



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Milieu

Deltares

Achtergrondrapportage hydraulische belasting voor de Vechtdelta

Juli 2012

Dit rapport is opgesteld in opdracht van RWS Waterdienst

Achtergrondrapportage hydraulische belasting voor de Vechtdelta

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 Vechtdelta

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
RWS Waterdienst	1204143-003	1204143-003-ZWS-0025	66

Trefwoorden

Vechtdelta, WTI-2011, Hydraulische Randvoorwaarden, toetspeilen, concept HR2011, Toetspeilen, SWAN, WAQUA IJVD

Samenvatting

Dit rapport beschrijft de achtergronden bij het berekenen van de concept hydraulische randvoorwaarden voor de waterkeringen in de Vechtdelta. Deze randvoorwaarden zijn in het kader van het Wettelijke Toetsinstrumentarium WTI-2011 opnieuw bepaald. Het doel van dit achtergrondrapport is het inzichtelijk en navolgbaar vastleggen van uitgangspunten en keuzes die ten grondslag liggen aan deze concept HR2011 getallen.

Voor het berekenen van de concept hydraulische randvoorwaarden in de Vechtdelta is zoveel mogelijk gebruik gemaakt van de nieuwe inzichten in de HR-keten. De waterstanden zijn bepaald met de integrale WAQUA IJVD modelschematisatie die naast de Vechtdelta, de IJsseldelta en het hele IJsselmeer, inclusief het Ketelmeer en het Vossemeer, omvat. Het gebied van het Kampereiland is in dit model verbeterd ten opzichte van het HR2006 model. De golfparameters in het Zwarte Meer zijn bepaald met een tweedimensionaal SWAN model in plaats van Bretschneider, en de probabilistische berekeningen zijn uitgevoerd met Hydra-Zoet.

De berekende concept hydraulische randvoorwaarden HR2011 laten een consistent en logisch beeld zien. Het verschil in toetspeil tussen de huidige HR2006 en de berekende concept HR2011 is klein. Het varieert tussen -0.12 en 0.15 m en is goed verklaarbaar. Verbetering van de modelschematisatie en actualisatie van de bodemligging is de belangrijke oorzaak van de verschillen in toetspeilen.

Het SWAN model leidt voor het Zwarte Meer, met uitzondering van de locaties langs het noordoostelijke deel van de Noordoostpolder, tot lagere golfparameters en hydraulische belastingniveaus. De verhoging van de golfparameters in het noordoostelijke deel van de Noordoostpolder wordt veroorzaakt door de tweedimensionale effecten in SWAN, en de verlaging in de rest van het Zwarte Meer door de bodemeffecten.

Referenties

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	dec. 2011	Houcine Chbab		Chris Sprengers		Annemargreet de Leeuw	
	Juli 2012	Houcine Chbab		Chris Sprengers		Gerard Blom	

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Achtergrond	1
1.2 Vechtdelta	1
1.3 Doelstelling	2
1.4 Doelgroep	2
1.5 Proces en organisatie	3
1.6 Leeswijzer	3
2 Systeem- en ketenbeschrijving	5
2.1 Systeembeschrijving	5
2.2 Ketenbeschrijving	7
3 Waterbeweging en productie waterstanden	11
3.1 Inleiding	11
3.2 Modelgebied en brongegevens	11
3.2.1 IJsseldelta	11
3.2.2 Overijsselse Vecht en Vechtdelta	11
3.2.3 IJsselmeer (inclusief Ketelmeer en Vossemeer)	12
3.2.4 Brongegevens	12
3.2.5 Veranderingen ten opzichte van HR2006 schematisatie	13
3.2.6 Modelschematisatie en rooster	14
3.3 Kalibratie en verificatie WAQUA IJVD	17
3.4 Aanpassingen IJVD modelschematisatie binnen WTI	18
3.5 Productieberekeningen en Randvoorwaarden Vechtdelta	19
3.5.1 Productieberekeningen Vechtdelta	19
3.6 Productie randvoorwaarden	20
3.6.1 Bovenrand van het IJVD model	20
3.6.2 Benedenrand van WAQUA bij de Afsluitdijk	21
3.6.3 Wind en windverloop	22
3.6.4 Windrichting	23
3.6.5 Kunstwerken	24
3.7 Uitvoerlocaties	26
3.8 Resultaat en controle productieberekeningen	28
3.8.1 Controle productieberekeningen	28
3.8.2 Resultaat controle productieberekeningen	30
4 Productie golfparameters	33
4.1 Inleiding	33
4.2 Bretschneider formulering	33
4.3 SWAN model voor Zwarte Meer	34
4.3.1 Versie	34
4.3.2 Fysische en numerieke instellingen	34
4.3.3 Rekenrooster en verificatie SWAN model Zwarte Meer	35
4.4 Controle productieberekeningen SWAN	38
4.5 Keuze golfparameters uit SWAN en vullen databases	38
4.5.1 Keuze golfparameters uit SWAN berekeningen	38
4.5.2 Vullen databases	40

5	Statistiek en probabilistisch rekenen	41
5.1	Inleiding	41
5.2	Marginale statistiek stochasten Vechtdelta	41
5.2.1	Meerpeilstatistiek	41
5.2.2	Afvoerstatistiek	43
5.2.3	Windstatistiek	45
5.2.4	Ramspolkering	45
5.3	Probabilistisch model Hydra-Zoet	46
6	Concept hydraulische randvoorwaarden	49
6.1	Inleiding	49
6.2	Vergelijking en verschilanalyse toetspeilen	49
6.3	Vergelijking en verschilanalyse belastingniveaus	52
7	Samenvatting conclusies en aanbevelingen	57
7.1	Samenvatting	57
7.2	Conclusies	57
7.3	Aanbevelingen	58
8	Referenties	59
Bijlage(n)		
A	Overzicht aanpassingen en versies WAQUA-IJVD model WTI-2011	A-1
B	Benedenrand bij Afsluitdijk	B-2
C	Overzicht toetspeilen	C-3
D	Keuze golfparamaters uit SWAN berekeningen	D-4

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

De Waterwet uit 2009 (zie [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 maatgevende hydraulische belastingen, in termen van waterstanden en golfparameters als significante golfhoogte, golfperiode en golfrichting, voor alle locaties waar zich primaire waterkeringen bevinden. Zowel het VTV als het Randvoorwaardenboek worden vastgesteld door de Minister van Infrastructuur en Milieu.

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

Dit rapport heeft tot doel het inzichtelijk en navolgbaar vastleggen van de gegevens, keuzes en uitgangspunten waarmee en de wijze waarop de concept hydraulische randvoorwaarden 2011 (concept HR2011) voor de Vechtdelta zijn bepaald. Deze concept HR2011 zouden kunnen worden opgenomen in een nieuwe versie van het Randvoorwaardenboek. Tevens zullen de belangrijkste resultaten worden. Het rapport beoogt geen volledige beschrijving van alle aspecten van de concept HR2011 te geven maar geeft slechts een samenvatting van de belangrijkste informatie en de belangrijkste resultaten. Meer detailinformatie is te vinden in separate projectdocumenten. In de lopende tekst zal hier naar verwezen worden.

Door de Waterdienst werd 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 werd wel besloten om nieuwe randvoorwaarden af te leiden. De continuïteit van 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.

1.2 Vechtdelta

Onderhavig rapport richt zich op de concept hydraulische randvoorwaarden voor het gebied van de Vechtdelta. De Vechtdelta is gedefinieerd als het gedeelte van de Overijsselse Vecht vanaf Ommen (km 36) tot de Ramspolkering in het Zwarte Meer inclusief het Zwarte Water tot de keersluis bij Zwolle en het Zwolle-IJsselkanaal. Opgemerkt wordt dat naam Vechtdelta

uit praktische overwegingen wordt gehanteerd, en geen fysisch-geografische onderbouwing kent. De dijkringen 7, 9, 10 en 53 grenzen geheel of gedeeltelijk aan de Vechtdelta.

Elke van deze dijkringen heeft een wettelijk vastgestelde frequentienorm, zie Tabel 1.1. Dat wil zeggen dat de concept hydraulische randvoorwaarden die berekend worden voor deze dijkringen de waterstand of het hydraulische belastingniveau is die behoort bij de gegeven normfrequentie.

Naast deze dijkringen bevindt zich in de Vechtdelta 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 Vechtdelta is gegeven in Tabel 1.2.

Tabel 1.1 Dijkringgebieden in de Vechtdelta

Dijkringgebied	Normfrequentie	Naam	Buitenwater
7	1/4000	Noordoostpolder	Zwarte Meer
9	1/1250	Vollenhove	Overijsselde Vecht, Zwarte Water, Zwarte Meer
10	1/2000	Mastenbroek	Zwarte Water, Zwarte Meer
53	1/1250	Salland	Vecht, Zwarte Water

Tabel 1.2 Verbindende waterkeringen in de Vechtdelta

Verbindende waterkering	Normfrequentie	Naam	Buitenwater
2	1/4000	Kadoelersluis	Zwarte Meer
6	1/2000	Spoldersluis	IJssel
25	1/2000	Keersluis Ramspol	IJsselmeer/Ketelmeer

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 Vechtdelta. Dit rapport is een nadere beschrijving van gemaakte en door het Expertise Netwerk Waterveiligheid (ENW) goedgekeurde keuzes ten behoeve van WTI-2011, deze keuzes staan beschreven in de Ketenbeschrijvingen voor HR2011 [Van der Klis, 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); en
- Ontwikkelaars van de hydraulische randvoorwaarden en verwante gereedschappen in het kader van veiligheid tegen overstromen: bijvoorbeeld Hydra-Ring in het kader van WTI-2017 en 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 Water (DGW) 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 Hydraulic Review Team (HRT).

Om de waterkeringbeheerders gedurende het project te informeren en zodoende een breed draagvlak voor de concept hydraulische randvoorwaarden te creëren zijn er zogenaamde watersysteemgroepen opgericht. Voor het IJsselmeer, Vecht- en IJsseldelta was er één 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 hydraulische randvoorwaarden af te leiden, zijn in het project HR zoet uitgewerkt.

1.6 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 geeft een beschrijving van het systeem van de Vechtdelta en de werkwijze. Vervolgens wordt in de hoofdstukken 3 en 4 de productie van waterstanden respectievelijk golven, nodig voor het probabilistisch rekenen, behandeld. Hierbij wordt tevens aandacht besteed aan het gebruikte WAQUA en SWAN model. Hoofdstuk 5 behandelt de statistiek van de voor de Vechtdelta relevante stochasten en het probabilistisch model Hydra-Zoet. In hoofdstuk 6 worden resultaten van de berekende concept toetspeilen en belastingniveaus gepresenteerd. Conclusies en aanbevelingen zijn te vinden in hoofdstuk 7.

2 Systeem- en ketenbeschrijving

2.1 Systeembeschrijving

Zoals hierboven vermeld richt het onderhavige rapport zich op de Vechtdelta. Voor de IJsseldelta, met uitzondering van de verbindende Ramspolkering blijven de vigerende hydraulische randvoorwaarden ongewijzigd. Voor de Vechtdelta en vooral de verbindende Ramspolkering zijn berekeningen in de IJsseldelta noodzakelijk, we spreken daarom in dit rapport van de Vecht- en IJsseldelta.



Figuur 2.1 Geografisch overzicht van de Vecht- en IJsseldelta

Voor de Vechtdelta worden concept hydraulische randvoorwaarden vastgesteld vanaf kilometer 36 ter hoogte van de brug in de weg N348 nabij Ommen tot en met de Ramspolkering in het Zwarte Meer (inclusief het Zwarte Water tot de Keersluis Zwolle en het Zwolle-IJsselkanaal). De buitendijkse polders langs het Zwarte Meer (bv. Kampereiland) en de waterlopen die deze polders doorsnijden, maken ook deel uit van de Vechtdelta. De betrokken dijkringen zijn 7, 9, 10 en 53 met achtereenvolgens normfrequenties van 1/4000, 1/1250, 1/2000 en 1/1250; zie Figuur 2.1. De dijkringen in de Vechtdelta worden bedreigd door stormen op het IJsselmeer, hoge afvoeren op de Overijsselse Vecht (in combinatie met hoge afvoeren op de IJssel) of combinaties van beide.

In de Vechtdelta bevinden zich drie keersluizen. Ten eerste de Ramspolkering welke bij een stormsituatie uit westelijke richting hoge waterstanden door opstuwning vanuit het IJsselmeer/Ketelmeer op het Zwarte Meer moet voorkomen. De Ramspolkering is een balgstuw die normaal gesproken op de bodem van het Zwarte Meer ligt.

Wanneer het waterpeil boven 0,5 m+NAP komt en de stromingsrichting oostelijk is (van het Ketelmeer richting Zwarte Meer), wordt de balg gevuld met water en lucht zodat een barrière ontstaat met een kruinhoogte van 3,65 m+NAP. De sluitfrequentie voor de Ramspolkering is berekend op iets meer dan 1 keer per jaar. De Ramspolkering opent vervolgens weer als de waterstand aan de buitenzijde (Ketelmeer) lager wordt dan de waterstand aan de binnenzijde (Zwarte Meer). Het sluiten van de kering gebeurt in 1 uur, terwijl voor het openen 3 uur nodig is (bron: website waterschap Groot Salland).

De tweede keersluis is een klepkering bij Zwolle. Deze kering ligt tussen het oude centrum van Zwolle en de A28 en heeft als functie om bij hoge waterstanden op het Zwarte Water en de Vecht de binnenstad van Zwolle en het Sallandse achterland te beschermen. De kering treedt in werking wanneer het waterpeil boven de 1,0 m+NAP stijgt en de stroming van het Zwarte Water naar de binnenstad van Zwolle gericht is. De sluitfrequentie van de keersluis Zwolle is berekend op één keer per twee jaar (bron: website Groot Salland). Naar aanleiding van de aanleg van deze keersluis is de status van de achterliggende dijken langs de Sallandse Weteringen veranderd van primaire waterkeringen naar regionale waterkeringen.

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

Naast de drie keersluizen bevindt zich in de Overijsselse Vecht ook nog een aantal stuwen. Voor het bepalen van de hydraulische randvoorwaarden zijn de stuwen bij Vechterweerd en bij Vilsteren van belang. De overige stuwen in de Vecht liggen namelijk verder bovenstrooms en maken dus geen deel meer uit van het in dit project beschouwde gebied.

Voor de Overijsselse Vecht zelf is voornamelijk de afvoer bepalend voor de maatgevende waterstand. De wind heeft op de Vecht een minimale invloed op de waterstand, bij gebrek aan nabijgelegen grote wateroppervlakten. Dit verandert echter verder benedenstrooms op het Zwarte Water. Hier gaat het systeem geleidelijk over van afvoergedomineerd naar windgedomineerd. Het Zwarte Meer is bij geopende Ramspolkering voornamelijk een windgedomineerd systeem. Echter, wanneer de Ramspolkering gesloten is, wordt de invloed van de wind beperkt en speelt ook de afvoer een rol in de hoogte van de optredende waterstanden.

Het Kampereiland vormt een bijzonder gebied in de Vechtdelta. Dit is het buitendijkse gebied tussen het Zwarte Meer en de Kamperzeedijk. In het Kampereiland bevinden zich drie geulen: het Ganzendiep, het Goot en de Veneriete, zie Figuur 2.2. Deze geulen zijn omringend door regionale keringen of hoge gronden, waarvan de hoogte weergegeven staat in Tabel 2.1. Deze hoogtes zijn afkomstig uit Top25 kaarten. De regionale kering die het Kampereiland beschermt tegen hoge waterstanden op het Zwarte Meer heeft een hoogte van 1.7 m+NAP met variaties van ± 0.20 m.

Tabel 2.1 Hoogte regionale keringen en hooggronden langs Ganzendiep, Goot en Veneriete

Ganzendiep		Goot		Veneriete	
Oost	West	Oost	West	Oost	West
1.9 m	2.1 m	1.5 m	1.6 m	1.0 m	1.70 m

Tabel 2.1 laat zien dat de hoogtes langs de geulen in het Kampereiland variëren tussen 1.0 m+NAP en 2.1 m+NAP. Dit betekent dat Kampereiland geleidelijk onderloopt.

Het gebied ten oosten van de Veneriete loopt waarschijnlijk als eerste onder. Verder laat Tabel 2.1 zien dat delen van het Kampereiland waarschijnlijk droog blijven, ook onder maatgevende omstandigheden voor de waterstanden. Immers, de toetspeilen voor de dijken langs het Zwarte Meer bedragen ca. 1.5 m+*NAP* en de regionale keringen zijn dikwijls hoger dan 1.50 m, vergelijk ook met Tabel 2.1.



Figuur 2.2 Overzicht ligging kanalen Ganzendiep, Goot en Veneriete in het Kampereiland

2.2 Ketenbeschrijving

Voor het berekenen van de concept hydraulische randvoorwaarden is gebruik gemaakt van een probabilistische rekenmethode. Deze is principieel gebaseerd op de methoden die al eerder in de HR2006 zijn gebruikt voor de Vechtdelta. De kern van deze methode is dat de kansverdelingen van de belangrijkste bedreigingen (meerpeil, afvoer windsnelheid, windrichting en beheer situatie van de Ramspolkering) worden meegenomen in de bepaling van de hydraulische randvoorwaarden. Het resultaat is dan een frequentie, in keren per jaar, waarmee 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.

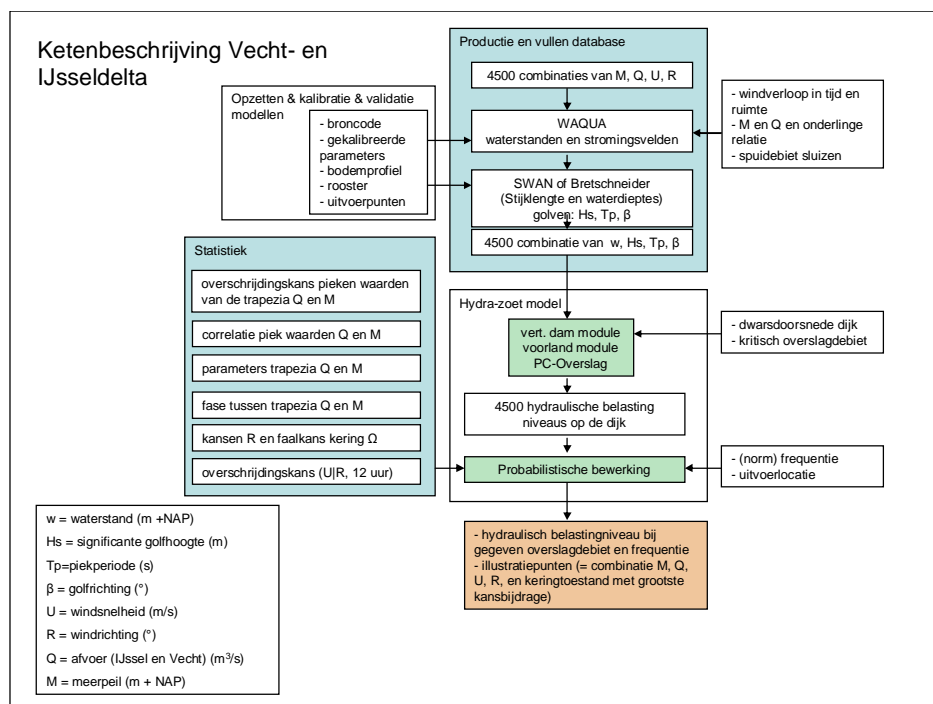
De probabilistische rekenmethode zoals gebruikt voor de Vechtdelta is beschreven in een overzichtsdokument van de probabilistische modellen in de zoete wateren [Geerse, 2008]. De methode is toepasbaar gemaakt voor praktische berekeningen door het computerprogramma Hydra-Zoet [HKV, 2011a]. Het programma Hydra-Zoet is, zoals de naam zegt, niet alleen voor de Vechtdelta maar geschikt voor alle zoetwatersystemen. Het schema in Figuur 2.3 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 dominant zijn en welke statistieken hierbij horen.

Voor de Vechtdelta zijn dit zoals hierboven beschreven het meerpeil, de afvoer, de windrichting, de windsnelheid en de beheersituatie van de Ramspolkering. Dit is het blok links in het schema. Dit zijn de in de productieberekeningen mee te nemen stochastische grootheden voor de invoer van het waterbewegingmodel (WAQUA) en het golfvoorspellingsmodel (SWAN). Voor het IJsselmeer is er vanwege correlatie met het meerpeil ook de grootte afvoer, maar die heeft geen invloed op de waterstanden en het hydraulische belastingniveau in het IJsselmeer. In totaal worden van 4500 combinaties van meerpeilen, afvoeren, windrichtingen, windsnelheden en beheersituatie van Ramspol op elke locatie de maximale waterstand berekend met een tweedimensionaal 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 het golfvoorspellingsmodel SWAN. De uitkomsten van al deze berekeningen worden opgeslagen in een database. Dit is rechtsboven in het schema weergegeven. Vanwege de grote hoeveelheid data zijn de databases opgeknipt in aparte databases per dijkkring.

Het waterbewegingmodel (WAQUA) en het golfvoorspellingsmodel (SWAN) moeten hiervoor 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 [Deltares, 2010]. Voor SWAN zijn de modelkalibratie en -validatie uitgevoerd in het kader van de WTI voor de Waddenzee [Gautier, 2010]. Hierin zijn vele metingen beschouwd, waaronder ook metingen op het IJsselmeer en het Slotenmeer.

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. Het rekenen begint met selecteren wat één of meerdere locaties waarvoor de gebruiker het toetspeil of het hydraulische belastingniveau wil berekenen. Indien windgolven in de berekening moeten worden betrokken zijn ook het golfoverslagdebiet en dijkprofiel nodig.



Figuur 2.3 Schematische weergave van de HR-keten voor de Vecht- en IJsseldelta uit de ketenbeschrijving van de HR2011 [Van der Klis et al.,(2010), Fig. 2.1].

Zoals hierboven is beschreven, kan met het programma Hydra-Zoet voor alle geselecteerde punten in de database een berekening worden gemaakt van het toetspeil en/of het hydraulische belastingniveau.

Hydra-Zoet is geschikt voor alle zoete watersystemen en bevat daarom alle stochastische variabelen die relevant zijn voor al deze watersystemen. Voor de Vechtdelta bevat Hydra-Zoet de volgende stochasten:

- Rivierafvoer van de Overijsselse Vecht (de IJsselafvoer is in Hydra-Zoet gecorreleerd met de afvoer van de Overijsselse Vecht),
- IJsselmeerpeil,
- Windsnelheid,
- Windrichting,
- Keringsituatie van de balgstuw te Ramspol (open of dicht), waarbij de faalkans van de kering wordt meegenomen.

De stormduur wordt niet meegenomen als aparte stochast. Dit is gebaseerd op een gevoeligheidsanalyse waarbij is gekeken hoe groot het effect van de keuze is op de uitkomsten van Hydra-VIJ [Geerse, 2004]. Op basis van dit onderzoek is aangenomen dat het gebruik van één gemiddelde stormduur voor het bepalen van de concept hydraulische randvoorwaarden volstaat. Daarbij is, op basis van het onderzoek, een gemiddelde stormduur van 48 uur aangenomen. Dit is onveranderd ten opzichte van de HR2006.

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 hooggronden 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 de maximale waterstanden en golfcondities voor een groot aantal combinaties van de stochasten meerpeil, afvoer, windrichting en windsnelheid bekend. Door op de juiste manier de kansen op een bepaalde combinatie van meerpeil, afvoer, 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.

3 Waterbeweging en productie waterstanden

3.1 Inleiding

Zoals beschreven in hoofdstuk 2 zijn een waterbewegingmodel en een golfvoorspellingsmodel van de Vechtdelta gebruikt voor het bepalen van de maximale waterstanden en golfcondities. Dit is gedaan voor een groot aantal combinaties van meerpeilen, afvoeren, windsnelheden, windrichtingen en keringsituaties van de Ramspolkering. Dit hoofdstuk gaat verder in op de gebruikte modelschematisaties en hoe deze zijn geïkt. Daarnaast worden de verschillende randvoorwaarden en achtergronden van de modelschematisaties en de productieberekeningen beschreven.

Voor de waterbeweging is een WAQUA modelschematisatie ontwikkeld en beschikbaar gesteld voor gebruik binnen WTI.

3.2 Modelgebied en brongegevens

In opdracht van Rijkswaterstaat¹ is door Deltares een integrale WAQUA modelschematisatie ontwikkeld voor het IJsselmeer, Vecht- en IJsseldelta. Binnen Deltares zijn de betreffende werkzaamheden uitgevoerd binnen de projecten Atlantis en Rivierkundig Model instrumentarium. Binnen deze projecten wordt gewerkt aan de ontwikkeling, het beheer en onderhoud van de 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.

De IJVD modelschematisatie van WAQUA omvat de Overijsselse Vecht, de Vecht- en de IJsseldelta en het IJsselmeer. Een schematische weergave van de modelschematisatie is gegeven in Figuur 3.1. De IJsseldelta en de Vechtdelta vormen beiden een overganggebied tussen een meersituatie en een riviersituatie. Beide rivieren monden uit in het Ketelmeer, dat via het IJsselmeer en de Spuisluizen in de Afsluitdijk op de Waddenzee loost.

