde celgrootte in de m- en n-richting van respectievelijk 120 m en 100 m. Het aantal actieve cellen bedraagt 28645.

Om een goede keuze te maken over de optimale resolutie van het definitieve rekenrooster zijn SWAN gevoeligheidsberekeningen uitgevoerd met fijnere resoluties dan het basisrekenrooster. Het basisrekenrooster is telkens verfijnd met een factor 2, 4, 5, 6, 7 en 8. Uit de resultaten van de gevoeligheidsanalyse blijkt dat een verfijning van het basisrekenrooster niet noodzakelijk is.



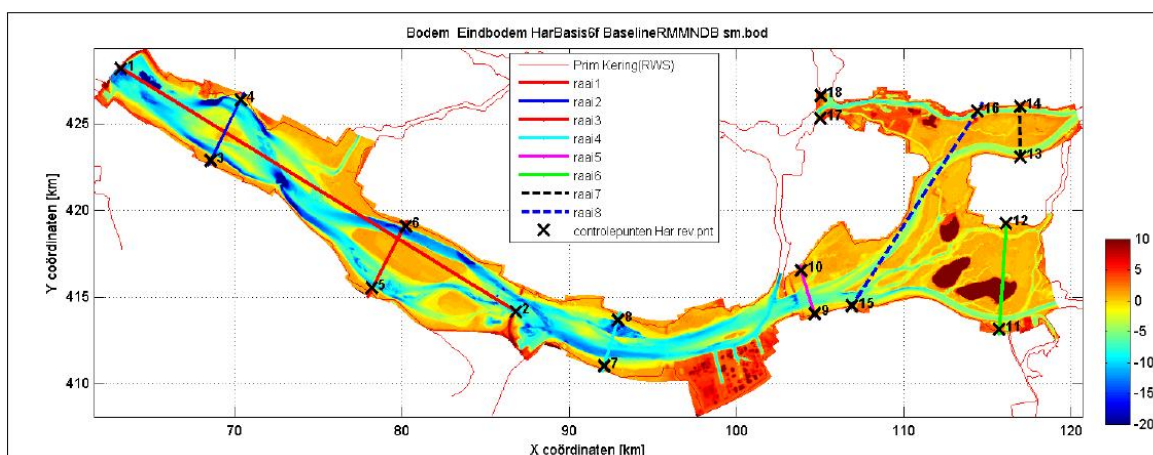
Figuur 4.4 Overzicht basisrekenrooster Haringlviët, Hollandsch Diep en Biesbosch, inclusief de primaire waterkering (rode lijn).

Het effect van roosterresolutie op de SWAN resultaten is onderzocht door 28 SWAN berekeningen uit te voeren voor 4 testcondities en de bovenvermelde 7 rekenroosters (basisrekenrooster + 6 verfijnde roosters). De 4 testcondities hebben betrekking op uniforme wind- en waterstandsvelden en zijn weergegeven in Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Testcondities voor de bepaling van geschikt rekenrooster

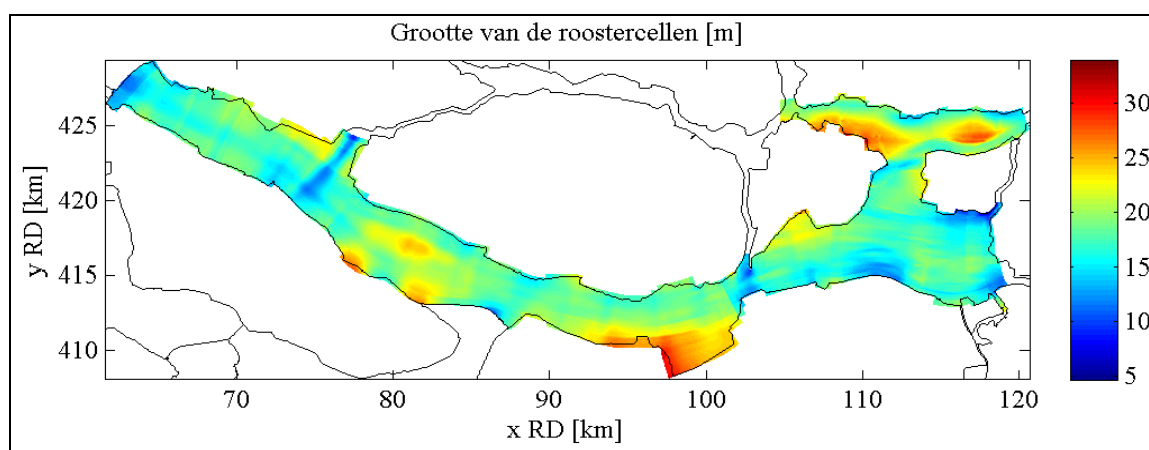
Testconditie	Waterstand [m+NAP]	Windsnelheid [m/s]	Windrichting [grd t.o.v. N]
1	4.0	20	225
2	4.0	40	225
3	4.0	20	315
4	4.0	40	315

Het convergentiegedrag van de testberekeningen is onderzocht op een aantal controlepunten en raaien dat verspreid gedefinieerd is over het hele gebied van het Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch. In Figuur 4.5 zijn deze controlepunten en raaien weergegeven. Details van de testberekeningen zijn te vinden in [Boomgaard, 2010].



Figuur 4.5 Gedefinieerde controlepunten en raaien studie resolutie rekenrooster.

Op basis van de uitgevoerde testberekeningen en de vergelijking van de ruimtelijke verschillen van de berekende golfparameters is geconcludeerd dat het rekenrooster dat 6 keer fijner is dan het hierboven genoemde basisrekenrooster, voldoende nauwkeurige resultaten levert van het SWAN model. Dit rekenrooster heeft een variabele roosterafstand met een gemiddelde celgrootte in de m- en n-richting van respectievelijk 20 m en 17 m. Het aantal actieve cellen bedraagt 1003525. Dit is het rekenrooster waarmee uiteindelijk de productieberekeningen met SWAN zijn uitgevoerd. De ruimtelijke verdeling van de cellen van dit rekenrooster is weergegeven in onderstaande Figuur 4.6.



Figuur 4.6 Ruimtelijke verdeling van de grootte van de roostercellen van het SWAN model Haringvliet, Hollandsch Diep en Biesbosch.

4.4 Productieberekeningen SWAN Haringvliet, Hollandsch Diep en Biesbosch

4.4.1 Waterstandsvelden en resolutie wind in SWAN

De database voor de Benedenrivieren bevat in totaal 6768 stochastcombinaties van afvoeren, zeewaterstanden, windsnelheid, windrichting en beheersituatie van de

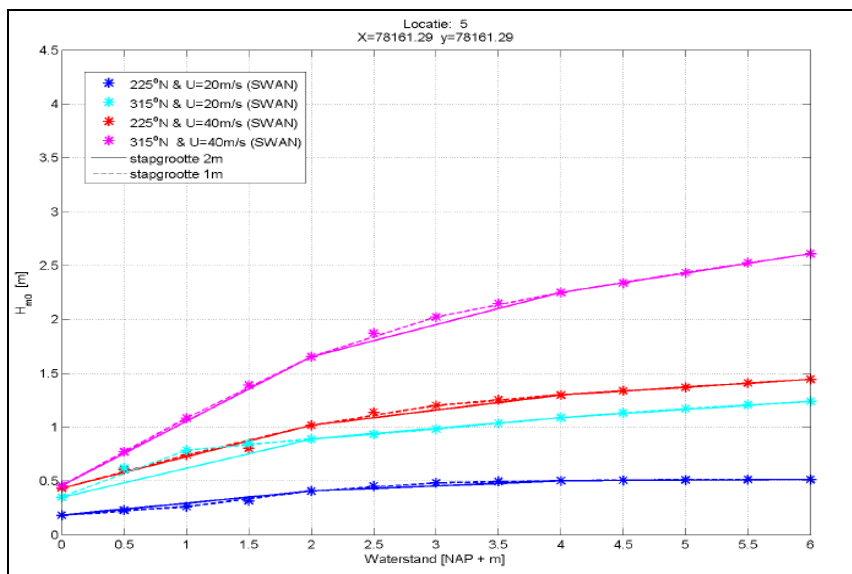
stormvloedkeringen, zie ook Tabel 3.4. De database bevat per combinatie o.a. de bijbehorende maximale waterstand (Hoofdstuk 3) en golfcondities (golfhoogte, golfperiode en golfrichting). Idealiter zou er daarom eenzelfde aantal SWAN berekeningen moeten worden gemaakt als WAQUA om deze golfparameters te bepalen. Dit is echter te omvangrijk en te rekenintensief. Om de rekentijd te beperken zijn binnen WTI-2011 keuzes gemaakt zodat het aantal daadwerkelijk uit te voeren SWAN berekeningen gelimiteerd blijft. Deze keuzes hebben betrekking op de invoer “waterstandsvelden” in SWAN en de optimale resolutie van de wind.

Waterstandsvelden SWAN

Eén onderdeel van de invoer voor SWAN berekeningen is het waterstandsveld. De SWAN productieberekeningen voor het Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch zijn uitgevoerd met gebruik van uniforme waterstandsvelden in plaats van variabele waterstandsvelden uit WAQUA. Door gebruik van uniforme waterstandsvelden is het aantal stochastische variabelen teruggebracht van 5 (zie hoofdstuk 3) naar 3: uniforme waterstand, windsnelheid en windrichting. De stochasten afvoeren, zeewaterstanden en beheersituatie van de stormvloedkeringen zijn als het ware vervangen door één gezamenlijke stochast “uniforme waterstand”. De aldus berekende golfparameters met 3 stochasten voor het Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch zijn vervolgens geïnterpoleerd naar de met WAQUA berekende waterstandsvelden, en daarmee met de oorspronkelijke stochasten.

De invloed van een uniforme waterstand ten opzichte een ruimtelijk variërende waterstand is onderzocht in [Boomgaard, 2010]. Hierbij zijn SWAN berekeningen uitgevoerd met zowel uniforme als ruimtelijk variërende waterstanden en onderling vergeleken op verschillende controlepunten zoals weergegeven in Figuur 4.5. De berekeningresultaten laten zien dat de verschillen in golfhoogte zeer beperkt zijn en bedragen enkele centimeters.

De resolutie en stapgrootte van een uniforme waterstand dient voldoende klein te zijn om het gedrag van de afhankelijkheid van de golfparameters (golfhoogte en golfperiode) van de waterstand goed te representeren. Indien het verband lineair is, dan is een relatief grote stapgrootte gerechtvaardigd. In alle andere gevallen dient de stapgrootte zodanig klein te zijn dat de interpolatie niet leidt tot te grote onnauwkeurigheden. Tot dit doel is in [Boomgaard, 2010] de relatie tussen de waterstand en de golfhoogte enerzijds en de waterstand en de golfperiode anderzijds geanalyseerd voor 2 windrichtingen (225°N en 315°N), 2 windsnelheden (20 m/s en 40 m/s) en 13 uniforme waterstanden (0, 0.5, 1.0, ..., 6 m+NAP). Voor een controlepunt, locatie 5, staan de resultaten van de uitgevoerde SWAN berekeningen weergegeven in Figuur 4.7.



Figuur 4.7 Verband tussen waterstand en de berekende golfhoogte, stapgrootte 2 m en 1 m voor de controle locatie 5.

De doorgetrokken- en de stippelijnen laten het verband zien tussen de windsnelheid en de golfhoogte verkregen met een stapgrootte van respectievelijk 1 m en 2 m. In [Boomgaard, 2010] staan de resultaten van alle uitgevoerde berekeningen beschreven. Deze laten zien dat bij een stapgrootte van 2 m de verschillen tussen de berekende golfcondities en de lineaire verlopen klein zijn, zeker voor de hogere waterstanden en hogere windsnelheden. Bij een stapgrootte van 1 m zijn nauwelijks nog verschillen te constateren.

Resolutie wind

Bij de productieberekeningen met WAQUA-RMM zijn potentiële windsnelheden beschouwd die variëren tussen 10 en 42 m/s met een stapgrootte van 10 m/s. Deze stapgrootte is relatief groot maar voldoende nauwkeurig voor waterstandsberekeningen. De resolutie en stapgrootte van de windsnelheid in SWAN dient voldoende klein te zijn om het gedrag van de afhankelijkheid van de golfparameters (golfhoogte en golfperiode) van de windsnelheid goed te representeren. Indien het verband lineair is, dan is een relatief grote stapgrootte gerechtvaardigd. In alle andere gevallen dient de stapgrootte zodanig klein te zijn dat de interpolatie niet leidt tot te grote onnauwkeurigheden. In [Boomgaard, 2010] is onderzocht of een stapgrootte van 10 m/s zoals gebruikt is voor de waterstandsberekeningen met WAQUA-RMM ook voldoende nauwkeurig is voor golfberekeningen met SWAN. Hierbij zijn conform de resolutie van de waterstand verschillende gevoeligheidsberekeningen uitgevoerd. Uit alle uitgevoerde berekeningen blijkt dat een stapgrootte van 10 m/s en kleiner voldoende nauwkeurig is om de afhankelijkheid van de golfhoogte en golfperiode met de windsnelheid goed te representeren. Voor meer details wordt verwezen naar [Boomgaard, 2010].

4.4.2 Randvoorwaarden SWAN berekeningen

De productieberekeningen met SWAN voor het Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch zijn conform paragraaf 4.4.1 uitgevoerd met uniforme waterstanden met een stapgrootte van 1 m. De stochasten afvoeren, zeewaterstanden en beheersituatie van de stormvloedkeringen, zijn hiermee niet als onafhankelijke stochasten beschouwd maar vervangen door 'uniforme waterstand'. De windsnelheid en windrichting zijn wel als onafhankelijke stochasten beschouwd. Er zijn conform de waterstandsberekeningen met WAQUA-RMM (hoofdstuk 3) 16 windrichtingen beschouwd. Voor de westelijke en oostelijke windrichtingen zijn verschillende waarden voor de windsnelheid gebruikt. Er zijn 7 waterstandsniveaus

beschouwd in stappen van 1 m, voor zowel de oostelijke als de westelijke windrichtingen. Het laagste waterstandsniveau komt ongeveer overeen met het Gemiddelde Laag Water (GLW) en het hoogste met de kerende hoogte van de Haringvlietsluizen (5 m t.o.v. NAP). Een overzicht van de combinaties die zijn doorgerekend met SWAN voor het Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch is weergegeven in Tabel 4.2. Merk op dat de windsnelheden 25 m/s en 35 m/s niet nodig zijn voor het vullen van de database, ze zijn beschouwd om extra informatie te genereren en indien nodig te gebruiken bij de interpolaties. In totaal zijn 574 SWAN berekeningen uitgevoerd.

Tabel 4.2 Stochastcombinaties SWAN berekeningen Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch

Sector	Windrichting [graden]	Windsnelheid [m/s]	Waterstand [m+NAP]
Oostelijk	22,5	10	-1
	45,5	20	0
	67,5	25	1
	90,0	30	2
	112,5		3
	135,0		4
	157,5		5
Westelijk	180,0	10	-1
	202,5	20	0
	225,0	25	1
	247,5	30	2
	270,0	35	3
	292,5	42	4
	315,0		5
	337,5		
	360,0		

SWAN is toegepast in de stationaire modus. De windsnelheden gegeven in Tabel 4.2 zijn vertaald naar open water windsnelheden en variëren hiermee van 11,1 tot en met 43,3 m/s, zie Tabel 3.5.

Uit verkennende berekeningen blijkt dat delen van het Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch invloed ondervinden van windgolven vanuit voornamelijk de Oude Maas en de Noord. Vooral rondom het splitsingspunt van de Beneden Merwede – Oude Maas – de Noord is de invloed niet verwaarloosbaar, [Klein, 2011]. Deze invloed is meegenomen in de productieberekeningen. Met een uitgebreide versie van het SWAN model, die naast het gebied van het Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch o.a. ook de Beneden Merwede, de oude Maas en de Noord omvat, zijn vooraf de productie namelijk 574 SWAN berekeningen gemaakt en randvoorwaarden op de betreffende riviertakken afgeleid. Windgolven vanuit de Boven Merwede en de Bergsche Maas zijn vanwege de ligging (oostelijke wind) buiten beschouwing gelaten.

Een overzicht van alle invoer- en uitvoerbestanden gebruikt in de productieberekeningen met SWAN voor het Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch is te vinden in [Klein et al, 2010ab].

4.5 Uitvoeren en controleren productieberekeningen SWAN

De productie van SWAN berekeningen voor het Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch zijn uitgevoerd op het cluster van Svasek in Schiphol. De berekeningen zijn uitgevoerd op 5 machines, elke met 8 Intel processoren met een kloksnelheid van 3 GHz. Het interne geheugen van elke machine bedraagt 16 GB.

Er zijn procedurele controles en numerieke controles gedefinieerd en uitgevoerd. De procedurele controles hebben betrekking op de printfiles en de aanwezigheid van alle in- en uitvoerbestanden van elke berekening. De numerieke controles bestaan uit een controle op fysische juistheid van de berekende golfparameters, consistentie binnen de uitvoerfiles en verwachte relaties tussen diverse berekende golfparameters. In dit laatste geval is de controle voornamelijk gericht op de relaties tussen de berekende significante golfhoogte H_{m0} en de periodematen T_{ps} en $T_{m-1,0}$ met de windsnelheid. Alle 574 berekeningen en uitvoerlocaties komen aan de orde bij beide controles.

De uitgevoerde procedurele controles hebben aan het licht gebracht dat alle 574 berekeningen aan alle controles hebben voldaan. 558 berekeningen zijn direct procedureel goedgekeurd en de overige 16 niet-geconvergeerde berekeningen zijn na een nadere analyse van het convergentiegedrag alsnog goedgekeurd. Dit betekent dat alle berekeningen goedgekeurd zijn in procedurele zin en konden onderworpen worden aan de numerieke controles.

De kwaliteit van de SWAN resultaten voor het Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch zijn voor het overgrote deel van de berekeningen en locaties uitstekend. De diverse numerieke controles die op de SWAN resultaten zijn uitgevoerd hebben aangetoond dat de SWAN berekeningen betrouwbare en fysisch realistische resultaten hebben opgeleverd, niet alleen in de uitvoerlocaties maar ook in de roosterpunten. De controles hebben echter één gebied geïdentificeerd waar de kwaliteit van de berekeningen minder goed is. Het betreft 15 locaties uit de basisset en 5 locaties uit de extra set langs het Wantij rond het spaarbekken Grote Rug. Desondanks, zijn deze locaties niet verworpen en opgenomen in de databases. Bij de toepassing dient hier, indien nodig, rekening mee te worden gehouden. De numerieke controles hebben tot slot aangetoond dat er een zeer grote mate van consistentie is tussen de diverse uitvoerbestanden van SWAN voor het Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch.

De productieberekeningen inclusief controles zijn uitvoerig beschreven in [Klein et al. 2010ab].

4.6 Keuze golfparameters uit SWAN en vullen databases

4.6.1 Keuze golfparameters uit SWAN berekeningen

Voor het Harinvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch (en ook de Europoort, hoofdstuk 5) zijn de golfcondities berekend met SWAN. SWAN is een spectraal model: het berekent het golfspectrum en leidt daar de golfparameters uit af. Bretschneider daarentegen berekent de golfparameters rechtstreeks, dus zonder de spectrale vorm te berekenen. In dat laatste geval is geen informatie over de spectrale vorm beschikbaar en kunnen alternatieve periodematen alleen bepaald worden met behulp van de standaard omrekeningsfactoren die voor 'standaard' golfspectrum gelden, welke op alle locaties en alle omstandigheden wordt toegepast.

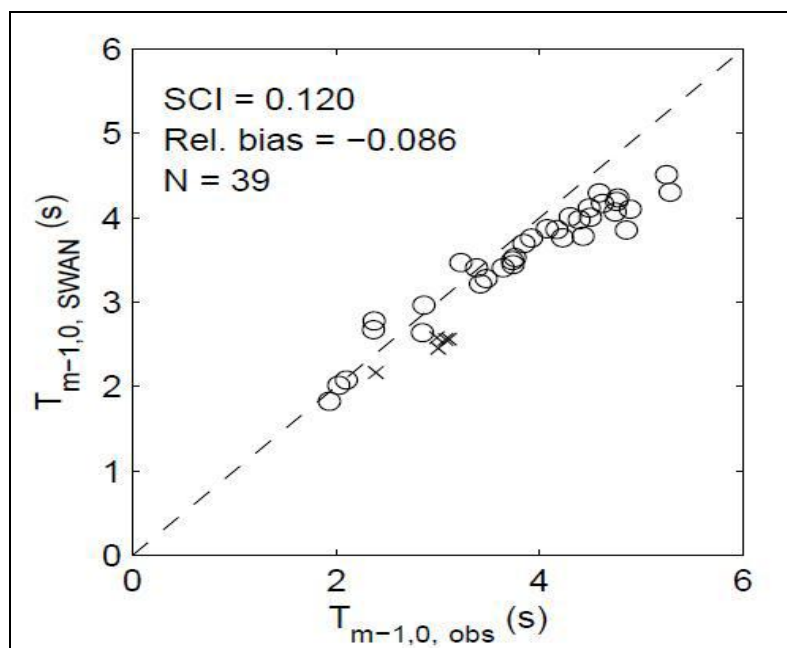
In Hydra-Zoet (maar ook Hydra-B), is de piekperiode T_p de gebruikelijke periodemaat. Bij berekeningen met PC-Overslag wordt echter de spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$ gebruikt. Omrekening van de piekperiode naar de spectrale golfperiode vindt binnen de Hydra's plaats door middel van een omrekeningsfactor van $c = 1,1$. Er geldt $T_{m-1,0} = T_p/c$.

In de eerste resultaten van WTI-2011 met Hydra-Zoet en golfoverslag zijn hogere benodigde kruinhoogtes geconstateerd dan verwacht. De in het kader van HR2006 gehanteerde keuze ten aanzien van de te gebruiken golfperiode uit het golfmodel SWAN via een omrekeningsfactor blijkt een rol te spelen, terwijl deze keuze slecht onderbouwt bleek. Dit is aanleiding geweest om in het kader van WTI-2011 deze keuze nader tegen het licht te houden. Voor een uitgebreide beschrijving van het probleem wordt verwezen naar [de Waal, 2011].

Bij de afregeling en beoordeling van SWAN voor wat betreft de reproductie van meetresultaten, wordt wat betreft de golfperiode doorgaans gekeken naar gewogen gemiddelde periodematen ($T_{m-1,0}$ en T_{m01}) en hooguit zijdelings naar de piekperiode T_p . De SWAN performance aangaande $T_{m-1,0}$ in een brede set meetgegevens is goed te noemen. In het calibratie- en validatierapport zijn resultaten van hindcasts van stormen getoond in verschillende gebieden van de Waddenzee, de monding van de Oosterschelde, het IJsselmeer en het Slotenmeer; zie voor details [Gautier, 2010].

In het kader van WTI-2011 is besloten om voor de zoete watersystemen waar SWAN wordt gebruikt, evenals bij de zoute wateren, rechtstreeks gebruik te maken van de SWAN resultaatberekeningen zonder omrekening. Dit betekent dat de berekende spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$ gebruikt wordt in plaats van de via omrekening afgeleide golfperiode.

De overall performance van SWAN wat de spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$ is goed; zie [de Waal, 2011]. Echter de performance wat betreft de spectrumvorm voor het IJsselmeer en het Slotermeer¹³ is enigszins onbevredigend. Dit is reeds eerder geconstateerd en is aanleiding geweest voor het plannen van nader onderzoek binnen SBW. Voor meer details wordt verwezen naar [Gautier, 2010]. Verwacht wordt dat dit nader onderzoek in de toekomst tot SWAN resultaten voor de $T_{m-1,0}$ zal leiden die hoger zijn dan de vigerende SWAN versie geeft. Om te vermijden dat in de HR2011 golfcondities afgegeven worden waarvan op voorhand bekend is dat ze in de volgende HR editie zullen worden vervangen door zwaardere golfcondities, is besloten om de berekende golfcondities naar boven bij te stellen. Omdat deze bijstelling op dit moment pragmatisch moet zijn, is besloten om een correctiefactor op $T_{m-1,0}$ toe te passen, waarmee de bias in de SWAN performance voor $T_{m-1,0}$ voor de meren, zoals weergegeven in onderstaande Figuur 4.8 wordt gereduceerd tot nul. Er is gekozen voor een correctiefactor van 1,09; deze factor is gebaseerd op meetresultaten in het IJsselmeer en het Slotermeer. Een uitgebreidere onderbouwing van deze keuze is te vinden in [de Waal, 2011] van dit rapport.



Figuur 4.8 Performance van SWAN m.b.t. $T_{m-1,0}$ voor de meren (o: IJsselmeer; x: Slotermeer)

13. In het rivierengebied zijn geen metingen beschikbaar, en de kalibratie en validatie van het SWAN model is o.a. gebaseerd op metingen in het IJsselmeer en Slotermeer.