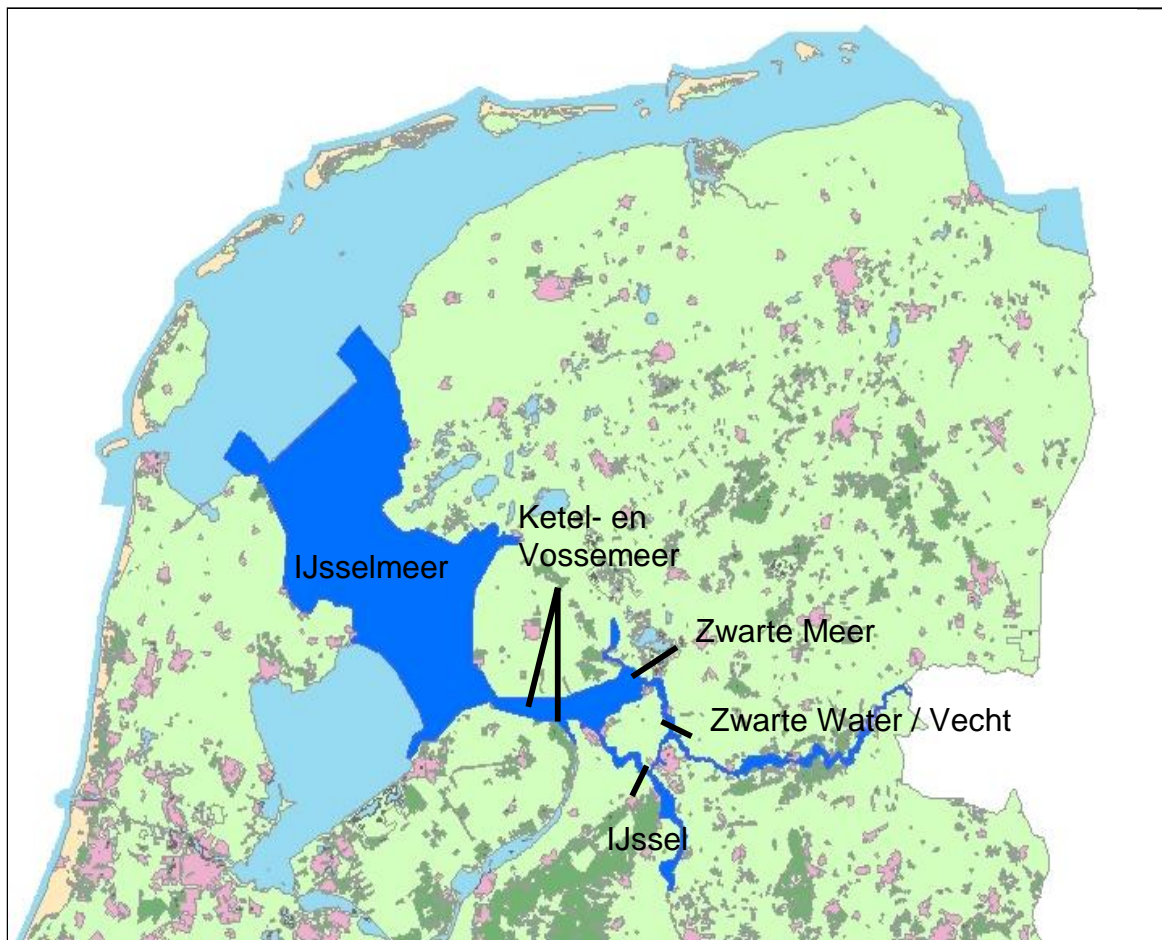
3.2.1 IJsseldelta

In Nederland splitst de Rijn, kort na de grens met Duitsland, zich in drie takken. Bij de Pannerdensche Kop splitst de Rijn zich in de Waal en het Pannerdensch Kanaal. Het Pannerdensch Kanaal splitst zich even verderop in Neder-Rijn en IJssel. De IJssel mondt via de IJsselmonding uit in het Ketelmeer en vervolgens in het IJsselmeer.

3.2.2 Overijsselse Vecht en Vechtdelta

De Overijsselse Vecht komt ten oosten van De Haandrik Nederland binnen en zij mondt bij Zwolle in het Zwarte Water uit dat vervolgens in het Zwarte Meer uitmondt. Het Zwarte Meer mondt via het Ketelmeer uit in het IJsselmeer. In de Overijsselse Vecht bevinden zich, in het traject tussen de Duitse grens en het Zwarte Water, zes stuwen: De Haandrik, Hardenberg, Duffelen (bij Mariënberg), Junne (iets ten oosten van Ommen), Vilsteren en Vechterweerd. Tevens bevinden zich in de Overijsselse Vecht twee keersluizen, namelijk de keersluis bij Kadoelen en de Ramspolkering bij Kampen. Ten opzichte van HR2006 zijn aan het model het Kadoelermeer en Vollenhovermeer toegevoegd vanwege hun waterbergende functie.

1. 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 gebiedsschematisatie integraal WAQUA model IJVD

Merk op dat bij de spuisluizen Den Oever en Kornwerderzand kleine delen van de Waddenzee worden meegenomen in de schematisatie van het IJVD model. Dit om het opleggen van verschillende benedenranden in de toekomst mogelijk te maken. Binnen WTI-2011 is hier geen gebruik van gemaakt en de Afsluitdijk geldt dan ook als benedenrand.

3.2.3 IJsselmeer (inclusief Ketelmeer en Vossemeer)

Het IJsselmeer wordt begrensd door de Afsluitdijk, de Friese kust (tussen Makkum en Lemmer), de westelijke dijk van de Noordoostpolder, de keersluis te Ramspol en verbindende Ramspolkering tot de Roggebotsluis in het Vossemeer, de noordwestelijke dijk van oostelijk Flevoland, de Houtribsluizen, de Houtribdijk Lelystad-Enkhuizen en de Noord-Hollandse kust van Enkhuizen naar Den Oever aan de Afsluitdijk. Het Markermeer (inclusief meren in open verbinding hiermee) en de Veluwerandmeren maken geen onderdeel uit van het IJsselmeer. In de Afsluitdijk bevinden zich twee complexen van spuisluizen, één bij Den Oever en één bij Kornwerderzand. Via deze spuisluizen wordt zowel de zoutindringing vanuit de Waddenzee tegengegaan als het streefpeil op het IJsselmeer (en Markermeer en Veluwerandmeren) gestabiliseerd.

3.2.4 Brongegevens

Voor het opzetten, kalibreren en valideren van de integrale IJVD WAQUA modelschematisatie 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 [Deltares, 2010]):

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

Deze gegevens zijn afkomstig van o.a.:

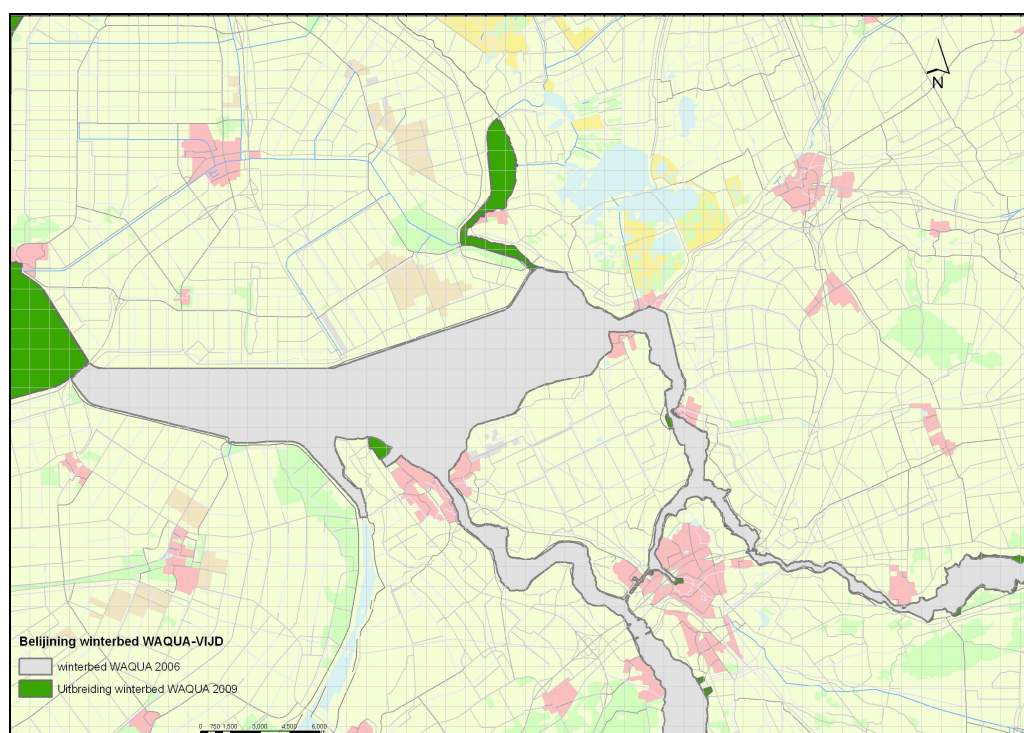
- verschillende directies van Rijkswaterstaat (IJsselmeergebied, Data-ict-Dienst, Oost Nederland),
- waterschappen (Groot Salland, Velt en Vecht),
- bureaus (Arcadis, Alkyon, HKV, CSO)

Voor de Overijsselse Vecht is ook gebruik gemaakt van de meer algemene gegevens zoals het Landelijk Grondgebruiksbestand (LGN5), de Grote basiskaart Nederland (GBKN), het Digitaal Topografische Bestand (DTB-nat), de Top10 Vector, het Algemeen Hoogtebestand Nederland (AHN) en de luchtfoto 2008.

3.2.5 Veranderingen ten opzichte van HR2006 schematisatie

Met betrekking tot het integrale WAQUA IJVD modelschematisatie zijn ten opzichte van de WAQUA HR2006 schematisatie de volgende aanpassingen en verbeteringen van belang voor de Vechtdelta:

- uitbreiding en begrenzing van modelschematisatie,
- verbetering schematisatie Kampereiland, en
- actualisering bodemligging.



Figuur 3.2 Uitbreiding en modelschematisatie Vechtdelta, groene gebieden zijn opgenomen in de nieuwe WAQUA schematisatie.

Uitbreiding en begrenzing schematisatie

Zoals hierboven reeds is vermeld omvat het IJVD model naast de Vecht- en IJsseldelta, het Ketelmeer en Vossemeer ook het IJsselmeer. De benedenrand komt hiermee bij de Afsluitdijk te liggen in plaats van bij de Ketelbrug². Mogelijke effecten van modelranden worden hiermee naar verwachting opgelost. Naast uitbreiding met het IJsselmeer zijn ten opzichte van de WAQUA schematisatie voor de HR2006 nog andere uitbreidingen in de nieuwe schematisatie doorgevoerd; dit betreft, zie ook Figuur 3.2:

- het bedrijvenpark aan de linkeroever van de IJssel stroomafwaarts van Kampen,
- het bedrijventerrein aan de linkeroever van het Zwarte Water ter hoogte van Hasselt en het Kadoelermeer.

Deze drie gebieden zorgen voor extra bergingscapaciteit, vooral het Kadoelermeer.

Verbetering schematisatie Kampereiland

Conform aanbevelingen uit HR2006 is een verbeterde weergave van het Kampereiland samengesteld en meegenomen in de IJVD WAQUA modelschematisatie. De geulen in het Kampereiland zijn nu opgenomen in de schematisatie, waar dit niet het geval was in de schematisatie voor de bepaling van de HR2006. Ook is het rekenrooster aangepast en verbeterd, zie volgende subparagraaf 3.2.6.

3.2.6 Modelschematisatie en rooster

De eerste versie van de integrale WAQUA modelschematisatie van het IJsselmeer en Vecht- en IJsseldelta is beschreven in [Alkyon, 2006] en [Alkyon, 2008]. De schematisatie van deze eerste versie van het IJVD-model is gebaseerd op de schematisatie zoals die voor de bepaling van de HR2006 is gebruikt. Deze schematisatie is later uitgebreid en geactualiseerd naar de situatie anno 2009, waarbij een update is gemaakt van de bodem [Deltares, 2010]. Aanvankelijk zijn er onafhankelijke baseline-bomen gemaakt voor de verschillende deelgebieden in het IJVD model. De gebiedsschematisatie en de schematisaties van de maatregelen³ zijn opgezet in Baseline versie 4.03. Daarna zijn deze bomen samengevoegd tot één baseline-boom voor het IJsselmeer, Vecht- en IJsseldelta voor 1998. Als laatste stap is de gemaakte baseline-boom van 1998 geactualiseerd naar het jaar 2009, ook inmixen van maatregelen genoemd. Evenals het opzetten van de gebiedsschematisaties is het inmixen van maatregelen in Baseline 4 uitgevoerd. Vervolgens zijn de schematisaties geconverteerd naar Baseline 5 met de Baseline Converter module in ArcGis. Het aanmaken van de afgeleide bestanden (ruwheid, overlaten en bodemhoogtemodel) alsmede de conversie naar WAQUA zijn in Baseline 5 uitgevoerd. De gebruikte versie van Baseline 5 is 5.05.820. Dit is geen officiële release van de software. Een officiële release van Baseline 5 bestond nog niet ten tijde van de projectuitvoering. Voor meer details over deze werkwijze wordt verwezen naar het opbouw, verificatie en kalibratiedocument van WAQUA [Deltares, 2010].

De volgende baseline-bomen zijn geleverd:

- IJVD_98_4_1/IJVD_98_5_1
- IJVD_98_4_2/IJVD_98_5_2
- IJVD_09_4_2/IJVD_09_5_2

2. De benedenrand van het WAQUA model voor de HR2006 ligt bij Ketelbrug.

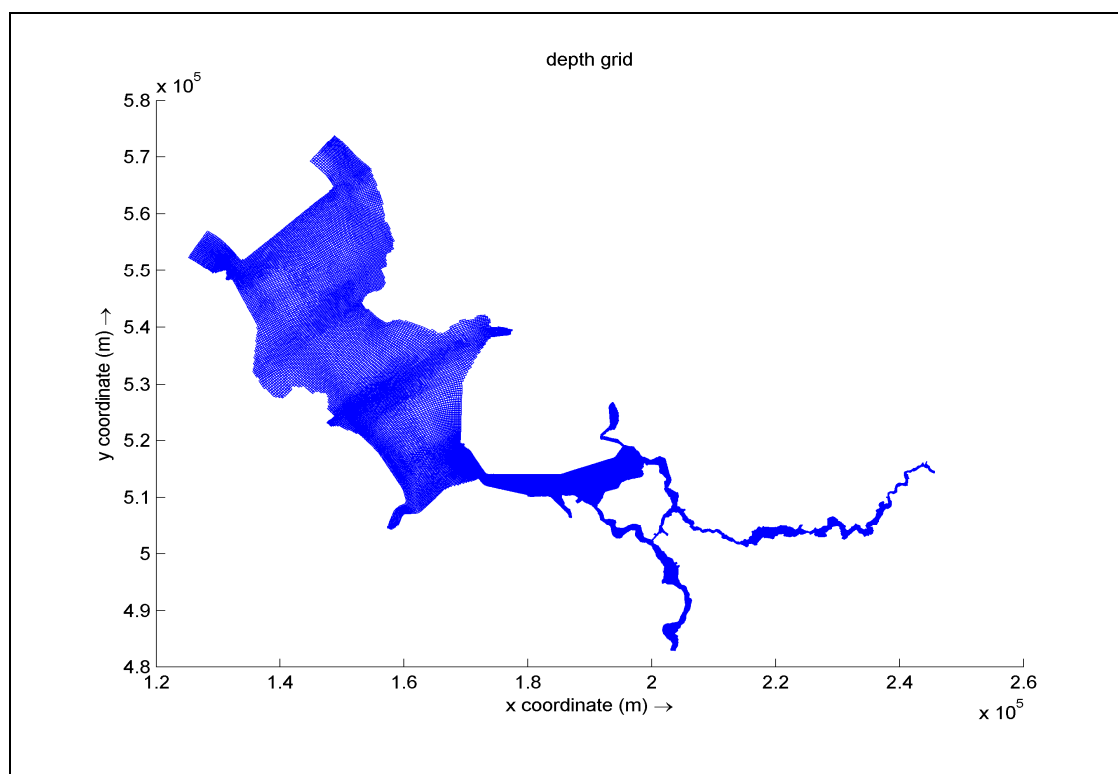
3. Met een Baseline-maatregel worden veranderingen aangebracht aan de referentie-gebiedsschematisatie.

Op basis hiervan zijn de volgende WAQUA modellen gemaakt:

- SIMONA_IJVD_98_5_2
- SIMONA_IJVD_09_5
- SIMONA_IJVD_09_5_WTI

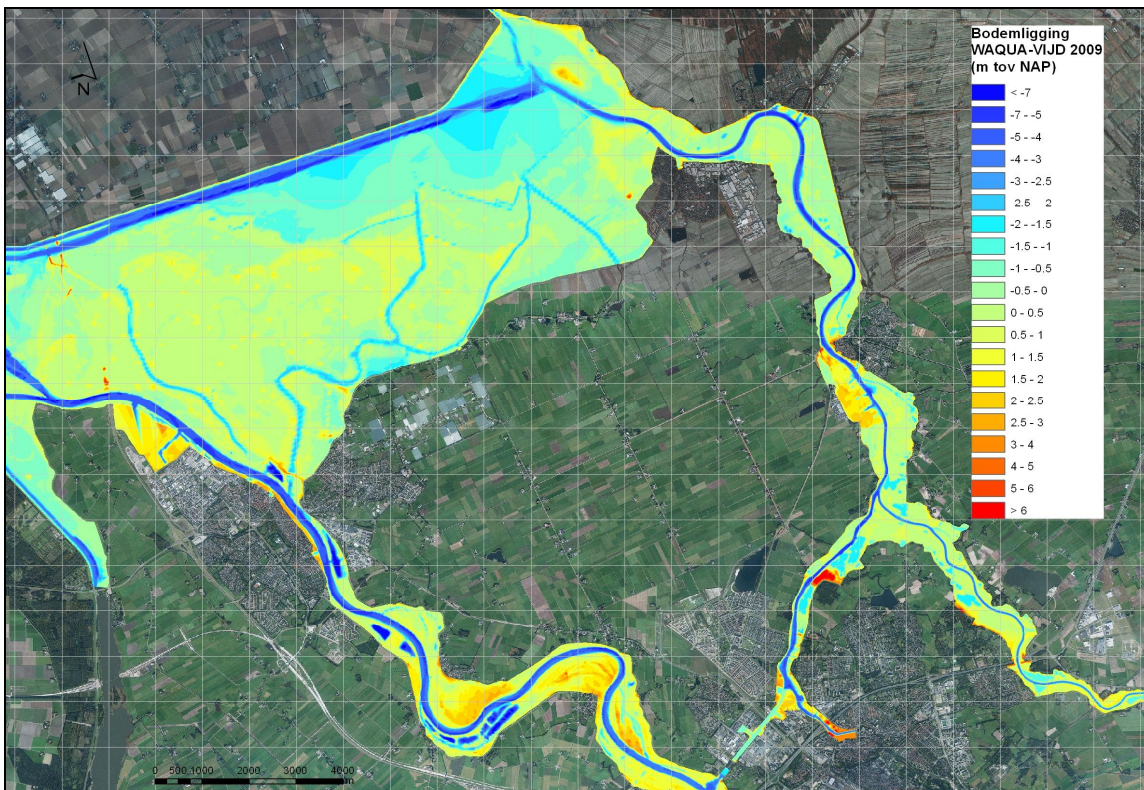
De grens van het laatste WAQUA model is afgeknipt bij Ommen en is uiteindelijk gebruikt voor de productieberekeningen voor het IJsselmeer, de Vecht- en de IJsseldelta. Een nadere beschrijving van de gebiedsschematisaties is te vinden in het rapport over het WAQUA model uit 2010 [Deltares, 2010].

Voor de IJVD WAQUA modellen is het rooster vijs40m_5c.rgf gebruikt, zie Figuur 3.3. Dit rooster is gebaseerd op het rooster rij40m_5rgf dat door Alkyon is gemaakt [Alkyon, 2008]. In 2010 is dit rooster op verschillende plaatsen aangepast, zie [Hartsuiker, 2010].

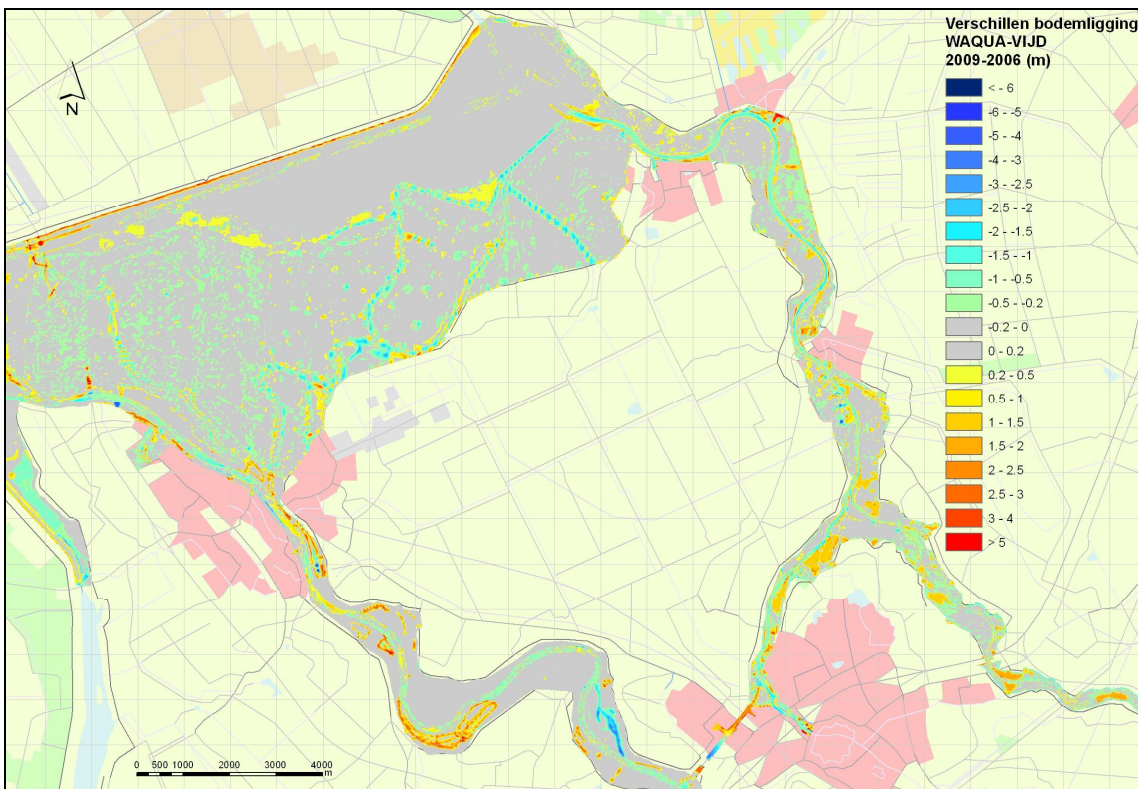


Figuur 3.3 het rooster voor het IJVD model (vijs40m_rgf)

De bodemligging van de Vechtdelta is geactualiseerd en opgenomen in de IJVD model-schematisatie. De bodemligging van de geulen in het Kampereiland is geactualiseerd en is ten opzichte van de schematisatie van HR2006 lager, lokaal tot 2 m. Ook de bodemschematisatie van het zomerbed in het Zwarte Water, benedenstrooms van Hasselt, is verbeterd. De bodem ligt hier tot 1 m lager ten opzichte van de schematisatie van de HR2006. Op het traject Hasselt – Zwolle is het winterbed op een aantal locaties geactualiseerd, de nieuwe bodem ligt in een aantal gevallen tot ruim 2 m hoger dan in de schematisatie van de HR2006. Dit laatste kan leiden tot verminderde bergingscapaciteit. Geeft het verschil weer tussen de geactualiseerde bodemligging in het IJVD model voor het deel van de Vechtdelta en bodemligging in de WAQUA schematisatie voor de HR2006.



Figuur 3.4 Bodemligging van de Vechtdelta in de IJVD WAQUA modelschematisatie



Figuur 3.5 Verschil in bodemligging tussen de IJVD modelschematisatie en de WAQUA schematisatie van HR2006.

3.3 Kalibratie en verificatie WAQUA IJVD

Het WAQUA IJVD model is gekalibreerd en geverifieerd. We beschrijven in dit achtergrond rapport kort de belangrijkste aspecten van deze kalibratie- en verificatieslag. (voor nadere details zie [Deltares, 2010]).

Voor de kalibratie van het IJVD WAQUA model is de stormachtige periode met tevens hoge rivierafvoer van 22 oktober 1998 t/m 9 november 1998 gekozen. De wind bedroeg op de top bij meetstation Stavoren circa 17 m/s (Beaufort 8) uit zuidwestelijke richting. In voorgaande studies is deze periode ook als kalibratieperiode gekozen [HKV, 2005]. Na 1998-1999 zijn er verschillende zware stormen opgetreden. De stormachtige periodes in januari-februari 1999 en januari 2007 zijn als verificatie van het model gebruikt. Tijdens de storm in 2007 is de Ramspolkering gesloten geweest. Opgemerkt wordt dat de Ramspolkering tijdens de kalibratie- en verificatieperiodes in 1998 en 1999 in aanbouw was en dus nog niet operationeel was.

De kalibratie- en verificatieperiodes zijn weergegeven in Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Kalibratie- en verificatieperiodes IJVD WAQUA model

Kalibratieperiode
22-10-1998 t/m 09-11-1998
Verificatieperiodes
23-01-1999 t/m 26-01-1999
02-02-1999 t/m 06-02-1999
18-01-2007 t/m 19-01-2007

De volgende criteria zijn aangehouden voor de kalibratie:

- Het gemiddelde verschil over de topperiode (2-4 dagen) tussen gemeten en berekende waterstanden mag niet meer dan 5 cm bedragen,
- Het gemiddelde absolute verschil over de topperiode (2-4 dagen) tussen gemeten en berekende waterstanden mag niet meer dan 10 cm bedragen,
- Het algemene meerpeil (meerpeil zonder wind) moet binnen een marge van 5 cm van de gefilterde gemeten waarden worden berekend,
- Opstuwung als gevolg van wind moet binnen een marge van 10 tot 20 cm ten opzichte van de metingen worden berekend.

De eerste twee criteria gelden voor de Vecht en het Zwarte water en de laatste criteria voor het IJsselmeer (zie voor details [Deltares, 2010]). De kalibratie van het IJVD WAQUA model bestaat uit een paar aspecten(zie ook [Deltares, 2010]):

- Voor het IJsselmeer is de schematisatie van de spuisluizen bij Den Oever en Kornwerderzand zo geoptimaliseerd dat de waterbalans van het IJsselmeer sluit, het meerpeil langere tijd stabiel blijft en de berekende spuidebieten overeenkomen met de rivierafvoeren,
- Voor de Vecht en het Zwarte Water is het doel van de kalibratie de zomerbedruwheid te optimaliseren zodanig dat de gemeten waterstanden goed worden gereproduceerd. De zomerbedruwheid van de IJssel wordt niet gekalibreerd maar overgenomen uit het bestaande Rijntakkenmodel, zodat het IJVD WAQUA model goed aansluit op modellen van bovenstroomse delen in Nederland;

- Voor de waterstanden op het IJsselmeer is geen kalibratie uitgevoerd, omdat die waterstanden in sterke mate door het opgelegde windveld worden bepaald. De schematisatie van de wind is in het IJVD WAQUA model niet gekalibreerd. Voor de windparameters in WAQUA wordt uitgegaan van de waarden van Bak en Vlag [Bak en Vlag 1999], hiervoor was geen kalibratie nodig (zie [Deltares, 2010]). Wel is aan de hand van de kalibratieberekeningen geverifieerd of de waterstanden op de meren aan de acceptatiecriteria voldoen,
- De reproductie van stroomsnelheden in het model is geen onderdeel van de kalibratie.

De doelstelling van de kalibratie is niet overal en voor alle meetstations gehaald, maar de afwijking blijft beperkt. Wanneer de onbetrouwbaarheid van de gemeten waterstanden en debieten in ogenschouw worden genomen dan is de conclusie dat het model voldoende presteert en daarom gebruikt kan worden voor de productie binnen WTI-2011.

Ten aanzien van de verificatie blijkt dat strikt genomen het IJVD model niet aan de gestelde criteria voldoet. Als effecten van de beperkte nauwkeurigheid van de veldgegevens en de schematisatie van het windveld tot een uniform windveld mee worden gewogen, dan is de conclusie dat het model in voldoende mate voldoet aan de acceptatiecriteria. Na bespreking in een expertpanel (zie [Deltares 2010]) is de betrouwbaarheid van het IJVD model voldoende bevonden en wordt geadviseerd het model te gebruiken voor de productie binnen WTI-2011.

Tot slot wordt vermeld dat alle WAQUA berekeningen ten behoeve van de kalibratie en verificatie uitgevoerd zijn met de WAQUA-versie SIMONA 2009 major-release. Dit is dezelfde versie als waarmee uiteindelijk de productiesommen van WTI-2011 voor de Vechtdelta zijn uitgevoerd.

3.4 Aanpassingen IJVD modelschematisatie binnen WTI

Na levering door Rivierkundig modelinstrumentarium zijn binnen WTI-2011 enkele testberekeningen uitgevoerd met de IJVD modelschematisatie. Hierbij zijn randvoorwaarden gebruikt die relevant zijn voor extreme omstandigheden, zie paragraaf 3.5. Uit de uitgevoerde testberekeningen blijkt dat er enige onvolkomenheden waren in het model. Deze betreffen o.a., zie Bijlage A:

- Bodemligging bij Ketelbrug,
- Dummy waarden in deelgebieden waarvoor geen bodemgegevens beschikbaar zijn,
- Bodemschematisatie rondom Ramspol en
- Aansturing van de Ramspolkering.

De werking van de Ramspolkering kreeg bijzondere aandacht binnen WTI en de productievoorbereidingen. Omdat de resultaten van de testberekeningen enige instabiliteiten vertoonden, zijn later nog extra testberekeningen uitgevoerd waarin specifiek werd gekeken naar de werking van Ramspolkering. Uit deze tests bleek dat de schematisatie van de Ramspolkering maar ook de aansturing ervan nog onvolkomenheden bevatten. De dam ten westen van de Ramspolkering blijkt namelijk volledig te ontbreken in de schematisatie en de aansturing van de kering fout te zijn (zie [HKV, 2011c] en [HKV, 2011d]). De dam is alsnog opgenomen in de schematisatie.

Ten aanzien van de aansturing van de Ramspolkering bleek uit de testberekeningen dat er relatief weinig debiet over de kering heen ging dan verwacht. Dit werd veroorzaakt door correctiefactoren in de sturingfile van HR2006 die niet overeenkomen met de drie openingen van de kering, zie paragraaf 3.6.5. De sturingfile van de Ramspolkering is aangepast.

Aanpassing van de Ramspolkering heeft geleid tot een aanzienlijke vermindering van de eerder geconstateerde instabiliteiten (zie [HKV, 2011c]).

3.5 Productieberekeningen en Randvoorwaarden Vechtdelta

3.5.1 Productieberekeningen Vechtdelta

Na het maken en actualiseren van de WAQUA schematisatie zijn productieberekeningen gemaakt. Voor de productieberekeningen WTI-2011 zijn evenals in HR2006 een groot aantal combinaties van de bedreigingen/stochasten meerpeil, afvoer, windsnelheid, windrichting en keringsituatie van de Ramspolkering. De database voor de Vechtdelta bevat in totaal 10170 combinaties van deze stochasten. Het gaat om 8 windsnelheden (inclusief windsnelheid 0 m/s), 16 windrichtingen, 5 meerpeilen, 9 afvoeren en 2 situaties voor de Ramspolkering (open en dicht), zie [Beijk, 2007]. Merk op dat voor de windsnelheid 0 m/s de windrichting niet van belang is. Het aantal combinaties dat nodig is voor het vullen van de database is $(7*16*5*9*2) + (1*1*9*5*2) = 10080 + 90 = 10170$ combinaties.

Om de rekentijd te beperken is conform de HR2006 een aantal aannames gedaan zodat het aantal daadwerkelijk te maken sommen beperkt kon blijven. Ten eerste is, gezien de ligging van het gebied, aangenomen dat een storm uit (noord)westelijke richting voornamelijk zal bijdragen aan de hydraulische randvoorwaarden. Ook blijkt uit statistische analyses van metingen dat de hoogste windsnelheden in Nederland zijn opgetreden tijdens (noord)westerstormen [Geerse, 2006]. Voor de windrichting sectoren van NNO t/m ZZW (22,5° t/m 202,5°) zijn daarom geen WAQUA sommen gemaakt, maar is de maximale waterstand overgenomen uit de berekeningen met windsnelheid 0 m/s. Dit is dus feitelijk een veilige benadering omdat in werkelijkheid afwaaiing optreedt. Door deze aanname is het aantal daadwerkelijk gemaakte sommen gereduceerd van 10170 tot 4500.

Een tweede aanname die is gedaan om de hoeveelheid sommen te beperken is het hanteren van een vast verband tussen IJsselafvoer en Vechtafvoer. Loslaten van dit verband zou namelijk betekenen dat er nog eens negen keer (negen extra afvoeren) gemaakt moeten worden. Een mogelijk verband zou kunnen worden gebaseerd op de aanname dat beide systemen vrijwel onafhankelijk functioneren. Met andere woorden: het maakt voor de waterstand op de Vecht niet uit wat de afvoer van de IJssel is en omgekeerd. Echter, vanwege de verbinding tussen beide systemen via het relatief veraf gelegen Ketelmeer is er toch enige afhankelijkheid waarbij de IJssel een minimale invloed op het Vechtsysteem heeft. Andersom zal de invloed, vanwege het dimensieverschil van beide systemen, te verwaarlozen zijn. Daarom is er voor gekozen om aan iedere Vechtafvoer een 'representatieve' IJsselafvoer te koppelen (zie [Beijk, 2007]).

Tabel 3.2 Stochastcombinaties productieberekeningen Vechtdelta inclusief open water in kolom (getal tussen haakjes)

Windsnelheid [m/s]	Windrichting [graden]	Vechtafvoer [m3/s]	IJsselafvoer [m3/s]	Meerpeil [m+NAP]	Ramspol
0 (0.00)	225,0	10	100	-0.40	Niet
10 (11.1)	242,5	100	500	-0.10	wel
16 (17.5)	270,0	250	950	0.40	
22 (23.7)	292,5	400	1400	0.90	
27 (28.7)	315,0	550	1850	1.30	
32 (33.6)	337,5	700	2300		
37 (38.5)	360,0	850	2750		
42 (43.3)		925	2975		
		100	3200		

In Tabel 3.2 zijn de parameterwaarden voor de verschillende combinaties opgenomen die uiteindelijk zijn doorgerekend. In totaal zijn er 4500 WAQUA berekeningen gemaakt.

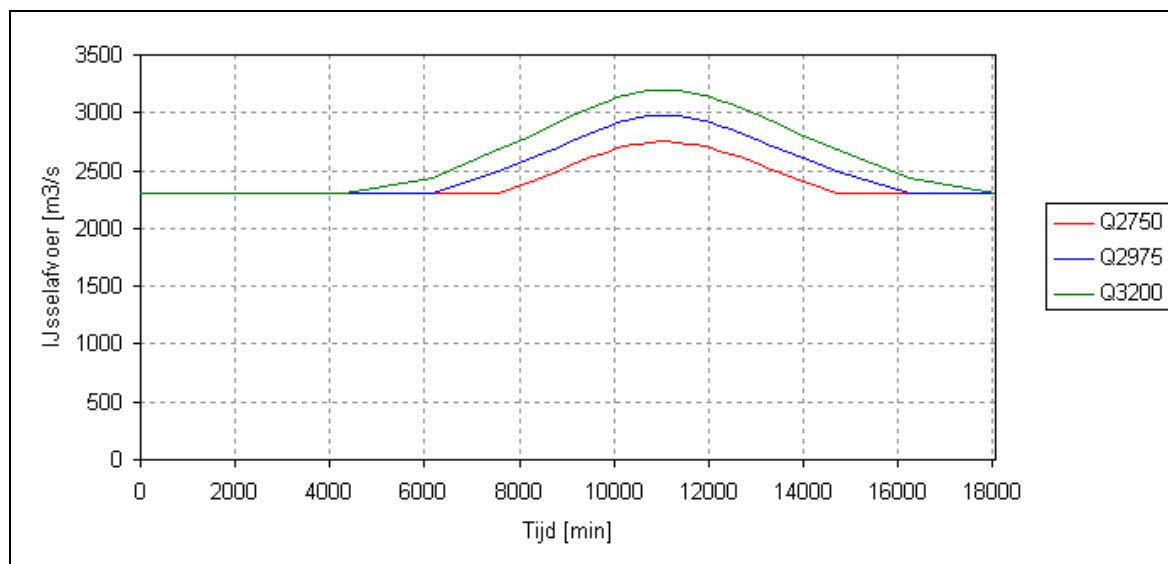
3.6 Productie randvoorwaarden

Zoals hierboven is beschreven, wordt het IJVD model benedenstrooms begrensd door de Afsluitdijk en bovenstrooms door de bovenrivieren. Op deze plaatsen dienen de modelranden, de benedenrand en de bovenrand, opgelegd te worden. Daarnaast zijn er randvoorwaarden nodig die niet op een specifieke plaats worden opgelegd maar modelbreed gelden. Dit geldt voor de wind en het meerpeil. In onderstaande subparagrafen gaan we nader in op de productierandvoorwaarden.

3.6.1 Bovenrand van het IJVD model

Zoals hierboven beschreven wordt voor de productie van de maximale waterstanden het integrale WAQUA IJVD model gebruikt. Bovenstrooms van het model ligt een afvoerrand op de IJssel bij Olst (km 957) en een afvoerrand op de Overijsselse Vecht bij de Varsenerbrug (km 35) nabij Ommen.

De afvoer is stationair doorgerekend, dit betekent dat gedurende de looptijd van een som de afvoer continu is. Echter voor de 3 hoogste IJsselafoeren zijn afvoergolven doorgerekend omdat bij dergelijke hoge afvoeren de verbindende kering tussen Kampen en Ramspol overstroomt. Als hiervoor een constante afvoer zou worden aangenomen, zou er teveel water naar het Kampereiland stromen met waarschijnlijk hogere waterstanden en dus hogere concept toetspeilen langs het Zwarte Meer tot gevolg (zie [Janssen en Van Ledden, 2005]). Het verloop van de 3 hoogste IJsselafoeren in de tijd komt overeen met de standaard golfvorm voor de IJssel zoals beschreven door Geerse in 2006 [Geerse, 2006]. De golfvorm boven het niveau van 2300 m³/s is weergegeven in Figuur 3.6.



Figuur 3.6 Verloop in de tijd boven het niveau van 2300 m³/s van de 3 hoogste IJsselafoeren

In het stroomgebied van de Vecht bevinden zich gemalen die bijdragen aan de afvoer van de Vecht. Deze lozingen zijn als laterale toestromingen meegenomen op diverse locaties in het WAQUA-model. In het model is de grootte van deze lateralen volledig gecorreleerd met de Vechtafvoer. De grootte van de laterale toestromingen voor de berekeningen voor de Vechtdelta zijn gegeven in Tabel 3.3; vergelijk ook met Tabel 3.2.

Tabel 3.3 Verband tussen vechtafvoer en gemalen

Vechtafvoer [m ³ /s]	Westerveld [m ³ /s]	Kloosterzijl [m ³ /s]	Streukelerzijl [m ³ /s]	Zedemuden [m ³ /s]	Kosterverlorenzijl [m ³ /s]	Cellem [m ³ /s]	Kadoelen [m ³ /s]
10	0	0	0	1.7	0.1	0	0
100	0	2.5	12.5	16.8	0.9	0	0
250	1	5	25	41.9	2.3	0	0
400	1	5	25	67.0	3.7	0	0
550	1	5	25	92.2	5.1	0	0
700	1	5	25	117.0	6.5	0	0
850	1	5	25	117.0	6.5	0	0
925	1	5	25	117.0	6.5	0	0
1000	1	5	25	117.0	6.5	0	0

3.6.2 Benedenrand van WAQUA bij de Afsluitdijk

Op de benedenrand van het model wordt water geloosd richting de Waddenzee. Dit gebeurt door middel van de spuisluisen bij Kornwerderzand (60%) en den Oever (40%). Tijdens een berekening dient het meerpeil constant te blijven, omdat het belastingmodel in Hydra-Zoet uitgaat van een constant meerpeil tijdens een storm⁴. Dit wordt gerealiseerd door ervoor te zorgen dat de totale uitstroom uit het model bij de Afsluitdijk gelijk is aan de som van de instroom vanaf de Vecht en de IJssel en de verschillende laterale toestromingen. Op deze manier blijft het initiële meerpeil in de berekening in principe constant. Verdamping en regen tijdens een berekening worden verwaarloosd. Voor de berekeningen voor het IJsselmeer, met een constante afvoer op de bovenrand, functioneert deze methode naar behoren. Uit diverse testsimulaties bleek dat de combinatie van debietrandvoorwaarden op de boven- en benedenrand van het model resulteerde in stabiele waterstanden en een juist, constant meerpeil (zie [HKV, 2011c] en [HKV, 2011d]).

Voor de scenario's met een constante afvoer op de IJssel wordt een constante waarde voor het debiet opgelegd op de benedenrand van het model. De randvoorwaarden op de benedenrand van het model zijn voor deze scenario's exact gelijk aan de randvoorwaarden voor de productieberekeningen voor het IJsselmeer [HKV, 2011c].

Bij een constante afvoer op zowel de boven- als de benedenrand van het model is het handhaven van het initiële meerpeil triviaal. In het geval van een afvoergolf op de bovenrand van de IJssel is het handhaven van het initiële meerpeil beduidend complexer. Alleen voor een deel van de productieberekeningen voor de Vecht- en IJsseldelta is sprake van een afvoergolf op de bovenrand van de IJssel.

Als de uitstroom uit het model bij deze berekeningen gelijk zou worden gesteld aan de instroom, treedt een significante daling van het meerpeil op, omdat de afvoergolf vanaf de IJssel pas na enige tijd het IJsselmeer bereikt. Wanneer de uitstroom constant wordt gekozen en in grootte gelijk wordt gesteld aan de basis (beginwaarde) van de afvoergolf, treedt een sterke stijging van het meerpeil op wanneer de afvoergolf het IJsselmeer bereikt. De oplossing is gevonden in het opleggen van dezelfde afvoergolf op de benedenrand als op de bovenrand van de IJssel, maar dan met een faseverschil. Hierdoor wordt rekening gehouden met de looptijd van de afvoergolf. De grootte van dit faseverschil is bepaald op basis van testberekeningen met een constante uitstroom, behorend bij de basis van de afvoergolf op de IJssel (2300 m³/s). Een uitgebreide beschrijving van de methodiek ter bepaling van de grootte van het faseverschil is opgenomen in Bijlage B. In deze bijlage is ook uitgelegd om welke redenen er gekozen is voor een constant faseverschil van 795 minuten voor alle productieberekeningen met een afvoergolf.

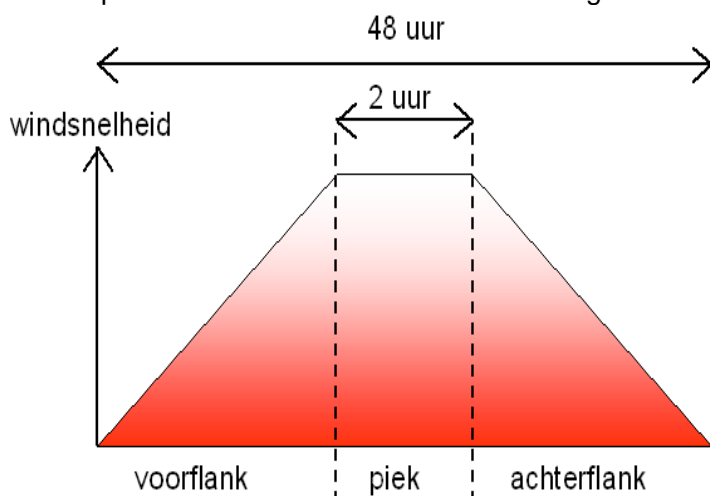
⁴ Dit is plausibel omdat tijdens een storm het meerpeil nauwelijks verandert.

Evenals bij een constante afvoer is bij een afvoergolf op de IJssel het debiet door de Afsluitdijk verdeeld over de spuiscuizen bij Kornwerderzand en Den Oever met een aandeel van respectievelijk 60% en 40%.

3.6.3 Wind en windverloop

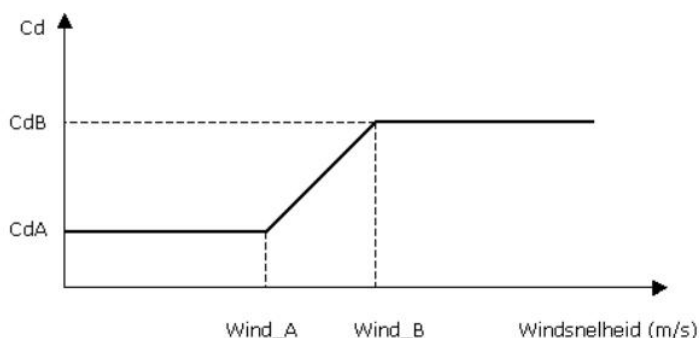
Deze randvoorwaarde wordt niet op een specifieke plaats in het modelgebied opgelegd, maar geldt modelbreed. Dat wil zeggen dat het opgelegde windveld voor alle deelsystemen in het IJVD model bij een zekere berekening gelijk is. Het opgelegde windveld is ruimtelijk uniform voor het gehele modelgebied. Er is verder gebruik gemaakt van de open water wind in plaats van de potentiële wind (voor de statistiek). De potentiële windsnelheden inclusief bijbehorende open water windsnelheden, gebruikt in de productieberekeningen, zijn opgenomen in kolom 1 van Tabel 3.2.

Het windveld is ruimtelijk uniform maar de windsnelheid en de windrichting variëren wel in de tijd. Het verloop van de windsnelheden in de tijd is gerelateerd aan het stormverloop zoals beschreven door Geerse in 2006 [Geerse, 2006]. Een schematische weergave van dit verloop is gegeven in Figuur 3.7. Het verloop van de windsnelheid in de tijd is trapeziumvormig. In 23 uur loopt de windsnelheid lineair op van nul naar de maximale waarde. De maximale windsnelheid treedt vervolgens gedurende twee uur op. Daarna neemt de windsnelheid in opnieuw 23 uur lineair af tot nul. In totaal zijn 7 verschillende windsnelheden beschouwd, zie Tabel 3.2. Deze zijn 0, 16, 22, 27, 32, 37 en 42 m/s. Dit betreft de potentiële wind en is voor de berekeningen eerst vertaald naar open water wind.



Figuur 3.7 Schematische weergave van het verloop van de wind in de tijd

De schuifspanning die de wind op het wateroppervlak uitoefent, is berekend met behulp van een variabele windschuifspanningscoëfficiënt C_D (zie [Bak en Vlag, 1999]) waarin de parameters als volgt zijn ingesteld: $C_{dA}=0,0014$, $C_{dB}=0,0039$, $wind_A=7,8$ m/s en $wind_B=50,0$ m/s.



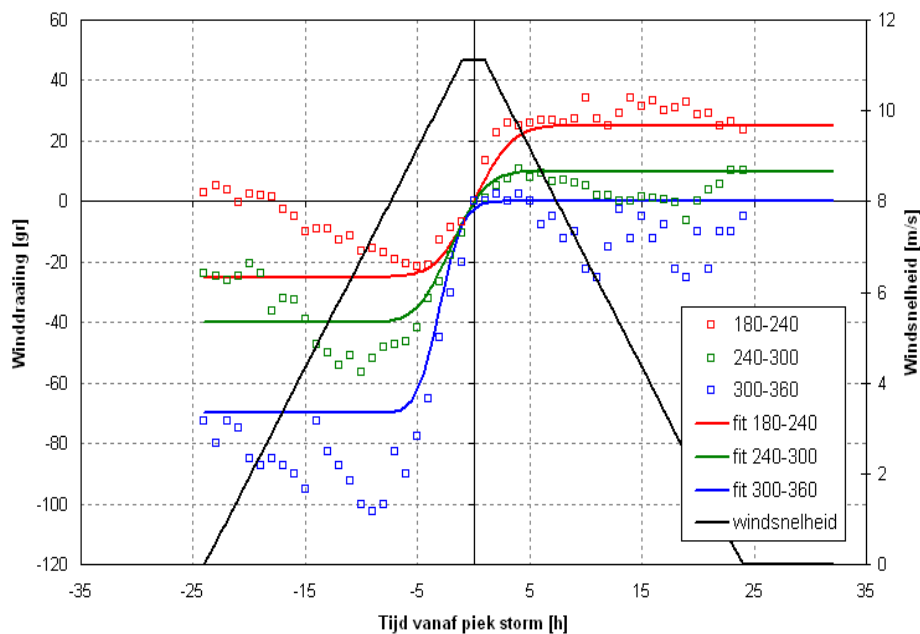
Figuur 3.8 Windschuifspanning coëfficiënt

3.6.4 Windrichting

Voor productieberekeningen met WAQUA voor de Vechtdelta zijn de 7 westelijke windrichtingen beschouwd, 225 graden tot en met 360 graden. Om zoveel mogelijk aan te sluiten bij de productie van HR2006 is een winddraaiing toegepast voor deze westelijke sectoren. Bij de afleiding van de winddraaiing is onderscheid gemaakt tussen de sector 180-240 graden, 240-300 graden en 300-360 graden ten opzichte van het ware noorden. Het verloop van de winddraaiing in de tijd voor deze sectoren is getoond in Figuur 3.9. Er is gebruik gemaakt van de “fit”-lijnen door de observatiedata [Deltares, 2009].

Conform de productieberekeningen voor het IJsselmeer is bij de productieberekeningen voor de Vechtdelta met het integrale WAQUA model de winddraaiing meegenomen. De onderbouwing van deze keuze luidt als volgt:

- Consistentie, enerzijds met het IJsselmeer vanwege het integrale WAQUA model en anderzijds met de HR2006. Ten behoeve van de productieberekeningen voor de HR2006 is een WAQUA model gebruikt met een benedenrand bij Ketelbrug. De benedenrand bestond uit waterstanden bij Ketelbrug en volgde uit de productieberekeningen voor het IJsselmeer, waarbij de winddraaiing wel was meegenomen;
- De productieberekeningen worden uitgevoerd met een integraal WAQUA model dat naast de Vecht- en IJsseldelta ook het hele IJsselmeer bevat. De winddraaiing is een relevant aspect voor IJsselmeer en heeft enige invloed op de waterstanden daar, en dus ook op de waterstanden bij de Ketelbrug (relevant voor de berekeningen in de Vechtdelta);
- De invloed van de lokale wind in de Vechtdelta zelf is in verhouding tot in windinvloed op het IJsselmeer beperkt,
- de Vechtafvoer speelt een rol.



Figuur 3.9 Winddraaiing voor verschillende sectoren, in graden ten opzichte van de betreffende richting. In zwart het trapezium tijdsverloop van de windsnelheid.

3.6.5 Kunstwerken

In het gebied van de Vechtdelta bevinden zich in verband met de veiligheid tegen overstromingen en als onderdeel van het waterbeheer enkele keersluizen en stuwen, die afhankelijk van de hydraulische omstandigheden bediend worden. Belangrijk voor de bepaling van de hydraulische randvoorwaarden en dus de productie van waterstanden zijn: de keersluis te Ramspol (Ramspolkering), de Kadoelersluis en de stuwen bij Vilsteren en Vechterweerd.

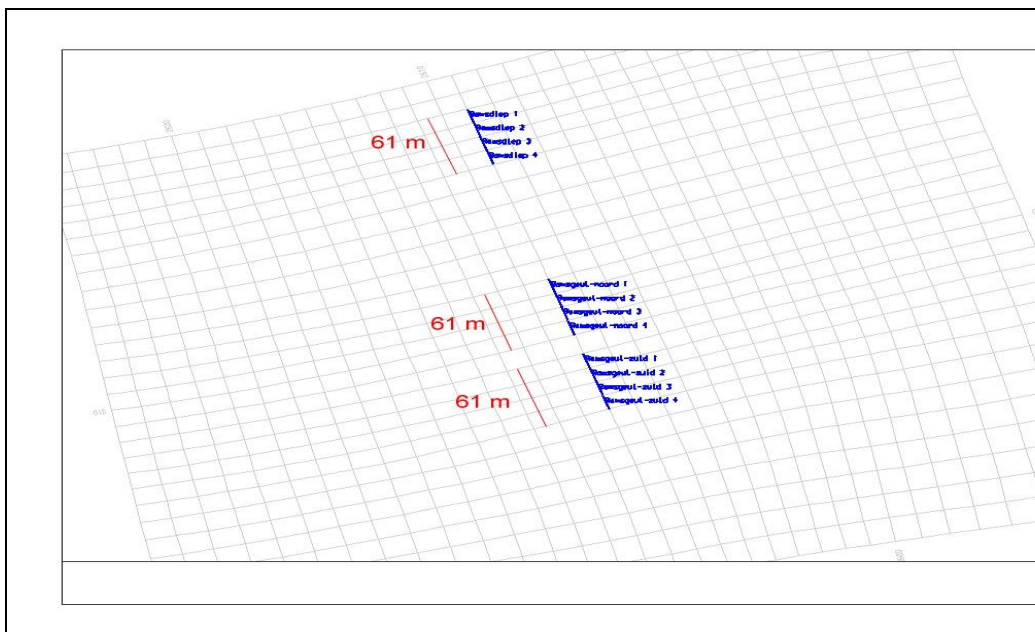
De Ramspolkering is de kering die het Ketelmeer scheidt van het Zwarte Meer, en dus het IJsselmeer van de Vechtdelta. Het werkelijke sluitcriterium van de Ramspolkering is opgenomen in de integrale IJVD WAQUA modelschematisatie. De kering sluit bij een waterstand op het Ketelmeer hoger dan 0,5 m + NAP en een stroming in oostelijke richting ter plaatse van de kering. De kering opent weer wanneer de waterstand aan de buitenzijde lager wordt dan de waterstand aan de binnenzijde. Het sluiten en openen van de Ramspolkering duren respectievelijk maximaal een en drie uur.

Zoals al hierboven vermeld bleek uit testberekeningen van WAQUA IJVD dat er minder debiet door de Ramspolkering ging dan verwacht. Deze onvolkomenheid is hersteld.



Figuur 3.10 Afmeting openingen Ramspolkering

In Figuur 3.10 zijn de globale afmetingen van de verschillende delen van de Ramspolkering weergegeven. In WAQUA hebben deze openingen van noord naar zuid de namen Ramsdiep, Ramsgeul-Noord en Ramsgeul-Zuid gekregen (zie [Deltares, 2010]). In Figuur 3.11 staan de afmetingen weergegeven zoals opgenomen in de WAQUA schematisatie.