Voor het gebied van het Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch, waar SWAN berekeningen zijn uitgevoerd voor de bepaling van de concept HR2011, zijn geen golfmetingen beschikbaar op basis waarvan een soortgelijke correctiefactor bepaald kan worden. Dit geldt ook voor het Europoortgebied, zie hoofdstuk 5. Voor deze gebieden moest in het kader van WTI-2011 een pragmatische keuze worden gemaakt tussen consistentie met het IJsselmeer (correctiefactor = 1,09) of consistentie met de kust (geen correctiefactor). Daarbij is de keuze gevallen op consistentie met het IJsselmeer. Voor het Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch (maar ook het Europoortgebied, hoofdstuk 5) is daarom dezelfde correctiefactor gehanteerd als voor het IJsselmeer.

4.6.2 Vullen databases

Voor de gedefinieerde uitvoerlocaties in het Benedenrivierengebied zijn voor alle combinaties van de stochasten zoals beschreven in hoofdstuk 3 de bijbehorende maximale waterstanden (productie WAQUA) en de golfparameters geproduceerd met SWAN en verwerkt volgens subparagraaf 4.6.1, gevuld in verschillende databases. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen as en oeverdatabases (wel met golfparameters).

Om droogval zo veel mogelijk te vermijden is bij het vullen van de oeverdatabases, analoog aan het IJsselmeer, gebruik gemaakt van zowel de basisset als de natte set uitvoerlocaties. Dit betekent dat de oeverdatabases bestaan uit uitvoerlocaties uit de basisset voor gebieden waar alleen de basisset bestaat en, waar aanwezig, uit de natte set.

De as databases bevatten geen golfparameters. Voor delen van dijkeringen die grenzen aan het Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch, waar golfberekeningen zijn uitgevoerd met SWAN, bevatten de oeverdatabases naast de berekende maximale waterstanden bij de teen van dijk ook de berekende golfparameters. Voor delen van de dijkeringen in het Benedenrivierengebied waar geen SWAN berekeningen voorhanden zijn (smalle wateren) zijn de effectieve strijklengtes en de gemiddelde waterdieptes gevuld in de betreffende oeverdatabases. De effectieve strijklengtes en gemiddelde waterdieptes zijn nodig voor de golfberekeningen met Bretschneider binnen Hydra-Zoet. De wijze waarop verschillende databases zijn gevuld is onveranderd ten opzichte van HR2006. Dit vindt plaats door middel van de applicatie VulDatabase [Slomp et al, 2001]. De aldus gevulde as- en oeverdatabases zijn uitgebreid gecontroleerd en betrouwbaar bevonden voor Hydra-zoet berekeningen, zie [Duits, 2011].

Tot slot wordt opgemerkt dat voor de natte set geen effectieve strijklengtes en gemiddelde bodemdieptes zijn bepaald. Bretschneider berekeningen voor locaties uit deze set, en derhalve een vergelijking tussen Bretschneider en SWAN, zijn niet mogelijk.

5 Europoort

5.1 Inleiding

Het Europoortgebied is het gebied dat buiten de Europoortkering ligt (de Maeslant- en Hartelkering). De Europoort vormt een bijzonder deelgebied binnen het gebied van de Benedenrivieren. In tegenstelling tot de rest van het Benedenrivierengebied kunnen hier namelijk seiches en golfdoordringing vanuit de zee een belangrijke bijdrage leveren aan de Hydraulische Randvoorwaarden. Vanzelfsprekend spelen hier ook de lokaal opgewekte golven een belangrijke rol. Qua hydraulische eigenschappen heeft het Europoortgebied meer overeenkomsten met de kust dan met het Benedenrivierengebied. De Europoort heeft de volgende kenmerken:

- De stormvloedkeringen geven geen bescherming
- De zeewaterstand is de dominante stochast, de afvoer is als stochast niet belangrijk
- De windgolven zijn complexer en belangrijker dan elders in de Benedenrivieren.

Mede in het licht van bovenstaande speelde binnen WTI-2011, naast het afleiden van nieuwe hydraulische randvoorwaarden, de vraag of het Europoortgebied onderdeel uit mag blijven maken van het Benedenrivierengebied of als een apart watersysteem beschouwd moet worden. Een ander mogelijke optie was het Europoortgebied te betrekken bij de kust. Dit laatste zou tot gevolg hebben dat de probabilistische berekeningen (hoofdstuk 6) uitgevoerd moeten worden met Hydra-K in plaats van Hydra-Zoet.

Een ander vraag met betrekking tot het Europoortgebied is de consistentie tussen statistische gegevens van Hydra-K voor de kust en die van Hydra-Zoet voor het Benedenrivierengebied.

In dit hoofdstuk komen bovenvermelde onderwerpen aan de orde. In paragraaf 5.3 komt de aanpak van het Europoortgebied aan de orde. Het inconsistentievraagstuk in de invoer wordt behandeld in paragraaf 5.3. Seiches respectievelijk lokale golven en golfdoordringing vanuit de zee komen aan de orde in de paragrafen 5.4 en 5.5.

5.2 Aanpak Europoort in WTI

Zoals in de inleiding al is aangegeven, heeft het gebied buiten de stormvloedkeringen grotere fysische overeenkomsten met de Hollandse kust dan met het rivierengebied. Waarom dit gebied toch onder het Benedenrivierengebied en niet onder de Hollandse kust valt, is historisch zo gegroeid. De grens tussen 'zoet' en 'zout' ligt bij de locatie Hoek van Holland, waardoor het gebied tussen de stormvloedkeringen en Hoek van Holland bij het Benedenrivierengebied is getrokken.

Uitgangspunt binnen WTI was om te onderzoeken of de Europoort ondergebracht kan worden bij de kust en Hydra-K dan wel als aparte deelsysteem beschouwd kan worden met bijbehorend nieuw probabilistisch instrumentarium. De eerste vraag of Hydra-K, gebaseerd op methode de Haan, toepasbaar is op de Europoort blijkt niet met zekerheid te beantwoorden. Een nadeel van het toepassen van Hydra-K voor de Europoort is dat het model een simultane meetreeks van wind en waterstand op meerdere locaties in het Europoortgebied vereist. Voor de Europoort zijn deze metingen, met uitzondering van de locatie Hoek van Holland, niet beschikbaar. Een ander belangrijk nadeel van een mogelijke overstap op een ander probabilistische model is het proces dat doorlopen moet worden om het model als officiële toetsinstrumentarium te laten goedkeuren. Ten aanzien van de tweede vraag blijkt uit inventarisatie dat het een aanzienlijk ontwikkeltraject is om te onderzoeken of de Europoort als een apart deelsysteem met eigen probabilistisch model beschouwd kan worden. Gezien

het onderzoekskarakter van beide vragen en de planning van WTI-2011 wordt het niet haalbaar geacht de ontwikkeltrajecten binnen de scope en de planning van WTI te doorlopen. Daarnaast blijkt uit de inventarisatie [van der Klis et al, 2010] dat het huidige probabilistische model Hydra-Zoet geen knelpunt vormt voor de Europoort. Er is daarom besloten om de Europoort te handhaven als onderdeel van het Benedenrivierengebied.

5.3 Inconsistenties kust en Benedenrivierengebied

De vigerende hydraulische randvoorwaarden (HR2006) voor de Hollandse kust zijn berekend met behulp van Hydra-K¹⁴, terwijl voor het Benedenrivierengebied inclusief de Europoort is gebruik gemaakt van Hydra-B. Binnen WTI-2011 wordt Hydra-B vervangen door Hydra-Zoet. Hydra-zoet is geschikt voor alle zoete watersystemen. Eén van de uitgangspunten van WTI-2011 is "zoveel mogelijk consistentie" in de HR bepaling. Dit betekent een verbeterde afstemming tussen verschillende watersystemen en afgeleide randvoorwaarden.

De methode van Hydra-K is verschillend van die van Hydra-B en Hydra-Zoet. Het is zeer wenselijk om deze methoden gelijk te trekken. Dit is echter niet haalbaar en niet wenselijk. Niet wenselijk omdat voor de Hollandse Kust geen nieuwe randvoorwaarden worden afgeleid en niet haalbaar binnen WTI-2011 vanwege de grote verschillen tussen beide methoden. Binnen WTI-2011 zijn de mogelijke inconsistenties in de invoer voor de kust en de Benedenrivieren geïnventariseerd en is een schatting gemaakt van de mogelijke effecten van deze inconsistenties. De volgende stappen zijn genomen:

- inventarisatie van mogelijke inconsistenties in de invoer tussen Hollandse Kust en het Benedenrivierengebied in het algemeen en de Europoort in het bijzonder,
- inschatting per inconsistentie of deze veel of weinig effect heeft op de HR en
- in beeld brengen welke aanpassingen nodig zijn aan het Hydra-B- en daardoor aan het Hydra-zoet instrumentarium.

Daarbij zijn de volgende invoerparameters onderzocht op inconsistenties:

- Statistiek zeewaterstand inclusief locatie,
- Statistiek van de wind (locatie, snelheid, richting en volkerfactor),
- Correlatie wind-waterstandstatistiek,
- Waterstanden
- Windgolven,
- Seiches en deining.

Uit de inventarisatie blijkt dat de belangrijkste inconsistenties de windstatistiek betreffen. Voor de kust wordt namelijk de windstatistiek bij Hoek van Holland gebruikt en voor het Benedenrivierengebied die bij Schiphol. Ook ten aanzien van de windrichting zijn er verschillen. Hydra-K maakt gebruik van setoren van 30 graden terwijl Hydra-Zoet windrichtingen van 22,5 graden hanteert. Alle andere geconstateerde inconsistenties zijn inherent aan de methodes die ten grondslag liggen aan Hydra-K en Hydra-Zoet en betreffen daarom geen invoer. Het effect van al deze inconsistenties blijkt echter marginaal te zijn. Voor een uitgebreide beschrijving wordt verwezen naar [Nicolai, 2010].

Een ander belangrijk verschil tussen de kust en het Benedenrivierengebied is de wijze waarop de golfcondities worden bepaald. In de huidige methode wordt voor het Benedenrivierengebied, en het Europoortgebied in het bijzonder, de Bretschneider formulering toegepast terwijl voor de kust het geavanceerde tweedimensionale spectrale SWAN model wordt gebruikt.

14. Hydra-K is gebaseerd op methode de Haan. De methode maakt gebruik van simultane metingen van de stochasten.

Bretschneider vereist een sterke vereenvoudiging van de schematisatie van de kades en hooggelegen buitendijkse gebieden in het Europoortgebied. Dit maakt deze methode eigenlijk ongeschikt voor de Europoort. Voor de Europoort is daarom besloten om een SWAN model te ontwikkelen voor het bepalen van de golfcondities. Een ander belangrijke voordeel van SWAN is dat golfdoordringing vanuit de Noordzee direct meegenomen wordt in de berekeningen van lokaal opgewekte golven.

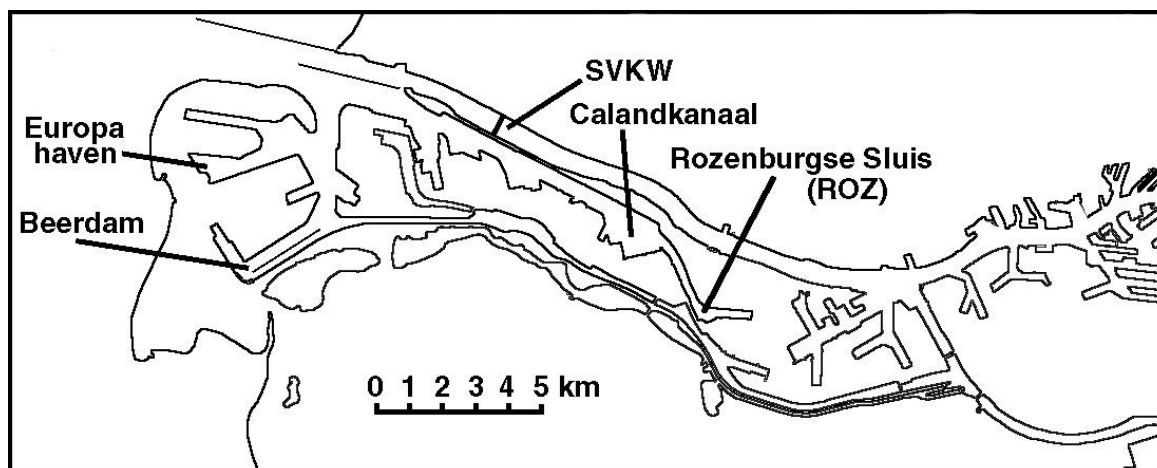
Tot slot, Hydra-K houdt geen rekening met seiches. Hydra-Zoet neemt seiches wel mee als een vaste toeslag op de waterstand. Deze aanpak blijft onveranderd in WTI-2011 ten opzichte van HR2006. Wel zijn de seiches toeslagen geactualiseerd, zie paragraaf 5.4.

5.4 Seiches toeslagen

5.4.1 Inleiding

Een seiche is een resonante slinging in het havenbekken. In Rotterdam worden deze lange golven opgewekt door meteorologische effecten rondom koufrontpassages en tijdens instabiele weerscondities [De Jong, 2004]. Dergelijke meteorologische condities kunnen leiden tot grootschalige circulatiepatronen (convectiecellen) die fluctuaties in de wind veroorzaken met tijdschalen rondom 30 minuten en hoger die de seiche-slingeringen als gevolg hebben.

De eigen frequenties of -periodes van het systeem hangen af van de lengte en diepte van de havenbekkens. De langste eigen periode in het Europoortgebied is 90 minuten. De bijbehorende seiche brengt het gehele Calandkanaal in slinging en wordt met name waargenomen bij de Rozenburgse Sluis (ROZ), aan het einde van het Calandkanaal, zie Figuur 5.1. In andere bekkens treden seiches met andere eigen periodes op. In de Europahaven wordt bijvoorbeeld een seiche van ca. 50 minuten gemeten.



Figuur 5.1 schematische kaart van het Europoortgebied inclusief relevante locaties voor bepaling van seiches.

In de laatste jaren zijn nieuwe inzichten verkregen in de achtergronden van seiches, maar deze zijn nog niet verwerkt in de vigerende methode [De Jong, 2004]. Deze inzichten hebben niet alleen betrekking op het opwekkingsmechanisme maar op het versterkingsgedrag van de seiches in de haven, en geven aan hoe de versterkingspectra omgezet dienen te worden in vertaalfactoren. Bovendien is er inmiddels een veel langere tijdreeks van waterstanden bij ROZ beschikbaar gekomen. In de volgende subparagraaf gaan we nader in op de vigerende seiches toeslagen in de HR2006, daarna behandelen we in de daaropvolgende subparagrafen de in het kader van WTI-2011 geactualiseerde seiches toeslagen.

5.4.2 Vigerende seiches toeslagen

De vigerende seichetoeslagen in de HR2006 zijn gebaseerd op de methode van De Looff [de Looff, 1994]. Hierbij wordt uitgegaan van eerder afgeleide referentie seiches-statistiek bij Rozenburgsesluis (ROZ). Vervolgens wordt een vertaalslag gemaakt van deze statistiek naar andere locaties in het gebied door gebruik te maken van zogenaamde translatiefactoren, waarin tegelijkertijd het effect van onderlopende kades wordt meegenomen (hieronder nader toegelicht). Deze twee stappen resulteren in een set aan seichestoeslagen voor verschillende representatieve locaties in Europoort. De toeslagen worden alleen bepaald voor de normfrequenties van de dijkringen die grenzen aan het Europoortgebied, te weten 1/4000 en 1/10000 per jaar.

De vigerende referentiestatistiek is gebaseerd op metingen uit de periode 1975 tot en met 1983. Vanwege wijzigingen in de havengeometrie worden meetgegevens van voor 1975 als niet representatief beschouwd. Een uitgebreide beschrijving van de afleiding van deze referentiestatistiek is te vinden in [De Valk, 1994].

De seichetoeslagen voor de overige locaties in het Europoortgebied worden berekend door middel van de zogenoemde translatiefactoren die gebaseerd zijn op de verhouding tussen de lokale seiche-amplificaties (versterkingspectrum) en die bij ROZ. De versterkingsspectra bij ROZ en de overige locaties worden berekend met PHAROS. Voor meer details over deze vertaalslag en de PHAROS berekeningen voor HR2006 wordt verwezen naar [Veldman et al, 2005].

5.4.3 Actualisatie seiches WTI-2011

In het kader van SBW is een studie uitgevoerd met het doel om op basis van de bovengenoemde nieuwe inzichten, meetgegevens en bestaande kennis een evaluatie van de rekenmethode voor de seichetoeslagen uit te voeren [van der Klis, 2010]. In dat rapport worden drie aanbevelingen gedaan voor WTI-2011:

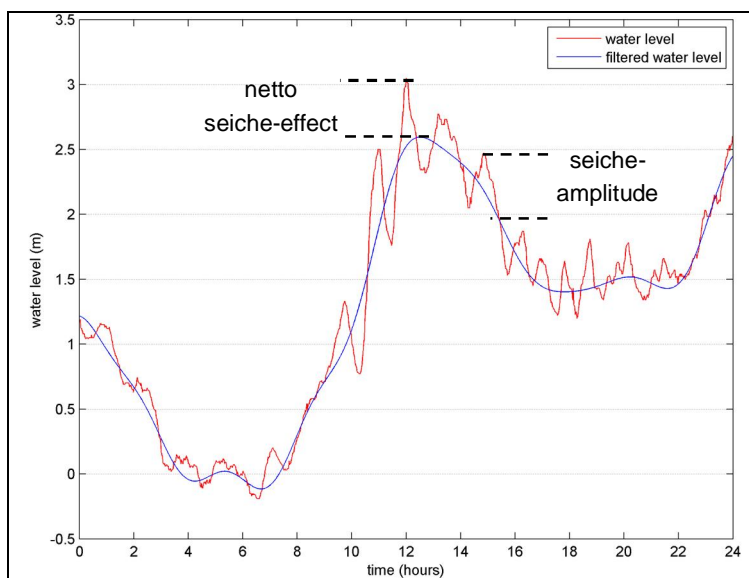
1. Actualiseren van de seiches-referentiestatistiek bij Rozenburgse sluis, ROZ,
2. Actualiseren van de vertaalfactoren op basis van een nieuwe aanpak waarbij gebruik wordt gemaakt van het volledige spectrum,
3. Combineren van 1 en 2 om seichetoeslagen te bepalen voor de locaties in Europoort die relevant zijn voor HR.

In de volgende subparagrafen wordt nader ingegaan op deze 3 onderwerpen.

5.4.4 Actualisatie referentiestatistiek te ROZ

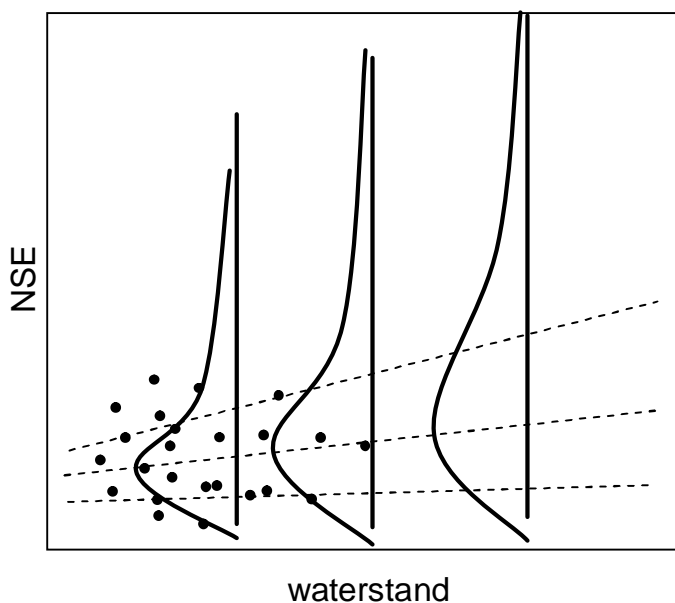
Voor de actualisatie van de referentiestatistiek van het Netto seiche-effect¹⁵ (NSE) te ROZ, zie Figuur 5.2, is gebruik gemaakt van waterstanden met een bemonsteringsinterval van 1 minuut uit de periode februari 1989 tot augustus 2007. Relevante hoogwater-events zijn geselecteerd door middel van een drempelwaarde voor de ongestoorde waterstand; deze drempelwaarde bedraagt 1,76 m. Alle hoogwatersituaties boven deze drempelwaarde worden meegenomen in de statistische analyse. De maximale waarde van de ongestoorde waterstand bij ROZ is +3,3 m+NAP.

15. NSE is gedefinieerd als de netto bijdrage aan het hoogwater door seiche-slingerin, dat wil zeggen inclusief het effect van een verschil in timing van de seiche ten opzichte het getij en de opzet.



Figuur 5.2 Voorbeeld van een gemeten (rood) en bijbehorende gefilterde tijdreeks (blauw), inclusief het netto-seiche-effect en seiche-amplitude.

Uit waarnemingen blijkt dat seiches vaak optreden tijdens stormen waarbij hoge waterstanden optreden. De methode voor het bepalen van de referentie seiche-statistiek gaat uit van een correlatie tussen het NSE en de maximale waterstand zoals weergegeven in Figuur 5.3. De kansverdeling wordt bepaald onder de aanname van een lineaire trend door de data. Voor de kansverdeling van de waterstanden is gebruik gemaakt van de algemeen geaccepteerde Basispeilen-statistiek voor Hoek van Holland. De waterstanden bij Hoek van Holland zijn vertaald naar waterstanden bij ROZ door een ‘verschuiving’ toe te passen. Voor de conditionele kansverdeling van het NSE voor een gegeven waterstand wordt een Gamma verdeling aangenomen [Vrouwenvelder, 1994]. Verder wordt aangenomen dat de spreiding lineair toeneemt voor toenemende waterstanden.



Figuur 5.3 Voorbeeld schematische weergave van de conditionele kansverdeling van het NSE gegeven de waterstand

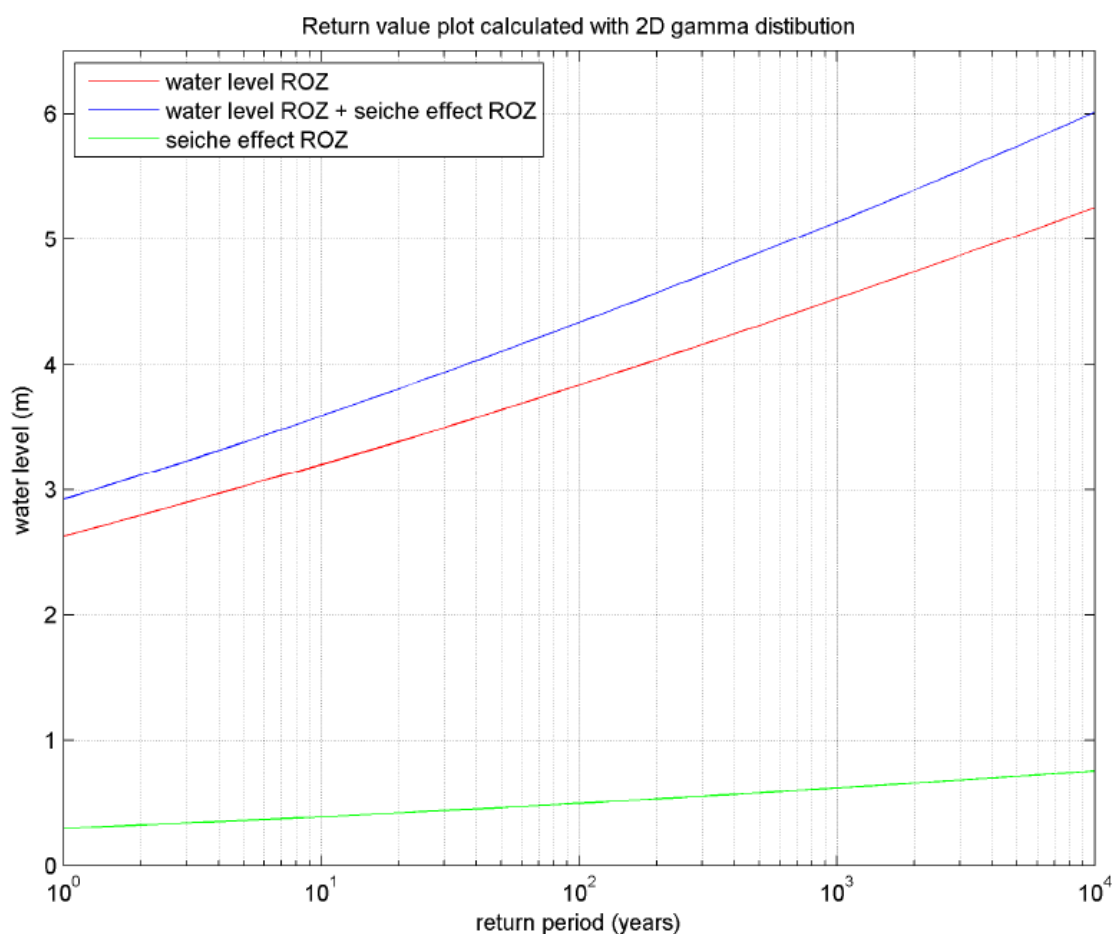
Het lineaire verband en de Gamma kansverdelingen zijn gefit op de gecombineerde metingen van waterstand en NSE. Zoals hierboven reeds genoemd is na gevoeligheidstesten en nadere analyses een drempelwaarde voor de ongestoorde waterstand bij ROZ van 1.76 m geselecteerd.