Figuur 3.11 Rooster en afmetingen Ramsol in WAQUA IJVD

De Kadoelersluis gaat dicht als het peil in het Zwarte Meer boven 1.0 m+NAP stijgt. Openen en sluiten duurt beide keren een uur. Dit is als zodanig opgenomen in de WAQUA schematisatie.

De sturing van de stuwen bij Vilsteren en Vechterweerd (beide op de Vecht) is zodanig dat getracht wordt het peil bovenstrooms te handhaven. Als de afvoer te groot wordt worden de stuwen gestreken

3.7 Uitvoerlocaties

WAQUA berekeningen geven naast waterstands- en stromingsvelden op de roosterpunten, ook uitvoer op een groot aantal locaties nabij de waterkering. Uitvoerlocaties zijn geografische locaties waar uitvoer van de waterstands- en golfberekeningen (voor golfberekeningen wordt verwezen naar hoofdstuk 6) wordt gegenereerd en waar bovendien Hydra-Zoet berekeningen voor kunnen worden uitgevoerd.

In het kader van WTI-2011 zijn voor de Vechtdelta nieuwe uitvoerlocaties gedefinieerd op basis waarvan nieuwe HR locaties worden bepaald. Dit betreft voornamelijk de oeverlocaties en de locaties in het Zwarte Meer. De aslocaties voor het Zwarte Water en de Overijsselse Vecht zijn onveranderd ten opzichte van HR2006. De redenen voor uitbreiding en aanpassing van de uitvoerlocaties en derhalve de HR locaties zijn:

- Aanpassing en uitbreiding van het modelgebied. , zie ook paragraaf 3.2.5
- Het aantal HR locaties in HR2006 is relatief beperkt; dijkbeheerders hebben dan ook aangegeven behoefte te hebben aan uitbreiding van de HR set locaties;
- De huidige HR locaties liggen op een relatief te grote afstand van de dijk;
- Tussen verschillende watersystemen bestaat diversiteit in de definitie van de HR locaties. Enige uniformiteit en consistentie⁵ in de HR bepaling was wenselijk,
- Langs de verbindende Ramspolkering bestaan geen (officiële) HR locaties, in WTI-2011 zijn er wel uitvoerlocaties gedefinieerd.

Als uitgangspunt voor de nieuwe uitvoerlocaties in de Vechtdelta is de nieuwe dijkkringlijn, versie 3.2 van RWS gebruikt [RWS, 2009]. Voor het definiëren van uitvoerlocaties in het IJsselmeer zijn dezelfde criteria toegepast als in het Benedenrivierengebied (zie [Deltares, 2011]). Deze criteria zijn:

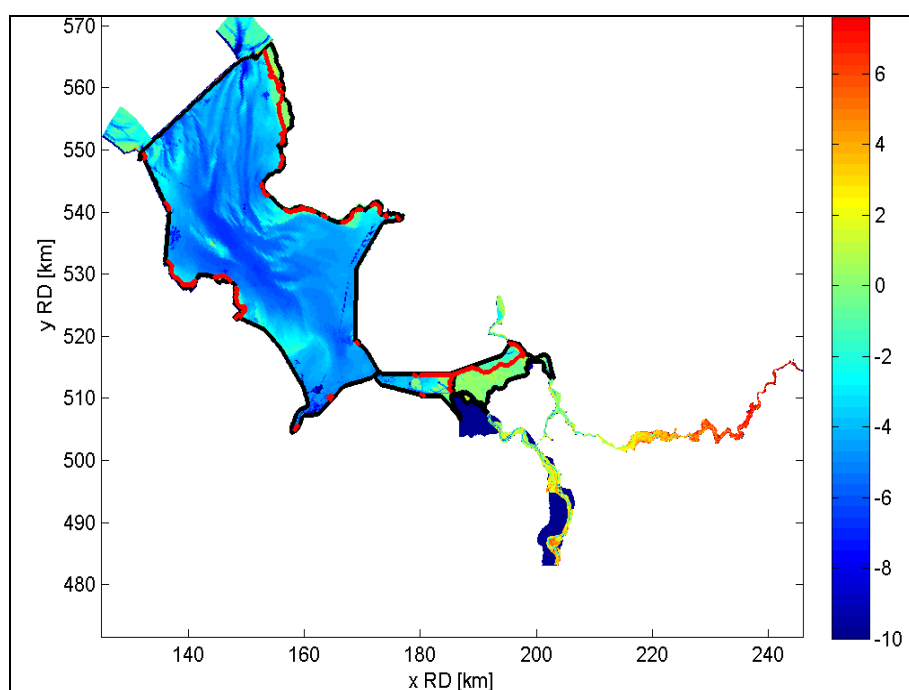
- De uitvoerlocaties liggen zo dicht mogelijk bij de dijk, maar in ieder geval niet in de eerste roostercel uit de rand,
- Hooggelegen gebieden, zoals uiterwaarden, worden niet ontweken tenzij deze hoge gebieden de primaire kering betreffen,
- De uitvoerlocaties worden gedefinieerd met onderlinge afstand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

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

⁵ In het rivierengebied worden oeverlocaties gekozen met een onderlinge afstand van ca. 100 m. Dit is ook de lijn die is gevolgd voor de Waddenzee en Westerschelde.

Naast de basisset en analoog aan andere watersystemen is voor het IJsselmeer een extra set uitvoerlocaties, de natte set, gedefinieerd die de hoge gronden vermijdt. Deze set met locaties volgt min of meer de oeverlijn van het IJsselmeer. Daar waar deze set ongeveer zou samenvallen met de basisset is er voor gekozen daar geen extra punten te definiëren. De locaties uit de extra set hebben een onderlinge afstand van ca. 200 m. Naast basisset en natte set ook HR2006 locaties gebruikt (voor controle en verschilanalyse)

De aldus samengestelde basisset en natte set uitvoerlocaties zijn gebruikt voor de productieberekeningen met WAQUA (en SWAN, zie hoofdstuk 6). De totale basisset bestaat uit ca. 2000 locaties en de natte set uit ca. 600 locaties in het IJsselmeer. Een overzicht van de nieuwe gedefinieerde uitvoerlocaties (inclusief locaties in het Zwarte Meer) is gegeven in Figuur 3.12. Dit betekent dat voor alle uitvoerlocaties de maximale waterstand per combinatie van de stochasten wordt gegenereerd en bewaard.



Figuur 3.12 Overzicht van de uitvoerlocaties in het IJVD model: basisset (zwart) en natte set (rood)



Figuur 3.13 Uitvoerlocaties in het Zwarte Meer; blauw = basisset, rood = natte set, groen = HR2006 locaties

Naast locaties uit de basis en natte set zijn er nog twee typen locaties beschouwd waarvoor ook uitvoer is gegenereerd en bewaard; dit zijn de HR2006-locaties en de meetlocaties. Uitvoer op deze locaties wordt alleen voor controle en verschilanalyse van de concept HR2011 en HR2006 doeleinden gebruikt.

Op basis van de resultaten van de berekeningen is een keuze gemaakt welke van de bovengenoemde uitvoerpunten als uitvoerlocaties voor de concept HR2011 zullen worden gebruikt. Alle overige genoemde uitvoerlocaties zullen geen 'HR-status' meer krijgen en dienen hierna slechts ter controle of in een uitzonderlijk geval als uitwijkmogelijkheid, mocht er aanleiding zijn voor een nadere beschouwing van de beschouwde HR locatie.

3.8 Resultaat en controle productieberekeningen

3.8.1 Controle productieberekeningen

Zoals vermeld in de voorgaande paragrafen zijn er voor de Vechtdelta 4500 combinaties van stochasten met WAQUA doorgerekend. 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 3.5. 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 Matlabscripts⁶ uitgevoerd voor alle productieberekeningen. Het resultaat van een controle is een goedkeuring of een afkeuring van een berekening. Afgekeurde berekeningen zijn aan een nader 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 de betreffende berekening. De volgende automatische controles zijn voor alle productieberekeningen uitgevoerd:

- Systeemmeldingen van WAQUA over het correct voltooien van een berekening
- Stabiliteit
- Maximale waterstand
- Windverhang
- Trendmatige ontwikkeling van de waterstand

Automatische controles hebben als voordeel dat alle berekeningen binnen een relatief korte tijd kunnen worden gecontroleerd. Met name berekeningen waarvoor één van 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 Ramspolkering
- Water in afgescheiden zones als plassen en omdijkte gebieden
- Droogval

Een nadere beschrijving van de controles zijn te vinden in [HKV, 2011c] en [HKV, 2011d].. In het volgende lichten we de controle op instabiliteit nader toe.

⁶ MATLABTM 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

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. 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. Een aanpassing in de modelschematisatie is in dit geval een voor de hand liggende oplossing;
- 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 stabiliteit werd bepaald of er een continu verloop van de waterstand in de tijd optreedt. Bij te abrupte veranderingen werd de berekening afgekeurd. Dit werd nagegaan door de waterstand op een bepaald tijdstip te vergelijken met de gemiddelde waterstand van het vorige en het volgende tijdstip. Voor elk uitvoertijdstip (om de 10 minuten) en voor elke uitvoerlocatie is deze controle uitgevoerd.

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

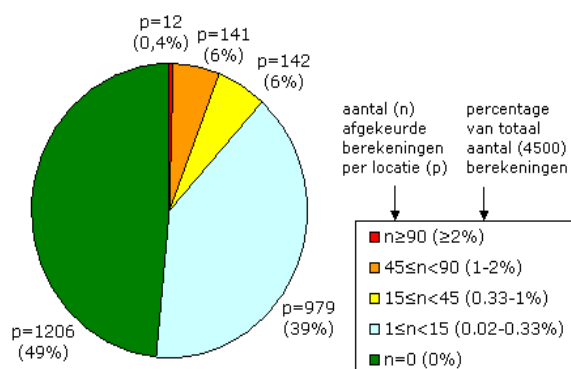
- Het maximale verschil van de waterstand op een bepaald tijdstip met de gemiddelde waterstand van het vorige en het volgende tijdstip is groter dan een gedefinieerd criterium. Voor de HR2006 is 5 cm gehanteerd voor dit criterium (zie [Jansen en Van Ledden, 2005]). Het criterium is voor HR2011 aangescherpt tot 4 cm;
- 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;
- Het maximum van de reeks moet tenminste 0,2 m hoger liggen dan de beginwaarde van de reeks.

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 werd afgekeurd.

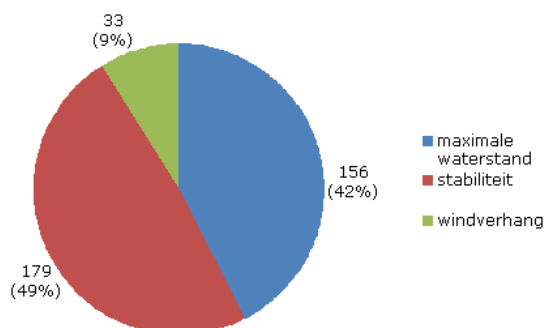
3.8.2 Resultaat controle productieberekeningen

Van de 4500 productieberekeningen voor de Vecht- en IJsseldelta zijn er in totaal 347 automatisch afgekeurd⁷ (8%). Het merendeel van de afkeuringen was op stabiliteit en maximale waterstand. Het aandeel van de controle op maximale waterstand op het totaal aantal afkeuringen is relatief gezien groter dan voor het IJsselmeer [HKV, 2011d]. Dit komt doordat niet alleen berekeningen met een opeenvolgend meerpeil worden gecontroleerd, maar ook berekeningen met een opeenvolgend debiet en een opeenvolgende windsnelheid.

7. Voor de vergelijking: de productieberekening voor de HR2006 werd ca. 25 % van de berekeningen afgekeurd.

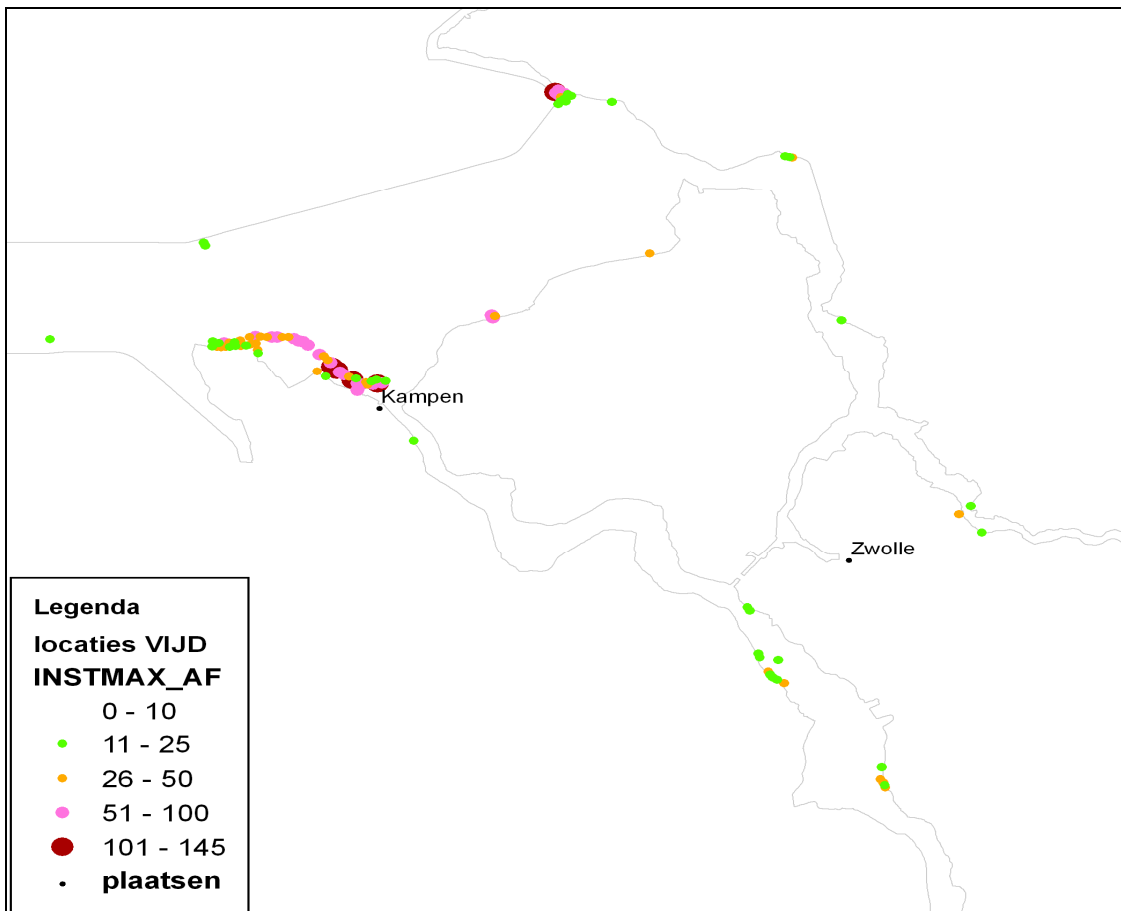


Figuur 3.14 Verdeling aantal locaties (p) waarvoor (n) berekeningen worden afgekeurd



Figuur 3.15 Verdeling automatische afkeuringen Vechtdelta

Ruwweg de helft (51%) van alle uitvoerlocaties is in één of meer berekeningen afgekeurd. Dit aandeel is vanzelf groter dan bij het IJsselmeer vanwege het aanzienlijk grotere aantal productieberekeningen. Dit heeft doorgaans te maken met droogval van uitvoerpunten, en zegt derhalve niets over de kwaliteit van de berekeningen. In Figuur 3.14 is een nadere verdeling van de uitvoerlocaties gegeven, waarbij ingedeeld is in categorieën met een zeker aantal productieberekeningen die voor de betreffende locatie een afkeuring gaven. Hierbij is n het aantal afgekeurde berekeningen, en p het aantal afgekeurde locaties. Er waren 1206 locaties (p=1206) die in geen enkele productieberekening (n=0) een afkeuring opleverden. Te zien is dat er slechts 12 locaties waren (0,4% van alle locaties voor de Vecht- en IJsseldelta) waarvoor meer dan 2% van de berekeningen een afkeuring opleverde.



Figuur 3.16 Verdeling totaal aantal afgekeurde berekeningen op basis van instabiliteit en/of maximale waterstand

Uit de controle blijkt dat de locaties die afgekeurd worden op instabiliteit voornamelijk langs de binnenzijde van de verbindende Ramspol kering en bij de Kadoelersluis liggen, zie Figuur 3.16. Dit heeft doorgaans te maken met droogval van uitvoerpunten, en zegt derhalve niets over de kwaliteit van de berekeningen. Hiernaast wordt opgemerkt dat langs de binnenzijde van de verbindende kering geen hydraulische randvoorwaarden worden afgegeven.

Uit de uitgevoerde automatische en handmatige controles blijkt dat de productieberekeningen voor de Vechtdelta over het geheel genomen resultaten bevatten met voldoende consistentie en nauwkeurigheid. De combinatie van de resultaten van enerzijds visuele controles en anderzijds geautomatiseerde controles heeft geleid tot ruim vertrouwen in de kwaliteit van de productieberekeningen.

4 Productie golfparameters

4.1 Inleiding

Met Hydra-Zoet kunnen naast de maximale waterstanden behorende bij bepaalde normfrequenties (Toetspeilen) ook de zogenoemde hydraulische belastingniveaus worden berekend. Hierbij wordt naast de waterstand, ook rekening gehouden met de golfaanval op een dijk als gevolg van de wind. Hiervoor zijn voor alle combinaties van de stochasten, in totaal⁸ 10170, naast de waterstanden ook de opgetreden golven nodig.

Deze golven worden voor de Vechtdelta berekend met behulp van de golfgroeikrommes van Bretschneider of het golfvoorspellingsmodel SWAN. Bretschneider is een eendimensionale berekeningsmethode die gebruik maakt van een gemiddelde bodemligging en een representatieve strijklengte om op een zekere locatie golfcondities te berekenen. SWAN is daarentegen een tweedimensionaal golfvoorspellingsmodel dat rekening houdend met de bodemligging in het gebied en gebruik makend van ondiep water fysica voor het gehele 2D rekengebied golfspectra berekent. De karakteristieke waarden zoals de significante golfhoogte en de piekperiode kunnen worden afgeleid uit het spectrum.

4.2 Bretschneider formulering

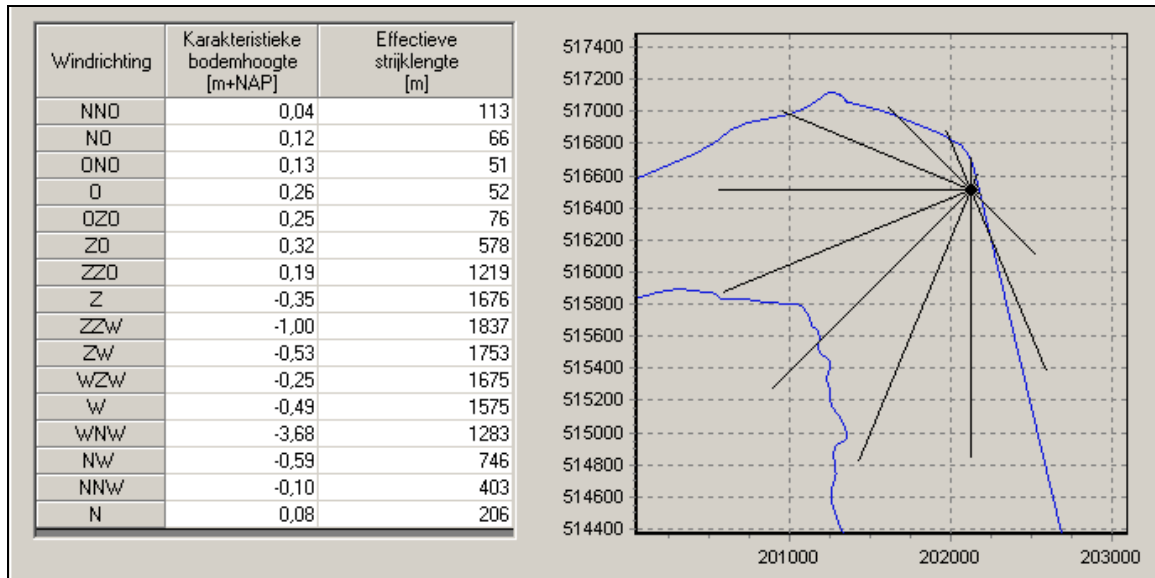
Voor het gebied van het Zwarte Water en de Overijsselse Vecht is in WTI-2011 gebruik gemaakt van Bretschneider [TAW, 1995] voor het berekenen van de golven. Bretschneider geeft de significante golfhoogte H_s en de significante golfperiode T_s als functie van de windsnelheid, effectieve strijklengte en de waterdiepte. De golfrichting wordt gelijk genomen aan de windrichting, dit, in tegenstelling tot de situatie bij toepassing van een tweedimensionaal golfmodel.

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 golfperiode en 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, 2004]. De invloed van een eventueel voorland of een dam voor de dijk kan apart in rekening worden gebracht aan de hand van een voorland of dammodule (zie [RWS, 1999]).

Zoals hierboven reeds is vermeld zijn voor het berekenen van de significante golfhoogtes en piekperiodes onder andere de effectieve strijklengte en gemiddelde waterdieptes nodig. Uitgangspunt voor de berekening van de strijklengtes vormt de Leidraad voor rivierdijken – deel 1 [TAW, 1985]. In het kader van WTI-2011 zijn de strijklengtes opnieuw bepaald [Alkyon 2010] omdat enerzijds een nieuw modelschematisatie is gebruikt en anderzijds nieuwe uitvoerlocaties zijn gedefinieerd. Merk op dat strijklengtes gekoppeld worden aan de uitvoerlocaties. Omdat de bodemligging van het IJVD model is geactualiseerd zijn ook de gemiddelde waterdieptes opnieuw afgeleid; waarbij gebruik is gemaakt van de bodemligging van het integrale WAQUA model voor IJsselmeer, Vecht- en IJsseldelta.

8. Voor de waterstanden worden alleen de westelijke windrichtingen beschouwd met als gevolg dat er 4500 stochastcombinaties worden doorgerekend met WAQUA. Met betrekking tot golfparameters zijn gegevens nodig voor stochastcombinaties uit de database.

(Zie voor meer details [Alkyon, 2010]). De berekende strijklengtes en gemiddelde waterdieptes zijn opgenomen in de database voor Hydra-Zoet.



Figuur 4.1 Voorbeeld strijklengtes voor locatie DR9_325_ZW in het Zwarte Water.

4.3 SWAN model voor Zwarte Meer

Zoals hierboven is vermeld, is voor het Zwarte Meer een SWAN model opgezet. Daar waar op het Zwarte Meer 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 (strijklengte) 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. parameterisaties), dus zonder de spectrale vorm te berekenen (zie voor meer details [Klein *et al*, 2010]).

4.3.1 Versie

Voor het Zwarte Meer is een tweedimensionaal golfvoorspellingsmodel SWAN opgezet. Het SWAN model voor het Zwarte Meer sluit qua model en instellingen aan bij de andere watersystemen waarvoor in het kader van WTI-2011 concept hydraulische randvoorwaarden zijn afgeleid. Voor het Zwarte Meer vervangt het SWAN model Bretschneider. De toegepaste versie van SWAN is 40.72ABCDE (zie [TUDelft, 2010]).

4.3.2 Fysische en numerieke instellingen

De gebruikte fysische en numerieke instellingen van het SWAN model voor Zwarte Meer zijn gebaseerd op de instellingen uit de kalibratie het SWAN model voor de Waddenzee en Westerschelde en validatie voor het IJsselmeer (resp. [Gautier, 2010] en [Klein *et al*, 2010]). Deze fysische instellingen luiden:

```
GEN3 WESTH
WCAP WESTH cds2=5.0e-05 br=0.00175 p0=4.0 powst=0.0 powk=0.0 nldisp=0.0
cds3=0.8 powfsh=1.0
```

QUAD iquad=2 lambda=0.25 Cnl4=3.0+07
 LIMITER ursell=10.0 qb=1.0
 FRIC JONSWAP cfjon=0.067
 BREA WESTH alpha=0.96 pown=2.5 bref=-1.3963 shfac=500.0
 TRIAD trfac=0.1 cutfr=2.5

De numerieke instellingen zijn als volgt:

NUM STOPC 0.00 0.01 0.001 99. STAT mxitst=80

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

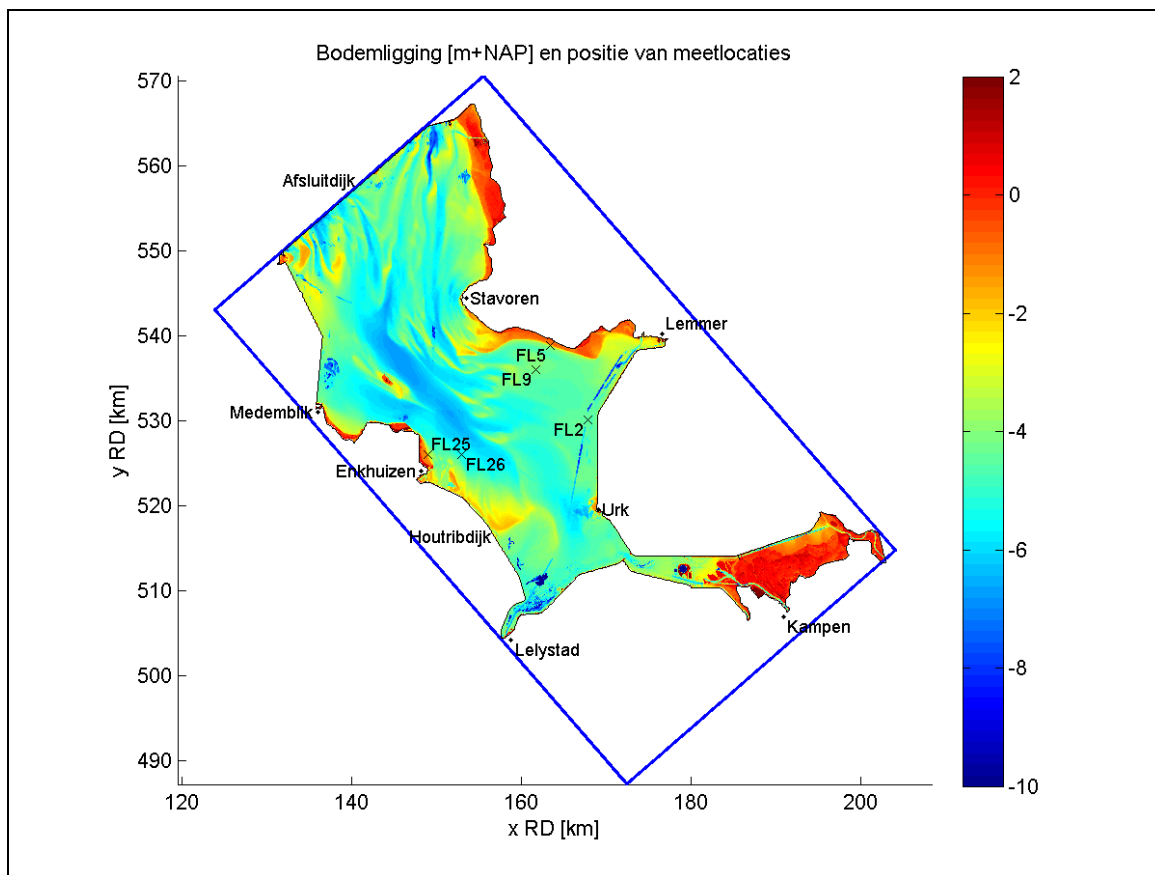
Bodemligging Zwarte Meer

De bodemligging is gerapporteerd in de verificatie rapportage over het SWANmodel voor het IJsselmeer [Klein *et al*, 2010] en is afkomstig uit het IJVD WAQUA model. Een schematische weergave is gegeven in Figuur 4.2. Een belangrijk element in de bodem betreft de verbindende waterkering 25 die bestaat uit de Ramspolkering en de dijk tussen de Ramspolkering en IJsselmuiden. Om te garanderen dat deze kering de juiste hoogte heeft in het model, is de kering als een 'lijnelement' in de bodem aangebracht en niet door middel van interpolatie vanuit de originele bodemdata. De verbindende kering 25 is overstroombaar meegenomen in SWAN berekeningen. Dit betekent dat er golven over de kering heen kunnen slaan.