De kansverdeling van de waterstand bij ROZ (met en zonder NSE) en het NSE is weergegeven in onderstaande Figuur 5.4.

Tabel 5.1 geeft de waarden weer van het NSE die bij verschillende terugkeertijden behoren. Naast de WTI-2011 waarden bevat de tabel ook de in HR2006 gebruikte getallen.

Tabel 5.1 NSE waarden behorende bij verschillende terugkeertijden zoals gebruikt in HR2006 en WTI-2011

Frequentie [1/jaar]	NSE bij ROZ [m]	
	HR2006	WTI-2011
1	0,50	0,30
1/4000	0,95	0,70
1/10000	1,00	0,75



Figuur 5.4 Waterstand met en zonder NSE, en NSE bij ROZ als functie van de terugkeertijd

5.4.5 Actualisatie seiches toeslagen

De referentie statistiek te ROZ dient vertaald te worden naar verschillende locaties in het Europoortgebied. De vertaling is gebaseerd op methode de Jong zoals beschreven in [Janssen, 1995], en later aangepast en gevalideerd door [De Jong, 2004]. De aanpassingen hadden betrekking op het te gebruiken frequentiebereik en de condities in de havenmond (randvoorwaarde-spectrum). De methode maakt gebruik van het volledige seiche-bereik in het amplificatiespectrum en niet alleen de waarden rond de hoogste piek zoals in de vigerende HR methode. De methode gaat bovendien uit van een niet-uniforme spectrale vorm voor de aanbod van energie in het seiche-frequentiebereik bij de haveningang. Voor details wordt verwezen naar [De Jong, 2010].

De nieuwe seichestoelagen voor het Europoortgebied worden verkregen door de nieuwe referentiestatistiek te vertalen naar representatieve locaties op basis van geactualiseerde translatiefactoren. De resulterende waarden voor seiches toeslagen voor de normfrequenties 1/4000 en 1/10000 per jaar zijn opgenomen in Bijlage A.

Samengevat wordt ten aanzien van de geactualiseerde seiches toeslagen geconcludeerd dat actualisatie van de referentiestatistiek tot een NSE heeft geleid van 0,70 m en 0,75 m voor respectievelijk de normfrequenties 1/4000 en 1/10000 per jaar. Deze waarden zijn lager dan de vigerende HR2006 waarden van 0,95 m en 1,00 m. De nieuwe methode om de vertaalfactoren van de referentiestatistiek van ROZ naar andere locaties in de Europoort vast te stellen levert soortgelijke translatiefactoren als gebruikt voor de HR2006. Op basis van de nieuwe referentiestatistiek en geactualiseerde translatiefactoren en geometrie van de Europoort zijn seiches toeslagen bepaald die ongeveer 20 % lager liggen dan de vigerende seiches toeslagen.

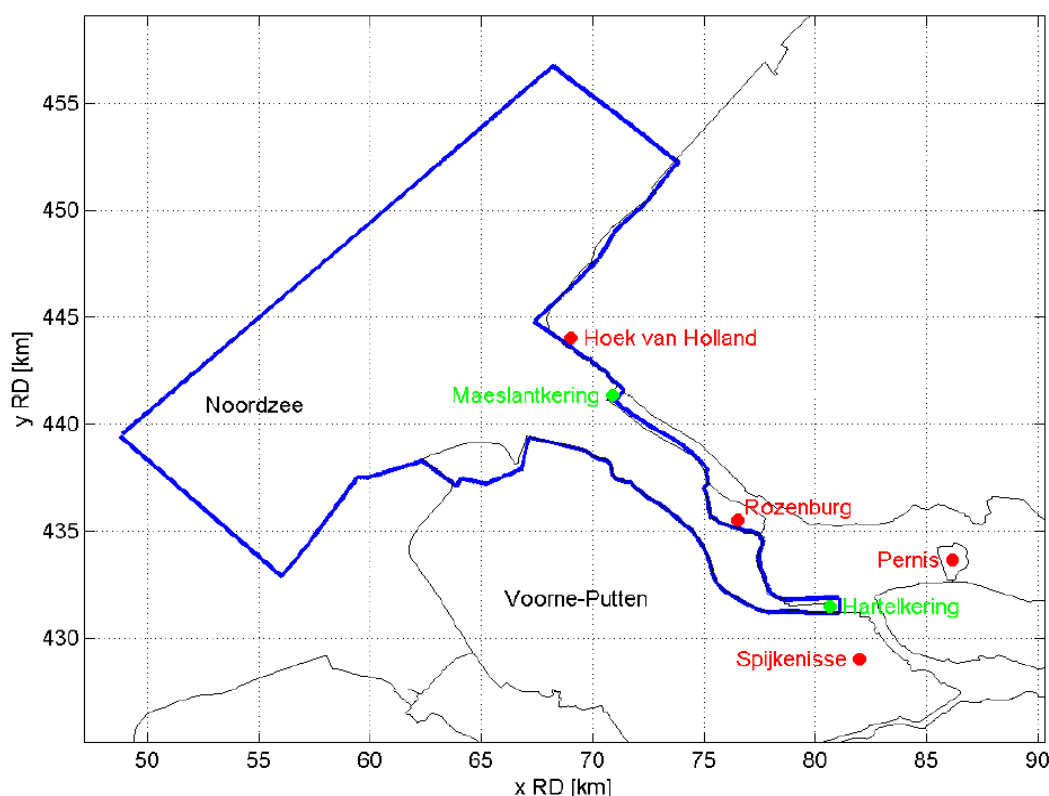
5.5 SWAN Europoort: lokale golven en deining

5.5.1 Modelgebied SWAN Europoort

Zoals in hoofdstuk 4 vermeld is voor het Europoortgebied een SWAN model opgezet voor de berekening van lokaal opgewekte golven en golfdeining vanuit de Noordzee. 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. Vanaf de Maeslantkering tot ten oosten van de Hartelkering lopen de verbindende keringen 8 en 9 (Stormvloedkering Nieuwe waterweg en Europoort/Hartelkering). Vanaf de Hartelkering volgt de Europoort de noordelijke begrenzing van dijkkringgebied 20 (Voorne-Putten). De havenbassins van de Maasvlakte en de havenbekkens grenzend aan het Caland- en Hartelkanaal maken onderdeel uit van het Europoortgebied. De tweede Maasvlakte, die nog in aanleg is, maakt in de SWAN modellering ook onderdeel uit van het Europoortgebied evenals een deel van de Noordzee. De begrenzingen van het zeegedeelte zijn zo gekozen dat voor de zeerandvoorwaarden gebruik kan worden gemaakt van de resultaten van productieberekeningen van de HR2006 voor de Hollandse Kust. De grens op de Noordzee volgt grotendeels de -20 m+NAP dieptelijne. Een overzicht van het modelgebied van het Europoortgebied is weergegeven in Figuur 5.5.

Daar waar in de Europoort Bretschneider geïsoleerd werkt, worden de SWAN berekeningen in SWAN sterk beïnvloed door de omgeving. In SWAN kunnen golven die elders worden opgewekt worden bijgebogen, waar dit bij Bretschneider niet aan de orde is. Anderzijds neemt SWAN de golfdoordringing vanuit de Noordzee en de ondiep water fysica mee in de berekening terwijl Bretschneider hier geen rekening mee houdt. Berekeningen met PHAROS voor golfdoordringing vanuit de Noordzee in de Europoort zijn overbodig. SWAN is een spectraal model: het berekent het golfspectrum en leidt daar de golfparameters uit af. Het voorheen (en

in sommige gebieden nog steeds) voor de HR bepaling gebruikte golfmodel Bretschneider berekent de golfparameters rechtstreeks (m.b.v. parametrisaties), dus zonder de spectrale vorm te berekenen, zie voor meer details [de Waal, 2008].



Figuur 5.5 Schematische weergave modelgebied Europoort

5.5.2 Versie en instellingen

In het Europoortgebied worden de golfcondities bepaald enerzijds door lokale golfgroei en anderzijds door golfdoordringing vanuit de Noordzee. In het gebied van de Europoort zijn geen golfmetingen beschikbaar. Een specifieke kalibratie en verificatie van SWAN voor dit deelsysteem is derhalve niet mogelijk.

De toegepaste broncode van het SWAN model voor de Europoort is afkomstig uit het HR2006 SWAN model voor de kust. Er is gekozen voor deze versie enerzijds vanwege het feit dat het Europoortgebied in open verbinding staat met de zee en bovendien veel overeenkomsten heeft met de kust en anderzijds omwille van consistentie met de kust. De gebruikte versie is 40.41.AB, [van Leeuwen, 2011]. Voor de golftransmissie door de Noorderdam en de splitsingsdam is de formulering van van der Meer toegepast [van Leeuwen, 2011]. Deze is niet opgenomen in de standaard SWAN versie en daarom is een patch toegepast, patch 40.41.ABa.

Naast de broncode zijn fysische en numerieke instellingen voor SWAN modellering nodig.

De gebruikte fysische instellingen zijn gelijk aan de instellingen van HR2006 voor de Hollandse kust. Deze instellingen luiden:

```
GEN3
QUAD IQUAD = 2
WCAP KOM 2.36e-5 3.02e-3 2.0 1.0 1.0
```

BREAKING 1. 0.73
FRICTION JONSWAP CFJON,=,0.038
LIMITER 10. 10.

Alle numerieke instellingen voor het SWAN model voor de Europoort zijn overgenomen uit het SWAN model voor de Hollandse Kust met één uitzondering. In het Europoort SWAN model is een eerste orde upwind-schema gebruikt, door middel van de optie 'BSBT'. De keuze volgt uit een onderzoek naar het voorkomen van stralenpatronen in het golfveld, zie onderstaande subparagraaf 5.5.4. De toegepaste numerieke instellingen zijn:

PROP BSBT
NUM ACCUR 0.01 0.01 0.01 99. STAT MXITST = 50

Deze instellingen betekenen dat het criterium voor convergentie van een SWAN berekening als volgt is geformuleerd: de relatieve verandering van de Hm0 en Tm01 van de ene iteratie naar de andere is in minimaal 99% van de natte cellen niet meer dan 1%. Het maximale aantal iteraties dat een SWAN berekening doorloopt is vastgesteld op 50.

Samengevat zijn de volgende processen meegenomen in de SWAN modellering voor het Europoortgebied.

- Golfgroei door wind
- Breking ten gevolge van een te grote golfsteilheid (Whitecapping)
- Breking ten gevolge van een beperkte diepte
- Bodemwrijving en
- Quadruplet golfinteracties.

Processen die niet zijn meegenomen zijn:

- Diffractie
- Reflectie
- Triad golfinteracties¹⁶
- Golfopzet in de brekerzone.

5.5.3 Bodemligging SWAN Europoort

De bodemligging van het SWAN model voor het Europoortgebied is gerapporteerd in [van Leeuwen, 2011] en is afkomstig uit de baselinedata 2009 die ten grondslag ligt aan het WAQUA-RMM modelschematisatie. Algemeen is bij het samenstellen van de bodem voorrang verleend aan deze Baselinegegevens. Daar waar nodig zijn deze data gecorrigeerd of aangevuld met behulp van de beschikbare waterkaarten. In overige gebieden waar geen of onvoldoende Baselinedata voorradig waren is met behulp van omringende datapunten, waterkaarten en Google Earth een beredeneerde schatting gemaakt. Eventueel geschatte bodemliggingen t.o.v. NAP zijn daarbij altijd naar beneden afgerond (met lagere bodemligging als gevolg) en nooit naar boven. Dit is enigszins conservatief ten behoeve van de SWAN berekeningen van de golfcondities. Een schematische weergave van de definitieve bodemligging van de Europoort is weergegeven in Figuur 5.6.

16. Dit is conform de HR2006 berekeningen voor de Hollandse kust. Het niet meenemen van Triad golfinteracties wijkt hiermee af van de berekeningen van WTI-2011 in de overige gebieden.

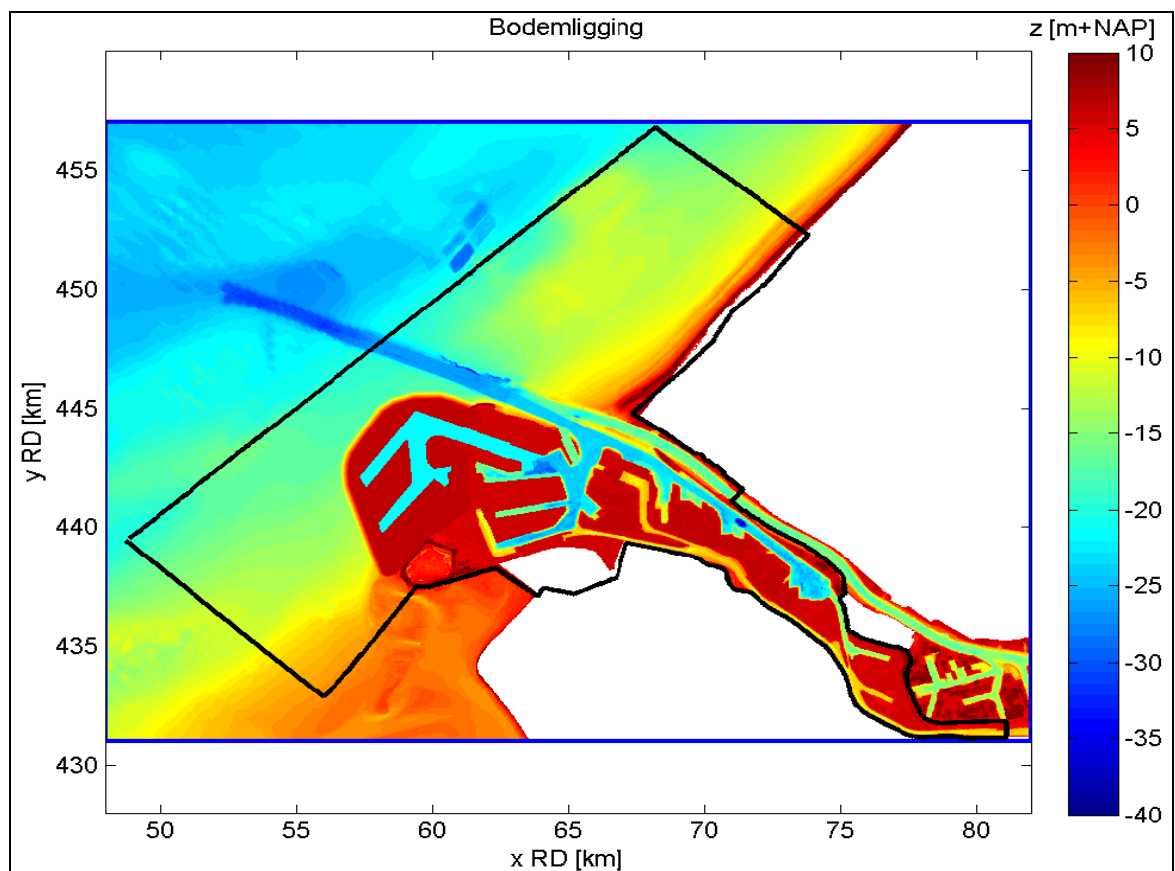
De baselinedata 2009 bevat geen gegevens over de tweede Maasvlakte. Omdat er bij de opzet van het Europoort SWAN model geen gegevens verkrijgbaar waren, is de hoogte van de tweede Maasvlakte gesteld op de ontwerpcondities; de hoogte bedraagt ca. 6,5 m+NAP.

Steigers, dammen en andere obstakels, die niet bestand zijn tegen de toets- en ontwerpcondities zijn verwijderd uit de bodem en hebben daarom geen golfhoogte reducerende functie in SWAN. Meer details met betrekking tot de definitieve bodem voor de Europoort zijn te vinden in [van Leeuwen, 2010].

SWAN biedt de mogelijkheid havendammen, kribben e.d. (die bestand zijn tegen ontwerpcondities) als obstakels te schematiseren al dan niet met een bepaalde doorlaatbaarheid of reflectiecoëfficiënt. In het Europoort SWAN model zijn de volgende constructies als obstakels opgenomen:

- De Noorderdam met het Noorderhoofd
- De Zuiderdam
- De splitsingsdam.

Deze dammen waren al eerder opgenomen in het SWAN model voor de Hollandse Kust ten behoeve van de HR2006. De dimensies en parameterwaarden van deze dammen zijn dan ook overgenomen uit dit model.



Figuur 5.6 Overzicht bodemligging Europoortgebied.

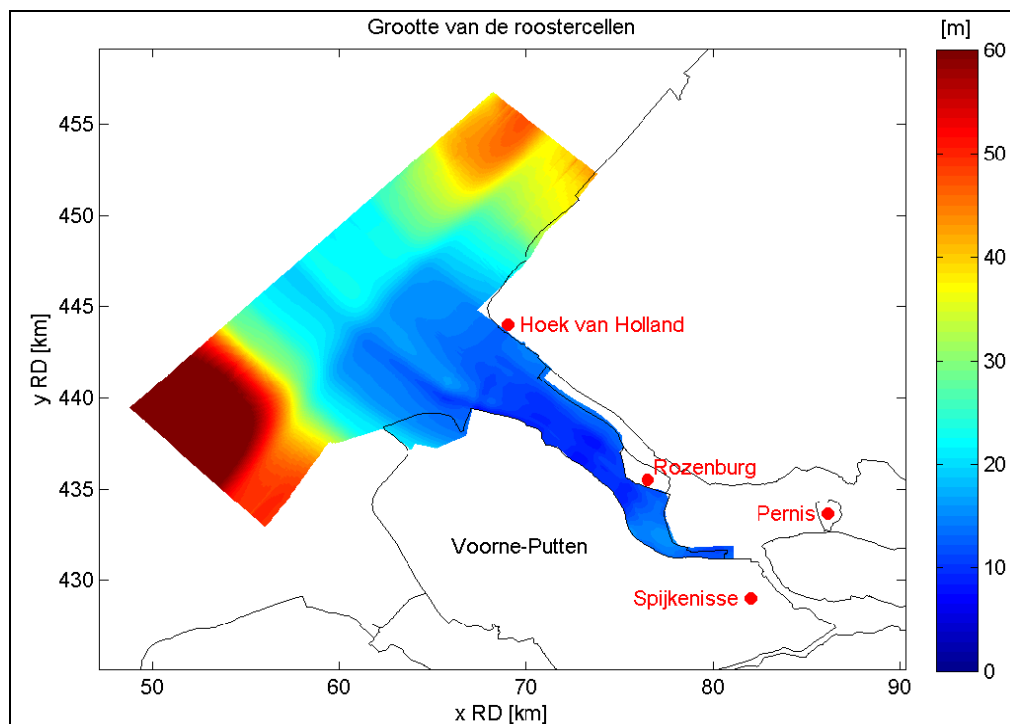
5.5.4 Rekenrooster SWAN Europoort

Er is een curvilineair basisrekenrooster opgezet voor de Europoort. Dit heeft als voordeel dat het WAQUA-RMM rooster als basis kan dienen. Merk op dat het zeedeelte geen onderdeel

uitmaakt van WAQUA-RMM rooster. Dit gebied is opgezet met Seagrid (zie U.S. Geological Survey, 2010) en samengevoegd met het Europoortgebied. Dit rooster vormt de basis

Ten behoeve van het definiëren van een goede roosterresolutie zijn testberekeningen uitgevoerd en onderling vergeleken waarbij het basisrekenrooster telkens verfijnd is. Bij de testberekeningen zijn 3 windrichtingen (270, 300 en 330 graden) en 2 waterstanden (3 en 6 m+NAP) beschouwd. Windkracht is bij de keuze van de roosterresolutie niet beschouwd omdat uit ervaring bij het opzetten van het SWAN model voor het Haringvliet, Hollandsch Diep en Biesbosch geen reden aanwezig was om de windkracht te variëren. Variatie in waterstand is voor het Europoort echter wel gewenst aangezien haventerreinen bij hoge waterstanden (meer dan 5 m+NAP) onder water komen te staan. Tot slot is ook de variatie in de windrichting van belang om zowel de noordoever als de zuidoever van het Europoortgebied te onderzoeken.

Uit resultaten van de uitgevoerde testberekeningen is een keuze gemaakt van het rekenrooster voor het SWAN model van de Europoort. Het gekozen rooster, waarmee de productieberekeningen zijn uitgevoerd, is schematisch weergegeven in Figuur 5.7. Het rekenrooster heeft een gemiddelde celgrootte van ongeveer 10 m in de ξ -richting (zuidwest-noordoost) en 12,5 m in de η -richting (noordwest-zuidoost). Deze celgroottes komen overeen met 2465 respectievelijk 673 cellen in de betreffende richtingen. Het rekenrooster in het zeedeelte is grover dan het rooster in het Europoortgebied. Meer details met betrekking tot het resolutieonderzoek en resolutiekeuze zijn beschreven in [van Leeuwen, 2010].



Figuur 5.7 Overzicht rekenrooster SWAN modellering Europoort.

Uit eerst verkennende berekeningen blijkt in het Europoortgebied een probleem zich voor te doen, namelijk het stralenprobleem¹⁷. Dit probleem is opgelost door het vergroten van het

17. Er blijken verschillen op te treden in golfhoogte en golfperiode die een radiaal altererend patroon vertonen. De stralen van het radialpatroon komen overeen met de richtingssectoren die SWAN gebruikt in de berekeningen.

aantal richtingssectoren van 36 naar 96 in combinatie met een ander numeriek BSBT schema, zie van [van Leeuwen 2010].

5.6 Productierandvoorwaarden SWAN Europoort

Zoals hierboven reeds vermeld staat het Europoortgebied in open verbinding met de Noordzee. Voor een goede golfvoorspelling in het Europoortgebied is het daarom noodzakelijk rekening te houden met golven die vanaf de Noordzee de Europoort binnendringen. In het SWAN model gebeurt dit door golfbrandvoorwaarden op de Noordzeerand op te leggen. Deze golfbrandvoorwaarden volgen uit golfspectra berekend voor de HR2006 van de Hollandse kust.

Naast golfbrandvoorwaarden op de zeerand zijn randvoorwaarden nodig voor waterstanden, windsnelheden en windrichtingen.

Evenals voor het Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch zijn voor het Europoortgebied berekeningen gemaakt voor verschillende uniforme waterstanden in plaats van waterstandsvelden uit WAQUA-RMM berekeningen. De resolutie van de wind en de uniforme waterstand is gelijk aan die voor het Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch, zie paragraaf 4.4.1. Er zijn 6 waterstanden variërend van 1 tot 6 m+NAP beschouwd. Verder zijn 16 windrichtingen van sectoren van 22,5 graden en 7 windsnelheden doorgerekend.

Echter, de waardecombinaties van de windsnelheid en de windrichting die binnen WTI-2011 nodig zijn voor het Benedenriviereengebied in het algemeen en het Europoortgebied in het bijzonder verschillend van die voor de Hollandse Kust. In de HR2006 voor de Hollandse kust zijn alleen westelijke sectoren van 30 graden doorgerekend terwijl in WTI-2011 voor het Europoort (en hele Benedenrivieren) de hele cirkel met sectoren om de 22,5 graden doorgerekend moeten worden. Immers, in het gebied van de Europoort kunnen ook de oostelijke situaties maatgevend zijn. In Totaal zijn 672 SWAN berekeningen uitgevoerd.

Tabel 5.2 Stochastwaarden SWAN berekeningen Europoort en de bijbehorende HR2006 stochastwaarden die de golfbrandvoorwaarden op de Noordzee leveren. De niet exact bij elkaar passende WTI-2011 en HR2006 waarden zijn cursief weergegeven

Waterstand [m+NAP]		Windrichting [graden]		Windsnelheid [m/s]	
WTI-2011	HR2006 kust	WT-2011	HR2006 kust	WTI-2011	HR2006 kust
1	1	22,5	n.v.t.	10	15
2	2	45,5	n.v.t.	15	15
3	3	67,5	n.v.t.	20	20
4	4	90,0	n.v.t.	25	25
5	5	112,5	n.v.t.	30	30
6	6	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		

De in Tabel 5.2 gegeven windsnelheden zijn potentiële windsnelheden. Deze zijn getransformeerd naar open-water windsnelheden, zie voor de transformatie Tabel 3.5.

In WTI-2011 is een potentiële windsnelheid van 10 m/s doorgerekend terwijl de kleinste windsnelheid toegepast in de HR2006 15 m/s bedraagt. Daarnaast bedraagt de grootste windsnelheid in de HR2006 40 m/s terwijl in WTI-2011 productieberekeningen een windsnelheid van 42 m/s nodig is.

In Tabel 5.2 is aangegeven welke stochastwaarden uit de HR2006 de randvoorwaarde levert aan de betrokken stochastwaarde uit WTI-2011. Er is geen interpolatie of extrapolatie toegepast op de randvoorwaarden uit HR2006. De dichtstbijzijnde of de meest conservatieve stochastwaarde uit de HR2006 berekeningen is gebruikt voor de productieberekeningen van WTI-2011. Opgemerkt wordt dat voor de oostelijke windrichtingen geen randvoorwaarden nodig zijn, noch op de zeerand noch op de oostelijke randen die voor waterstanden begrensd zijn door primaire keringen.

5.7 Uitvoeren en controle productieberekeningen SWAN Europoort

De productie van SWAN berekeningen voor het Europoortgebied zijn uitgevoerd op het cluster van Svasek in Schiphol. De berekeningen zijn uitgevoerd op 5 machines, elke met 8 Intel processoren met een kloksnelheid van 3 GHz. Het interne geheugen van elke machine bedraagt 16 GB.

Er zijn procedurele controles en numerieke controles gedefinieerd en uitgevoerd. De procedurele controles hebben betrekking op de printfiles en de aanwezigheid van alle in- en uitvoerbestanden van elke berekening. De numerieke controles bestaan uit een controle op fysische juistheid van de berekende golfparameters, consistentie binnen de uitvoerfiles en verwachte relaties tussen verschillende golfparameters. In dit laatste geval is de controle voornamelijk gericht op de relaties tussen de berekende significante golfhoogte H_{m0} en de periodematen T_{ps} en $T_{m-1,0}$ met de windsnelheid. Alle 672 berekeningen en uitvoerlocaties komen aan de orde.

De uitgevoerde procedurele controles hebben aan het licht gebracht dat alle 672 berekeningen aan alle controles hebben voldaan. Dit betekent dat alle 672 berekeningen goedgekeurd zijn in procedurele zin zodat die onderworpen kunnen worden aan de numerieke controles.

De numerieke controles hebben aangetoond dat de uitgevoerde SWAN berekeningen betrouwbare en fysisch realistische resultaten hebben opgeleverd, niet alleen in de uitvoerlocaties maar ook in de roosterpunten. De controles hebben wel aanleiding gegeven een zevental uitvoerlocaties te verwerpen (4 uit de basisset en 3 uit de natte set uitvoerlocaties).

De numerieke controles hebben ook aangetoond dat er een zeer grote mate van consistentie is tussen de diverse uitvoerbestanden van SWAN.

De productieberekeningen inclusief controles zijn uitvoerig beschreven in [Klein en Kroon 2010c] en [Klein en Kroon 2011].

5.8 Keuze golfparameters uit SWAN berekeningen en vullen databases

Voor de uitvoerlocaties in het Europoortgebied zijn voor alle combinaties van de stochasten zoals beschreven in hoofdstuk 3 de bijbehorende maximale waterstanden (productie WAQUA) en golfparameters (productie SWAN) gevuld in verschillende databases. De keuze van de golfparameters en het vullen van databases vindt verder plaats conform subparagrafen 4.6.1 en 4.6.2.

6 Statistiek en probabilistisch rekenen

6.1 Inleiding

Voor het bepalen van de hydraulische randvoorwaarden is goede keuze van de voor het watersysteem relevante stochasten, inclusief bijbehorende statistieken, erg belangrijk. De in Hydra-zoet opgenomen stochasten voor het Benedenrivierengebied zijn al geïntroduceerd in hoofdstuk 2. De vigerende HR2006 zijn bepaald met het probabilistische model Hydra-B [Geerse, 2003; Slomp et al, 2001]. Voor de bepaling van de concept HR2011 is Hydra-B vervangen door het probabilistische model Hydra-Zoet. In het probabilistische model Hydra-Zoet zijn dezelfde stochasten opgenomen als in Hydra-B. Deze zijn:

- Rivierafvoer Q. Dat is ofwel de Rijnafvoer te Lobith voor een Rijndominante locatie, ofwel de Maasafvoer te Lith voor een Maasdominante locatie. N.B.: beide afvoeren worden niet tegelijk als (gecorrleerde) stochasten meegenomen
- Zeewaterstand M te Maasmond
- Windsnelheid U (statistiek van Schiphol)
- Windrichting R (statistiek van Schiphol). Er worden 16 windrichtingen van 22,5 graden beschouwd: NNO, NO,..., N, die genummerd worden als $r = 1, 2, \dots, 16$
- Beheertoestand Ω van de Maeslant- en Hartelkering (beide keringen blijven open of beide sluiten op de juiste wijze).

De zeewaterstand is in Hydra-Zoet gecorreleerd met de windsnelheid en de windrichting. De afvoer wordt statistisch onafhankelijk beschouwd van de zeewaterstand, de windsnelheid en de windrichting.

Bovengenoemde stochasten en de achtergronden van Hydra-Zoet worden verderop in dit rapport nader omschreven.

6.2 Probabilistisch model Hydra-Zoet

Hydra-Zoet is een probabilistisch model dat in 2010 is ontwikkeld voor alle zoete watersystemen. Naast het Benedenrivierengebied is Hydra-Zoet in het kader van WTI-2011 ook gebruikt voor de bepaling van de hydraulische randvoorwaarden voor het IJsselmeer, inclusief het Ketelmeer en Vossemeer en de Vechtdelta¹⁸. Hydra-Zoet vervangt de bestaande probabilistische modellen Hydra-B, Hydra-M, Hydra-VIJ en Hydra-R (en Hydra-Q¹⁹).

Hydra-B bevat de afvoer als stochast; afhankelijk van de ligging van de locatie is dat de Rijn- of de Maasafvoer. De afvoer is een trage²⁰ stochast en wordt in Hydra-B gemodelleerd met standaardafvoergolven, zie [Geerse, 2003] en [de Waal, 2007]. De snelle stochasten in Hydra-B zijn de zeewaterstand, windsnelheid en windrichting, die variëren op een tijdschaal van een getijperiode. De beheertoestand van de Europoortkering is in Hydra-B eveneens geassocieerd met een getijperiode, zodat de stochast keringtoestand ook als een snelle stochast kan worden beschouwd.

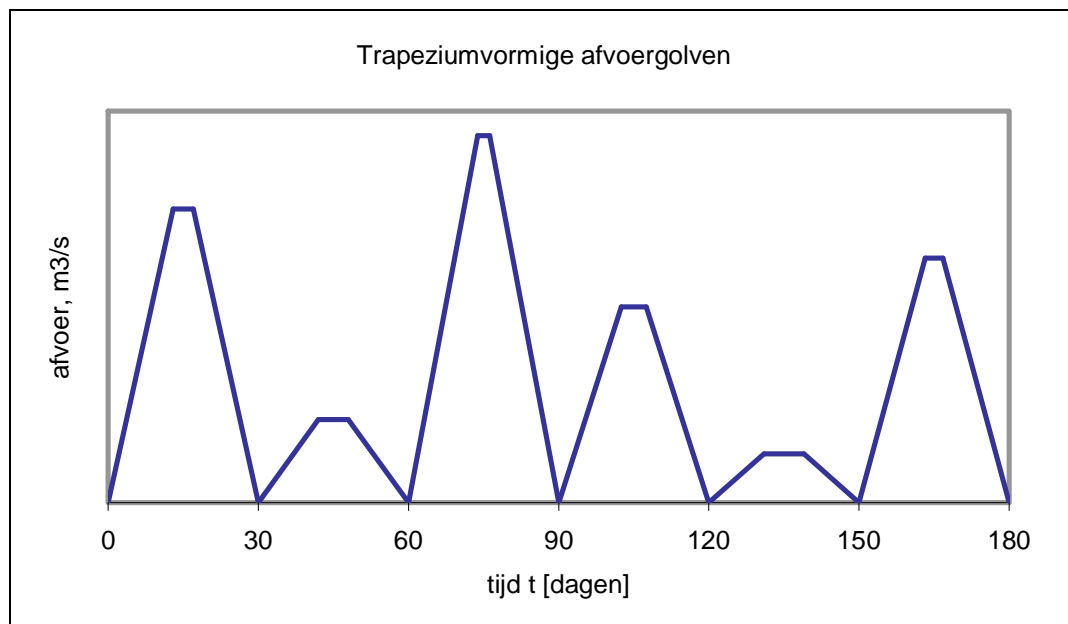
Uitgangspunt voor de ontwikkeling en bouw van Hydra-zoet is het bestaande programma Hydra-VIJ voor de Vecht- en de IJsseldelta. Voor de Vecht- en IJsseldelta is de modelopzet in Hydra-Zoet zelfs volledig identiek aan die in Hydra-VIJ. Het belangrijkste kenmerk van Hydra-Zoet is dat de trage stochasten afvoeren (en ook meerpeilen voor het merengebied)

18. Hydra-zoet is ook geschikt voor het Markermeer, de IJsseldelta en het bovenrivierengebied.

19. Hydra-Q is een variant van Hydra-M voor bekleddingen.

20. Een hoge afvoergolf kan meerdere dagen duren tot enkele weken en varieert langzaam in de tijd.

worden geschematiseerd door trapezia in plaats van golfvormen. De trapezia hebben een basisduur B en een topduur b . Figuur 6.1 illustreert de modellering met trapezia.



Figuur 6.1 Illustratie trapeziumvormige afvoergolven in Hydra-Zoet

Alle snelle stochasten voor het Benedenrivierengebied maar ook andere watersystemen worden in Hydra-Zoet gemodelleerd door constante blokken van 12 uur. Ter illustratie: de tijdbasis van de wind in Hydra-Zoet is alle zoete watersystemen gelijk gesteld aan een blok van 12 uur, in plaats van een blok van 24 uur in Hydra-M voor het IJsselmeergebied en een getijperiode in Hydra-B voor het Benedenrivierengebied. Gedurende genoemd blok van 12 uur zijn de windrichting en de windsnelheid constant verondersteld. De afvoertrapezia worden in Hydra-Zoet verder onderverdeeld in een gelijk aantal windblokken. Met andere woorden, elk trapeziumverloop van de afvoer van basisduur 30 dagen wordt gediscretiseerd in 60 blokken van 12 uur (een halve dag). Voor meer details wordt verwezen naar [Geerse, 2006].

6.3 Marginale statistiek stochasten Benedenrivieren

6.3.1 Afvoerstatistiek Rijn en Maas in Hydra-Zoet

6.3.1.1 Veranderingen ten opzichte van HR2006

De statistiek van de Rijnafvoer geldt voor station Lobith en de Maasafvoer voor station Lith. In het kader van WTI-2011 is onderzoek gedaan naar de hoogte van de maatgevende afvoer van de Rijn en de Maas bij deze stations. Daarbij is gebruik gemaakt van gemeten afvoeren van de hydrologische jaren 1901 t/m 2008 voor de Rijn bij Lobith en 1911 t/m 2008 voor de Maas bij Borgharen. De berekende 1/1250 afvoeren van de Rijn en de Maas bedragen respectievelijk $15700 \text{ m}^3/\text{s}$ en $3845 \text{ m}^3/\text{s}$. De verschillen met de vigerende maatgevende afvoeren van de Rijn en de Maas zijn erg klein. Details met betrekking tot uitgevoerde onderzoeken zijn te vinden in [Tijssen, 2010ab]. Verlenging van de meetreeks van de Rijn te Lobith en de Maas bij Borgharen geven ook geen aanleiding voor aanpassing van de golfvormen; zie [Tijssen, 2009ab].

Op basis van bovengenoemde onderzoeksresultaten is besloten om de vigerende afvoerstatistiek van zowel de Rijn als de Maas aan te houden en te gebruiken in Hydra-Zoet.

6.3.1.2 Statistiek Rijnafvoer te Lobith

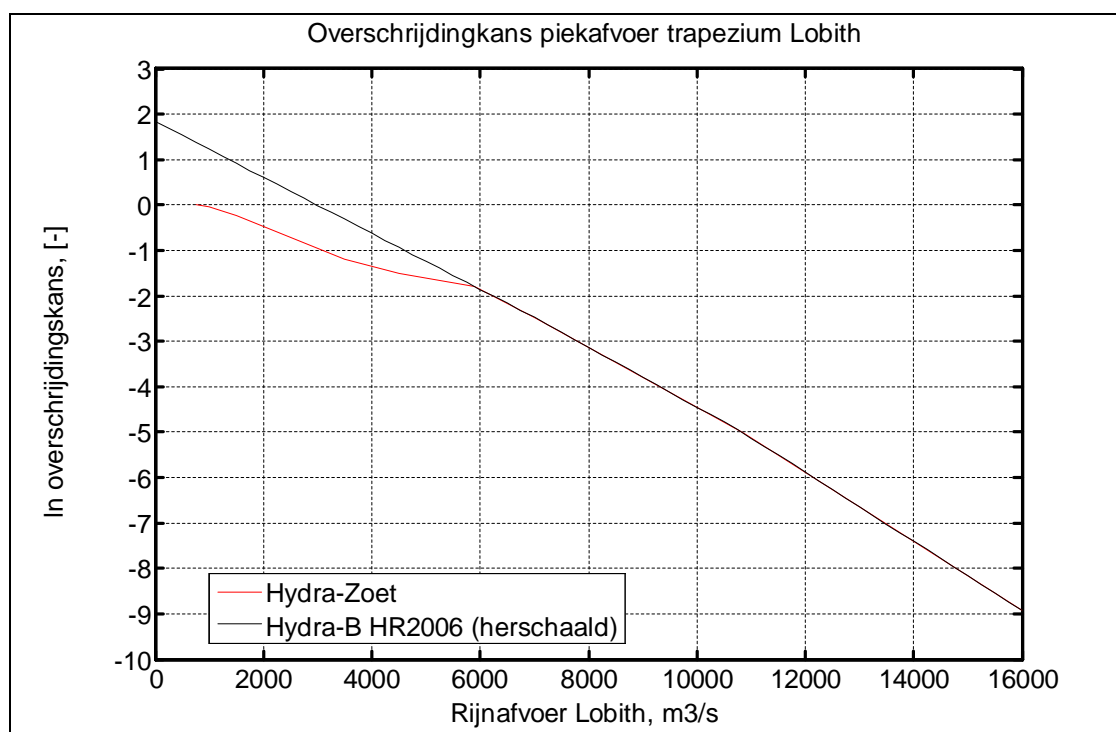
Zoals hierboven al vermeld worden afvoeren van de Rijn gemodelleerd met trapezia. Een en ander betekent dat de statistiek van Hydra-B zodanig omgezet dient te worden in een vorm die vereist en geschikt is voor Hydra-Zoet. Gerelateerd aan de modellering met trapezia met basisduur van 30 dagen dient de volgende statistische informatie afgeleid te worden, voor zowel Lobith als Lith:

- Overschrijdingskans $P(Q>q)$ van de piekafvoer q , hierbij is q het maximum van het trapezium,
- Topduur $b(q)$, dit is de duur van het horizontale plateau van het trapezium met piekwaarde q .

Voor de hogere piekafvoeren, met terugkeertijd groter dan circa eens per jaar, wordt $P(Q>q)$ gevonden door een simpele herschaling van de overschrijdingsfrequentielijn (werklijn) $F(q)$ uit Hydra-B. Er geldt dan $P(Q>q) = F(q)/6$. Daarnaast dient voor deze piekwaarden van de afvoer de topduur $b(q)$ zo gekozen te worden dat deze redelijkerwijs overeenstemt met de standaard afvoergolfvormen uit Hydra-B.

Voor de lagere piekafvoeren, lager dan de piekafvoer met terugkeertijd van circa één jaar, worden $P(Q>q)$ en $b(q)$ zo gekozen dat ze in combinatie met elkaar de momentane kansen van de afvoeren uit Hydra-B opleveren. Voor details met betrekking tot het bepalen van de benodigde afvoerstatistiek voor Hydra-Zoet wordt verwezen naar [Geerse, 2009].

De gekozen overschrijdingskans $P(Q>q)$ is weergegeven in Figuur 6.2.



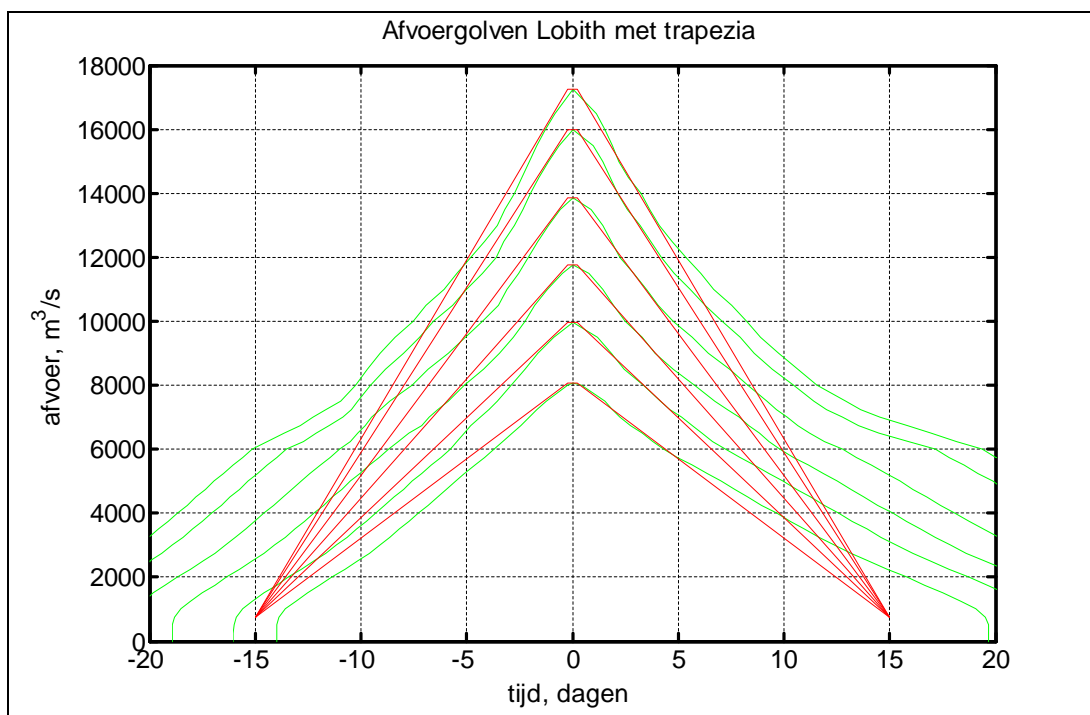
Figuur 6.2 Overschrijdingskans piekafvoeren Rijn bij Lobith, in Hydra-Zoet en Hydra-B.

Figuur 6.2 laat zien dat de overschrijdingskansen van de piekafvoeren in Hydra-Zoet en Hydra-B samenvallen voor afvoerpieken groter dan ca. 6000 m³/s. Dit is de afvoerpiek²¹ die

21. Een afvoerpiek met $T = 1$ jaar is gelijk aan 5859.3 m³/s

een gemiddelde terugkeertijd van ca. één jaar heeft. Voor lagere afvoerpieken verschilt de Hydra-zoet lijn met die van Hydra-B. Dit deel van de overschrijdingskans van Hydra-B hoeft echter niet gereproduceerd te worden omdat het niet relevant is voor de berekeningen. Merk op dat voor lagere afvoerpieken in Hydra-B de momentane kans wordt gebruikt.

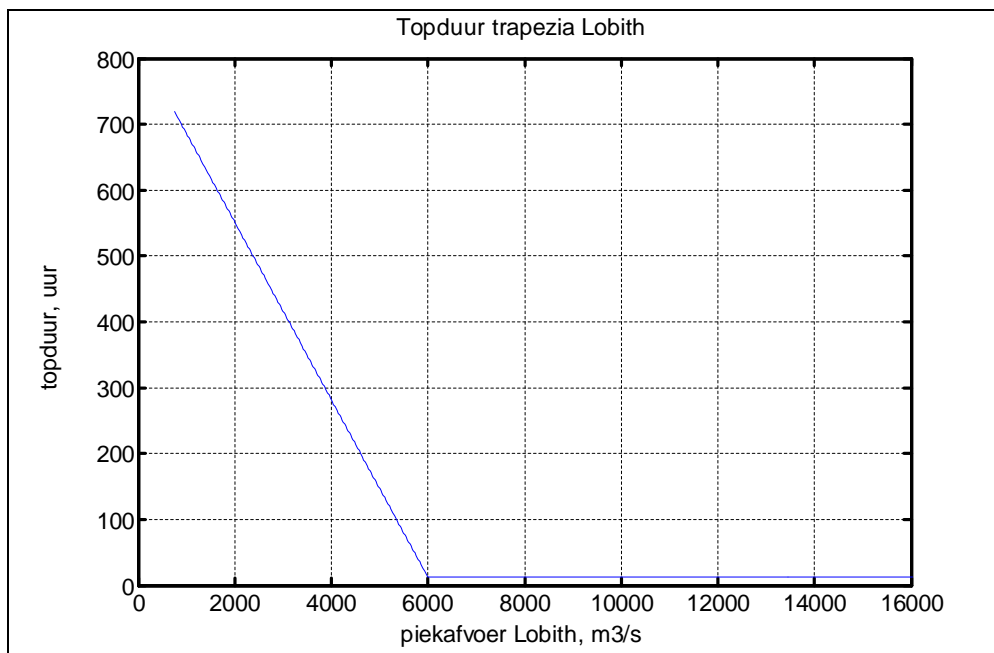
De basisduur van de trapezia behorende bij de Rijnafvoer in Hydra-Zoet is 30 dagen (720 uur). De trapezia zijn symmetrisch in de tijd; d.w.z. dat de voor- en achterflank dezelfde duur hebben. Voor piekafvoeren groter dan $6000 \text{ m}^3/\text{s}$ wordt een vaste topduur gekozen van 12 uur. In Figuur 6.3 zijn de afvoergolven uit Hydra-B tezamen met de trapezia in Hydra-Zoet weergegeven. Figuur 6.3 laat zien dat de hogere delen van de standaard afvoergolven uit Hydra-B goed worden weergegeven door de trapezia met basisduur van 30 dagen. Voor de lagere²² delen van de afvoergolven geldt dat niet. Dat laatste is echter niet bezwaarlijk. De Hydra-B resultaten zijn namelijk vrijwel ongevoelig voor het tijdsverloop van lagere delen van de afvoergolven, zie [Geerse, 2003].



Figuur 6.3 Trapezia van Rijnafvoer bij Lobith in Hydra-zoet, tezamen met de standaard golfvormen uit Hydra-B.

De topduur $b(q)$ van de afvoertrapezia is afhankelijk van de piekafvoer. Voor de piekafvoeren lager dan $6000 \text{ m}^3/\text{s}$ wordt $b(q)$ gekozen zoals weergegeven in Figuur 6.4. Voor de Rijn bij Lobith geldt een minimum afvoer van $750 \text{ m}^3/\text{s}$. Voor deze minimumwaarde van de afvoer is $b(q)$ gelijk aan 720 uur (30 dagen), waarna $b(q)$ lineair afneemt tot 12 uur voor $q = 6000 \text{ m}^3/\text{s}$, waarna $b(q)$ constant blijft op de waarde van 12 uur voor afvoeren groter dan $6000 \text{ m}^3/\text{s}$. Zoals hierboven vermeld reproduceert deze keuze voor $b(q)$, in combinatie met de keuze van $P(Q>q)$, de momentane kansen uit Hydra-B.

22. Bij de standaard instellingen van Hydra-B worden de delen van de afvoergolven onder de $6000 \text{ m}^3/\text{s}$ niet gebruikt. Bij die standaard instellingen wordt namelijk alleen de momentane kans van de afvoer gebruikt.



Figuur 6.4 Topduur $b(q)$ van het trapezium voor de Rijn afvoer bij Lobith.