4.3.3 Rekenrooster en verificatie SWAN model Zwarte Meer

Zoals hierboven vermeld zijn de numerieke en fysische instellingen voor het SWAN model voor Zwarte Meer afkomstig uit de calibratie en validatie van het SWAN model voor de Waddenzee en het IJsselmeer [Gautier, 2010]. Binnen 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 IJsselmeer. Op het Zwarte Meer zijn geen metingen beschikbaar.

De toepasbaarheid van deze instellingen voor het Zwarte Meer IJsselmeer zijn vervolgens geverifieerd door met het SWAN IJsselmeer model zeven gemeten stormen te simuleren. Deze stormen beslaan de periode 1999 tot en met 2007. De windsnelheid in die stormen varieerde van 15,2 tot 23,5 m/s en de windrichting van 215 tot 286°N. De resultaten van deze berekeningen zijn vervolgens vergeleken met metingen; alle beschouwde meetlocaties liggen in het IJsselmeer, zie Figuur 4.2 voor de gebruikte meetlocaties voor de validatie. De meetlocaties liggen alle in een band rond de lijn Enkhuizen-Lemmer. Bovendien liggen de locaties, op locatie FL5 op het ondiepe Friese voorland na, in de minder ondiepe delen van het IJsselmeer. Wel is het zo dat twee punten enigszins in de luwte van de oever en de Houtribdijk liggen.



Figuur 4.2 Bodemligging SWAN IJsselmeer en Zwarte Meer, inclusief meetlocaties voor de validatie.

De verificatieberekeningen zijn uitgevoerd op een rekenrooster met $80 \times 80 \text{ m}^2$ en op een rooster met $40 \times 40 \text{ m}^2$ roostercellen. Voor het Ketelmeer en het Vossemeer is ook $20 \times 20 \text{ m}^2$ onderzocht. Uit de verificatieberekeningen blijkt dat $40 \times 40 \text{ m}^2$ voldoende nauwkeurig is voor het IJsselmeer; maar dit rekenrooster blijkt echter minder nauwkeurig te zijn voor het Zwarte Meer. Daarnaast blijkt in het Ketelmeer en Zwarte Meer een ander probleem zich voor te doen, namelijk het stralenprobleem⁹. Dit probleem is opgelost door het vergroten van het aantal richtingssectoren van 36 naar minimaal 96 in combinatie met een ander numeriek BSBT schema (zie [Klein *et al*, 2010]). Uit verificatieberekeningen blijkt tot slot dat een rekenrooster met $20 \times 20 \text{ m}^2$ voldoende nauwkeurig is voor het Zwarte Meer.

Zoals hierboven is vermeld bevat de database voor de Vecht- en IJsseldelta in totaal 10170 combinaties [Geerse, 2008] met bijbehorende maximale waterstanden en golfcondities (productieberekeningen met WAQUA en SWAN/Bretschneider). In tegenstelling tot waterstanden zijn alle windrichtingen belangrijk voor golven, wat bovenvermelde werkwijze voor WAQUA onwerkbaar maakt voor golfcondities. Idealiter zouden er daarom ruim 10.000 SWAN berekeningen moeten worden gemaakt. Om de rekentijd te beperken is een aantal aannames gedaan zodat het aantal daadwerkelijk te maken SWAN sommen beperkt kon blijven. Er is gekozen om als invoer voor de SWAN berekeningen uniforme waterstanden te gebruiken in plaats van waterstandvelden uit WAQUA en deze vervolgens te interpoleren. Dit betekent dat de combinaties bestaande uit waarden van de stochasten meerpeil en afvoer vervangen zijn door 'uniforme waterstanden'. Deze werkwijze is onderzocht in het

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

verificatierapport voor het IJsselmeer [Klein *et al*, 2010]). Door deze keuze is het aantal berekeningen gereduceerd tot 1792 combinaties; dit aantal bestaat uit 7 windsnelheden, 16 windrichtingen, 8 uniforme waterstanden en 2 beheersituaties van de Ramspolkring. In totaal zijn dus 1792 SWAN berekeningen nodig voor het Zwarte Meer. Een overzicht van deze combinaties is gegeven in Tabel 4.1.

Hier dient nog te worden opgemerkt dat voor de bepaling van de golfcondities in het Zwarte Meer er voor iedere stochastcombinatie eerst een berekening is uitgevoerd voor het IJsselmeer met een grover rooster (40m * 40m). Deze levert de randvoorwaarden voor de detailberekeningen voor Ketelmeer, Vossemeer en het Zwarte Meer. Om randvoorwaarden te genereren zijn dus in totaal 892 SWAN berekeningen gemaakt voor het IJsselmeer. De instellingen voor de gedetailleerde berekeningen in de fysica zijn identiek aan het IJsselmeer; het rooster in de fysieke en de spectrale ruimte is echter een factor twee fijner [Klein, 2011]. Deze keten resulteert uiteindelijk in de golfcondities voor onder meer het Zwarte Meer.

SWAN is toegepast in de stationaire modus. De windsnelheden zijn vertaald naar open water windsnelheden en variëren hiermee van 11,1 tot en met 43,3 m/s (potentiële wind 10 m/s t/m 42 m/s). De windrichtingen zijn gelijk aan die voor IJsselmeer Ketelmeer en Vossemeer: de cirkel van 360 graden wordt in 16 gelijke stappen van 22,5 graden doorlopen. De waterstanden worden in de SWAN berekeningen voor het Zwarte Meer meegenomen als een vlakke waterspiegel.

Tabel 4.1 set combinaties die doorgerekend zijn met SWAN voor Zwarte Meer

Windsnelheid [m/s]	Windrichting [grd]	Waterstand [m+NAP]	Toestand Ramspol
10 (11.1)	22,5	-0,4	Wel
16 (17.5)	45,0	+0.1	Niet
22 (23.7)	67,5	+0.6	
27 (28.7)	90,0	+1.1	
32 (33.6)	112,5	+1.6	
37 (38.5)	135,0	+2.5	
42 (43.3)	157,5	+3.5	
	180,0	+6.0	
	202,5		
	225,0		
	247,5		
	270,0		
	292,5		
	315,0		
	337,5		
	360,0		

Zoals hierboven vermeld, zijn de resultaten geïnterpoleerd om terug te vertalen naar de oorspronkelijke stochasten, namelijk meerpeil en afvoeren. Hiertoe is de gebruikelijke interpolatie methode die reeds in Hydra-Zoet toegepast wordt, gebruikt.

De SWAN productieberekeningen voor het Zwarte Meer zijn gerapporteerd in een tweetal rapportages [Klein, 2011] en [Klein en Kroon, 2011].

4.4 Controle productieberekeningen SWAN

De golfberekeningen voor het IJsselmeer (inclusief het Ketelmeer en Vossemeer) zijn uitgebreid gecontroleerd en gerapporteerd, (zie hiervoor [Klein 2011] en [Klein en Kroon 2011]).

De controles van de golfberekeningen hebben zich met name gericht op de significante golfhoogte en de periodematen T_{ps} en $T_{m-1,0}$. Bij de controles is gekeken naar de volgende aspecten:

- Rekeningtijd en convergentie;
- Aanwezigheid in- en uitvoerbestanden;
- Boven- en ondergrenzen van de golfcondities en de kwaliteit m.b.t. tot deze grenzen in ruimtelijke verdeling;
- Consistentie binnen de verschillende uitvoersoorten (tabel, 1D- en 2D-spectrum);
- Consistentie van de golfparameters H_{m0} , T_{ps} en $T_{m-1,0}$ met toenemende wind.

De berekende golfparameters vertonen de verwachte trends. Bij toenemende windsnelheid nemen de golfhoogten en golfperioden toe bij aanlandige wind, welke van belang zijn voor de concept HR2011. De uitgevoerde controles hebben aangetoond dat alle SWAN berekeningen voor Zwarte Meer succesvol zijn verlopen. Uit de numerieke en fysische controles blijkt bovendien dat de 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 beperkt aantal locaties te verwerpen. De controles hebben ook aangetoond dat er een zeer grote mate van consistentie is tussen de diverse uitvoerbestanden van SWAN. Meer details met betrekking tot de controles van de SWAN berekeningen zijn te vinden in de betreffende rapportage [Klein en Kroon 2011].

4.5 Keuze golfparameters uit SWAN en vullen databases

4.5.1 Keuze golfparameters uit SWAN berekeningen

De golven in het IJsselmeer zijn in het kader van WTI-2011, zoals eerder in dit rapport genoemd, berekend met SWAN. SWAN is een spectraal model: het berekent het golfspectrum en leidt daar de golfparameters uit af. Het eerder (en in de kleine rivierwateren nog steeds) voor de HR bepaling gebruikte golfmodel Bretschneider 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.

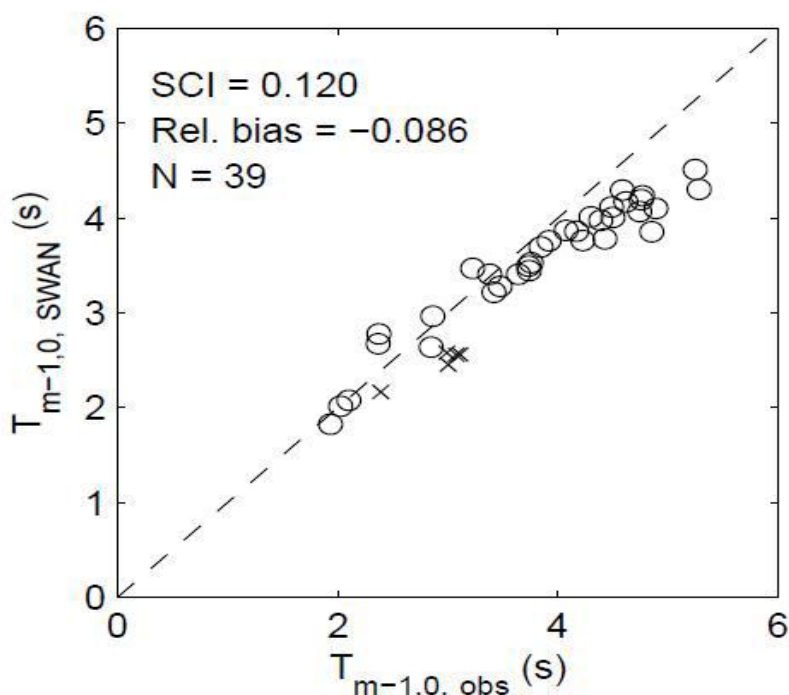
In Hydra-M en Hydra-VIJ, maar ook in Hydra-Zoet, is de piekperiode T_p de gebruikelijke periodemaat. Bij berekeningen met PC Overslag wordt echter de spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$ gebruikt. Omrekening van de piekperiode naar de spectrale golfperiode vindt binnen de Hydra's plaats door middel van 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 golfperiodemaat uit het golfmodel SWAN via een omrekeningsfactor leek een rol te spelen, terwijl deze keuze slecht onderbouwd 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 Bijlage D van dit rapport.

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 $T_{m0,1}$) en hooguit zijdelings naar de piekperiode T_p . De SWAN performance aangaande $T_{m-1,0}$ in een brede set meetgegeven 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 het IJsselmeer, 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 Bijlage D. Echter de performance wat betreft de spectrumvorm voor het IJsselmeer en het Slotermeer 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 huidige 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 4.3 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 Bijlage D van dit rapport.



Figuur 4.3 Performance van SWAN m.b.t. $T_{m-1,0}$ voor de meren (o = IJsselmeer; x = Slotermeer)

Voor het Zwarte Meer, waar SWAN berekeningen worden uitgevoerd voor de bepaling van de concept HR2006, zijn geen golfmetingen beschikbaar op basis waarvan een soortgelijke correctiefactor kan worden bepaald. Voor dit gebied 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 Zwarte Meer wordt daarom dezelfde correctiefactor gehanteerd als voor het IJsselmeer.

4.5.2 Vullen databases

Voor de geselecteerde HR-locaties zijn voor 10170 stochastcombinaties de bijbehorende maximale waterstanden (productie WAQUA) en golfparameters (productie SWAN) of de effectieve strijklengtes en gemiddelde waterdieptes opgenomen in verschillende databases. De databases zijn uitgebreid gecontroleerd en betrouwbaar bevonden voor Hydra-Zoet berekeningen (zie [HKV, 2011b]).

Voor het Zwarte Meer is een database samengesteld met maximale waterstanden (productie WAQUA) en golfcondities (productie SWAN). Naast de golfcondities van SWAN bevat de database ook de gemiddelde waterdieptes en de effectieve strijklengtes. Dit maakt naast berekeningen met SWAN ook berekeningen met Bretschneider mogelijk.

5 Statistiek en probabilistisch rekenen

5.1 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 IJsselmeer zijn reeds beschreven in hoofdstuk 2; deze zijn: IJsselmeerpeil, Vechtafvoer (en IJsselafoer) windsnelheid, windrichting en de keringsituatie van Ramspol. Dit betekent dat de marginale statistiek van deze stochasten nodig is voor probabilistisch rekenen.

De marginale statistiek van de in Hydra-Zoet opgenomen stochasten voor de Vechtdelta is onveranderd ten opzichte van Hydra-VIJ. In onderstaande paragrafen geven we daarom slechts een korte beschrijving, voor details wordt verwezen naar de achtergrondrapportage van HR2006 voor de Vechtdelta.

5.2 Marginale statistiek stochasten Vechtdelta

5.2.1 Meerpeilstatistiek

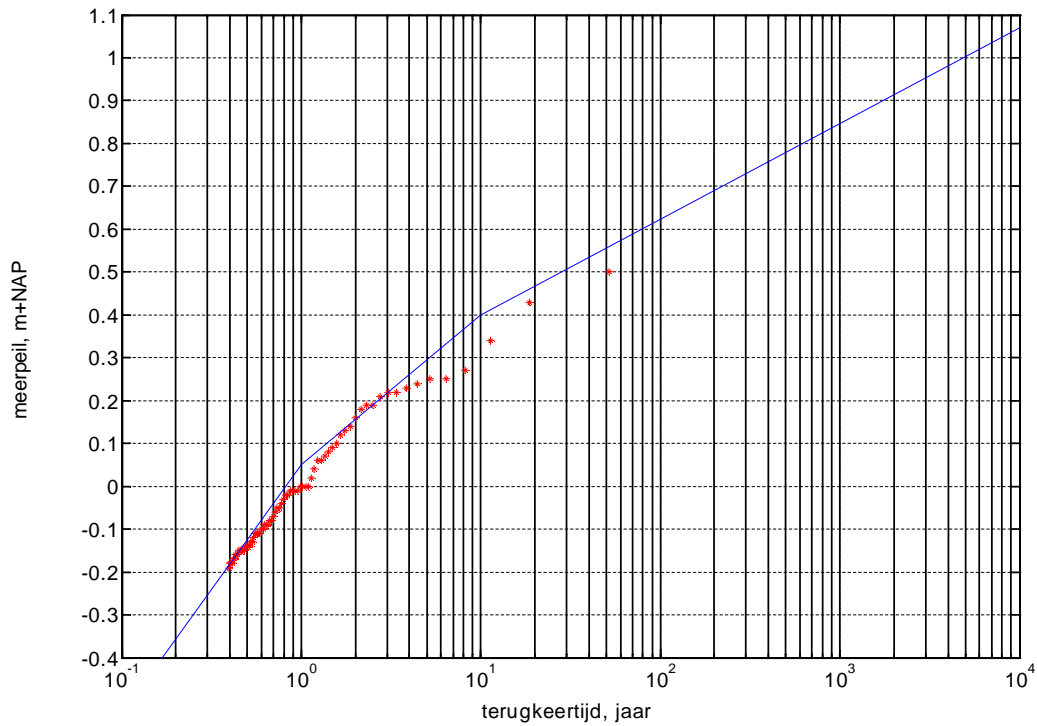
De statistiek van het IJsselmeerpeil is gebaseerd op het gemiddelde meerpeil per dag en bestaat uit de volgende drie onderdelen:

- *Werklijn*: geeft voor een bepaalde overschrijdingsfrequentie het bijbehorende gemiddelde meerpeil per dag
- *Momentane overschrijdingskans*: is de kans dat op een bepaalde dag het meerpeil op enig moment een bepaald niveau overschrijdt,
- *Standaard golfvorm*: is een representatief tijdsverloop van het meerpeil

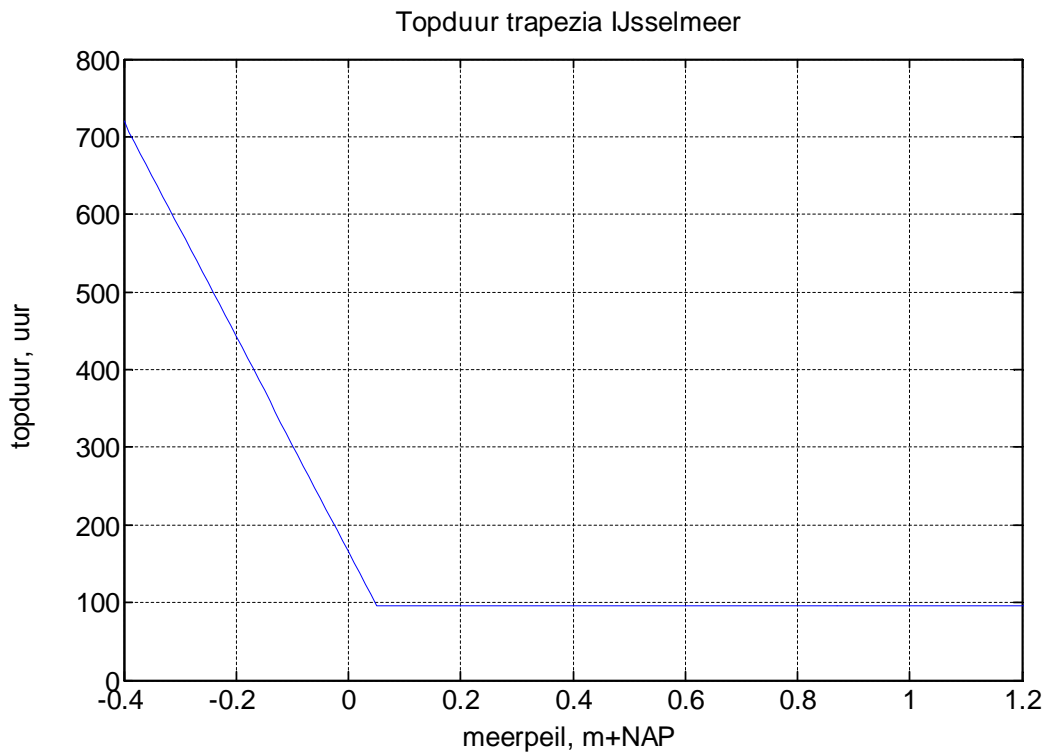
De werklijn van het IJsselmeerpeil is in het verleden al afgeleid ten behoeve van Hydra-M, en later herberekend ten behoeve van Hydra-VIJ (zie [Geerse, 2006]). Ook de momentane overschrijdingskans en standaard golfvorm zijn herberekend ten behoeve van Hydra-VIJ en worden in het kader van WTI-2011 overgenomen in Hydra-Zoet.

De werklijn voor het IJsselmeerpeil geldt voor $T \geq 1$, ofwel vanaf 0.05 m+NAP, en is weergegeven in Figuur 5.1. De meerpeilgolven voor het IJsselmeer worden gemodelleerd door trapezia, die gelden voor piekwaarden groter dan -0.40 m+NAP. Ze hebben een basisduur $B = 30$ dagen en topduren $b(s)$ volgens Figuur 5.2. Deze figuur laat zien dat de duur van de trapezia voor meerpeilen hoger dan 0.05 m+NAP, constant 4 dagen (96 uur) bedraagt.

Uit de werklijn van het IJsselmeerpeil wordt ten behoeve van de probabilistische berekeningen met Hydra-Zoet de zogenoemde kansdichtheid, $f(m)$, afgeleid (zie [Geerse, 2006]) voor de afleiding van de kansdichtheid van het IJsselmeerpeil.



Figuur 5.1 Werklijn meerpeil (blauwe lijn) en data IJsselmeer (rode markers) (uit [Geerse, 2006]).



Figuur 5.2 Topduur van de IJsselmeerpeiltrapezia

5.2.2 Afvoerstatistiek

De statistiek van de Vechtafvoer geldt voor station Dalfsen nabij Vechterweerd en bestaat net als voor het IJsselmeerpeil uit de volgende drie onderdelen:

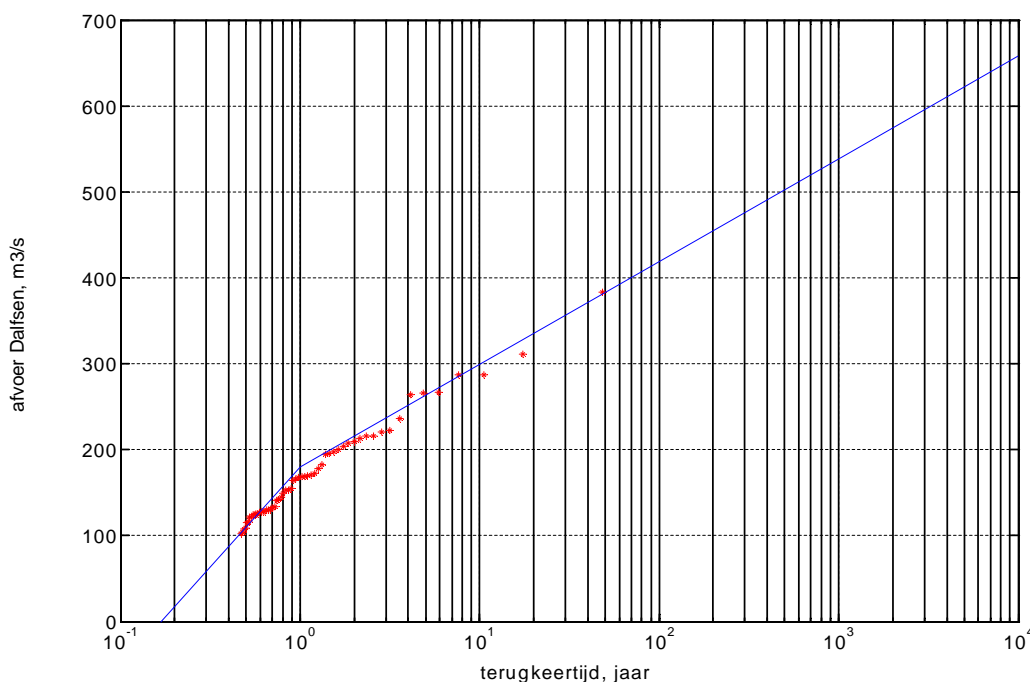
- Werklijn
- Momentane overschrijdingskans
- Standaard golfvorm

Voor het bepalen van de werklijn is ten eerste de maatgevende afvoer met een overschrijdingsfrequentie van 1/1250 nodig. De maatgevende afvoer bij Dalfsen is in het verleden al afgeleid ten behoeve van Hydra-VIJ en bedraagt 550 m³/s, zie [Geerse, 2006]. Hierbij is gebruik gemaakt van metingen uit de volgende periodes:

- 1 januari 1960 t/m december 1983
- 1 oktober 1993 t/m maart 1994
- 1 oktober 1998 t/m 31 maart 1999
- 1 oktober 2000 t/m 31 maart 2001

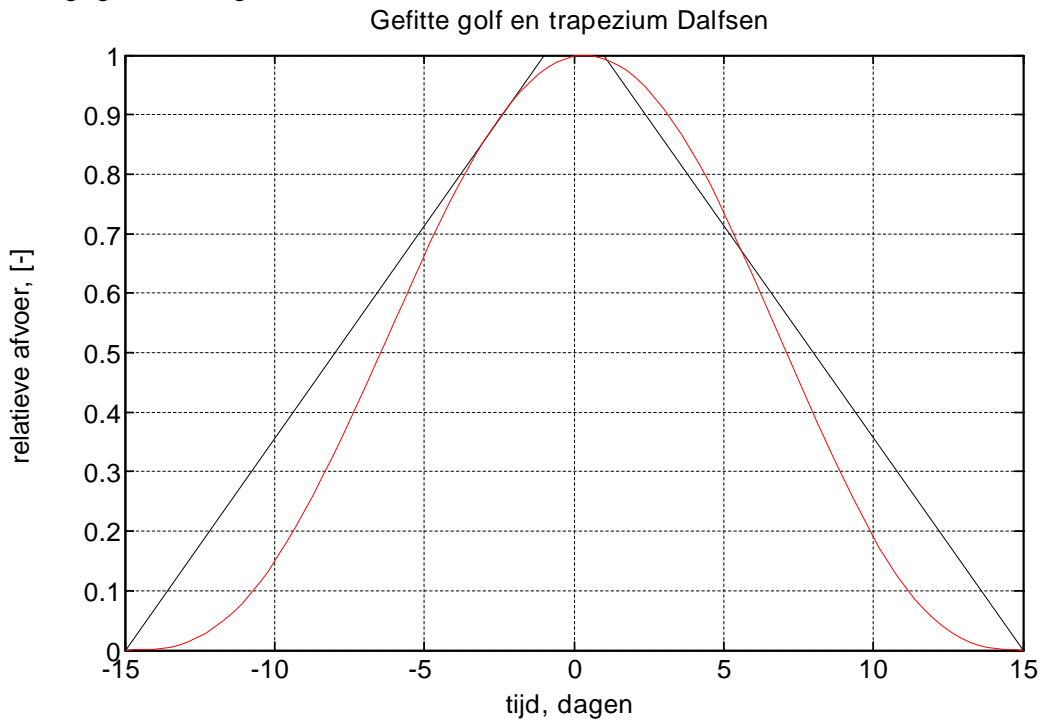
In het kader van WTI-2011 is de statistiek van de Vechtafvoer niet geactualiseerd en daarom onveranderd ten opzichte van HR2006. De verlenging van de meetreeks gaf geen aanleiding voor een herberekening. De huidige inzichten geven bovendien aan dat de waarde van 550 m³/s voor de maatgevende relatief voldoende robuust is. Dat komt doordat bij meer neerslag de extra afvoer sterk beperkt wordt door de fysische maxima [Geerse, 2006].

Naast de maatgevende afvoer is op basis van de meetreeks bij Dalfsen de afvoer met een overschrijdingsfrequentie van één keer per jaar bepaald; die is gesteld op 180 m³/s. De maatgevende afvoer van 550 m³/s bepaalt samen met de afvoer van 180 m³/s, die één keer per jaar wordt overschreden, de werklijn. Deze werklijn is gegeven in Figuur 5.3.

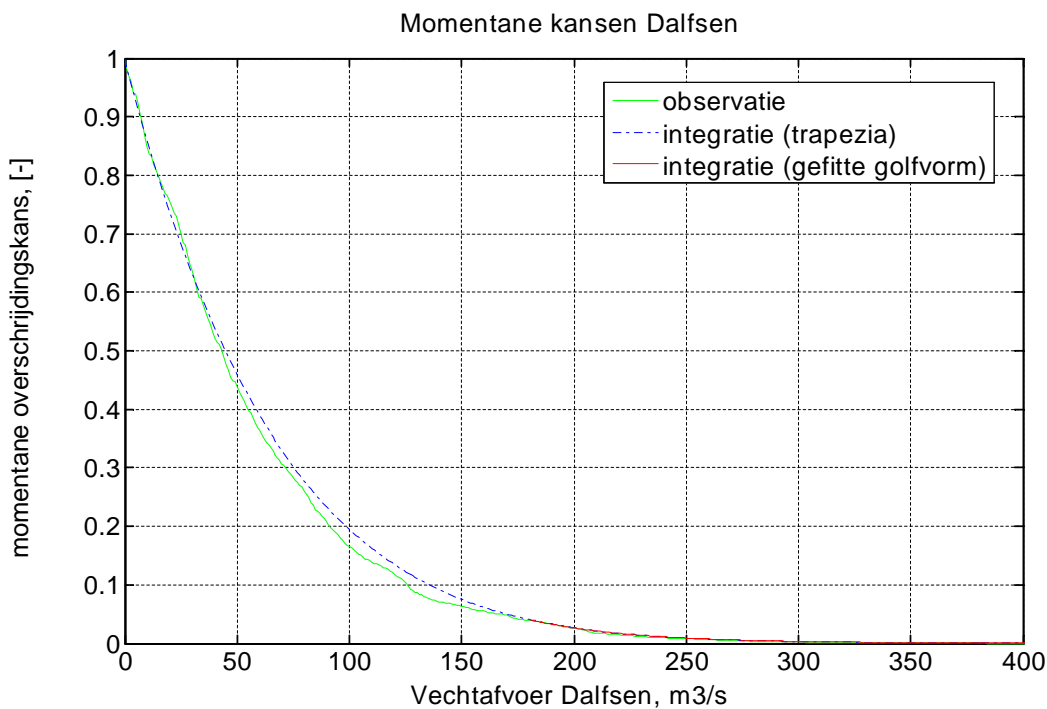


Figuur 5.3 Werklijn Dalfsen (uit [Geerse, 2006]).

Ook de momentane overschrijdingskans en standaard golfvorm zijn al in het verleden (her)berekend ten behoeve van Hydra-VIJ en worden in het kader van WTI-2011 overgenomen in Hydra-Zoet. De standaard golfvorm, voor afvoerpieken groter dan 180 m³/s, is weergegeven in Figuur 5.4.



Figuur 5.4 standaard afvoergolfvorm bij Dalfsen inclusief trapeziumvormige vorm met basisduur van 30 dagen (uit Geerse, 2006)



Figuur 5.5 Momentane kansen van de afvoer bij Dalfsen volgens de metingen, en zoals bepaald met de gefitte golven en met de trapezia uit Figuur 5.4(Uit [Geerse 2006])

De momentane overschrijdingskansen worden door turven uit de metingen bepaald. Maar kunnen ook uit de werklijn en de golfvorm worden afgeleid (zie voor details [Geerse, 2006]).

Uit de werklijn van de Overijsselse Vecht wordt ten behoeve van de probabilistische berekeningen met Hydra-Zoet de zogenoemde kansdichtheid, $f(q)$, afgeleid (Zie [Geerse, 2006] voor de afleiding van de kansdichtheid van de Vechtafvoer).

Voor de Vechtdelta wordt in Hydra-Zoet alleen de statistiek van de Overijsselse Vecht gebruikt; daarom wordt in dit rapport alleen deze statistiek behandeld; de afvoerstatistiek van de Rijn (IJssel) en de Maas wordt niet behandeld. De afvoer van de Overijsselse vecht en de IJsselafvoer zijn wel gecorreleerd.

5.2.3 Windstatistiek

De voor Hydra-Zoet gebruikte statistische invoer voor de wind bestaat uit twee belangrijke onderdelen:

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

De overschrijdingsfrequentie van de windsnelheid per windrichting is beschreven door Geerse in 2003 [Geerse, 2003a] en is overgenomen uit Hydra-VIJ in Hydra-Zoet. Hierbij is per windsector van 22.5 graden de overschrijdingskans van windsnelheden van 0 tot en met 42 m/s bepaald. De momentane kans op de windrichting is ook direct overgenomen uit Hydra-VIJ. Beide statistische parameters zijn gebaseerd op het Rijkooort-Weibull model [Wierenga en Rijkooort, 1983].

Naast de statistische parameters gebruikt Hydra-Zoet als invoer ook een transformatie tabel waarmee potentiële wind vertaald kan worden naar een windsnelheid op 10 meter hoogte boven open water. De onderbouwing van deze vertaling wordt gegeven in een tweetal documenten van De Waal (zie [De Waal, 2003] en [De Waal, 2010]).

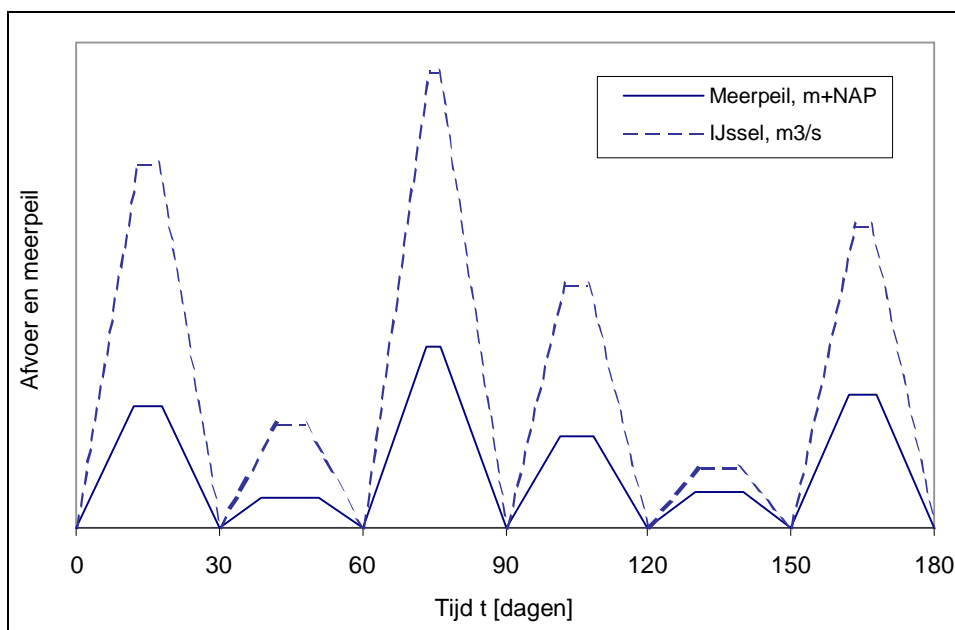
5.2.4 Ramspolkering

De Ramspolkering dient om de dijken rond het Zwarte Meer en langs het Zwarte water te ontlasten. Tijdens stormen uit het westen of noordwesten kan namelijk door opwaaiing vanuit het IJsselmeer de waterstand in grote delen van de Vechtdelta ook opgestuwd worden. Om dit te voorkomen is de Ramspolkering aangelegd. De Ramspolkering vormt in Hydra-Zoet een aparte stochast. De beheersituatie van de kering wordt om die reden in beschouwing genomen bij de productieberekeningen, zie hoofdstuk 3 en 4. In het probabilistische model van Hydra-Zoet wordt de kering opgenomen door middel van een faalkans van de kering. Dit is de kans dat de kering niet sluit als dit volgens de geldende sluitcriteria wel zou moeten, wat wordt gedefinieerd als het falen van de kering. Hierbij wordt geen onderscheid gemaakt tussen niet sluiten, niet tijdig sluiten of constructief falen na sluiten. Op basis van de MER Ramspol [Kors et al, 1994] is deze kans gesteld op 0.0035. Dit betekent dat gemiddeld één keer per 286 sluitvragen de kering zal falen in Hydra-Zoet berekeningen.

5.3 Probabilistisch model Hydra-Zoet

Hydra-Zoet is een probabilistisch model dat in 2010 is ontwikkeld voor de zoete watersystemen. Naast de Vechtdelta 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 het benedenrivierengebied¹⁰. Hydra-Zoet vervangt de bestaande probabilistische modellen Hydra-M, Hydra-VIJ, Hydra-R en Hydra-M (en Hydra-Q¹¹).

Uitgangspunt voor de ontwikkeling en bouw van Hydra-Zoet is het bestaande programma Hydra-VIJ. 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 meerpeilen) worden geschematiseerd door trapezia. Verder is om redenen van uniformiteit de tijdbasis van alle snelle stochasten gelijk gesteld aan constante blokken van 12 uur (in plaats van 24 uur in Hydra-M voor het IJsselmeergebied en een getijperiode in Hydra-B voor het benedenrivierengebied). Een voorbeeld van de schematisatie door trapezia is te vinden in Figuur 5.6.



Figuur 5.6 Afvoer- en meerpeilverloop geschematiseerd door trapezia met als basisduur 30 dagen.

Het tijdsverloop van de wind, de trage stochast voor de Vechtdelta, wordt in Hydra-Zoet gemodelleerd door windblokken van 12 uur. Gedurende deze periode van 12 uur worden de windrichting en de windsnelheid constant verondersteld. De meerpeil- en afvoertrapezia worden in Hydra-Zoet onderverdeeld in een gelijk aantal windblokken. Met andere woorden, elk trapeziumverloop van basisduur 30 dagen wordt gediscriteerd in 60 blokken van 12 uur (een halve dag). Voor meer details wordt verwezen naar het document van Geerse uit 2006 [Geerse, 2006].

10. Hydra-Zoet is ook geschikt voor het Markermeer, de IJsseldelta en het bovenrivierengebied.

11. Hydra-Q is een variant van Hydra-M voor bekledingen.

In het probabilistisch model uit Hydra-Zoet wordt alleen het winterhalfjaar beschouwd. Het winterhalfjaar is dan verdeeld in 6 afvoer- en meerpeiltrapezia met elk een basisduur van 30 dagen. In werkelijkheid vallen afvoer- en meerpeilgolven niet exact samen.

Om deze reden is het probabilistisch zodanig opgezet dat er een faseverschuiving tussen de afvoer en meerpeiltrapezia gehanteerd kan worden. De grootte van de faseverschuiving is bepaald aan de hand van metingen. Daarbij zijn de afvoerpieken gekoppeld aan maximale meerpeilen die binnen een tijdvenster van 30 dagen liggen. Voor een exacte beschrijving van de analyse en rekenwijze wordt verwezen naar het document van Geerse uit 2006 [Geerse, 2006]. Uiteindelijk heeft de analyse geresulteerd in een faseverschil van 3,5 dagen. Dit betekent dat de piekafvoeren (van de IJssel en de Overijsselse Vecht) 3,5 dagen eerder plaatsvinden dan de piek van het IJsselmeerpeil. Behalve als functie van de tijd, wordt een trapezium met een bepaalde piekwaarde ook gekarakteriseerd door een vaste overschrijdingsduur op een bepaald afvoerniveau onder de top. Voor een meerpeil trapezium wordt dezelfde methode gebruikt.

De afvoeren van de Overijsselse Vecht en de IJssel zijn onderling gecorreleerd, maar gecorreleerd met het IJsselmeerpeil. In Hydra-Zoet wordt ook rekening gehouden met deze correlaties. Dit gebeurt door middel van gezamenlijke kansdichtheidfuncties die worden berekend met een correlatiemodel dat uitgebreid is beschreven in een tweetal documenten uit 2004: [Beijk en Geerse, 2004] en [Geerse, 2003b]. Het correlatiemodel beschrijft door middel van een transformatie de samenhang tussen verschillende gecorreleerde stochasten. De samenhang wordt uitgedrukt in een correlatieparameter die als invoer geldt voor Hydra-Zoet. Een kleine waarde voor deze correlatieparameter betekent een sterke correlatie tussen twee stochasten. Voor een grotere waarde geldt een zwakkere correlatie.

De correlatieparameters van meerpeil en afvoer van de Overijsselse Vecht en van meerpeil en IJsselafvoer zijn bepaald aan de hand van meerpeil- en afvoermetingen. Voor beide is een waarde van 1.2 vastgesteld [Geerse, 2006].

Samengevat zijn de volgende statistische invoergegevens benodigd voor Hydra-Zoet. Hoewel de statistiek van de IJsselafvoer niet relevant is voor de Vechtdelta, nemen we die vanwege o.a. de correlatie met het meerpeil ook mee in dit overzicht. Voor details met betrekking tot de statistiek van de IJssel wordt verwezen naar het rapport van Geerse uit 2006 [Geerse, 2006].

- Kansdichtheidfuncties van de piekafvoeren van de Overijsselse Vecht en de IJssel,
- Topduur van de afvoertrapezia, als functie van de hoogte van het trapezium,
- Kansdichtheidfunctie van IJsselmeerpeil,
- Topduur van de meerpeiltrapezia, als functie van de hoogte van het meerpeil,
- Karakteristieke waarde voor de fase φ tussen Vecht- en IJsselmeertrapezia,
- Karakteristieke waarde voor de fase φ tussen IJssel- en IJsselmeertrapezia,
- Parameter σ voor de parameterisatie van de gezamenlijke kansdichtheid $f(q_v, m)$ voor de pieken van Vecht- en meerpeiltrapezia,
- Parameter σ voor de parameterisatie van de gezamenlijke kansdichtheid $f(q_{ij}, m)$ voor de pieken van IJssel- en meerpeiltrapezia,
- Momentane kansen $P(r)$ op de windrichtingen r , namelijk de 16 windrichtingen N, NNO, NO, ..., NNW,
- Conditionele overschrijdingskansen $P(U > u | r)$ van het 12-uursmaximum van de windsnelheid u , gegeven richting r gedurende de 12-uursperiode.

Tabel 5.1 parameterinstellingen van Hydra-Zoet voor de Vechtdelta.

Paramters Hydra-zoet	Waarde	Eenheid
Faalkans Ramspolkering	0.0035	per vraag
Aantal trapezia in winterhalfjaar	6	-
Basisduur trapezia	30	dagen
Insnoeringfactor hoogte afvoertrapezia	100	%
Insnoeringfactor horizontale breedte afvoertrapezia	100	%
Insnoeringfactor hoogte meerpeiltapezia	100	%
Insnoeringfactor horizontale breedte meerpeiltapezia	100	%
Faseverschuiving meerpeiltapezia t.o.v. afvoertrapezia	84	uur
Correlatieparameter	1.2	-
Laagste piekwaarde trapezia Vechtafvoer	0.0	m ³ /s
Hoogste piekwaarde trapezia Vechtafvoer	800	m ³ /s
Stapgrootte piekwaarde Vechtafvoer	5	m ³ /s
Laagste piekwaarde trapezia IJsselafvoer	200	m ³ /s
Hoogste piekwaarde trapezia IJsselafvoer	4000	m ³ /s
Stapgrootte piekwaarde IJsselafvoer	25	m ³ /s
Laagste piekwaarde trapezia meerpeil	-0.40	m+NAP
Hoogste piekwaarde trapezia meerpeil	1.80	m+NAP
Stapgrootte piekwaarde trapezia meerpeil	0.05	m
Bovengrens windsnelheid	45	m/s
Ondergrens windsnelheid	0	m/s

6 Concept hydraulische randvoorwaarden

6.1 Inleiding

De in de voorgaande hoofdstukken beschreven methode en technieken zijn uiteindelijk gebruikt voor het berekenen van de concept HR2011 voor de Vechtdelta. Er zijn berekeningen gemaakt voor het afleiden van zowel de toetspeilen als de hydraulische belastingniveaus. De hydraulische belastingniveaus zijn berekend voor standaard profielen van 1 op 3 en een overslagdebiet van 1 l/s/m. Voor de vergelijking met de vigerende HR2006 is gebruik gemaakt van de HR2006 locaties. De definitieve concept HR2011 zijn bepaald voor de in het kader van WTI-2011 gedefinieerde locaties zoals beschreven in paragraaf 3.7. Bij de vergelijking en verschilanalyse zijn ook de illustratiepunten beschouwd.

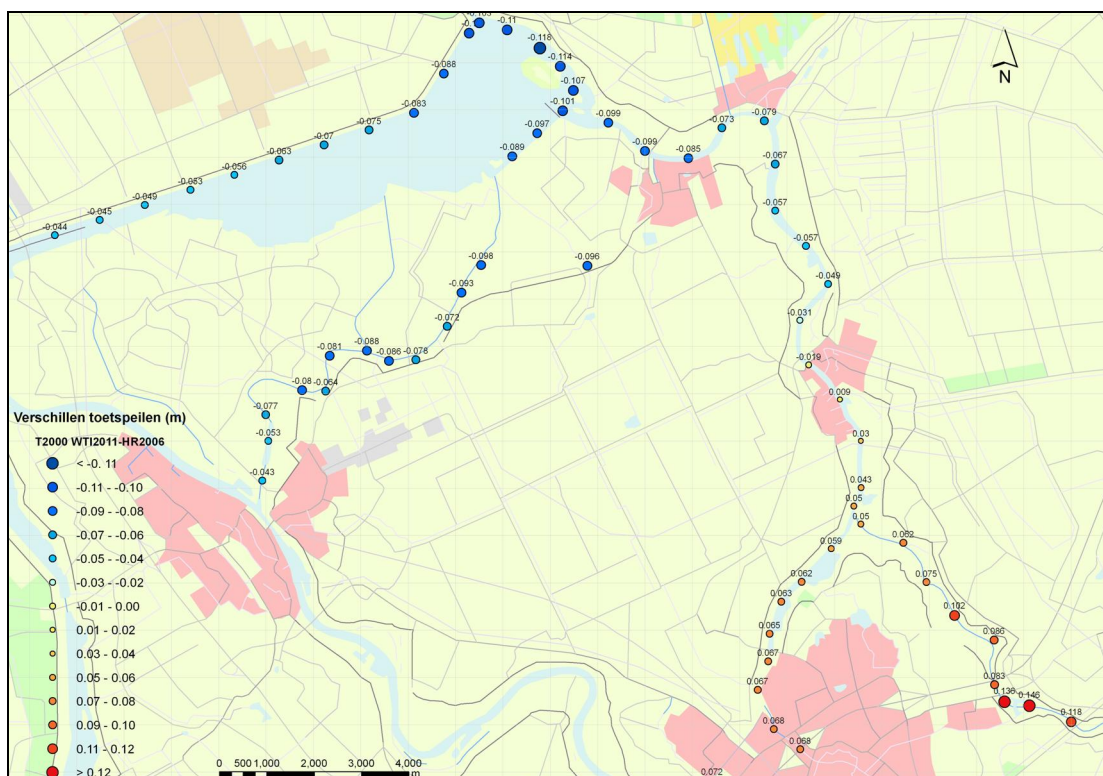
In paragraaf 6.2 wordt een beknopt overzicht gegeven van de verschillen in toetspeilen tussen de HR2006 en concept HR2011 op zowel de HR2006 als de HR2011 locaties. In paragraaf 6.3 worden de belastingniveaus beschouwd. Voor een uitgebreide beschrijving van de vergelijking en verschilanalyse wordt verwezen naar de verschilanalyse van Chbab uit 2011 [Chbab, 2011].

6.2 Vergelijking en verschilanalyse toetspeilen

Zoals in de vorige paragrafen is beschreven zijn binnen WTI-2011 nieuwe uitvoerlocaties gedefinieerd. Voor een objectieve vergelijking en verschilanalyse zijn in eerste instantie de oude HR2006 locaties beschouwd. Voor alle 67 HR2006 locaties in de Vechtdelta zijn concept toetspeilen bepaald met Hydra-Zoet en vervolgens vergeleken met de vigerende (onafgeronde) toetspeilen. Deze berekeningen en de vergelijking zijn uitvoerig beschreven in Verschilanalyse concept HR2011 en HR2006 voor de Vechtdelta [Chbab, 2011]. Een globaal overzicht van de verschillen tussen de HR2006 en de concept HR2011 op basis van de oude uitvoerlocaties (HR2006) is weergegeven in Figuur 6.1. De berekende concept toetspeilen op de oude HR2006 locaties zijn opgenomen in Bijlage C.

Naast de toetspeilen zijn voor alle as locaties de illustratiepunten bepaald en vergeleken met de illustratiepunten behorende bij de vigerende HR. De verschillen in illustratiepunten behorende bij de concept HR2011 en HR2006 zijn klein; een gedetailleerde overzicht van de vergelijking is te vinden in [Chbab, 2011].

De berekende concept toetspeilen voor HR2011 op de HR2006 locaties laten een zeer consistent beeld zien. De verschillen met de vigerende toetspeilen zijn relatief klein. Op het Zwarte Meer en het benedenstroomse deel van het Zwarte Water zijn de berekende concept toetspeilen lager dan de HR2006. Het maximale verschil bedraagt 0.12 cm en treedt op aan de oostzijde van het Zwarte Meer. Elders op het Zwarte Meer en het Zwarte Water, tot de lijn Hasselt-Zwolle, bedraagt het verschil enkele centimeters. Hoewel er enige verschillen optreden in de waarden van het illustratiepunt, worden deze verschillen voornamelijk veroorzaakt door enerzijds een verbeterde bodemschematisatie in WAQUA en dus het onderloopgedrag van het Kampereiland en anderzijds de verbetering van de bodemschematisatie van het zomerbed langs het Zwarte Water (zie [Deltares, 2010]). Het zomerbed is in het integrale WAQUA modelschematisatie namelijk tot 1 m lager dan het model dat ten grondslag ligt aan de HR2006.



Figuur 6.1 Verschillen tussen de HR2006 en de concept HR2011 op de HR2006 locaties in de Vechtdelta

Op het bovenstroomse deel van het Zwarte Water, en de Overijsselse Vecht zijn de berekende concept toetspeilen hoger dan de vigerende toetspeilen. Het verschil loopt vanaf Hasselt-Zwolle geleidelijk op om een maximale waarde te bereiken van 0.14 m op de Overijsselse Vecht. Dit verschil wordt namelijk veroorzaakt door de bodemligging in de IJVD modelschematisatie die hoger is dan de bodemligging van de HR2006 WAQUA, vergelijk ook met Figuur 3.5 waarin de verschillen in bodemligging zijn weergegeven.

Tabel 6.1 Verschil in toetspeil tussen HR2006 en concept HR2011 (op de HR2006 locaties).

Dijkringgebied	Normfrequentie	Naam	Minimaal Verschil [m]	Maximaal verschil [m]
7	1/4000	Noordoostpolder	-0.04	-0.10
9	1/1250	Vollenhove	-0.12	0.15
10	1/2000	Mastenbroek	-0.10	0.07
53	1/1250	Salland	0.05	0.15

Voor het Zwarte Meer zijn nieuwe uitvoerlocaties gedefinieerd. De berekende toetspeilen op deze nieuwe locaties, de HR2011 locaties, vertonen een consistent en logisch beeld met de berekende toetspeilen op de HR2006 locaties. Langs dijkkring 53 zijn er geen verschillen omdat de as locaties ongewijzigd zijn ten opzichte van HR2006. Voor dijkkring 9 is uiteindelijk besloten om de HR locaties te selecteren uit de natte set. Deze valt min of meer samen met de oude HR2006 locaties.

Tabel 6.2 Verschil in toetspeil tussen HR2006 en concept HR2011.

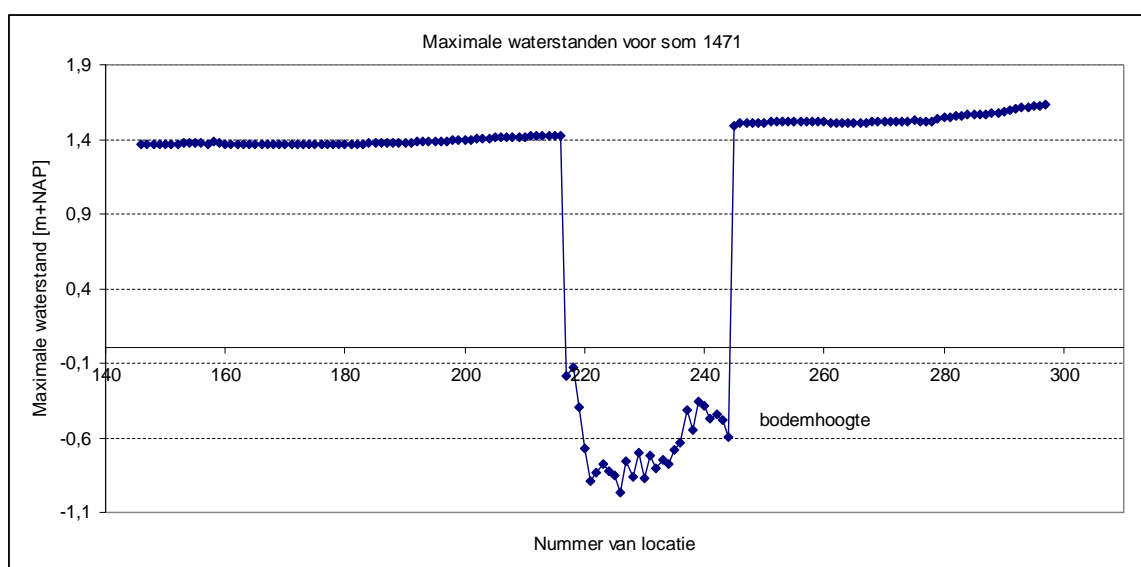
Dijkringgebied	Normfrequentie	Naam	Minimaal Verschil [m]	Maximaal verschil [m]
7	1/4000	Noordoostpolder	0.00	0.02
9	1/1250	Vollenhove	0.00	0.00
10	1/2000	Mastenbroek	0.00	0.10
53	1/1250	Salland	0.00	0.00

Het verschil in toetspeil tussen de HR2006 en de concept HR2011 voor de nieuwe locaties langs de Kamperzeedijk (dijkring 10) verdient extra toelichting. De berekende concept toetspeilen voor de locaties langs de zuidelijke kant van het Kampereiland laten, met uitzondering van het gebied tussen Goot en Veneriete, een consistent en logisch beeld zien. Het verschil met de huidige toetspeilen op de HR2006 locaties is klein (kleiner dan 0.10 m). Nadere analyse heeft laten zien dat het gebied tussen Goot en Veneriete, zie ook Figuur 2.2, droog blijft, ook onder maatgevende omstandigheden. De uitvoerlocaties in dit gebied blijken allen een illustratiepunt te hebben dat aardig in de beurt komt van de WAQUA berekening met randvoorwaarden zoals weergegeven in Tabel 6.3.