6.3.1.3 Statistiek Maasafvoer te Lith

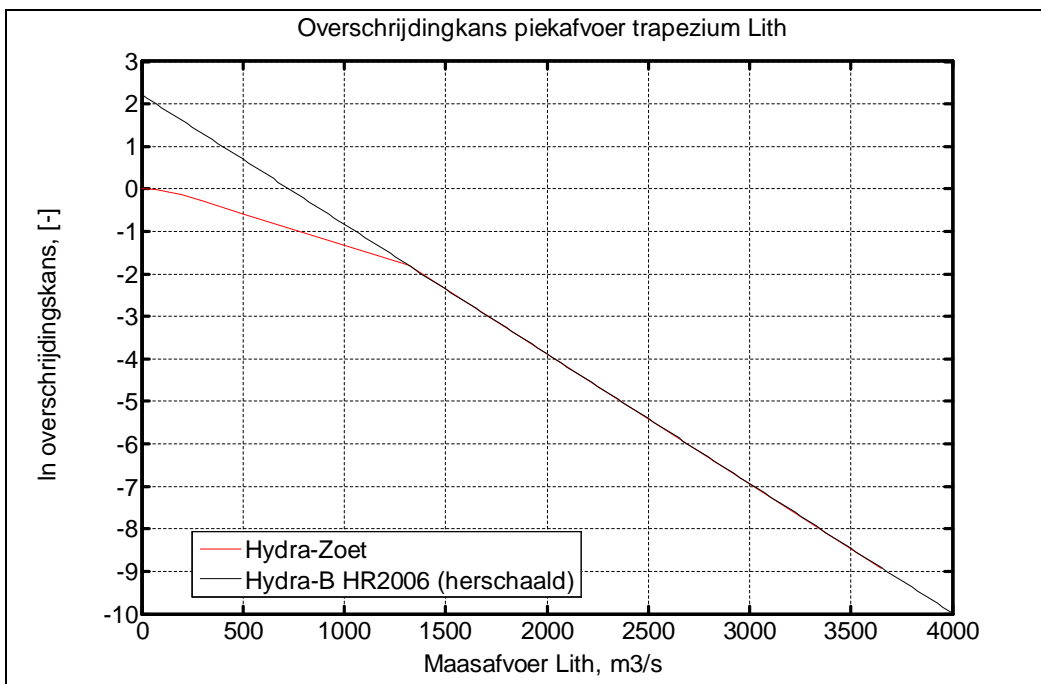
Evenals de Rijnafvoeren zijn de Maasafvoeren bij Lith in Hydra-Zoet gemodelleerd met trapezia met basisduur van 30 dagen. Op analoge wijze, zie subparagraaf 6.3.1.2, is de statistiek van de Maasafvoer te Lith voor Hydra-Zoet afgeleid uit de statistiek van Hydra-B. Evenals voor de Rijnafvoer dient voor de Maasafvoer bij Lith afgeleid te worden:

- De overschrijdingskans $P(Q>q)$ van de piekafvoer q , hierbij is q het maximum van het trapezium
- De topduur $b(q)$, dit is de duur van het horizontale plateau van het trapezium met piekwaarde q .

Voor de hogere piekafvoeren, met terugkeertijd groter dan circa eens per jaar, wordt $P(Q>q)$ gevonden door een simpele herschaling van de overschrijdingsfrequentielijn (werklijn) $F(q)$ uit Hydra-B. Er geldt dan $P(Q>q) = F(q)/6$. Daarnaast dient voor deze piekwaarden van de afvoer de topduur $b(q)$ zo gekozen te worden dat deze redelijkerwijs overeenstemt met de standaard afvoergolfvormen uit Hydra-B voor de Maas bij Lith.

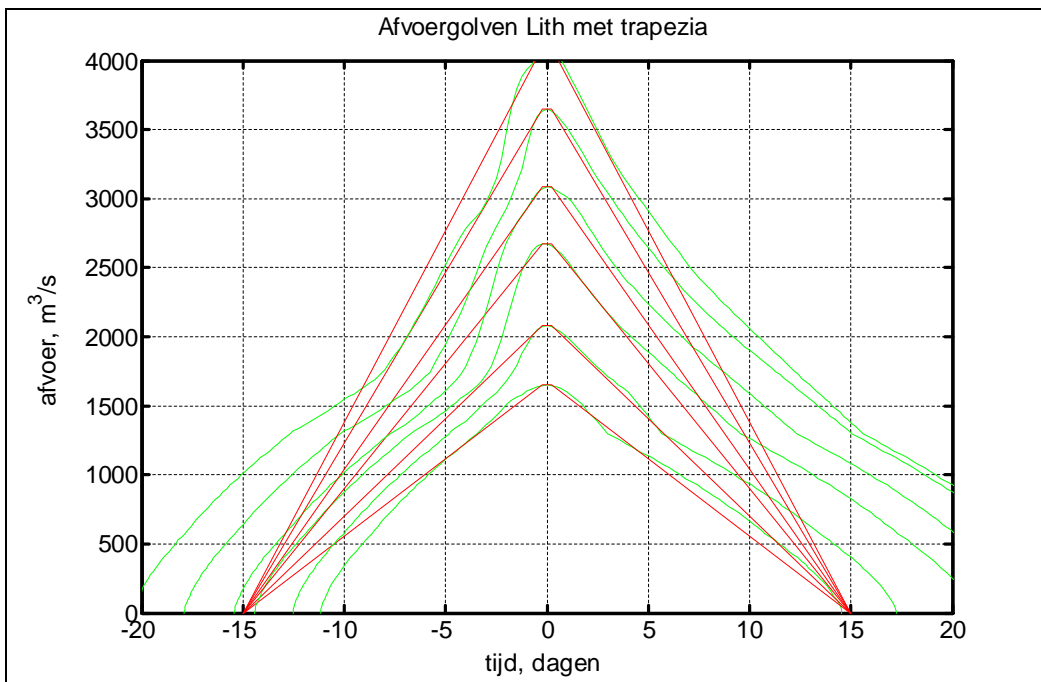
Voor de lagere piekafvoeren, lager dan de piekafvoer met terugkeertijd van circa één jaar, worden $P(Q>q)$ en $b(q)$ zo gekozen dat ze in combinatie met elkaar de momentane kansen van de afvoeren uit Hydra-B voor Lith opleveren. Voor details met betrekking tot het bepalen van de benodigde afvoerstatistiek voor Hydra-Zoet wordt verwezen naar [Geerse, 2009].

De overschrijdingskans van de Maasafvoer bij Lith zoals geïmplementeerd in Hydra-zoet is beschreven in Figuur 6.5.



Figuur 6.5 Overschrijdingskans piekafvoeren Maas bij Lith, in Hydra-Zoet en Hydra-B

De basisduur van de trapezia van de Maas bij Lith is 30 dagen. De trapezia zijn symmetrisch in de tijd gekozen, hoewel niet-symmetrische trapezia beter fitten. Uit eerdere berekeningen blijkt namelijk dat voornamelijk het volume en niet de vorm bepalend is voor de Hydra berekeningen, zie [Geerse 2009].

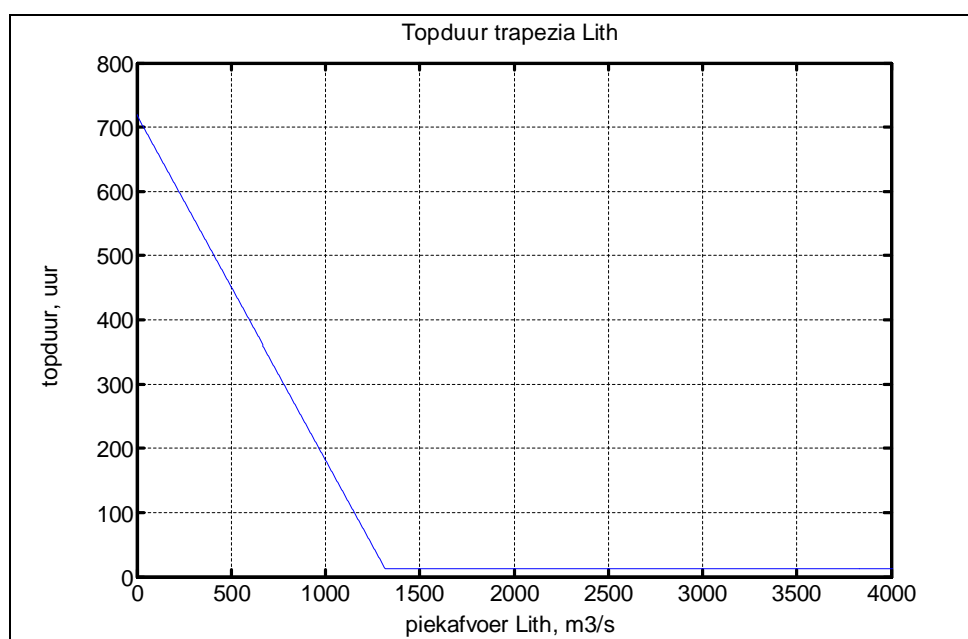


Figuur 6.6 Trapezia van Maasafvoer bij Lith in Hydra-zoet, tezamen met de standaard golfvormen uit Hydra-B

Voor piekafvoeren groter dan 1300 m³/s wordt een vaste topduur gekozen van 12 uur. In Figuur 6.6 zijn de afvoergolven uit Hydra-B tezamen met de trapezia in Hydra-Zoet

weergegeven. Figuur 6.3 laat zien dat de hogere delen van de standaard afvoergolven uit Hydra-B goed worden weergegeven door de trapezia met basisduur van 30 dagen. Voor de lagere²³ delen van de afvoergolven geldt dat niet. Dat laatste is echter niet bezwaarlijk, zie subparagraaf 6.3.1.2 hierboven.

Voor de piekafvoeren van de Maas bij Lith lager dan 1300 m³/s wordt de topduur $b(q)$ gekozen als weergegeven in Figuur 6.7: voor de minimum afvoer van 0 m³/s is de topduur gelijk aan 720 uur, waarna $b(q)$ lineair afneemt tot een duur van 12 uur voor $q = 1300$ m³/s, waarna vervolgens $b(q)$ constant blijft op 12 uur voor afvoerpieken hoger dan 1300 m³/s.



Figuur 6.7 Topduur $b(q)$ van het trapezium voor de afvoer van de Maas bij Lith.

6.3.2 Windstatistiek

Voor de windstatistiek ten behoeve van de probabilistische berekeningen voor de Benedenrivieren is conform HR2006 (Hydra-B) windstation Schiphol aangehouden. De statistische invoer van de wind in Hydra-Zoet bestaat uit twee belangrijke onderdelen:

- Overschrijdingsfrequentie van de windsnelheid gegeven de windrichting,
- Momentane kans op de windrichting.

De windstatistiek is vrijwel onveranderd ten opzichte van HR2006. De enige aanpassing betreft de tijdschaal. In Hydra-B wordt de windsnelheid gemodelleerd door constante blokken van een getijperiode (12,25 uur); Hydra-Zoet veronderstelt, uit uniformiteitsoverwegingen met andere zoete watersystemen, uniforme blokken van een halve dag (12 uur) voor de windsnelheid. Het effect van deze aanpassing is verwaarloosbaar [Geerse, 2009].

Naast de statistische parameters gebruikt Hydra-Zoet als invoer ook een transformatie tabel waarmee potentiële wind vertaald kan worden naar een open-water windsnelheid. De onderbouwing van deze vertaling wordt gegeven in [de Waal, 2003, 2010].

23. Bij de standaard instellingen van Hydra-B worden de delen van de afvoergolven onder de 1300 m³/s niet gebruikt. Bij die standaard instellingen wordt namelijk alleen de momentane kans van de afvoer gebruikt.

6.3.3 Zeewaterstand

De zeewaterstand is vrijwel onveranderd ten opzichte van HR2006. De enige aanpassing betreft de tijdschaal. In Hydra-B wordt de zeewaterstand gemodelleerd door constante blokken van een getijperiode (12,25 uur); Hydra-Zoet veronderstelt, uit uniformiteitsoverwegingen met andere zoete watersystemen, uniforme blokken van een halve dag (12 uur) voor de zeewaterstand. Het effect van deze aanpassing is verwaarloosbaar [Geerse, 2009].

6.3.4 Maeslant en Hartelkering

Zoals in hoofdstuk 3 vermeld bevinden zich in het Benedenrivierengebied diverse beweegbare keringen en spuisluizen. Voor de bepaling van hydraulische randvoorwaarden binnen WTI-2011 wordt alleen de onzekerheid rond de beheersituatie van de Maeslant- en Hartelkering als stochast beschouwd. De overige keringen worden verondersteld te functioneren volgens de vastgestelde normen en procedures. Deze aanpak is onveranderd ten opzichte van HR2006.

De Maeslant- en Hartelkering sluiten op basis van een sluitcommando, gebaseerd op de sluitcriteria beschreven 3.2.5. Na het afgeven van een sluitcommando is er een kans dat de keringen falen. In de berekeningen wordt slechts met één manier van falen rekening gehouden, namelijk dat de keringen geheel open blijven staan. In de berekeningen wordt bovendien uitgegaan van afhankelijk falen. Dit betekent dat óf de keringen beide tegelijkertijd falen óf beide tegelijkertijd functioneren op de juiste wijze. Daarom kan de beheersituatie van de Maeslant- en Hartelkering gemodelleerd worden door één stochast met slechts twee uitkomsten: open keringen (bij falen of niet hoeven sluiten) en dichte keringen. De faalkans voor de keringen wordt uitgedrukt als de kans op falen per sluitvraag. Deze kans is in Hydra-Zoet gelijk aan 0,01 en is onveranderd ten opzichte van Hydra-B.

7 Concept hydraulische randvoorwaarden

7.1 Berekeningen

De methode en technieken beschreven in de vorige hoofdstukken zijn gebruikt voor de berekeningen van de concept toetspeilen en belastingniveaus. De toetspeilen betreffen de maatgevende waterstanden in de as van de rivier behorende bij de normfrequentie/veiligheidsnorm. Een maatgevende waterstand of toetspeil wordt verkregen middels een berekening met Hydra-Zoet op basis van het faalmechanisme overloop. Het hydraulische belastingniveau is een benodigde kruinhoogte gebaseerd op het faalmechanisme golfoverslag, en heeft betrekking op de oeverlocaties.

Voor alle aslocaties, zie Figuur 3.15, in het Benedenrivierengebied zijn twee berekeningen gemaakt voor verschillende normfrequenties: een berekening met Hydra-B op basis van de HR2006 database om de vigerende onafgeronde HR2006 opnieuw te bepalen en een berekening met Hydra-Zoet op basis van de nieuwe samengestelde database zoals beschreven in subparagraaf 4.6 om de concept toetspeilen af te leiden. Voor het Europoortgebied, waar seiches een rol spelen, zijn wederom twee berekeningen gemaakt met beide Hydra's: met en zonder seiches toeslagen. De berekeningsresultaten zijn vergeleken met de vigerende HR2006. Bij de vergelijking en verschilanalyse zijn ook de illustratiepunten beschouwd.

Naast waterstanden en toetspeilen zijn ook berekeningen gemaakt op basis van het faalmechanisme overslag, ter verkrijging van de hydraulische belastingniveaus (HBNs). Er bestaat geen kant en klare lijst met officiële HBNs van HR2006 die vergeleken kan worden met de berekende HBNs van HR2011. Die vergelijking is dus niet direct gemaakt, mede omdat de oeverlocaties van Hydra-Zoet verschillen van die van Hydra-B. Om toch inzicht te krijgen in de onderlinge verschillen zijn voor een beperkte set locaties berekeningen gemaakt. Hiertoe is elke vijfde oeverlocatie uit de volledige databases beschouwd. Deze onvolledige doorsnede geeft naar verwachting een goed beeld van de verschillen die zoal optreden. Er is gerekend met een standaard dijkprofiel van 1 op 3, zonder voorland, en een kritisch overslagdebiet van 1 l/s/m. Dit is dus een theoretische vergelijking op basis van fictieve dijkgegevens en geen toetsing. Voor de toetsing dient een beheerder namelijk de daadwerkelijke dijkgegevens (profielen, berm, voorlanden, e.d.) te gebruiken, wat kan leiden tot andere belastingniveaus.

Bij de vergelijking en verschilanalyse is conform hoofdstuk 4 onderscheid gemaakt tussen de bredere wateren, die beslaan enerzijds het Europoortgebied en anderzijds het gebied van de Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch, en de smalle wateren in de Benedenrivieren.

Bredere wateren

In de bredere wateren zijn berekeningen gemaakt met Hydra-Zoet voor 165 uitvoerlocaties verspreid over het gebied, zowel op basis van een dataset met SWAN resultaten als – ter vergelijking – op basis van een dataset met Bretschneider berekeningen. De uitvoerlocaties van beide datasets voor deze verschilanalyse zijn identiek en betreffen ongeveer elke vijfde locatie uit de volledige databases. De verschillen zijn geanalyseerd en verklaard. Er wordt op gewezen dat voor de brede wateren de mogelijke verschillen tussen beide datasets die in deze analyse naar voren komen, volledig zijn toe te schrijven aan het gebruik van SWAN versus Bretschneider. SWAN is een spectraal model dat ook spectrale golfparameters berekent. De golfperiodemaat die Bretschneider berekent is eigenlijk een piekperiode T_p die

op basis van verhoudingen van een standaardspectrum omgerekend wordt naar de spectrale $T_{m-1,0}$.

In het Europoortgebied spelen naast lokaal opgewekte golven niet alleen golven vanuit zee een rol maar ook seiches. De seichetoeslag is achterwege gelaten bij het bepalen van de HBNs met Hydra-Zoet. Voor het bepalen van de verschillen tussen SWAN en Bretschneider maakt dat niets uit. De doordringing van zeegolven is wel in de SWAN berekeningen verdisconteerd, in de Bretschneider berekeningen niet. Bij de toepassing van Bretschneider voor de HR2006 in Europoort, is de doordringing van zeegolven met PHAROS bepaald en vervolgens als toeslagen verdisconteerd. Die component is nu niet meegenomen in de bepaling van de op Bretschneider gebaseerde hydraulische belastingniveaus.

Alle overige gegevens in Hydra-Zoet zoals de ligging van de uitvoerlocaties zijn voor de bredere wateren gelijk voor zowel de SWAN en als de Bretschneider berekeningen.

Smalle wateren

Voor de smalle wateren zijn ook berekeningen gemaakt ten behoeve van de HBNs. In tegenstelling tot de bredere wateren, waar de berekeningen alleen met Hydra-Zoet zijn uitgevoerd, zijn voor de smalle wateren zowel Hydra-Zoet als Hydra-B toegepast. In beide gevallen zijn de golfparameters bepaald aan de hand van Bretschneiderberekeningen.

In paragraaf 7.2 wordt een beknopt overzicht gegeven van de verschillen in toetspeilen tussen de HR2006 en de berekende concept HR2011. In paragraaf 7.3 worden de belastingniveaus beschouwd. Voor een uitgebreide beschrijving van de resultaten, vergelijking en verschilanalyse wordt verwezen naar [Chbab et al, 2012].

7.2 Vergelijking en verschilanalyse toetspeilen

De berekende concept toetspeilen zijn weergegeven Bijlage B. Een globaal overzicht van de verschillen tussen de HR2006 en de berekende concept HR2011 is schematisch weergegeven in Figuur 7.1.

De berekende concept toetspeilen laten een consistent beeld zien. Het algemene beeld is dat er ten opzichte van de vigerende toetspeilen verhoging optreedt van de concept toetspeilen in de hele benedenstroomse delen van het Benedenrivierengebied, waar de stromopzetduur effect heeft. In delen van het Europoortgebied en de bredere wateren van het Haringlviet, Hollandsch Diep en de Biesbosch zijn de berekende concept toetspeilen hoger dan de vigerende HR2006. Het effect van de verlengde stormopzetduur is in dit gebied het grootst. Hier zijn de concept toetspeilen maximaal circa 0,3 m hoger ten opzichte van de HR2006. Dit treedt op langs het Wantij en de Amer.

Verlaging van de berekende concept toetspeilen treedt op langs de bovenstroomse delen van het Benedenrivierengebied. In dit gebied is het effect van de stormopzetduur het kleinst. De grootste verlagingen van de concept toetspeilen treden op langs de Boven Merwede en de Bergsche Maas; de maximale verlaging daar bedraagt -0,38 m.

Uit de berekeningen blijkt verder dat het verschil in toetspeil tussen de concept toetspeilen en HR2006 nauwelijks afhangt van de normfrequentie. Het verschil tussen de berekende concept toetspeilen en de vigerende HR2006 is even groot voor de relevante normfrequenties in het Benedenrivierengebied.



Figuur 7.1 Overzicht van de verschillen tussen de berekende concept toetspeilen en vigerende HR2006

Figuur 7.1 Overzicht van de verschillen tussen de berekende concept toetspeilen en vigerende HR2006

laat zien dat de berekende concept toetspeilen (zonder seiches toeslagen) hoger zijn dan de vigerende toetspeilen in HR2006. Deze verhoging wordt veroorzaakt door de aangepaste stormopzetduur. Het verschil in toetspeil zonder seiches toeslagen varieert tussen 0,01 m voor de meest benedenstroomse locaties en 0,20 m voor de meest bovenstroomse locaties. Het verschil tussen de normfrequenties 1/4000 en 1/10000 per jaar is marginaal (maximaal 0,02 m).

Zoals eerder beschreven in dit rapport zijn in het kader van WTI-2011 de seiches toeslagen geactualiseerd. De geactualiseerde seiches toeslagen zijn lager dan de vigerende toeslagen, en leiden dan ook tot lagere maatgevende waterstanden in het Europoortgebied. Een overzicht van de berekende maatgevende waterstanden waarin seiches toeslagen zijn verwerkt, is weergegeven in Figuur 7.2.



Figuur 7.2 Overzicht van de verschillen tussen de berekende getallen (toetspeil +toeslag) in WTI-2011 en HR2006.

In het gebied binnen de stormvloedkeringen is de verhoging van de concept toetspeilen voornamelijk veroorzaakt door de verlengde stormopzetsduur in combinatie met de tweedimensionale modellering met WAQUA. In het gebied dat afvoergedomineerd is zorgt de tweedimensionale modellering van het gebied rondom de Sliedrechtse Biesbosch met WAQUA-RMM en het aangepaste bodemprofiel voor een verlaging van de toetspeilen.

Naast de toetspeilen zijn voor alle aslocaties de illustratiepunten bepaald en vergeleken met de illustratiepunten behorende bij de vigerende HR. De verschillen in illustratiepunten zijn klein. Voor een uitgebreide beschrijving van de verschilanalyse van de toetspeilen wordt verwezen naar [Chbab et al, 2012].

Tabel 7.1 Verschillen concept toetspeilen met seiches toeslagen t.o.v. HR2006 per buitenwater

Buitenwater	Dijkringen	Effect	Gemiddeld [m]	Minimum [m]	Maximum [m]
Nieuwe Waterweg	14, 19	verlagend	-0.02	-0.07	-0.01
Nieuwe Maas	14, 15, 17 en 18	verhogend/verlagend	-0.01	-0.06	0.05
Lek	15, 16	idem	-0.01	-0.16	0.07
Boven Merwede	16, 24	verlagend	-0.32	-0.38	-0.25
Beneden Merwede	16	verlagend/verhogend	0.02	-0.28	0.10
Noord	16 en 17	verhogend	0.05	0.00	0.07
Oude Maas	17 en 20	verhogend/verlagend	0.05	-0.03	0.10
Calandkanaal	19	idem	-0.06	-0.08	0.03
Hartelkanaal	20	idem	-0.02	-0.18	0.09
Spui	20 en 21	verhogend	0.07	0.04	0.10
Haringvliet	20, 21 en 25	verhogend	0.11	0.07	0.15
Dortsche Kil	21 en 22	verhogend	0.12	0.07	0.17
Hollandsch Diep	21, 22 en 34	verhogend	0.16	0.10	0.20
Wantij	22	verhogend	0.16	0.06	0.28
Nieuwe Merwede	22 en 23	verhogend/verlagend	0.00	-0.30	0.18
Biesbosch	23 en 24	verhogend	0.13	0.00	0.20
Maas	24	verlagend	-0.33	-0.34	-0.32
Bergsche Maas	34, 34a en 35	verhogend/verlagend	-0.15	-0.31	0.16
Amer	34 en 34a	verhogend	0.21	0.19	0.22

7.3 Vergelijking en verschilanalyse belastingniveaus

Bij de vergelijking en verschilanalyse is onderscheid gemaakt tussen smalle en bredere wateren. Er wordt op gewezen dat de golfparameters in de bredere wateren bepaald zijn met SWAN en in de smalle wateren met Bretschneider.

Bredere wateren

De verschilanalyse voor de brede wateren richt zich volledig op de invloed die toepassing van SWAN of Bretschneider heeft op het HBN. Die invloed is niet eenduidig. In sommige gebieden leidt SWAN tot een hoger HBN, in andere gebieden is dit Bretschneider. Gemiddeld over de beschouwde locaties is de berekende kruinhoogte op basis van SWAN 0.07 m hoger dan op basis van Bretschneider. De verschillen zijn terug te voeren op onderstaande oorzaken. De resultaten van SWAN zijn in vrijwel alle gevallen realistischer.

- Steile oever met diepe geul: SWAN hoger. SWAN benut de kromme geullengte beter en heeft daardoor een grotere strijklengte. Bovendien is de geul meestal dieper dan de

representatieve diepte op een Bretschneiderprofiel die ook middelt over ondiepere delen. SWAN leidt in situaties met steile oevers met diepe geulen tot hogere HBNs.

- Ondiep voorland met diepe geul: Omdat bij Bretschneider per raai slechts met één karakteristieke bodemligging gerekend kan worden, wordt de ondiepte als het ware weggemiddeld, waardoor Bretschneider hogere resultaten geeft.
- Complexe bodemgeometrie: Bij complexe gebieden is het vrijwel onmogelijk om de bodemligging in één karakteristieke waarde te vangen, zoals benodigd voor een Bretschneiderberekening. Dit leidt altijd tot verschillen.
- Afgeschermd gebied: In afgeschermd gebied zal SWAN over het algemeen hogere golven berekenen omdat de golven kunnen bijdraaien.
- Europoort: Bretschneider berekent hogere waarden omdat de haventerreinen niet zijn meegenomen in de bepaling van de effectieve strijklengtes en gemiddelde waterdieptes. De met Bretschneider berekende golven zijn dan ook onrealistisch voor het Europoortgebied.