Tabel 6.3 Randvoorwaarden van de berekening 1471 uit de productie (komen redelijk overeen met Illustratiepunt voor locaties tussen Goot en Veneriete)

Meerpeil (m+NAP)	Afvoer (m ³ /s)	Windsnelheid (m/s)	Windrichting (graden)
0.9	400	16	West

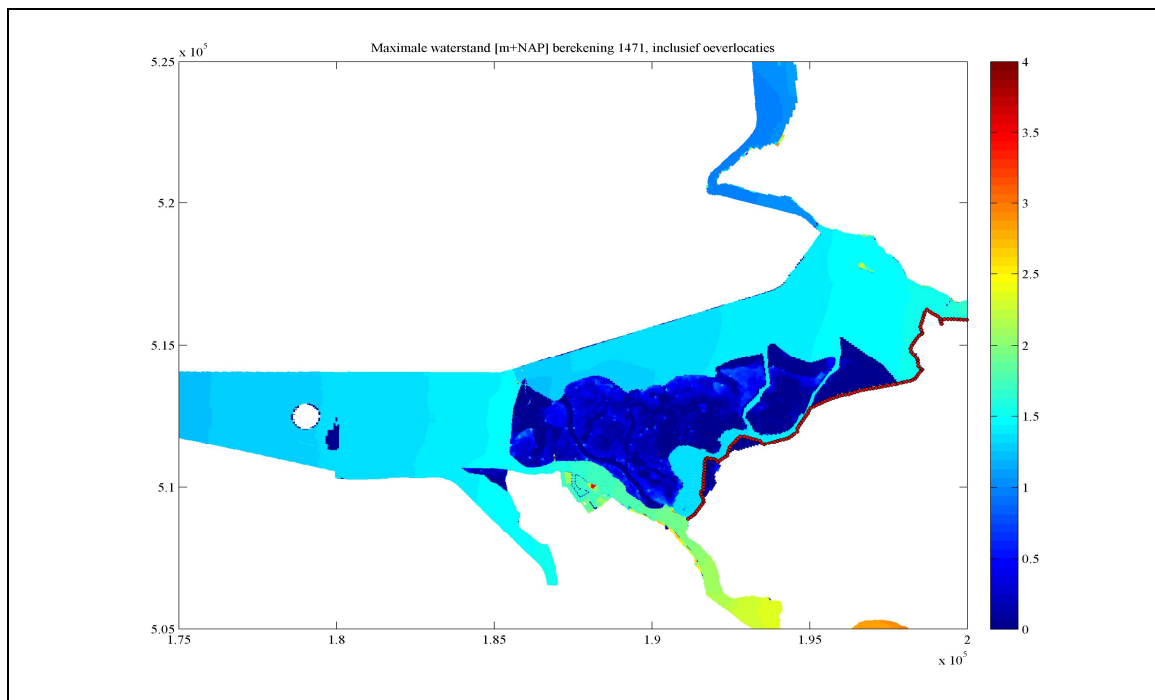
De berekende "maximale waterstand" voor deze som is weergegeven in Figuur 6.2 en Figuur 6.3.



Figuur 6.2 berekende maximale waterstand voor alle locaties langs de zuidelijke kant van Kampereiland voor de WAQUA simulatie met de randvoorwaarden van Tabel 6.3.

Figuur 6.2 laat zien dat de berekende "maximale waterstand" voor alle locaties gelegen tussen Goot en Veneriete gelijk is aan de bodemhoogte.

Figuur 6.3 laat zien dat alleen het deelgebied ten oosten van Veneriete en delen langs de Kamperzeedijk onderlopen onder maatgevende omstandigheden. Dit resultaat sluit goed aan bij de hoogte van de regionale keringen in het Kampereiland zoals beschreven in subparagraaf 2.1.



Figuur 6.3 maximale waterstand in Kampereiland met randvoorwaarden uit Tabel 6.3.

6.3 Vergelijking en verschilanalyse belastingniveaus

Ten aanzien van golven en belastingniveaus is onderscheid gemaakt tussen het gebied waar SWAN is gebruikt en het gebied waar Bretschneider is gebruikt.

Belastingniveaus berekend op basis van Bretschneider (Zwarte Water en Overijsselse Vecht)

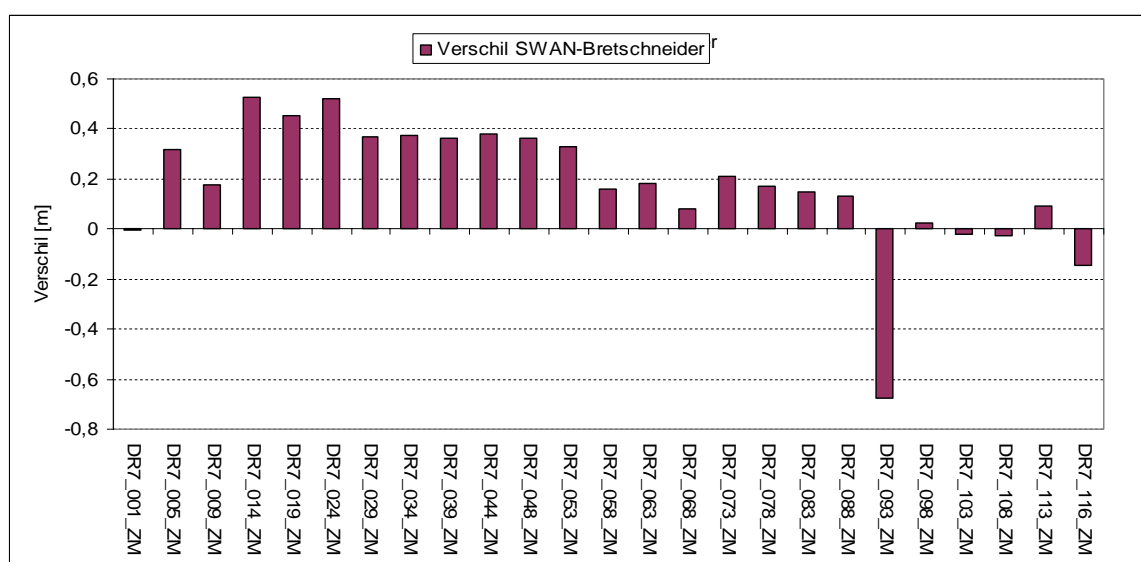
Door aanpassing van de begrenzing van de WAQUA modelschematisatie en de verandering in de bodemligging treden er enige verschillen op in de effectieve strijklengtes en gemiddelde dieptes. Hierdoor treden er verschillen op in de berekende waterstanden in het illustratiepunt. Het verschil in de effectieve strijklengtes en de gemiddelde dieptes evenals het verschil in de berekende waterstanden in het illustratiepunt zorgen voor enig verschil in de nieuwe berekende belastingniveaus ten opzichte van de belastingniveaus uit HR2006. Op basis van 1) de uitgevoerde berekeningen, 2) de verwachte verschillen in de effectieve strijklengtes en de gemiddelde dieptes en 3) de berekende waterstanden in het illustratiepunt (op basis van verschillen in toetspeilen) stellen wij de volgende verschillen vast:

- Vergelijkbare of lagere concept belastingniveaus voor het gebied benedenstrooms het Zwarte Water, vanaf de monding van de Vecht. Het maximale verschil is ca. - 0.2 m.
- Vergelijkbare of iets hogere concept belastingniveaus voor het gebied bovenstrooms het Zwarte Water, vanaf de monding van de Vecht, en de Overijsselse Vecht. Het maximale verschil is ca. 0.1 m.

Belastingniveaus berekend met SWAN (Zwarte Meer)

Dijkring 7

De berekende belastingniveaus vertonen een consistent beeld maar laten wel grote verschillen zien met de belastingniveaus berekend met Bretschneider. De verschillen zijn nihil tot klein in het westelijke gedeelte van het Zwarte Meer en nemen geleidelijk toe richting het oosten om een maximaal verschil te bereiken van 0.5 m. Dit verschil wordt veroorzaakt door het feit dat SWAN hogere golfcondities berekent dan Bretschneider. In SWAN worden golven die elders in het gebied ontstaan bijgebogen in de richting van de kering. Ook andere ondiep water fysica wordt in het SWAN model in beschouwing genomen. Zodoende kunnen golven uit andere richtingen de golfparameters in de uitvoerlocatie beïnvloeden. De strijklengtes in SWAN zijn zodoende groter dan die van de grootste effectieve strijklengtes in Bretschneider. Het verschil in belastingniveau voor de locaties langs dijkkring 7 is gegeven in Figuur 6.4.



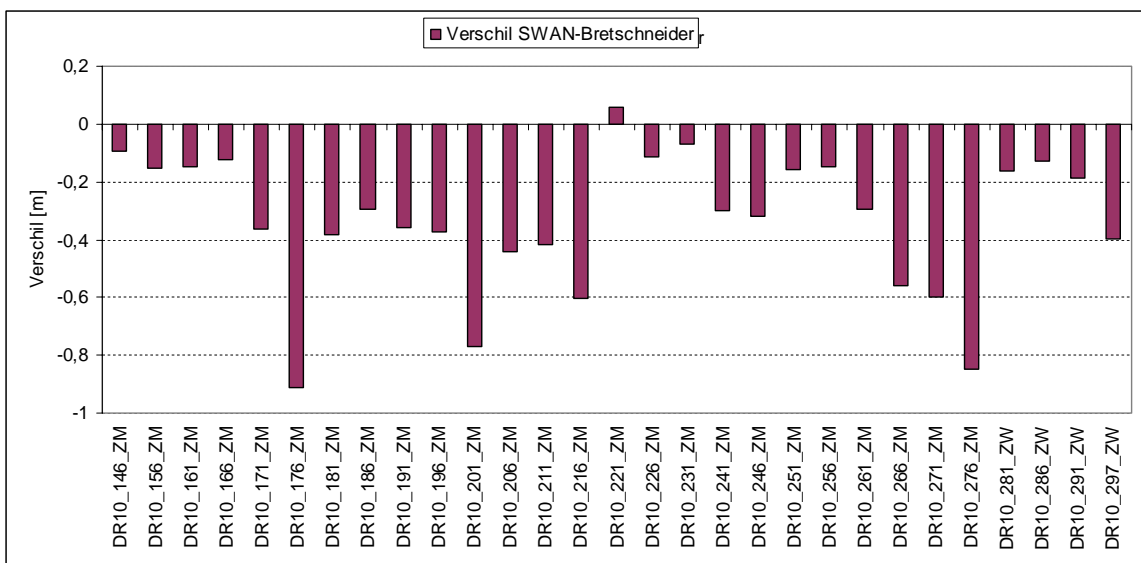
Figuur 6.4 Verschil in berekende belastingniveaus met SWAN en Bretschneider voor de locaties langs dijkkring 7 voor een overslag van 1 l/s/m en een taludhelling van 1:3.

De locatie DR7_093_ZM ligt hoog en er worden geen golven berekend met SWAN(zie voor details [Chbab, 2011]).

Dijkring 10

Voor de locaties langs de Kamperzeedijk zijn de op basis van SWAN berekende belastingniveaus overwegend lager dan die berekend zijn met Bretschneider. De variatie in de met SWAN berekende belastingniveaus is grilliger dan die berekend zijn met Bretschneider. Dit wordt veroorzaakt door de grilligheid in de bodemligging. Bretschneider houdt hier geen rekening mee. Het gemiddelde verschil bedraagt ca. -0.3 m. Het minimale en maximale verschil bedraagt -0.07 m en -0.9 m respectievelijk. De locaties met maximale verschillen liggen afgeschermd of zijn omringd door hoge gronden. Het verschil in belastingniveau voor de locaties langs dijkkring 10 is gegeven in Figuur 6.5.

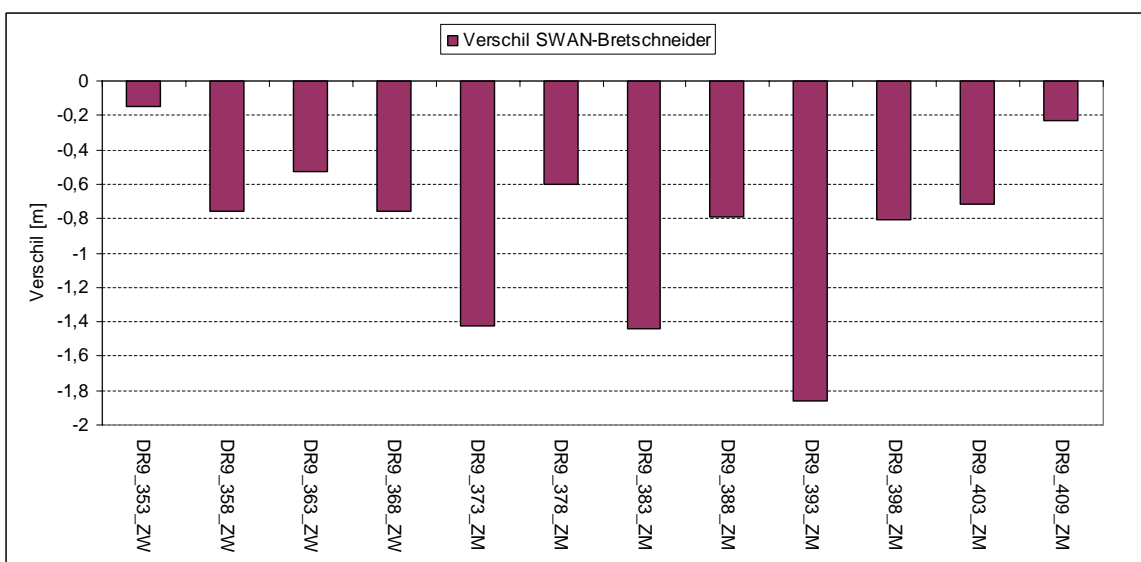
Voor details met betrekking tot de verklaring van de verschillen in belastingniveaus wordt verwezen naar Verschilanalyse concept HR2011 en HR2006 [Chbab, 2011].



Figuur 6.5 Verschil in berekende belastingniveaus met SWAN en Bretschneider voor de locaties langs dijkkring 10 voor een overslag van 1 l/s/m en een taludhelling van 1:3.

Dijkkring 9

De belastingniveaus berekend met SWAN zijn voor alle locaties overwegend lager dan die berekend zijn met Bretschneider. Het gemiddelde verschil bedraagt ca. -0.8 m. Het minimale en maximale verschil bedraagt -0,15 m en -1,85 m respectievelijk. De verschillen worden veroorzaakt door hoge gronden en het Vogeleiland dat golfdoordringing belemmert in SWAN maar niet Bretschneider. Het verschil in belastingniveaus voor de locaties langs dijkkring 9 is gegeven in Figuur 6.6.



Figuur 6.6 Verschil in berekende belastingniveaus met SWAN en Bretschneider voor de locaties langs dijkkring 9 voor een overslag van 1 l/s/m en een taludhelling van 1:3.

Tabel 6.4 vat de verschillen in de berekende belastingniveaus samen voor de dijkringdelen die grenzen aan het Zwarte Meer.

Tabel 6.4 Gemiddeld, minimaal en maximaal verschil in berekende belastingniveaus voor het Zwarte Meer

Dijkringgebied	Toenmend/ Afnemend	Norm	Gemiddeld verschil [m]	Minimaal verschil [m]	Maximaal verschil [m]
7	Toenmend	1/4.000	0.18	-0.14	0.52
9	Afnemend	1/1.250	-0.80	-0.15	-1,85
10	Afnemend	1/2.000	-0.30	-0.10	-0.90

7 Samenvatting conclusies en aanbevelingen

7.1 Samenvatting

In de Waterwet (zie [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 alsmede 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 de Vechtdelta. De Vechtdelta 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 RWS de Waterdienst. De kwaliteitsborging en inhoudelijke afstemming vonden plaats in de klankbordgroep van het Expertise Netwerk voor Waterveiligheid (ENW), waarin leden uit verschillende ENW groepen zijn vertegenwoordigd, en de watersysteemgroep voor IJsselmeer en Vecht- en IJsseldelta.

De concept HR2011 voor de Vechtdelta zijn bepaald met Hydra-Zoet en omvatten naast toetspeilen ook golfrandvoorwaarden. Voor het Zwarte Meer zijn nieuwe uitvoer- en HR locaties gedefinieerd. De productieberekeningen voor de waterstanden zijn uitgevoerd met een integrale WAQUA modelschematisatie die naast de Vechtdelta ook de IJsseldelta en het hele IJsselmeer bevat. De bodemligging in het integrale model is geactualiseerd en de schematisatie van het Kampereiland is verbeterd.

De golfrandvoorwaarden in het Zwarte Meer zijn gebaseerd op het golfvoorspellingsmodel SWAN in plaats van Bretschneider. In de rest van de Vechtdelta is Bretschneider gehandhaafd. De strijklengtes en gemiddelde waterdieptes, nodig voor Bretschneider, zijn echter geactualiseerd.

Er zijn berekeningen gemaakt met Hydra-Zoet voor het berekenen van toetspeilen en hydraulische belastingniveaus. De berekeningen ten behoeve van de belastingniveaus zijn uitgevoerd voor standaard dijkprofielen van 1 op 3 en overslagdebiet van 1 l/m/s. Hierbij zijn zowel de huidige HR2006 als de nieuwe gedefinieerde uitvoerlocaties beschouwd.

7.2 Conclusies

De volgende conclusies worden getrokken:

- De productieberekeningen met het integrale WAQUA model ten behoeve van de maximale waterstanden bevat over het geheel genomen resultaten met voldoende consistentie en nauwkeurigheid. De combinatie van de resultaten van enerzijds visuele controles en anderzijds geautomatiseerde controles heeft geleid tot ruim vertrouwen in de kwaliteit van de productieberekeningen,
- Voor het Zwarte Meer is een SWAN model opgezet en gebruikt. De uitgevoerde fysische en numerieke controles hebben 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 worden gegeneerd met zowel WAQUA als SWAN is ruim voldoende voor het definiëren van HR locaties,

- Hydra-Zoet kan als opvolger van Hydra-VIJ succesvol worden toegepast voor zowel het bepalen van de toetspeilen als de hydraulische belastingniveaus,
- De berekende concept toetspeilen laten een consistent en logisch beeld zien, op zowel de oude HR2006 als de nieuwe HR2011 locaties,
- De berekeningen met Hydra-Zoet hebben geresulteerd in zowel hogere als lagere toetspeilen dan de huidige HR2006,
 - De verlaging van de toetspeilen treedt op in het Zwarte Meer en het benedenstroomse deel van het Zwarte Meer, en bedraagt maximaal -0,12 m,
 - De verhoging treedt op het bovenstroomse deel van het Zwarte Water en de Overijsselse Vecht, en bedraagt maximaal 0.15 m,
 - De verschillen in toetspeilen bij de verplaatsing van de uitvoerlocaties richting de teen van de dijk zijn marginaal klein en bedragen slechts enkele centimeters,
 - De berekende toetspeilen hangen nauwelijks af van de normfrequentie,
 - De verschillen in toetspeilen zijn goed verklaarbaar.
- Het SWAN model voor het Zwarte Meer heeft, met uitzondering van het noordoostelijke deel langs de Noordoostpolder, geresulteerd in lagere golfrandvoorwaarden en bijgevolg hydraulische belastingniveaus,
 - De hogere golfrandvoorwaarden in het noordoostelijke deel van het Zwarte Meer langs de Noordoostpolder worden veroorzaakt door de tweedimensionale effecten en strijklengtes in SWAN. Deze hogere golfrandvoorwaarden leiden tot hogere belastingniveaus, de maximale verhoging bedraagt ca. 0.5 m,
 - Elders in het Zwarte Meer worden lagere golfrandvoorwaarden berekend omdat SWAN rekening houdt met variaties in en ligging van de bodem. Bretschneider doet dat niet. De lagere golfrandvoorwaarden leiden tot lagere hydraulische belastingniveaus; de gemiddelde verlaging bedraagt ca. 0.8 m, maar kan oplopen tot bijna 2 m.

7.3 Aanbevelingen

De volgende aanbevelingen worden gedaan:

Het integrale WAQUA model voor het IJsselmeer, de Vecht- en de IJsseldelta is gevalideerd. Voor de waterstanden op het IJsselmeer is geen kalibratie uitgevoerd, ook de schematisatie van de wind is niet gekalibreerd. Verder zijn er na oplevering aan WTI enkele aanpassingen doorgevoerd in de schematisatie. Aanbevolen wordt om de kalibratie en validatie van het IJVD model opnieuw tegen het licht te houden. In het IJVD model zitten nog steeds enkele kleine onvolkomenheden zoals dummy waarden en e.d. Aanbevolen wordt om voor de volgende toepassing van het model deze tekortkomingen op lossen.

In het Zwarte Meer zijn geen golfmetingen beschikbaar. Het SWAN model dat gebruikt is voor de bepaling van de golfrandvoorwaarden in het Zwarte Meer is gebaseerd op de instellingen uit de kalibratie van het Waddenzeemodel en de validatie in het IJsselmeer. Het verdient aanbeveling om golfmetingen te starten in het Zwarte Meer en het SWAN golfmodel hierop te ijken.

In het kader van WTI-2011 zijn niet voor alle aan de Vechtdelta grenzende watersystemen de nieuwe en verbeterde inzichten verwerkt in de hydraulische randvoorwaarden. Hierdoor ontstaat hier enige inconsistentie in de wijze waarop delen van bepaalde dijkeringen worden getoetst. Vanuit veiligheidsoogpunt is deze inconsistentie onwenselijk. Aanbevolen wordt om de mogelijke effecten hiervan in beeld te brengen en indien nodig hier rekening mee te houden bij de toepassing van de concept HR2011.

8 Referenties

- Alkyon, (2006), Operationalisatie WAQUA voor IJsselmeer en Vecht- en IJsseldelta, A1591, 2006.
- Alkyon, (2008), Update WAQUA model Vecht- en IJsseldelta, A1986, mei 2008.
- Alkyon, (2010), Interpolatie bodemhoogtes en strijkraaien Vecht- en IJsseldelta, Memo 79 van Alkyon, maart 2011.
- Bak, C.I. en D.P. Vlag, (1999), Achtergronden hydraulische belastingen dijken IJsselmeergebied, deelrapport 5, Modellerings waterbeweging WAQUA, RIZA rapport 99.042, 1999.
- Beijk V.A.W. en C.P.M. Geerse, (2004), Bivariate correlatiemodellen op exponentiële marginale verdelingen, Beschrijving en werking MATLAB programmatuur RWS-RIZA werkdocument 2004.109x.2004.
- Beijk, V.A.W., (2007), Achtergrondrapport HR2006 voor de Vecht- en IJsseldelta, Hydraulische randvoorwaarden 2006 voor de Vechtdelta en thermometerrandvoorwaarden 2006 voor de IJsseldelta, RWS-RIZA rapport 2007.024, november 2008.
- Chbab, H. (2011), Verschilanalyse concept HR2011 en HR2006 voor de Vechtdelta, Deltares rapport 1204143-003, november 2011.
- Deltares (2009), The Evolution of Storms on the Wadden Sea, SBW-Belastingen, 1200264-004-HYE-0012, 2009.
- Deltares, (2010), WAQUA model IJsselmeer, IJsseldelta en Vecht, opbouw, kalibratie en verificatie, Deltares rapport 1202108-000, 2010.
- Deltares, (2011), Memo uitvoerlocaties voor de zoete wateren, 4 januari 2011.
- De Waal, J.P., (2003), Windmodellering voor bepaling waterstanden en golven, Een analyse van de bouwstenen, RIZA werkdocument 2003 118x, 2003.
- De Waal J.P. (2008), Windgolven in HR2011 voor rivieren: voorstudie naar noodzaak modelverbetering, Deltaresrapport Q4571.21, december 2008.
- De Waal, J.P. (2010), WTI2011 Wind input to be used in HBC assessment, Deltares report 1200103-027-HYE, februari 2010.
- Gautier, C. (2010), SWAN calibration and validation for HBC 2011, Deltares report 1200103-020, May 2010.
- Geerse, C.P.M. (2003a), Probabilistisch model hydraulische randvoorwaarden Benedenrivierengebied, RWS-RIZA werkdocument 2003.128x, 2003.