Smalle wateren

De verschillen tussen de resultaten van de Hydra-Zoet en de Hydra-B berekeningen sluiten over het algemeen aan bij de verschillen die gevonden zijn in de analyse voor de maatgevende waterstanden en toetspeilen. In het benedenstroomse deel van de Lek neemt het belastingniveau bij een standaard profiel met enkele decimeters toe ten opzichte van HR2006. Op de Boven Merwede en het bovenstroomse deel van de Bergsche Maas is het concept-HBN van 2011 enkele decimeters lager dan van 2006. Waar de Bergsche Maas bij de Biesbosch komt is het HBN van 2011 juist hoger dan van 2006, tot wel een halve meter. In de overige gebieden zijn de verschillen over het algemeen beperkt tot ongeveer een decimeter met enkele individuele uitschieters. Zie voor details [Chbab et al, 2012].

8 Samenvatting en conclusies

8.1 Samenvatting

In de Waterwet (2009) is vastgelegd dat iedere zes jaar de primaire waterkeringen in Nederland moeten worden getoetst. Voor de toetsing stelt de Minister van Infrastructuur en Milieu Hydraulische Randvoorwaarden (HR) beschikbaar evenals rekenregels in de vorm van het voorschrift toetsen op veiligheid (VTV). Bij de bepaling van de hydraulische randvoorwaarden wordt onderscheid gemaakt tussen diverse watersystemen in Nederland. Onderhavig rapport beschrijft de werkwijze voor het vervaardigen van de concept hydraulische randvoorwaarden, concept HR2011, voor het Benedenrivierengebied. Het Benedenrivierengebied maakt onderdeel uit van het project HR-zoet van het Wettelijke Toetsinstrumentarium WTI-2011.

Het project WTI-2011 is door Deltares uitgevoerd in opdracht van DGW onder begeleiding van de Waterdienst van RWS. De kwaliteitsborging en inhoudelijke afstemming binnen WTI-2011 vonden plaats in de klankbordgroep van het Expertise Netwerk voor Waterveiligheid (ENW), waarin leden uit verschillende ENW groepen zijn vertegenwoordigd, en de watersysteemgroep voor het Benedenrivierengebied. Waar gebruik is gemaakt van volledig nieuwe methoden of technieken uit Sterkte en Belastingen van Waterkeringen (SBW), zijn deze eerst ter beoordeling voorgelegd aan het Hydraulic Review Team (HRT).

De concept HR2011 voor de Benedenrivieren zijn bepaald met het probabilistische programma Hydra-Zoet in plaats van Hydra-B, en omvatten naast toetspeilen ook golfrandvoorwaarden. Hydra-Zoet is uit uniformiteitoverweging ontwikkeld voor alle zoete watersystemen, en is in het kader van WTI-2011 ook gebruikt voor de probabilistische berekeningen in het IJsselmeer (inclusief het Ketelmeer en het Vossemeer) en de Vechtdelta. Het belangrijkste verschil tussen Hydra-Zoet en Hydra-B betreft de modellering van de afvoeren in de tijd. In Hydra-Zoet worden de stochasten die langzaam variëren in de tijd, trage stochasten, gemodelleerd door trapezia in plaats van afvoergolfvormen zoals in Hydra-B. Het effect op de toetspeilen van de overstap op Hydra-Zoet is klein, en bedraagt enkele millimeters.

Voor het Benedenrivierengebied is een geavanceerde tweedimensionale WAQUA-RMM modelschematisatie ontwikkeld en binnen WTI-2011 toegepast voor de productieberekeningen van de waterstanden. Met dit model kunnen naast de waterstanden in de as van de rivier de waterstanden aan de oever rechtstreeks worden berekend. De ontwikkelde WAQUA-RMM modelschematisatie vervangt de eerdere gebruikte eendimensionale schematisatie van SOBEK en de TAW formule voor dwarsopwaaiing. De bodemligging in WAQUA-RMM is gebaseerd op de baseline gegevens voor de situatie 2009. Ten einde inzicht te krijgen in de performance van het WAQUA-RMM model zijn testberekeningen uitgevoerd met zowel WAQUA-RMM als SOBEK, en zijn de berekeningsresultaten onderling vergeleken. Ook zijn ter controle productieberekeningen uitgevoerd met SOBEK.

De randvoorwaarden voor de productieberekeningen van WTI-2011 zijn veranderd ten opzichte van HR2006. De belangrijkste verandering heeft betrekking op de randvoorwaarde bij de benedenrand van het model. De vorm en de duur van de stormopzet bij Hoek van Holland is veranderd. De nieuwe stormopzet heeft een trapeziumvorm met een basisduur van 30 uur op het half meter niveau met flanken van 12 uur naar het nul meter niveau. Andere aanpassingen betreffen de wind, de stormduur, de zeespiegelstijging en de afvoerverdeling over de Rijntakken. In WTI-2011 is gerekend met open-water wind in plaats van potentiële

wind en een trapeziumvormige stormduur van 48 uur voor de basis en 2 uur voor de top (conform het IJsselmeer en de Vechtdelta).

De overstap van een één- naar een tweedimensionale modellering van de waterstanden met WAQUA-RMM heeft tot gevolg dat in het hele Benedenriviereengebied nieuwe uitvoerlocaties bij de teen van de dijk zijn gedefinieerd. De oeverlocaties van Hydra-B blijken namelijk niet geschikt te zijn voor het rekenrooster van WAQUA-RMM. Naast het rekenrooster van WAQUA-RMM is bij de definitie van de nieuwe punten gebruik gemaakt van de nieuwe dijkkringlijn van Rijkswaterstaat. De uitvoerlocaties in de as van de rivier zijn onveranderd gebleven ten opzichte van de vigerende HR2006.

Voor de bredere wateren van het Benedenriviereengebied, het Europoortgebied en het gebied van het Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch, zijn SWAN modellen opgezet en gebruikt voor de productie van de golfcondities. Het SWAN model voor de Europoort neemt golfdoordringing vanuit de Noordzee mee; de golfdoordringing binnen WTI-2011 is dan ook niet apart berekend met het PHAROS model zoals in de HR2006. De berekeningen met het SWAN model voor deze bredere wateren zijn uitgevoerd voor uniforme waterstanden in plaats van waterstandsvelden uit WAQUA-RMM. Dit is gebeurd om het aantal SWAN berekeningen, en bijgevolg de rekentijd, te reduceren. Deze aanpak blijkt goed te werken.

In de rest van het Benedenriviereengebied, de smalle wateren, is Bretschneider gehandhaafd. De effectieve strijklengtes en gemiddelde waterdieptes, nodig voor de golfberekeningen met Bretschneider, zijn echter wel geactualiseerd. Hierbij zijn de nieuwe gedefinieerde oeverlocaties en de nieuwe bodem van WAQUA-RMM gebruikt.

In het Europoortgebied spelen seiches een belangrijke rol. Deze zijn in het kader van WTI-2011 geactualiseerd. De referentiestatistiek te Rozenburgse Sluis (ROZ) is opnieuw afgeleid, op basis van een verlengde en betrouwbare reeks waterstandmetingen, deze bestaat uit de periode 1989-2007. De vertaling van de referentiestatistiek naar verschillende locaties in het Europoortgebied is geactualiseerd waarbij de meest recente inzichten in het opwekkingsmechanisme van seiches zijn meegenomen, evenals de geometrie van het Europoortgebied. Op basis van de nieuwe referentiestatistiek en translatiefactoren zijn nieuwe seiches toeslagen bepaald. Deze blijken ongeveer 20% lager te zijn dan de vigerende toeslagen in de vigerende HR2006.

Er zijn berekeningen gemaakt met Hydra-Zoet voor het bepalen van de concept toetspeilen en hydraulische belastingniveaus. De berekeningen ten behoeve van de belastingniveaus zijn uitgevoerd voor standaard dijkprofielen van 1 op 3 en een kritisch overslagdebiet van 1 l/s/m.

8.2 Conclusies

De volgende conclusies kunnen worden getrokken:

- De productieberekeningen met het WAQUA-RMM model ten behoeve van de maximale waterstanden bevatten over het geheel genomen resultaten met voldoende consistentie en nauwkeurigheid. De combinatie van de resultaten van enerzijds de uitgevoerde controles en anderzijds de vergelijking met SOBEK, heeft geleid tot ruim vertrouwen in de kwaliteit van de productieberekeningen met WAQUA-RMM,
- Voor de bredere wateren, waar productieberekeningen zijn uitgevoerd met SWAN ten behoeve van de golfcondities, hebben de uitgevoerde fysische en numerieke controles aangetoond dat de productieberekeningen met SWAN over het geheel genomen betrouwbare en fysisch realistische resultaten hebben opgeleverd, niet alleen in de uitvoerlocaties maar ook in de roosterpunten,
- Het aantal uitvoerlocaties waarvoor betrouwbare resultaten zijn gegenereerd met zowel WAQUA-RMM als SWAN is ruim voldoende voor het definiëren van HR locaties,

- Hydra-Zoet kan als opvolger van Hydra-B succesvol worden toegepast voor zowel het bepalen van de toetspeilen als de hydraulische belastingniveaus,
- De berekende concept toetspeilen op basis van WAQUA-RMM laten een consistent en logisch beeld zien,
- De berekeningen met Hydra-Zoet hebben geresulteerd in zowel hogere als lagere concept toetspeilen dan de vigerende HR2006:
 - De verlaging van de toetspeilen treedt vooral op in het gebied dat bovenstrooms van de Biesbosch ligt. De maximale verlaging bedraagt -0,38 m en treedt op langs de Boven Merwede. Langs de Bergsche Maas treedt een soortgelijke verlaging op. Deze wordt veroorzaakt door de tweedimensionale modellering van het Biesbosch gebied met WAQUA,
 - De verhoging treedt op in de bredere wateren van het Haringvliet, Hollandsch Diep en delen van de Biesbosch, en bedraagt ca. 0,2 m. De oorzaak ligt voornamelijk in de verlengde stormopzetduur. De maximale verhoging van 0,28 m treedt op langs het Wantij, en wordt veroorzaakt door een combinatie van de stormduur en de WAQUA modellering,
 - De berekende concept toetspeilen hangen nauwelijks af van de normfrequentie,
 - De verschillen in concept toetspeilen zijn goed verklaarbaar,
 - In het Europoortgebied gaan de concept toetspeilen ook omhoog ten opzichte van HR2006. Vanwege het relatief klein effect van de stormopzetduur beperkt deze verhoging zich tot maximaal 0,2 m. Echter, wanneer seiches in beschouwing worden genomen, leidt dit tot lagere maatgevende waterstanden dan bij de HR2006.
- Algemeen genomen ogen de SWAN resultaten met Hydra-Zoet realistischer dan die van Bretschneider. Gemiddeld genomen leidt het SWAN model in het gebied van het Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch tot iets hogere hydraulische belastingniveaus dan Bretschneider. Dit beeld is echter niet eenduidig en hangt af van lokale omstandigheden,
- In de smalle wateren sluiten de gevonden verschillen in belastingniveaus berekend op basis van Bretschneider over het algemeen aan bij de gevonden verschillen in de concept toetspeilen en waterstanden. De verschillen zijn beperkt tot ongeveer een decimeter met enkele individuele uitschieters. De belangrijkste oorzaak van deze verschillen ligt in de geactualiseerde effectieve strijklengtes en gemiddelde waterdieptes, welke dieptes gebaseerd zijn op de bodemligging van WAQUA-RMM.

9 Aanbevelingen voor de toekomst

Ten aanzien van het toegepaste WAQUA-RMM model voor de productieberekeningen ten behoeve van de maximale waterstanden maken we de volgende aanbevelingen:

- Het WAQUA-RMM model is gekalibreerd en gevalideerd voor een gebied dat bovenstrooms begrenst is door de stations Krimpen aan de Lek, Werkendam Buiten en Keizersveer. In de gebieden bovenstrooms van deze stations zijn de instellingen overgenomen van de WAQUA modellen van de Maas en Rijntakken. Tijdens de kalibratie en validatie is echter gebleken dat de kwaliteit van de waterstandrepresentatie in de bovenstroomse gebieden achterblijft. Het vermoeden is dat de gebuikte instellingen minder goed zijn voor dit deel van het Benedenrivierengebied. Geadviseerd wordt om bij het opnieuw afregelen van de Maas- en Rijntakkenmodellen, het mogelijke effect van de getijvoortplanting te onderzoeken en indien nodig in beschouwing te nemen en de instellingen daarop te baseren,
- Gezien het belang van de Maeslant- en Hartelkering voor de toetsing van de veiligheid van het achterland wordt aanbevolen om ter validatie van het gedrag (aansturing, coëfficiënten, etc.) van de keringen de sluitingen van de afgelopen periode door te rekenen en te vergelijken met beschikbare metingen,
- Uit de controles blijkt dat in het gebied van de Europoort een relatief hoog percentage van instabiliteit optreedt. Aanbevolen wordt de oorzaak van dergelijke instabiliteiten nader te onderzoeken,
- Bij enkele stochastcombinaties met een extreme windsnelheid blijkt de Maeslantkering te laat sluit ten opzichte van het sluitcriterium. Aanbevolen wordt om het keringscript nader te beschouwen en de oorzaak van het te laat sluiten te achterhalen.

Daarnaast wordt ten aanzien van de toegepaste SWAN modellen voor de Europoort respectievelijk het gebied van het Haringvliet, Hollandsch Diep en de Biesbosch aanbevolen:

- In het rivierengebied zijn geen golfmetingen beschikbaar. Het SWAN model dat gebruikt is voor de bepaling van de golfrandvoorwaarden in de bredere wateren van het Benedenrivierengebied is gebaseerd op de instellingen uit de kalibratie en validatie van het model voor onder meer de Hollandse kust, Waddenzee en het IJsselmeer. Het verdient aanbeveling om golfmetingen te starten in het rivierengebied en het SWAN golfmodel hierop te kalibreren,
- Het SWAN model voor de Europoort houdt geen rekening met reflectie en diffractie. Uit inventariserende berekeningen blijkt dat deze twee aspecten mogelijk de golfparameters beïnvloeden, vooral in de monding van de Europoort. Aanbevolen wordt de rol van reflectie en diffractie in het kader van SBW nader te onderzoeken en indien nodig mee te nemen in de SWAN modellering.

Tot slot, voor het Benedenrivierengebied zijn in het kader van WTI-2011 concept hydraulische randvoorwaarden bepaald waarin de nieuwe en verbeterde inzichten zijn verwerkt. Voor de watersystemen die aan het Benedenrivierengebied grenzen zijn echter geen nieuwe hydraulische randvoorwaarden afgeleid. Hierdoor kan enige inconsistentie ontstaan in de wijze waarop delen van bepaalde dijkeringen, die grenzen aan het Benedenrivierengebied, worden getoetst. Aanbevolen wordt om de mogelijke effecten van deze inconsistenties in beeld te brengen en, indien nodig de aansluiting tussen het Benedenrivierengebied en enerzijds het Bovenrivierengebied en anderzijds de Hollandse kust te verbeteren.

Referenties

- Alkyon, 2005, Meerwaarde SWAN benedenrivierengebied, deskundige oordeel over meerwaarde van SWAN ten opzichte van ontwerprandvoorwaarden. A1347, januari 2005.
- Bak, C.I. en D.P. Vlag, (1999). Achtergronden hydraulische belastingen dijken IJsselmeergebied, deelrapport 5, Modelling waterbeweging WAQUA, RIZA rapport 99.042, 1999.
- Boomgaard, M.J.G. van den, 2010. WTI SWAN model Haringvliet, Hollandsch Diep en Biesbosch, HKV/Svašek Hydraulics rapport 1582/U10153/C/MB. Rotterdam, 19 juli 2010.
- Bosch P. van den, 2010, Memo Interpolatie bodemhoogte strijkraaien [Alkyon-memo A2206]. Alkyon. Marknesse, 29 november 2010
- Chbab, E.H., 2010a. Memo analyse faseverschil tussen opzet en getij bij Hoek van Holland. Deltares, juni 2010.
- Chbab, E.H., 2010b. Memo uitvoerlocaties zoete watersystemen. Deltares, januari 2010.
- Chbab, E.H. 2011. Achtergrondrapport WTI-2011 voor de Vechtdelta. Concept hydraulische randvoorwaarden HR2011 voor de Vechtdelta. Deltares 1204143.003. Delft 2011.
- Chbab, E.H., Kramer, N., en Gautier, C., 2012. Verschilanalyse concept HR2011 en HR2006 voor de Benedenrivieren. Deltares rapport 1204143.003. Delft 2012.
- Deugd, de, H. 2007. Waterloopkundige berekeningen TMR2006 Benedenrivierengebied. RWS RIZA rapport 2007.017. Lelystad 2010
- Duits M.T., 2011, Productieberekeningen Benedenrivierengebied voor WTI-2011. Fase 3, vullen en testen Hydra-zoet databases. M.T. Duits, HKV Lijn in Water, december 2011.
- Gautier, C., 2010. SWAN calibration and validation for HCB 2011. Deltares report 1200103-020, mei, 2010.
- Geerse, C.P.M., 2003. Probabilistisch model hydraulische randvoorwaarden, benedenrivierengebied. RIZA werkdocument 2003.128x, december 2003.
- Geerse, C.P.M., 2008. Overzichtsdocument probabilistische modellen zoete wateren. PR1391.10. Lelystad, december 2008.
- Geerse, C.P.M., 2009. Memo Hydra-Zoet invoer Lobith en Lith (conform HR2006). Memo 1564.10, HKV Lijn in Water, 2009.
- Goederen, S. de, 1999. Handleiding PRIS en TOF. RIZA-werkdocument 1999.153x, november 1999.
- Janse, J.C. Burgdorffer, M.C. 2005. Waterakkoord Hollandsche IJssel en Lek, definitief. RWS,ZH, 9 december 2005.
- Janssen, J.P.F.M. 1995. *Aanpassing seichestatistiek t.p.v. de SVKW voor open- en sluitcondities*, SVKW-TOC95*** (internal memo).
- Jong, de (2004). Origin and prediction of seiches in Rotterdam harbour basins, PhD thesis M.P.C. de Jong. Delft University of Technology.
- Jong, de (2009). Evaluation of the allowance of seiches in the Hydraulic Boundary Conditions for Europoort. M.P.C. de Jong, Deltares Report SBW Belastingen 1200264.006. October 2009.
- Hartsuiker, G. 2010. Bouw nieuw rooster voor Rijn- en Maasmonding model. Rooster generatie en testsimulatie. Alkyon rapport A4237, april 2010

- Jong, de (2010) Update of seiche allowances in the Rotterdam Europoort area. WTI 2009, input for the Hydraulic Boundary Conditions. M.P.C. de Jong and J.A.M. De Bont. Deltares Report 1200103.052. November 2010.
- Kallen, M.J., Udo, J. 2011. SOBEK productieberekeningen Benedenrivierengebied voor WTI-2011. Eindrapport. HKV lijn in Water en Svasek. November 2011.
- Klein, M.D. 2010a. SWAN model van het IJsselmeer. Rapport 1575/U010184/mkl. Svasek Hydraulics. Juli 2010.
- Klein, M.D., 2011. Memorandum 28 voor perceel 3. Resultaten aanvullende SWAN berekeningen BER. PR1876.10. HKV lijn in Water en Svasek. April 2011
- Klein, M.D. en J. Kroon, 2010a. SWAN Productieberekeningen Haringvliet, Hollands Diep en Biesbosch voor WTI-2011: rapportage fase 1, rapport PR1876. HKV en Svašek Hydraulics. December 2010.
- Klein, M.D. en J. Kroon, 2010d. SWAN Productieberekeningen Haringvliet, Hollands Diep en Biesbosch voor WTI-2011: rapportage fase 2, rapport PR1876. HKV en Svašek Hydraulics. December 2010.
- Klein, M.D. en J. Kroon, 2010c. SWAN Productieberekeningen Europoortgebied voor WTI-2011: rapportage fase 1, rapport PR1876. HKV en Svašek Hydraulics. December 2010.
- Klein, M.D. en J. Kroon, 2011. SWAN Productieberekeningen Europoortgebied voor WTI-2011: rapportage fase 2, rapport PR1876.10 HKV en Svašek Hydraulics. September 2011.
- Klis, H. van der, J. Groeneweg en H. Chbab, 2010. Ketenbeschrijvingen HR2011 ten behoeve van ENW klankbordgroep 19 januari 2010. Deltaresrapport 1200103-000-ZWS-0015 dd 14 januari 2010.
- Kramer, N. 2010. Randvoorwaarden voor de productieberekeningen van het Benedenrivierengebied. Deltares, 1202341-003-ZWS-0029. Mei 2010.
- Leeuwen, B. van, 2011. SWAN WTI model Europoort. Toepasbaarheidsonderzoek. Svasek rapport 1584/U10148/E/BvL, Rotterdam januari 2011.
- Looff, A.P. de, 1994: *Seiche berekeningen in het Europoortgebied*. Werkdocument RIKZ/AB-94.004X. RIKZ, februari 1994
- Nicolai, R, Steenberg, H., 2010. Inconsistenties invoer HR Europoortkering, Hollandse kust en Benedenrivierengebied. HKV lijn in Water en TNO-Bouw, PR1837.10. Januari 2010.
- Rozemuller, L., 2006. Basisontwerp keringprocedures Stormvloedkering Nieuwe Waterweg, Stormvloedkering Hartelkering en Hartelsluis, versie 5.3. TE-06-TEC-DOC-088, juli 2006.
- Slomp R.M., Geerse. C.P.M, de Deugd, H., 2001. Onderbouwing Hydraulische Randvoorwaarden 2001 voor het Benedenrivierengebied 19 mei 2005 CONCEPT RIZA-rapport 2002.017, ISBN 9036954371.
- TAW, 1985. Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken, deel 1 – bovenrivierengebied. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, Den Haag, september 1985.
- TU Delft, 2010. "SWAN downloadable files", <http://vlm089.citg.tudelft.nl/swan/index.htm>, opgehaald op 9-8-2010.
- Tijssen A., and Diermanse F.L.M, 2010a. Storm surge duration and storm duration at Hoek van Holland, Deltares Report 1200264, August 2010.
- Tijssen A., 2010b. Memo Stormopzetduur bij Hoek van Holland - effecten op de toetspeilen, Deltares, 1202341-003-ZWS-0014, 15 april 2010.
- Tijssen A. 2009a. Herberekening werklijn van de Rijn in kader van WTI-2011. Deltares, 2009.
- Tijssen A. 2009b. Herberekening werklijn van de Maas in kader van WTI-2011. Deltares, 2009.

- Valk, C.F. de (WL | Delft Hydraulics, 1994), Seiches Europoort: analyse betrouwbaarheid van seiches-berekeningen met PHAROS en TRISULA - fase 1: samenvatting statistiek
- Veldman, J.J., Jacobs, C.E.J., 2005: Seiches en golven in HR2006 Benedenrivieren: fase 1 en 2: rekenmethodiek, adviezen, berekeningen, controle en analyse van de resultaten.
- Vuik, V, Collard, E, Rotsaert, M., da Silva, J.V., 2011a. WAQUA productieberekeningen Benedenrivierengebied voor WTI-2011. Rapportage fase 1. HKV lijn in Water en Svasek Hydraulics. December 2011
- Vuik, V, Collard, E, Rotsaert, M., da Silva, J.V., 2011b. WAQUA productieberekeningen Benedenrivierengebied voor WTI-2011. Rapportage fase 2. HKV lijn in Water en Svasek Hydraulics. December 2011.
- Vrouwenvelder, A.C.W.M., 1994), Statistisch model voor seichehoogten ten behoeve van de kering in de Nieuwe Waterweg, 4.21.3.8581, Rijkswaterstaat/RIKZ en TUDelft.
- Waal, J.P. de, 2007. Achtergrondrapport HR2006 voor de Benedenrivieren. RWS RIZA rapport 2007.023.
- Waal, J.P. de, 2010. WTI2011 Wind input to be used in HBC assessment, Deltares report 1200103-027-HYE, februari 2010.
- Waal, J.P. de, 2003. Windmodellering voor bepaling van waterstanden en golven. Een analyse van de bouwstenen. Rijkswaterstaat RIZA, RZIA werkdocument 2003.118x, juli 2003.
- Waal, J.P. de, 2008. Windgolven in HR2011 voor rivieren. Voorstudie naar noodzak modelverbetering. Deltares, Q4571.21. Delft 2008.
- Zijl F., Kerkhoven, D., Visser, T., van der Kraan, 2010a, Waqua-model Rijn-Maasmonding, opzet, calibratie en verificatie, Deltares, 1202199-005.
- Zijl F., 2010a, Memo: Aanpassing RMM modelschematisatie ten behoeve van WTI, Deltares 30 mei 2010.
- Zijl F., 2010b, Memo: Impact van windschuifspanningen op gevolgen afknippen van RMR-model ten behoeve van WTI, Deltares, 20 mei 2010.

Bijlage A: lijst seiches toeslagen WTI-2011

x (m)	y (m)	4000 jaar	10000 jaar	x (m)	y (m)	4000 jaar	10000 jaar	x (m)	y (m)	4000 jaar	10000 jaar
76886	434881	0.74	0.73	71270	440592	0.49	0.49	70854	441963	0.38	0.40
76791	434911	0.74	0.73	71193	440656	0.48	0.49	70780	442031	0.38	0.40
76685	434950	0.74	0.73	71117	440721	0.48	0.48	70709	442101	0.38	0.39
76590	434977	0.74	0.73	71040	440785	0.47	0.48	70637	442171	0.38	0.39
76491	435019	0.74	0.72	70963	440849	0.47	0.47	70598	442247	0.38	0.39
76409	435049	0.74	0.72	70887	440913	0.46	0.47	70582	442323	0.38	0.39
76297	435079	0.73	0.72	70810	440977	0.46	0.46	70503	442384	0.38	0.39
76205	435098	0.73	0.72	70738	441037	0.46	0.46	70426	442447	0.37	0.38
76097	435128	0.73	0.71	70647	441071	0.44	0.45	70346	442508	0.37	0.38
75998	435154	0.73	0.71	70541	441123	0.44	0.44	70264	442564	0.37	0.38
75910	435187	0.72	0.71	70602	441305	0.38	0.40	70181	442620	0.36	0.38
75827	435227	0.72	0.71	70675	441383	0.38	0.40	70098	442677	0.36	0.38
75740	435276	0.72	0.71	70744	441455	0.38	0.40	70016	442734	0.36	0.38
75658	435332	0.71	0.70	70814	441527	0.38	0.40	69937	442795	0.35	0.37
75579	435398	0.71	0.70	70883	441599	0.38	0.40	69884	442879	0.35	0.37
75493	435453	0.69	0.68	70952	441671	0.38	0.40	69841	442955	0.35	0.36
75414	435509	0.69	0.68	71021	441744	0.38	0.40	69759	442934	0.35	0.36
75312	435526	0.69	0.68	80559	431207	0.34	0.35	69665	442962	0.35	0.36
75226	435582	0.69	0.68	80559	431217	0.34	0.35	69581	443017	0.35	0.36
75209	435681	0.69	0.68	80559	431317	0.34	0.35	69498	443072	0.34	0.35
75193	435766	0.68	0.67	80559	431417	0.34	0.35	69416	443129	0.34	0.35
75173	435871	0.68	0.67	80516	431588	0.34	0.35	69346	443201	0.33	0.35
75157	435960	0.67	0.66	80416	431583	0.34	0.35	69270	443264	0.33	0.35
75144	436059	0.67	0.66	80316	431579	0.34	0.35	69190	443325	0.32	0.34
75127	436157	0.66	0.65	80217	431574	0.34	0.35	69111	443386	0.32	0.34
75114	436253	0.66	0.65	80117	431570	0.34	0.35	69034	443449	0.32	0.34
75098	436374	0.66	0.65	80017	431566	0.34	0.35	68953	443508	0.32	0.33
75071	436460	0.65	0.64	79917	431561	0.34	0.35	68861	443547	0.32	0.33
75052	436555	0.64	0.64	79817	431557	0.34	0.35	68772	443590	0.32	0.33
75022	436667	0.64	0.63	79717	431552	0.34	0.35	68702	443660	0.32	0.32
74999	436759	0.63	0.63	79617	431548	0.34	0.35	68621	443719	0.31	0.32
74960	436857	0.63	0.62	79517	431543	0.33	0.34	68541	443779	0.31	0.32
74920	436943	0.63	0.62	79417	431539	0.33	0.34	68462	443840	0.31	0.32
74884	437038	0.63	0.62	79317	431535	0.33	0.34	68414	443930	0.31	0.32
74903	437000	0.63	0.62	79218	431530	0.33	0.34	68373	444022	0.30	0.32
74874	437014	0.63	0.62	79118	431526	0.33	0.34	68313	444090	0.30	0.32
74845	437113	0.63	0.62	79018	431521	0.33	0.34	62636	438590	0.43	0.42
74817	437209	0.62	0.62	78918	431527	0.33	0.34	62604	438670	0.43	0.42
74788	437304	0.62	0.61	78818	431535	0.33	0.34	62645	438720	0.43	0.42
74760	437400	0.62	0.61	78718	431543	0.33	0.34	62731	438746	0.43	0.42
74732	437496	0.61	0.61	78619	431551	0.33	0.34	62817	438774	0.43	0.42
74703	437592	0.61	0.61	78522	431562	0.32	0.34	62928	438809	0.43	0.42
74675	437688	0.61	0.61	78422	431575	0.32	0.33	63012	438834	0.43	0.42
74643	437773	0.61	0.61	78323	431587	0.32	0.33	63101	438867	0.43	0.42
74569	437834	0.61	0.61	78223	431605	0.32	0.33	63207	438899	0.43	0.42

x (m)	y (m)	4000 jaar	10000 jaar	x (m)	y (m)	4000 jaar	10000 jaar	x (m)	y (m)	4000 jaar	10000 jaar
74492	437898	0.61	0.61	78142	431645	0.32	0.33	63314	438936	0.43	0.42
74415	437962	0.61	0.60	78052	431689	0.32	0.33	63405	438959	0.42	0.41
74339	438026	0.61	0.60	77969	431738	0.32	0.33	63504	438996	0.42	0.41
74262	438090	0.60	0.60	77910	431807	0.32	0.33	63599	439024	0.41	0.41
74185	438155	0.60	0.60	77845	431883	0.32	0.33	63692	439046	0.41	0.40
74109	438219	0.60	0.60	77782	431964	0.32	0.33	63787	439078	0.41	0.40
74032	438283	0.60	0.59	77745	432038	0.32	0.32	63884	439111	0.41	0.40
73955	438347	0.60	0.59	77697	432124	0.32	0.32	63982	439141	0.41	0.39
73878	438411	0.60	0.59	77658	432220	0.32	0.32	64081	439169	0.40	0.39
73802	438475	0.60	0.59	77630	432306	0.32	0.32	64170	439197	0.40	0.38
73725	438539	0.60	0.59	77596	432407	0.30	0.31	64277	439225	0.39	0.38
73648	438604	0.59	0.59	77568	432478	0.30	0.31	64372	439251	0.39	0.38
73572	438668	0.59	0.58	77534	432569	0.30	0.31	64469	439270	0.39	0.38
73495	438732	0.58	0.58	77505	432660	0.30	0.31	64575	439294	0.37	0.36
73418	438796	0.57	0.57	77477	432761	0.30	0.31	64673	439318	0.37	0.36
73341	438860	0.57	0.57	77438	432852	0.30	0.31	64763	439335	0.37	0.36
73265	438924	0.57	0.56	77405	432952	0.30	0.31	64880	439362	0.37	0.36
73188	438988	0.57	0.56	77381	433038	0.30	0.31	64988	439384	0.37	0.36
73111	439053	0.56	0.56	77338	433148	0.30	0.31	65114	439414	0.37	0.36
73035	439117	0.56	0.56	77314	433253	0.30	0.31	65234	439440	0.37	0.36
72958	439181	0.55	0.56	77286	433358	0.30	0.31	65347	439466	0.37	0.36
72881	439245	0.55	0.55	77247	433449	0.30	0.31	65459	439492	0.36	0.35
72804	439309	0.55	0.54	77238	433553	0.30	0.31	65576	439518	0.36	0.35
72728	439373	0.55	0.54	77219	433654	0.74	0.73	65688	439514	0.35	0.35
72651	439438	0.54	0.53	77199	433759	0.74	0.73	65792	439505	0.35	0.35
72574	439502	0.54	0.53	77204	433874	0.74	0.73	65896	439471	0.35	0.35
72498	439566	0.53	0.53	77199	433979	0.74	0.73	65978	439406	0.35	0.34
72421	439630	0.53	0.53	77209	434079	0.74	0.73	66030	439315	0.35	0.34
72344	439694	0.52	0.53	77247	434175	0.74	0.73	66082	439216	0.35	0.34
72267	439758	0.52	0.52	77281	434257	0.74	0.73	66129	439116	0.34	0.34
72191	439822	0.52	0.52	77276	434338	0.74	0.73	66172	439030	0.34	0.34
72114	439887	0.52	0.51	77257	434424	0.74	0.73	66220	438926	0.33	0.33
72037	439951	0.51	0.51	77233	434505	0.74	0.73	66276	438831	0.33	0.32
71961	440015	0.51	0.51	77204	434587	0.74	0.73	66319	438744	0.32	0.32
71884	440079	0.51	0.50	77176	434663	0.74	0.73	66371	438662	0.32	0.32
71807	440143	0.50	0.50	77137	434745	0.74	0.73	66419	438580	0.32	0.32
71730	440207	0.50	0.50	77061	434807	0.74	0.73	66466	438485	0.32	0.32
71654	440271	0.50	0.50	76951	434859	0.74	0.73	66505	438403	0.32	0.32
71577	440336	0.49	0.50	76874	434888	0.74	0.73	66540	438303	0.32	0.32
71500	440400	0.49	0.50	71076	441762	0.38	0.40	66620	438241	0.32	0.32
71424	440464	0.49	0.50	71003	441830	0.38	0.40	66610	438337	0.32	0.32
71347	440528	0.49	0.49	70930	441899	0.38	0.40	66620	438437	0.32	0.32
66650	438532	0.32	0.32	73439	435962	0.21	0.20	79786	431232	0.34	0.35
66687	438625	0.32	0.32	73515	435898	0.21	0.20	79886	431231	0.34	0.35
66725	438717	0.32	0.32	73592	435834	0.21	0.20	79986	431230	0.34	0.35
66747	438815	0.32	0.32	73669	435770	0.21	0.20	80086	431229	0.34	0.35
66793	438902	0.32	0.32	73744	435704	0.21	0.20	80186	431229	0.34	0.35
66829	438995	0.32	0.31	73818	435637	0.21	0.20	80286	431228	0.34	0.35
66868	439087	0.32	0.31	73888	435565	0.21	0.20	80386	431228	0.34	0.35

x (m)	y (m)	4000 jaar	10000 jaar	x (m)	y (m)	4000 jaar	10000 jaar	x (m)	y (m)	4000 jaar	10000 jaar
66907	439179	0.32	0.31	73963	435500	0.22	0.20	80486	431228	0.34	0.35
66941	439273	0.32	0.31	74044	435441	0.22	0.20	68245	444150	0.30	0.32
66980	439365	0.31	0.31	74117	435373	0.22	0.21	68171	444205	0.30	0.31
67025	439450	0.31	0.31	74193	435308	0.23	0.21	68098	444269	0.30	0.31
67119	439448	0.31	0.31	74279	435257	0.23	0.22	68030	444337	0.29	0.31
67213	439415	0.31	0.31	74355	435193	0.24	0.22	67984	444415	0.29	0.31
67309	439386	0.31	0.30	74426	435123	0.24	0.23	67952	444506	0.29	0.31
67406	439363	0.30	0.30	74499	435054	0.24	0.23				
67504	439340	0.30	0.29	74570	434984	0.24	0.23				
67601	439316	0.30	0.29	74633	434906	0.24	0.24				
67698	439293	0.29	0.29	74692	434825	0.25	0.24				
67795	439270	0.29	0.29	74745	434741	0.25	0.24				
67892	439247	0.29	0.29	74797	434655	0.25	0.25				
67990	439224	0.29	0.29	74843	434567	0.25	0.25				
68087	439201	0.29	0.28	74891	434479	0.26	0.25				
68184	439176	0.28	0.28	74938	434390	0.26	0.26				
68282	439154	0.28	0.28	74985	434302	0.26	0.26				
68379	439131	0.28	0.27	75032	434214	0.27	0.26				
68476	439107	0.27	0.27	75079	434126	0.27	0.26				
68573	439085	0.27	0.27	75126	434037	0.27	0.27				
68671	439061	0.27	0.27	75172	433948	0.27	0.27				
68768	439040	0.27	0.27	75214	433858	0.27	0.27				
68866	439016	0.27	0.27	75252	433766	0.27	0.28				
68963	438994	0.27	0.27	75284	433671	0.28	0.28				
69061	438972	0.27	0.27	75312	433575	0.28	0.28				
69158	438951	0.27	0.27	75334	433477	0.28	0.29				
69256	438929	0.27	0.27	75351	433379	0.28	0.29				
69353	438905	0.27	0.27	75367	433280	0.29	0.29				
69449	438877	0.27	0.27	75384	433181	0.29	0.29				
69543	438845	0.27	0.27	75406	433084	0.29	0.29				
69636	438807	0.27	0.27	75434	432988	0.29	0.29				
69724	438760	0.27	0.27	75468	432894	0.29	0.29				
69810	438710	0.27	0.27	75509	432803	0.29	0.29				
69895	438656	0.27	0.27	75556	432715	0.29	0.29				
69972	438593	0.27	0.27	75609	432630	0.29	0.30				
70049	438530	0.27	0.27	75666	432548	0.29	0.30				
70134	438478	0.27	0.27	75729	432470	0.29	0.30				
70232	438456	0.27	0.27	75797	432397	0.29	0.30				
70330	438435	0.27	0.27	75869	432327	0.29	0.30				
70428	438414	0.27	0.27	75945	432263	0.29	0.30				
70524	438388	0.27	0.26	76025	432203	0.30	0.31				
70613	438344	0.27	0.26	76111	432151	0.30	0.31				
70696	438288	0.27	0.26	76196	432100	0.30	0.31				
70772	438223	0.27	0.26	76282	432049	0.30	0.31				
70840	438150	0.27	0.26	76368	431998	0.30	0.31				
70880	438060	0.27	0.26	76454	431946	0.30	0.32				
70884	437960	0.27	0.26	76541	431897	0.31	0.32				
70886	437861	0.27	0.26	76628	431847	0.31	0.32				
70910	437764	0.26	0.26	76714	431796	0.31	0.32				

x (m)	y (m)	4000 jaar	10000 jaar	x (m)	y (m)	4000 jaar	10000 jaar	x (m)	y (m)	4000 jaar	10000 jaar
70955	437675	0.26	0.26	76800	431746	0.31	0.32				
71006	437589	0.26	0.26	76886	431695	0.31	0.32				
71055	437502	0.26	0.25	76971	431642	0.31	0.32				
71128	437437	0.26	0.25	77057	431591	0.31	0.32				
71226	437419	0.26	0.25	77146	431545	0.32	0.32				
71324	437398	0.26	0.25	77232	431495	0.32	0.32				
71421	437377	0.26	0.25	77319	431445	0.32	0.32				
71520	437358	0.25	0.25	77410	431403	0.32	0.32				
71619	437344	0.25	0.24	77503	431366	0.32	0.32				
71710	437306	0.25	0.24	77598	431336	0.32	0.33				
71784	437240	0.24	0.23	77695	431312	0.32	0.33				
71851	437165	0.24	0.23	77793	431294	0.32	0.33				
71917	437090	0.24	0.23	77893	431282	0.32	0.33				
71987	437019	0.24	0.23	77992	431278	0.32	0.33				
72060	436950	0.24	0.23	78092	431278	0.32	0.33				
72134	436883	0.24	0.23	78192	431283	0.32	0.33				
72213	436822	0.24	0.22	78292	431289	0.32	0.33				
72293	436761	0.23	0.22	78392	431291	0.32	0.33				
72372	436700	0.23	0.22	78492	431292	0.32	0.33				
72452	436640	0.23	0.21	78592	431293	0.33	0.34				
72535	436585	0.23	0.21	78692	431299	0.33	0.34				
72621	436533	0.22	0.21	78791	431307	0.33	0.34				
72707	436482	0.22	0.20	78891	431313	0.33	0.34				
72793	436431	0.22	0.20	78991	431316	0.33	0.34				
72879	436380	0.22	0.20	79091	431313	0.33	0.34				
72964	436328	0.21	0.20	79191	431305	0.33	0.34				
73047	436272	0.21	0.20	79290	431294	0.33	0.34				
73128	436214	0.21	0.20	79389	431280	0.33	0.34				
73207	436152	0.21	0.20	79488	431264	0.33	0.34				
73285	436089	0.21	0.20	79587	431249	0.34	0.35				
73362	436026	0.21	0.20	79686	431238	0.34	0.35				

Bijlage B: berekende maatgevende waterstanden WTI-2011 voor verschillende terugkeertijd.

Locatie	x-co	y-co	HR2011			HR2006		
			2000	4000	10000	2000	4000	10000
Afgedamde Maas km 244	131025	423622	6,389	6,633	6,948	6,311	6,568	6,913
Afgedamde Maas km 245	130098	423976	6,385	6,623	6,945	6,309	6,566	6,912
Afgedamde Maas km 246	129315	424550	6,356	6,591	6,91	6,308	6,565	6,912
Afgedamde Maas km 247	128971	425420	6,235	6,467	6,781	6,306	6,564	6,912
Amerkm 252	116603	413818	3,213	3,351	3,542	3,023	3,149	3,32
Amerkm 253	115569	413759	3,171	3,309	3,499	2,966	3,09	3,261
Amer km 254	114597	413919	3,14	3,279	3,468	2,922	3,046	3,216
Amer km 255	113656	414226	3,112	3,251	3,44	2,89	3,014	3,183
Amerkm 256	112763	414673	3,085	3,224	3,413	2,865	2,988	3,156
Amer km 257	111885	415145	3,061	3,199	3,387	2,844	2,967	3,134
Amerkm 258	110895	415438	3,039	3,177	3,364	2,824	2,948	3,114
Amerkm 259	109792	415430	3,021	3,159	3,345	2,808	2,932	3,098
Amerkm 260	108938	415163	3,006	3,144	3,329	2,797	2,921	3,089
Amerkm 261	107951	414810	2,994	3,131	3,316	2,784	2,91	3,078
Amerkm 262	106915	414955	2,974	3,11	3,294	2,775	2,901	3,069
Beneden Merwede km 962	119481	425579	4,171	4,326	4,532	4,448	4,639	4,902
Beneden Merwede km 963	118484	425649	4,078	4,233	4,44	4,267	4,452	4,697
Beneden Merwede km 964	117491	425758	3,97	4,123	4,325	4,069	4,232	4,451
Beneden Merwede km 965	116480	425770	3,904	4,056	4,258	3,883	4,028	4,22
Beneden Merwede km 966	115470	425741	3,82	3,973	4,177	3,727	3,862	4,033
Beneden Merwede km 967	114504	425608	3,687	3,837	4,036	3,6	3,725	3,889
Beneden Merwede km 968	113545	425340	3,577	3,723	3,915	3,481	3,598	3,746
Beneden Merwede km 969	112542	425390	3,449	3,593	3,782	3,362	3,466	3,602
Beneden Merwede km 970	111637	425785	3,322	3,452	3,626	3,265	3,362	3,491
Beneden Merwede km 971	110760	426154	3,279	3,406	3,578	3,187	3,278	3,402
Beneden Merwede km 972	109769	426181	3,234	3,357	3,527	3,142	3,232	3,357
Beneden Merwede km 973	108763	426268	3,184	3,302	3,469	3,104	3,192	3,318
Beneden Merwede km 974	107762	426271	3,134	3,248	3,413	3,071	3,159	3,284
Beneden Merwede km 975	106771	426141	3,101	3,215	3,381	3,041	3,13	3,259
Beneden Merwede km 976	105832	426058	3,079	3,189	3,355	3,016	3,104	3,234
Boven Merwede km 953	128147	425891	5,995	6,221	6,52	6,271	6,53	6,879
Boven Merwede km 954	127169	425917	5,861	6,09	6,39	6,114	6,378	6,736
Boven Merwede km 955	126183	426182	5,602	5,824	6,117	5,921	6,192	6,549
Boven Merwede km 956	125220	426448	5,344	5,557	5,831	5,713	5,972	6,321
Boven Merwede km 957	124278	426706	5,126	5,321	5,578	5,51	5,758	6,093
Boven Merwede km 958	123266	426793	4,972	5,165	5,42	5,291	5,527	5,852
Boven Merwede km 959	122271	426544	4,697	4,877	5,113	5,049	5,271	5,581
Boven Merwede km 960	121330	426118	4,498	4,664	4,886	4,814	5,018	5,295
Dordtsche Kil km 980	102230	423380	2,94	3,054	3,223	2,869	2,976	3,125
Dordtsche Kil km 981	102444	422364	2,916	3,037	3,21	2,839	2,954	3,108
Dordtsche Kil km 982	102574	421380	2,9	3,026	3,2	2,814	2,934	3,093
Dordtsche Kil km 983	102481	420389	2,897	3,025	3,2	2,794	2,917	3,076
Dordtsche Kil km 984	102507	419393	2,884	3,016	3,194	2,777	2,9	3,063
Dordtsche Kil km 985	102740	418422	2,887	3,019	3,198	2,761	2,886	3,051
Dordtsche Kil km 986	102787	417428	2,891	3,024	3,204	2,746	2,873	3,04
Dordtsche Kil km 987	102637	416442	2,894	3,027	3,206	2,735	2,862	3,031
Dordtsche Kil km 988	102397	415497	2,897	3,031	3,21	2,726	2,854	3,024

Gat van het Zand km 970	117975	417744	3,227	3,36	3,548	3,057	3,177	3,344
Gat van het Zand km 971	117833	416720	3,231	3,365	3,553	3,034	3,155	3,323
Gat van het Zand km 972	117698	415688	3,233	3,369	3,558	3,029	3,151	3,32
Gat van Kampen km 974	113866	418772	3,082	3,217	3,403	2,907	3,03	3,199
Gat van Kampen km 975	113227	418196	3,07	3,207	3,393	2,887	3,011	3,181
Gat van Nooderklip km 972	115495	418700	3,126	3,261	3,447	2,962	3,079	3,245
Gat van Nooderklip km 973	114674	418866	3,103	3,238	3,423	2,931	3,05	3,218
Hartelkanaal km 1			3,195	3,268	3,414	3,093	3,169	3,33
Hollandsch Diep km 980	106018	415042	2,962	3,097	3,28	2,761	2,888	3,058
Hollandsch Diep km 981	105089	414968	2,942	3,077	3,259	2,75	2,877	3,047
Hollandsch Diep km 982	104044	414717	2,923	3,058	3,239	2,741	2,867	3,037
Hollandsch Diep km 983	103220	414537	2,913	3,047	3,228	2,732	2,86	3,029
Hollandsch Diep km 984	102289	414140	2,897	3,031	3,211	2,726	2,854	3,024
Hollandsch Diep km 985	101528	413492	2,889	3,022	3,202	2,719	2,847	3,017
Hollandsch Diep km 986	100786	412733	2,885	3,018	3,198	2,714	2,841	3,011
Hollandsch Diep km 987	99740	412319	2,875	3,007	3,186	2,708	2,836	3,006
Hollandsch Diep km 988	98763	412076	2,867	2,998	3,177	2,701	2,829	2,999
Hollandsch Diep km 989	97801	411837	2,855	2,986	3,165	2,696	2,823	2,994
Hollandsch Diep km 990	96788	411608	2,843	2,973	3,151	2,688	2,815	2,986
Hollandsch Diep km 991	95738	411520	2,834	2,964	3,14	2,681	2,808	2,979
Hollandsch Diep km 992	94695	411552	2,824	2,953	3,128	2,675	2,802	2,972
Hollandsch Diep km 993	93648	411650	2,814	2,942	3,116	2,669	2,796	2,967
Hollandsch Diep km 994	92571	411682	2,809	2,937	3,11	2,663	2,79	2,959
Hollandsch Diep km 995	91513	411919	2,801	2,929	3,103	2,656	2,783	2,951
Hollandsch Diep km 996	90590	412305	2,794	2,92	3,092	2,647	2,774	2,943
Hollandsch Diep km 997	89699	412765	2,785	2,911	3,082	2,638	2,764	2,934
Hollandsch Diep km 998	88812	413238	2,776	2,902	3,073	2,631	2,758	2,926
Hollandsch Diep km 999	88091	414114	2,77	2,895	3,065	2,621	2,747	2,915
Hollandsch Diep 1000	87268	414753	2,76	2,885	3,055	2,611	2,738	2,907
Lek km 967	122552	439451	4,882	5,083	5,354	4,976	5,197	5,49
Lek km 968	121580	439246	4,731	4,927	5,197	4,83	5,049	5,332
Lek km 969	120585	439032	4,592	4,785	5,04	4,683	4,881	5,161
Lek km 970	119606	438963	4,483	4,672	4,925	4,55	4,755	5,015
Lek km 971	118664	439311	4,347	4,528	4,772	4,454	4,649	4,91
Lek km 972	117667	439346	4,194	4,366	4,595	4,351	4,538	4,788
Lek km 973	116736	439021	4,14	4,308	4,534	4,232	4,411	4,654
Lek km 974	116101	438248	4,071	4,243	4,472	4,115	4,293	4,524
Lek km 975	115418	437518	3,945	4,098	4,306	4,005	4,164	4,387
Lek km 976	114507	437119	3,831	3,974	4,169	3,877	4,029	4,24
Lek km 977	113554	436816	3,758	3,895	4,084	3,753	3,894	4,088
Lek km 978	112589	436625	3,678	3,808	3,99	3,661	3,786	3,965
Lek km 979	111684	436204	3,629	3,754	3,933	3,59	3,704	3,872
Lek km 980	110947	435546	3,567	3,685	3,858	3,525	3,629	3,784
Lek km 981	110073	435022	3,518	3,631	3,802	3,462	3,556	3,693
Lek km 982	109201	434552	3,467	3,571	3,739	3,404	3,487	3,609
Lek km 983	108205	434524	3,411	3,506	3,672	3,352	3,428	3,537
Lek km 984	107234	434321	3,384	3,48	3,644	3,314	3,385	3,487
Lek km 985	106273	434034	3,347	3,436	3,597	3,283	3,353	3,454
Lek km 986	105368	433670	3,319	3,405	3,569	3,256	3,325	3,424
Lek km 987	104375	433730	3,287	3,376	3,534	3,233	3,302	3,4
Lek km 988	103399	433879	3,255	3,338	3,493	3,213	3,282	3,383
Lek km 989	102411	433670	3,226	3,304	3,461	3,196	3,265	3,367
Nieuwe Maas km 990	101465	433907	3,202	3,284	3,434	3,195	3,265	3,371
Nieuwe Maas km 991	100503	434213	3,224	3,3	3,46	3,202	3,273	3,385
Nieuwe Maas km 992	99778	434818	3,219	3,295	3,453	3,205	3,276	3,392

Nieuwe Maas km 993	98942	435330	3,217	3,293	3,452	3,208	3,279	3,398
Nieuwe Maas km 994	97991	435510	3,218	3,293	3,453	3,214	3,283	3,408
Nieuwe Maas km 995	97040	435422	3,204	3,283	3,438	3,221	3,289	3,42
Nieuwe Maas km 996	96131	435054	3,204	3,282	3,437	3,237	3,3	3,44
Nieuwe Maas km 997	95200	435200	3,253	3,324	3,481	3,273	3,343	3,487
Nieuwe Maas km 998	95060	436212	3,245	3,313	3,471	3,309	3,383	3,547
Nieuwe Maas km 999	94426	436931	3,276	3,349	3,501	3,358	3,434	3,61
Nieuwe Maas km 1000	93474	436754	3,312	3,382	3,539	3,372	3,452	3,631
Nieuwe Maas km 1001	92860	435954	3,326	3,393	3,553	3,37	3,449	3,628
Nieuwe Maas km 1002	92221	435265	3,328	3,394	3,555	3,366	3,445	3,623
Nieuwe Maas km 1003	91268	434946	3,329	3,395	3,556	3,358	3,434	3,612
Nieuwe Maas km 1004	90326	435036	3,326	3,392	3,552	3,347	3,42	3,598
Nieuwe Maas km 1005	89342	435337	3,329	3,394	3,552	3,331	3,401	3,581
Nieuwe Maas km 1006	88332	435294	3,313	3,382	3,536	3,292	3,371	3,542
Nieuwe Maas km 1007	87391	434901	3,304	3,375	3,527	3,284	3,361	3,531
Nieuwe Maas km 1008	86416	434716	3,294	3,366	3,515	3,262	3,338	3,507
Nieuwe Maas km 1009	85428	434914	3,278	3,35	3,496	3,235	3,305	3,482
Nieuwe Maas km 1010	84435	434994	3,261	3,33	3,479	3,219	3,292	3,467
Nieuwe Maas km 1011	83478	434754	3,246	3,312	3,465	3,202	3,28	3,451
Nieuwe Maas km 1012	82552	434468	3,229	3,295	3,45	3,193	3,271	3,441
Nieuwe Maas km 1013	81542	434423	3,214	3,283	3,431	3,186	3,264	3,433
Nieuwe Merwede km 962	119713	424933	4,187	4,344	4,549	4,489	4,679	4,934
Nieuwe Merwede km 963	119038	424208	4,091	4,246	4,453	4,391	4,579	4,835
Nieuwe Merwede km 964	118206	423638	4,02	4,174	4,377	4,272	4,451	4,706
Nieuwe Merwede km 965	117342	423370	3,943	4,096	4,3	4,142	4,331	4,592
Nieuwe Merwede km 966	116295	423407	3,869	4,023	4,224	3,999	4,188	4,451
Nieuwe Merwede km 967	115300	423656	3,758	3,912	4,116	3,862	4,049	4,309
Nieuwe Merwede km 968	114315	423682	3,654	3,802	3,996	3,715	3,907	4,167
Nieuwe Merwede km 969	113334	423355	3,556	3,7	3,889	3,574	3,749	3,991
Nieuwe Merwede km 970	112418	422850	3,455	3,598	3,784	3,399	3,553	3,764
Nieuwe Merwede km 971	111664	422124	3,323	3,455	3,628	3,262	3,397	3,577
Nieuwe Merwede km 972	111123	421276	3,266	3,398	3,572	3,162	3,289	3,46
Nieuwe Merwede km 973	110834	420358	3,205	3,335	3,507	3,083	3,206	3,372
Nieuwe Merwede km 974	110412	419462	3,144	3,274	3,445	3,01	3,134	3,299
Nieuwe Merwede km 975	109982	418610	3,1	3,231	3,405	2,952	3,074	3,237
Nieuwe Merwede km 976	109375	417778	3,057	3,19	3,367	2,89	3,012	3,174
Nieuwe Merwede km 977	108596	417107	3,016	3,151	3,332	2,85	2,972	3,136
Nieuwe Merwede km 978	107786	416501	2,996	3,132	3,314	2,82	2,943	3,109
Nieuwe Merwede km 979	106943	415968	2,98	3,116	3,298	2,796	2,921	3,087
Nieuwe Waterweg km 1014	80553	434623	3,2	3,272	3,413	3,187	3,265	3,434
Nieuwe Waterweg km 1015	79584	434880	3,17	3,239	3,379	3,179	3,257	3,424
Nieuwe Waterweg km 1016	78660	435279	3,18	3,251	3,39	3,172	3,249	3,416
Nieuwe Waterweg km 1017	77824	435822	3,173	3,243	3,38	3,161	3,236	3,402
Nieuwe Waterweg km 1018	76976	436349	3,182	3,253	3,389	3,151	3,223	3,391
Nieuwe Waterweg km 1019	76139	436890	3,203	3,274	3,411	3,172	3,249	3,416
Nieuwe Waterweg km 1020	75585	437518	3,221	3,288	3,43	3,189	3,268	3,439
Nieuwe Waterweg km 1021	75090	438334	3,237	3,3	3,445	3,205	3,282	3,456
Nieuwe Waterweg km 1022	74363	439034	3,228	3,293	3,436	3,214	3,289	3,466
Nieuwe Waterweg km 1023	73478	439517	3,23	3,295	3,438	3,215	3,29	3,464
Nieuwe Waterweg km 1024	72633	440054	3,247	3,314	3,457	3,216	3,291	3,468
Nieuwe Waterweg km 1025	71805	440604	3,256	3,327	3,468	3,226	3,299	3,476
Nieuwe Waterweg km 1026	71028	441232	3,218	3,285	3,423	3,248	3,325	3,498
Noord km 977	105505	426879	3,076	3,187	3,352	3,012	3,1	3,229
Noord km 978	105755	427806	3,089	3,199	3,365	3,017	3,103	3,229

Noord km 979	105395	428690	3,091	3,198	3,363	3,024	3,107	3,231
Noord km 980	104797	429473	3,087	3,193	3,355	3,033	3,113	3,233
Noord km 981	104319	430368	3,092	3,197	3,359	3,047	3,126	3,241
Noord km 982	103722	431118	3,099	3,203	3,366	3,068	3,144	3,255
Noord km 983	103037	431846	3,116	3,216	3,38	3,107	3,18	3,287
Noord km 984	102611	432742	3,141	3,235	3,397	3,159	3,231	3,335
Oude Maas km 977	104873	425712	3,014	3,126	3,294	2,976	3,068	3,208
Oude Maas km 978	104191	424982	2,978	3,088	3,257	2,938	3,038	3,182
Oude Maas km 979	103500	424300	2,97	3,08	3,249	2,909	3,012	3,156
Oude Maas km 980	102569	423816	2,951	3,061	3,229	2,884	2,989	3,138
Oude Maas km 981	101613	424047	2,944	3,055	3,222	2,87	2,973	3,122
Oude Maas km 982	100695	424445	2,939	3,047	3,214	2,863	2,963	3,111
Oude Maas km 983	99702	424595	2,933	3,041	3,206	2,859	2,957	3,104
Oude Maas km 984	98760	424900	2,929	3,035	3,2	2,85	2,946	3,091
Oude Maas km 985	98095	425653	2,923	3,028	3,193	2,843	2,938	3,082
Oude Maas km 986	97838	426638	2,925	3,03	3,194	2,841	2,934	3,076
Oude Maas km 987	97172	427362	2,93	3,035	3,203	2,84	2,932	3,075
Oude Maas km 988	96173	427278	2,928	3,033	3,2	2,846	2,937	3,082
Oude Maas km 989	95212	427246	2,931	3,035	3,203	2,853	2,944	3,092
Oude Maas km 990	94294	427667	2,931	3,034	3,203	2,851	2,941	3,087
Oude Maas km 991	93305	427885	2,94	3,039	3,208	2,855	2,945	3,092
Oude Maas km 992	92275	427730	2,934	3,031	3,199	2,848	2,938	3,086
Oude Maas km 993	91344	427484	2,928	3,024	3,19	2,84	2,93	3,076
Oude Maas km 994	90355	427491	2,935	3,028	3,194	2,836	2,925	3,068
Oude Maas km 995	89438	427886	2,928	3,019	3,183	2,838	2,928	3,074
Oude Maas km 996	88592	428376	2,886	2,981	3,138	2,856	2,945	3,092
Oude Maas km 997	87676	428760	2,913	3,004	3,167	2,888	2,974	3,124
Oude Maas km 998	86692	428703	2,925	3,011	3,171	2,912	2,993	3,149
Oude Maas km 999	85723	428656	2,958	3,04	3,197	2,95	3,026	3,181
Oude Maas km 1000	84769	428908	2,983	3,064	3,217	2,978	3,056	3,211
Oude Maas km 1001	83897	429351	2,995	3,075	3,227	3,005	3,082	3,24
Oude Maas km 1002	83210	430052	3,057	3,128	3,277	3,047	3,117	3,279
Oude Maas km 1003	82683	430900	3,052	3,121	3,27	3,08	3,157	3,317
Oude Maas km 1004	82320	431780	3,132	3,197	3,349	3,097	3,174	3,339
Oude Maas km 1005	82014	432770	3,158	3,226	3,373	3,125	3,196	3,367
Oude Maas km 1006	81801	433726	3,171	3,242	3,386	3,163	3,238	3,405
Ruigt km 970	117102	418716	3,187	3,32	3,505	3,047	3,165	3,329
Ruigt km 971	116300	418488	3,156	3,289	3,476	3	3,117	3,281
Spijkerboor km 973	117377	414682	3,231	3,367	3,558	3,036	3,161	3,331
Spui km 996	88648	427394	2,873	2,971	3,131	2,815	2,909	3,059
Spui km 997	87737	427257	2,837	2,937	3,095	2,767	2,866	3,016
Spui km 998	86740	427450	2,811	2,913	3,07	2,733	2,836	2,987
Spui km 999	85949	426834	2,784	2,887	3,044	2,715	2,821	2,972
Spui km 1000	85196	426219	2,771	2,876	3,034	2,702	2,81	2,959
Spui km 1001	84352	425991	2,749	2,856	3,013	2,689	2,8	2,949
Spui km 1002	83377	426043	2,724	2,834	2,993	2,674	2,787	2,937
Spui km 1003	82447	425716	2,704	2,818	2,978	2,658	2,772	2,923
Spui km 1004	81555	425396	2,683	2,8	2,961	2,639	2,755	2,91
Spui km 1005	80597	425103	2,67	2,788	2,949	2,623	2,741	2,898
Spui km 1006	79874	424389	2,66	2,779	2,94	2,608	2,728	2,889
Spui km 1007	78946	424493	2,65	2,768	2,928	2,589	2,71	2,872
Spui km 1008	77953	424650	2,642	2,76	2,92	2,572	2,695	2,859
Spui km 1009	77214	424015	2,636	2,755	2,914	2,563	2,687	2,853
Spui km 1010	76681	423181	2,632	2,75	2,909	2,551	2,676	2,843
Spui km 1011	76193	422426	2,63	2,747	2,907	2,539	2,664	2,834

Spui km 1012	75188	422514	2,622	2,739	2,897	2,529	2,655	2,823
Spui km 1013	74180	422910	2,61	2,726	2,883	2,512	2,637	2,804
Wantij km 1	106975	425612	3,106	3,221	3,387	3,036	3,126	3,257
Wantij km 2	107885	425298	3,129	3,244	3,412	3,061	3,152	3,285
Wantij km 3	108719	424954	3,151	3,269	3,438	3,09	3,182	3,318
Wantij km 4	109538	424472	3,377	3,506	3,674	3,131	3,225	3,364
Wantij km 5	110438	424093	3,462	3,604	3,79	3,18	3,277	3,419
Wantij km 6	111241	423532	3,47	3,612	3,798	3,237	3,338	3,485
Wantij km 7	111829	422928	3,462	3,603	3,787	3,293	3,402	3,563
Steurgat km 964	119744	423059	3,328	3,455	3,631	3,302	3,44	3,625
Steurgat km 965	119660	422089	3,315	3,443	3,621	3,259	3,393	3,574
Steurgat km 966	119369	421194	3,293	3,422	3,604	3,217	3,347	3,524
Steurgat km 967	118709	420491	3,258	3,386	3,568	3,176	3,302	3,475
Steurgat km 968	118681	419513	3,254	3,384	3,567	3,136	3,26	3,429
Steurgat Ruigt km 969	118050	418770	3,226	3,357	3,542	3,101	3,221	3,388
Werkendam Binnen steurgat km 963	119770	424040	3,342	3,468	3,642	3,345	3,488	3,678
Haringvliet km 1029 (Zuidoever)	63560	427653	2,528	2,64	2,792	2,463	2,586	2,749
Haringvliet km 1028 (Zuidoever)	64407	426983	2,534	2,646	2,798	2,464	2,588	2,753
Haringvliet km 1027 (Zuidoever)	65060	426169	2,539	2,651	2,804	2,47	2,593	2,761
Haringvliet km 1026 (Zuidoever)	65798	425403	2,546	2,66	2,813	2,474	2,6	2,766
Haringvliet km 1025 (Zuidoever)	66555	424764	2,557	2,671	2,824	2,479	2,605	2,771
Haringvliet km 1024 (Zuidoever)	67387	424151	2,564	2,678	2,833	2,48	2,606	2,773
Haringvliet km 1023 (Zuidoever)	68204	423673	2,57	2,684	2,84	2,482	2,608	2,775
Haringvliet km 1022 (Zuidoever)	69007	423259	2,575	2,689	2,846	2,486	2,612	2,78
Haringvliet km 1023 (Noordoever)	69616	426484	2,567	2,681	2,835	2,481	2,605	2,772
Haringvliet km 1021 (Zuidoever)	69787	422723	2,582	2,698	2,854	2,491	2,616	2,784
Haringvliet km 1022 (Noordoever)	70448	426092	2,571	2,684	2,838	2,483	2,607	2,774
Haringvliet km 1020 (Zuidoever)	70523	422173	2,589	2,706	2,862	2,495	2,62	2,788
Haringvliet km 1021 (Noordoever)	71116	425387	2,58	2,694	2,85	2,488	2,612	2,779
Haringvliet km 1019 (Zuidoever)	71374	421844	2,597	2,714	2,871	2,496	2,622	2,788
Haringvliet km 1020 (Noordoever)	71537	424185	2,586	2,701	2,857	2,493	2,618	2,785
Haringvliet km 1019 (Noordoever)	72453	424007	2,595	2,711	2,867	2,498	2,623	2,79
Haringvliet km 1018 (Zuidoever)	72606	422139	2,6	2,716	2,874	2,499	2,623	2,789
Haringvliet km 1017 (Zuidoever)	73039	421441	2,606	2,722	2,88	2,503	2,627	2,794
Haringvliet km 1018 (Noordoever)	73226	423375	2,601	2,718	2,875	2,506	2,631	2,798
Haringvliet km 1016 (Zuidoever)	73231	420748	2,609	2,725	2,883	2,509	2,634	2,8
Haringvliet km 1015 (Zuidoever)	73774	420121	2,616	2,732	2,889	2,514	2,64	2,807
Haringvliet km 1014 (Zuidoever)	74417	419598	2,623	2,74	2,898	2,518	2,644	2,812
Haringvliet km 1013 (Zuidoever)	75122	419120	2,633	2,75	2,91	2,523	2,649	2,818
Haringvliet km 1012 (Zuidoever)	75734	418700	2,641	2,758	2,919	2,527	2,653	2,822
Haringvliet km 1012 (Noordoever)	76576	419538	2,642	2,759	2,92	2,526	2,652	2,821
Haringvliet km 1011 (Zuidoever)	76603	418002	2,646	2,763	2,924	2,536	2,663	2,833
Haringvliet km 1010 (Zuidoever)	77253	417019	2,657	2,775	2,935	2,545	2,672	2,842
Haringvliet km 1011 (Noordoever)	77453	419443	2,652	2,77	2,93	2,531	2,657	2,826
Haringvliet km 1009 (Zuidoever)	78043	416031	2,669	2,787	2,949	2,554	2,682	2,852
Haringvliet km 1010 (Noordoever)	78421	419288	2,661	2,78	2,941	2,537	2,664	2,832
Haringvliet km 1008 (Zuidoever)	79077	415408	2,679	2,798	2,961	2,564	2,693	2,862
Haringvliet km 1009 (Noordoever)	79416	419023	2,669	2,787	2,95	2,541	2,668	2,836
Haringvliet km 1007 (Zuidoever)	80263	415425	2,687	2,807	2,971	2,574	2,702	2,873
Haringvliet km 1008 (Noordoever)	80381	418696	2,677	2,797	2,96	2,545	2,672	2,84
Haringvliet km 1006 (Zuidoever)	81180	414210	2,702	2,824	2,988	2,581	2,709	2,88
Haringvliet km 1007 (Noordoever)	81323	418328	2,686	2,807	2,97	2,553	2,678	2,846
Haringvliet km 1005 (Zuidoever)	82116	413855	2,716	2,839	3,005	2,59	2,718	2,888
Haringvliet km 1006 (Noordoever)	82179	417961	2,693	2,814	2,978	2,56	2,686	2,854

Haringvliet km 1005 (Noordoever)	83154	417561	2,702	2,823	2,988	2,571	2,697	2,866
Haringvliet km 1004 (Zuidoever)	83158	413589	2,731	2,854	3,021	2,596	2,724	2,894
Haringvliet km 1004 (Noordoever)	84016	417019	2,714	2,835	3,001	2,579	2,704	2,874
Haringvliet km 1003 (Zuidoever)	84480	414070	2,736	2,86	3,027	2,591	2,718	2,885
Haringvliet km 1003 (Noordoever)	84824	416380	2,727	2,849	3,014	2,592	2,719	2,887
Haringvliet km 1002 (Noordoever)	85604	415779	2,737	2,86	3,027	2,599	2,727	2,895
Haringvliet km 1001	86395	415212	2,746	2,87	3,038	2,604	2,731	2,9
Hartelkanaal km 1	81260	431320	3,195	3,268	3,414	3,093	3,169	3,33
Bergse Maas km 231	136430	416387	4,985			5,293		
Bergse Maas km 232	135529	416013	4,913			5,199		
Bergse Maas km 233	134663	415512	4,826			5,1		
Bergse Maas km 234	133879	414885	4,739			4,999		
Bergse Maas km 235	133095	414265	4,633			4,887		
Bergse Maas km 236	132202	413834	4,539			4,776		
Bergse Maas km 237	131226	413635	4,419			4,678		
Bergse Maas km 238	130227	413643	4,321			4,571		
Bergse Maas km 239	129140	413810	4,223			4,441		
Bergse Maas km 240	128268	414029	4,116			4,331		
Bergse Maas km 241	127328	414371	4,013			4,212		
Bergse Maas km 242	126392	414728	3,922			4,101		
Bergse Maas km 243	125421	414980	3,82			3,984		
Bergse Maas km 244	124418	415030	3,717			3,856		
Bergse Maas km 245	123427	414882	3,611			3,724		
Bergse Maas km 246	122457	414631	3,527			3,59		
Bergse Maas km 247	121458	414540	3,444			3,438		
Bergse Maas km 248	120476	414705	3,343			3,331		
Bergse Maas km 249	119465	414741	3,29			3,246		
Bergse Maas km 250	118499	414509	3,248			3,151		
Bergse Maas km 251	117539	414134	3,245			3,084		
Maas km 226	141298	416965	5,587					
Maas km 227	140323	417167	5,436			5,757		
Maas km 228	139337	417094	5,318			5,653		
Maas km 229	138367	416902	5,206			5,535		
Maas km 230	137407	416662	5,089			5,409		
Brittanniehaven 1	76000	434700		5,921	6,166		5,873	6,085
Brittanniehaven 2	76660	434490		5,947	6,201		5,893	6,105
Calandkanaal km 1018	75323	434861		5,425	5,686		5,852	6,068
Calandkanaal km 1019	75092	435720		5,83	6,088		5,794	6,018
Calandkanaal km 1020	74924	436600		5,752	6,027		5,726	5,983
Calandkanaal km 1021	74517	437426		5,69	5,984		5,686	5,953
Calandkanaal km 1022	73877	438060		5,668	5,955		5,667	5,932
Calandkanaal km 1023	73246	438616		5,619	5,918		5,64	5,905
Calandkanaal km 1024	72546	439251		5,568	5,861		5,599	5,867
Calandkanaal km 1025	71774	439872		5,515	5,807		5,546	5,83
Calandkanaal km 1026	71004	440498		5,466	5,774		5,549	5,874
Calandkanaal km 1027	70217	441122		5,402	5,703		5,438	5,717
Hartelkanaal km 2	80177	431330		5,66	5,917		5,568	5,939
Hartelkanaal km 3	79180	431370		5,615	5,869		5,553	5,922
Hartelkanaal km 4	78181	431340		5,577	5,834		5,534	5,9
Hartelkanaal km 5	77247	431547		5,554	5,806		5,516	5,884
Hartelkanaal km 6	76407	432046		5,507	5,773		5,499	5,87
Hartelkanaal km 7	75683	432647		5,48	5,754		5,483	5,854
Hartelkanaal km 8	75375	433595		5,443	5,705		5,458	5,827

Hartelkanaal km 9	74968	434494		5,388	5,64		5,409	5,774
Hartelkanaal km 10	74370	435266		5,337	5,577		5,367	5,722
Hartelkanaal km 11	73589	435910		5,288	5,551		5,329	5,682
Hartelkanaal km 12	72797	436505		5,285	5,546		5,292	5,643
Hartelkanaal km 13	72014	437096		5,28	5,552		5,266	5,612
Hartelkanaal km 14	71467	437657		5,301	5,584		5,251	5,594
Hartelkanaal km 15	70767	438568		5,283	5,565		5,264	5,563
Hartelkanaal km 16	69835	438959		5,253	5,541		5,265	5,548
Hartelkanaal km 17	68825	439110		5,203	5,481		5,23	5,513
Hartelkanaal km 18	67843	439332		5,199	5,48		5,378	5,55
Hartelkanaal km 19	66853	439557		5,205	5,496		5,279	5,515
Hartelkanaal km 20	65787	439740		5,249	5,552		5,298	5,553
Hartelkanaal km 21	64770	439597		5,259	5,559		5,358	5,564
Hartelkanaal km 22	63824	439270		5,306	5,604		5,411	5,598
Hartelkanaal km 23	62990	438988		5,319	5,611		5,429	5,613
Nieuwe Waterweg km 1027	70283	441887		5,368	5,66		5,37	5,679
Nieuwe Waterweg km 1028	69580	442580		5,306	5,607		5,313	5,62
Nieuwe Waterweg km 1029	68784	443193		5,234	5,551		5,259	5,563
Nieuwe Waterweg km 1030	67942	443727		5,2	5,508		5,228	5,531
Nieuwe Waterweg km 1031	67040	444152		5,163	5,469		5,225	5,531
Nieuwe Waterweg km 1032	66099	444485		5,135	5,451		5,191	5,501
Seinehaven 1	76070	433100		5,486	5,752		5,486	5,86
Seinehaven 2	76800	432700		5,526	5,805		5,508	5,885