- Geerse, C.P.M. (2003b), Probabilistisch model hydraulische randvoorwaarden IJssel- en Vechtdelta, RWS-RIZA werkdocument, 2003.129x, 2003.
- Geerse, C.P.M, (2004), , Probabilistische versus deterministische stormduur Vecht- en IJsseldelta, RWS-RIZA werkdocument 2004.206x, december 2004.
- Geerse, C.P.M, (2006), Hydraulische Randvoorwaarden 2006 Vecht- en IJsseldelta, Statistiek IJsselmeerpeil, afvoeren en stormverlopen voor Hydra-VIJ, RWS-RIZA werkdocument 2006.036x, 2006.
- Geerse, C.P.M., (2008), Overzichtsdocument probabilistische modellen zoete wateren, Hydra-VIJ, Hydra-B en Hydra-Zoet, HKV lijn in water, PR1391.10, december 2008.
- Hartsuiker, (2010), Aanpassingen aan rekenroosters riviermodellen, Arcadis memo van 5 maart 2010.
- HKV, (2005), WAQUA model Vecht- en IJsseldelta, PR830, Maart 2005.
- HKV, (2011a), Gebruikershandleiding Hydra-Zoet v 1.3. HKV Lijn in water, PR1564, september 2011.
- HKV, (2011b), Hydra zoet databases WTI2011, Vechtdelta, PR1878, oktober 2011.
- HKV, (2011c), WAQUA productieberekeningen IJsselmeer, Vecht- en IJsseldelta voor WTI-2011, Rapportage fase 1, 2011.
- HKV, (2011d)) WAQUA productieberekeningen IJsselmeer, Vecht- en IJsseldelta voor WTI-2011, Rapportage fase 2, 2011.
- Janssen, M. en M. Van Ledden, (2005), WAQUA en Hydra-VIJ voor de IJssel en de Vechtdelta, rapportage fase 1, juli 2005.
- Klein, M., A. Kroon en B. van Leeuwen (2010), SWAN model van het IJsselmeer, Svašek rapport 1575/U010184/mkl, 26 juli 2010.
- Klein, M.D. (2011), SWAN productieberekeningen IJsselmeer en Zwarte Meer voor WTI2011: rapportage fase 1, Rapport RP_01_4, HKV Lijn in water en Svašek Hydraulics, maart 2011.
- Klein, M.D. en J. Kroon (2011), SWAN productieberekeningen IJsselmeer en Zwarte Meer voor WTI2011, rapportage fase 2, Rapport RP_02_4, HKV Lijn in water en Svašek Hydraulics, april 2011.
- Kors A.G., J.H. van Zwol, A. Franken en anderen., (1994), Projectnota/MER Keersluis Ramspol, hydraulische randvoorwaarden, Deelrapport van de werkgroep Hydraulica, RWS-RIZA/DWW/Bouwdienst PRM-R-94101, 22 november 1994.
- RWS-RIZA, (1999), Achtergronden hydraulische belastingen dijken IJsselmeergebied, deelrapport 9, Modellerings dammen, voorlanden en golfploop, RIZA rapport 99.046, 1999.

RWS, 2009: Nieuwe shape dijkringlijn, versie 3-2. RWS DID. 2009.

Slomp R.M., Q. Lodder, 2004, E.J. Claessens, J.P. de Waal en H.E.J. Berger. (2004), Bundeling memo's Hydraulische Randvoorwaarden (HR2001) voor het Benedenrivierengebied 2001, RIZA-werkdocument 2004.150x, 2004.

TAW, 1985, Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken, deel 1 – bovenrivierengebied, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, september 1985.

TU Delft (2010), SWAN manual 40.72, zie swan.tudelft.nl.

Van der Klis (2010), H., J. Groeneweg, H. Chbab en G. Hoffmans. Ketenbeschrijvingen HR-2011, Deltares rapport 1200103.000, april 2010.

Waterwet (2009), <http://wetten.overheid.nl>.

website waterschap Groot Salland: <http://www.wgs.nl>.

Wieringa, J en P.J. Rijkooft (1983), Windklimaat van Nederland, KNMI.

A Overzicht aanpassingen en versies WAQUA-IJVD model WTI-2011

Overzicht aanpassingen en versies WAQUA-IJVD model WTI -2011

Versie 1

17 maart 2010: uitgeleverd is een "Non calibrated preliminary version for the IJsselmeer IJsseldelta and Vechtdelta" (simona-ymijved-98.zip) puur om doorlooptijden te testen.

Versie 2

10 mei 2010: uitgeleverd is WAQUA-VIJD 10052010. Het bijgeleverde stuk van Deltares stelde: "De berekening met constante onttrekkingen (benedenstroomse debietrand) en wind wordt na 20 dagen nog niet stationair", m.a.w. de uitgeleverde modelversie is nog niet geschikt voor WTI. Hiermee is getest.

Op 26 mei 2010 is voor deze versie de randvoorwaarden op de afsluitdijk gewijzigd in debietrandvoorwaarden. Hiermee zijn vier simulaties uitgevoerd en als concept verzonden op 27 mei 2010 voor de bespreking met de Waterdienst.

Bij nadere bestudering van de resultaten bleek dat de Ramspolkering er niet goed in was verwerkt:

1. De noordelijke barrier lag op zijn plaats, de zuidelijke barrier was echter gelegd op de plaat van de zuidoostelijke brug.
2. De aansluitingen naar het land waren niet goed. Er waren openingen, zeker in het noorden en misschien in het zuiden. Bovendien was het gebied tussen de noordelijke barrier en de twee zuidelijke barriers (op de plaats waar deze horen te liggen: in het westen) niet juist: de verbindingsdam was niet aanwezig.

De conclusie was dat het model duidelijk nog niet klaar was voor productieberekeningen. Dit is gerapporteerd aan Deltares.

Versie 3

10 juni 2010: versie IJVD 10062010 met verbeterde Ramspolkering. Er zijn geen sommen mee gemaakt omdat het model nog verder gewijzigd zou worden.

Versie 4

8 september 2010: oplevering ijvd_09_wti-model (met waterstandrandvoorwaarden). Er zijn testsommen uitgevoerd met de aangeleverde waterstandsrandvoorwaarden ter bepaling van de te gebruiken versie van SIMONA.

15 september 2010: er werd een belangrijke fout in de bodem bij de Ketelbrug aan Deltares gemeld.

22 september 2010: Startoverleg IJsselmeer-IJVDelta. Naar aanleiding hiervan zijn de volgende werkzaamheden uitgevoerd:

1. Het aanpassen van het model voor benedenstroomse debietrandvoorwaarden.
2. Het herstellen van een fout bij de Ketelbrug in een nieuwe bodemschematisatie.
3. Het controleren van de kruinhoogte van de overstroombare dijk ten zuiden van de Ramspolkering en het controleren van de sturing van de stuwen bij Vilsteren en Vechterweerd. Op 26 oktober 2010 is een memo over de controle van de kruinhoogte ten zuiden van de Ramspolkering opgeleverd (ME_06_4_controle_overlatenzuidramspolkering_4).
4. Het vergelijken van WAQUA-berekeningen met versies 2009 (patchlevel 15) en met de huidige vigerende versie 2010 (patchlevel 12) en het vergelijken met de Deltares berekeningen.
5. Het converteren van de x,y-coördinaten van de uitvoerlocaties naar m,n-coördinaten op het rekenrooster van WAQUA. (ME_05_4_Vertaling uitvoerlocaties naar mn

coördinaten.doc, 20 oktober 2010). Bij de conversie van (x,y) naar (m,n) kwam naar voren dat de WAQUA enclosure de Zuiderzeehaven nabij Kampen van het actieve WAQUA model uitsluit terwijl de dijkkringlijn 'achter' de haven langs loopt. Op 12 november 2010 is de enclosure aangepast door HKV/Svašek.

Op 19 oktober 2010 is de verificatie WAQUA met versies 2009 en 2010: "ME_03_4_Verificatie WAQUA IJsselmeer Vecht- IJsseldeltamodel.doc" opgeleverd.

Versie 5

22 oktober 2010: Uitlevering versie ijvd_09_wti_Q-model. Dit was de definitieve versie met debietranden waarmee de WTI-IJsselmeer berekeningen gestart zouden moeten worden. Hierbij werd een memo geleverd ("Test ijvd_09_wti_Q-model.doc, 21 oktober 2010, Deltares"), waarin een berekening met dit model werd gepresenteerd. Door Deltares is verzocht de berekening met dit model te onderzoeken omdat namelijk bleek dat "er geen stationaire oplossing wordt bereikt binnen een simulatietijd van 10 dagen en het lijkt er ook niet op dat de waterstand zich binnen korte tijd gaat stabiliseren". Uit onderzoek is gebleken dat er fouten waren gemaakt. Na herstel van deze fouten bleek dat er wel een stabiele stationaire oplossing met debietrandvoorwaarden werd bereikt, zie "ME_08_4_Testen_Debietrvw-IJVD_v2.doc", 2 november 2010.

Op 3 november 2010 zijn de definitieve randvoorwaarden voor de productie IJsselmeer en IJVDelta door Deltares ter beschikking gesteld. Tijdens het onderzoeken van de stabiliteit viel op dat op het IJsselmeer de waterstanden niet gelijk waren aan de beoogde waterstand. Dit is onderzocht (vraag Deltares dd 5 november 2010: over het tijdsverschil tussen de twee Q-randen) en een methode is hiervoor uitgewerkt om het juiste peil in het IJsselmeer te bereiken: Eerst een inspeelsom met Q-h randvoorwaarden om hiermee een waterstandveld met een juist meerpeil te genereren, en vervolgens de operationele berekeningen met Q-Q randvoorwaarden hierop doorstarten. Dit is in memo "ME_09_4_Sturing meerpeil bij debietrandvoorwaarden IJVD model_C.doc", 22 november 2010 behandeld.

Tevens is er een vraag gesteld over het effect van laterale instroming (vraag Deltares dd 5 november 2010). Daarover is afgesproken dat deze niet relevant zijn voor de IJsselmeerberekeningen, wel voor de berekeningen voor de Vecht- en IJsseldelta.

Bij het analyseren van de resultaten van de productieberekeningen IJsselmeer (de complete set ca. 700 berekeningen zijn dan uitgevoerd) viel het op dat er minder debiet door de Ramspolkering ging dan we verwachtten. De oorzaak bleek een te kleine breedte van de openingen van de Ramspolkering te zijn. Dit is aan Deltares gemeld op 26 november 2010 in "ME_11_4_Schematisatie_Ramspolkering_WAQUA_A.doc".

Op 30 november 2010 wordt door Deltares besloten dat HKV/ Svašek de stuurfile voor de barrier aanpast. Heel specifiek gaat het om de correctiefactoren zoals beschreven in de memo 11 voor perceel 4, d.d. 26 november 2010. De betreffende factoren worden op 1 gezet. Vervolgens worden 2 testberekeningen gemaakt om te controleren of het probleem daadwerkelijk opgelost is en dat conform verwachting voldoende debiet door de Ramspolkering gaat.

Uit de testberekeningen volgde echter dat na het aanpassen van de barrier er nog steeds een instabiliteit in het model aanwezig is. De instabiliteit staat omschreven in de memo "ME_12_4_Aanpassing_Schematisatie_Ramspolkering_WAQUA.doc" van 1 december 2010. Op 13 december 2010 werd door Deltares geconstateerd dat "Het blijkt dat de dam ten westen van Ramspol in WAQUA nagenoeg ontbreekt. Hij is niet als overlaat in de schematisatie meegekomen".

Versie 6

17 december 2010: Uitlevering versie ijvd_09_wti_Q-model_uitlevering101217 met de aanpassing van de bodem bij de Ramspolkering. Eerst is hier een testberekening mee uitgevoerd (verslag in memo ME_14_4_testberekening_schematisatie_17december_WAQUA, 20 december 2010). Deze

is goedgekeurd en vervolgens zijn de productiesommen voor het IJsselmeer opnieuw opgestart.

Voor de berekeningen voor de Vecht- en IJsseldelta met een afvoergolf op de IJssel bleek het IJsselmeerpeil significant te stijgen, omdat op de benedenrand een constante hoeveelheid water werd onttrokken. In de randvoorwaarde op de benedenrand is daarom ook een afvoergolf gespecificeerd, waarbij een faseverschuiving is opgelegd ten opzichte van de afvoergolf op de IJssel. Dit om rekening te houden met de looptijd van de golf. Het IJsselmeerpeil werd hiermee voldoende stabiel. Deze modelaanpassing is beschreven in ME_22_4_Bepalen faseverschuiving debietranden VIJD_A en ME_25_4_Faseverschuiving debietranden_C.

B Benedenrand bij Afsluitdijk

Memorandum 25 voor perceel 4

Project : Productiefase WT12011 (PR1878.10)
Datum : 6 juni 2011
Onderwerp : Faseverschuiving debietranden WAQUA-model Vecht-IJsseldelta
Van : HKV LIJN IN WATER en Svašek Hydraulics
Aan : Deltares

1 Inleiding

Na het uitvoeren van de productieberekeningen voor de Vecht- en IJsseldelta bleek dat het IJsselmeerpeil niet constant was gedurende de berekeningen met een afvoergolf.

De randvoorwaarden waren tot nu toe:

- Op de bovenrand van de IJssel wordt een afvoergolf opgelegd, startend bij 2300 m³/s en oplopend naar een maximale waarde op de top van respectievelijk 2750, 2975 en 3200 m³/s.
- Op de Vecht wordt een constante afvoer opgelegd van respectievelijk 850, 925 en 1000 m³/s.
- De uitstroom op het IJsselmeer was constant genomen en gelijk aan 2300 m³/s voor de IJssel plus de afvoer van de Vecht en de lateralen.

Hierdoor komt er meer water het IJsselmeer binnen dan er uit stroomt, met een toenemend IJsselmeerpeil als gevolg. De grootte van dit effect was van tevoren niet voorzien.

In memorandum 22 voor perceel 4 van 12 mei 2011 is een methodiek voorgesteld om ook op de benedenrand (bij de Afsluitdijk) een variabel debiet op te leggen. Dit debiet is gelijk aan de som van de debieten op de bovenrand (lateralen, Vecht en IJssel), waarbij een faseverschuiving wordt opgelegd ten opzichte van de afvoergolf op de bovenrand van de IJssel in het model. Deltares is akkoord gegaan met deze methodiek.

Het voorliggende memo gaat in op het bepalen van een zodanige faseverschuiving, dat de instroom in het IJsselmeer nagenoeg gelijk is aan de uitstroom. Deze aanpak zal moeten resulteren in een zo stabiel mogelijk meerpeil.

2 Methodiek en resultaten

Het IJsselmeerpeil wordt berekend op basis van een gewogen gemiddelde tussen 4 standaard meetstations: Den Oever, Kornwerderzand, Houtrib-noord en Lemmer:

Den Oever: p 38= (m= 233, n= 3105, name='OEBI_Den_Oever_binne')

Kornwerderzand: p 35= (m= 311, n= 3108, name='KOBI_Kornwerderz_bin')

Houtrib-noord: p 34= (m= 203, n= 2900, name='HOUN_Houtrib_noord')

Lemmer: p 48= (m= 314, n= 2987, name='Lemmer_Woudagemaal')

De weegfactoren ter bepaling van het gewogen gemiddelde bedragen:

Den Oever: 0,215

Kornwerderzand: 0,304

Houtrib-noord: 0,353

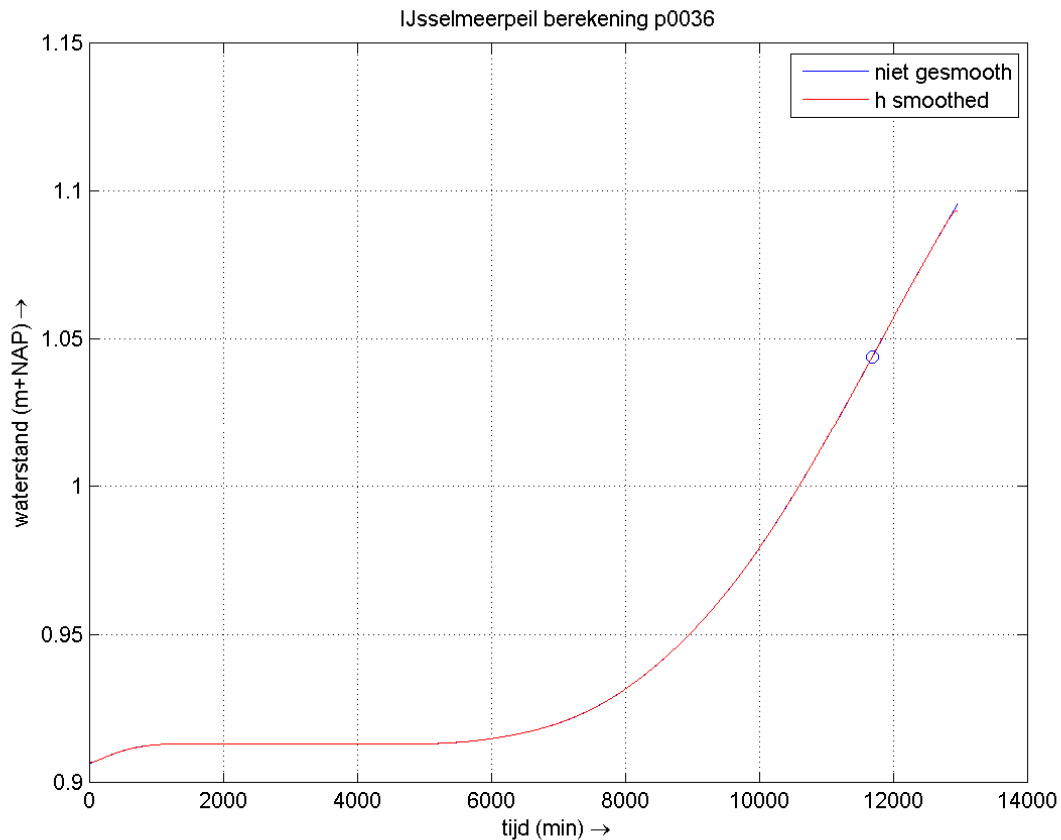
Lemmer: 0,128

Deze methodiek voor de berekening van een representatief IJsselmeerpeil is afkomstig uit Blaakman et al. (1999), "Achtergronden Hydraulische Belastingen IJsselmeergebied", RIZA rapport 99.039. Door de tijdsafgeleide van het IJsselmeerpeil te vermenigvuldigen met het bergende oppervlak van het IJsselmeer (ongeveer 1200 km²) wordt het netto in- of uitstromende debiet verkregen. Door het moment met maximaal debiet te vergelijken voor het IJsselmeer en de modelrand van de IJssel kan de faseverschuiving worden bepaald. Voor meer details over deze methodiek wordt verwezen naar memorandum 22 voor perceel 4 van 12 mei 2011. Voor de in tabel 1 opgesomde simulaties met afvoergolf is de faseverschuiving bepaald.

Berekening	Q_max_ijssel [m ³ /s]	Q_vecht [m ³ /s]	h_ijsselmeer [m+NAP]	windsnelheid [m/s]	faseverschuiving top [min]
7	2750	850	-0,4	0	845
8	2975	925	-0,4	0	845
9	3200	1000	-0,4	0	835
16	2750	850	-0,1	0	740
17	2975	925	-0,1	0	805
18	3200	1000	-0,1	0	960
25	2750	850	0,4	0	840
26	2975	925	0,4	0	710
27	3200	1000	0,4	0	665
34	2750	850	0,9	0	840
35	2975	925	0,9	0	1185
36	3200	1000	0,9	0	705
43	2750	850	1,3	0	710
44	2975	925	1,3	0	750
45	3200	1000	1,3	0	840

Tabel 1 – Randvoorwaarden en faseverschuivingen van de top voor diverse berekeningen

Figuur 1 toont het IJsselmeerpeil voor berekening 36, met een maximale afvoer op de IJssel van $3200 \text{ m}^3/\text{s}$, een constante afvoer op de Vecht van $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ en een initieel meerpeil van $0,9 \text{ m} + \text{NAP}$. Wind speelt in geen van de berekeningen een rol. De Ramspolkering is dan ook in alle gevallen open.



Figuur 1 – IJsselmeerpeil berekening 36: afvoer IJssel maximaal $3200 \text{ m}^3/\text{s}$, afvoer Vecht $1000 \text{ m}^3/\text{s}$, IJsselmeerpeil initieel $0,9 \text{ m} + \text{NAP}$. De marker geeft het punt met de maximale stijgsnelheid van het meerpeil weer.

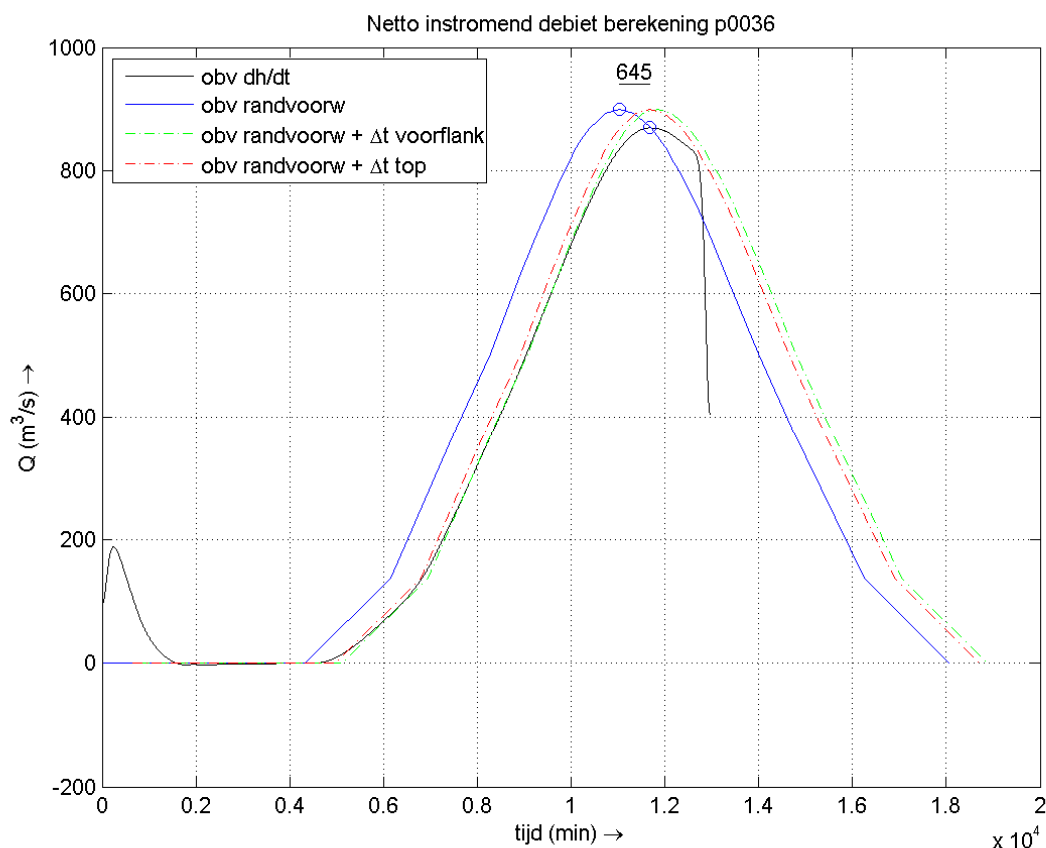
Opmerking: in Figuur 1 is de daling van het meerpeil in het eerste deel van de som, zoals deze in de voorgaande versie van het memo zichtbaar was, verdwenen. Dit was niet alleen in deze berekening 36 het geval, maar bij alle berekeningen met afvoergolf. De oorzaak was dat de initiële velden voor de berekeningen met afvoergolf bij deze sommen nog behoorden bij de combinatie van een IJsselaflow van $2300 \text{ m}^3/\text{s}$ en een Vechtaflow van $700 \text{ m}^3/\text{s}$, terwijl de Vechtaflow bij berekening 36 gelijk is aan $1000 \text{ m}^3/\text{s}$. In de beginfase van de berekening kwam er dus nog $700 \text{ m}^3/\text{s}$ van de Vecht af, en werd al wel de bij $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ behorende afvoer op de benedenrand onttrokken. Dit resulteerde in deze daling. Met de nieuwe initiële velden is dit probleem verholpen.

Figuur 2 toont:

- Het netto het model instromende debiet op de bovenrand van het model in blauw. Dit netto debiet is gelijk aan de som van de IJsselaflow (met afvoergolf), de Vechtaflow en de lateralen, minus het constante debiet op de benedenrand bij de sluisen in de Afsluitdijk.
- Het netto het IJsselmeer binnenstromende debiet in rood, berekend op basis van de verandering van het IJsselmeerpeil in de tijd.
- Het netto het model instromende debiet op de bovenrand van het model met een op twee manieren (zie onder) berekende faseverschuiving.

Het verschil in hoogte van de top tussen de opgelegde en berekende afvoergolf is voornamelijk het gevolg van vervorming van de afvoergolf tijdens het stroomafwaarts bewegen van de golf: topvervlakking. Er wordt wel opgemerkt dat het bergende oppervlak van het IJsselmeer niet erg nauwkeurig en onafhankelijk van het meerpeil is gekozen. Bovendien is er meerdere malen een gewogen gemiddelde toegepast op de tijdsafgeleide van de waterstand, om het berekende debiet een continu verloop te geven.

Voor de getoonde berekening 36 bedraagt de faseverschuiving 645 minuten, ofwel 10,8 uur. Uit eerder door Deltares uitgevoerde testberekeningen bij deze randvoorwaardencombinatie bleek dat een faseverschuiving van 12 uur te klein was: er trad een daling van het IJsselmeerpeil op. Blijkbaar is de berekende faseverschuiving van de top te klein. Als we 10,8 uur als faseverschuiving zouden hanteren, zal het IJsselmeerpeil zeker net als bij de som van Deltares gaan dalen. De methode levert dus op deze manier niet het gewenste resultaat. Om deze reden is een tweede methode voor de bepaling van de faseverschuiving toegepast: het gemiddelde faseverschil tussen beide voorflanken van de golven. Dit gemiddelde is bepaald op basis van een reeks van waarden voor het netto debiet, waarvoor het tijdsverschil tussen beide afvoergolven is berekend.



Figuur 2 – Netto instromend debiet op de bovenrand van het model (blauw) en netto instromend debiet in het IJsselmeer, berekend op basis van de verandering van het IJsselmeerpeil in de tijd (zwart) voor berekening 36. Daarnaast het netto instromend debiet op de bovenrand van het model met de twee berekende faseverschuivingen.

In Figuur 2 wordt voor berekening 36 de afvoergolf op de bovenrand onderworpen aan beide faseverschuivingen. In rood wordt de afvoergolf getoond, waarbij de faseverschuiving gebaseerd

is op het faseverschil tussen beide toppen. De groene, gestreepte lijn toont de afvoergolf, waarbij de faseverschuiving gebaseerd is op het faseverschil tussen beide voorflanken. De tweede methode komt beter overeen met het debiet dat is berekend op basis van de verandering van het IJsselmeerpeil in de tijd.

Opmerking: het verloop van de achterflank is niet direct van belang, omdat de productieberekeningen niet zover doorlopen. De productieberekeningen met afvoergolf beslaan het interval tussen TSTART = 4320 en TSTOP = 12960 min.

Tabel 2 geeft een vergelijking tussen beide faseverschuivingen. Voor een groot deel van de berekeningen leveren beide methoden een waarde in dezelfde orde van grootte. Er zijn echter ook verschillende berekeningen, waar beide methoden een aanzienlijk verschil opleveren. Een voorbeeld is de in dit memo getoonde berekening 36. De standaardafwijking voor de faseverschuiving van de top is groter dan die voor de voorflank. De faseverschuiving van de voorflank is blijkbaar een wat robuustere indicator. Dit komt doordat er gebruik wordt gemaakt van een gemiddelde verschuiving, en niet van de verschuiving van één punt: de top.

Berekening	Q_max_ijssel [m ³ /s]	Q_vecht [m ³ /s]	h_ijsselmeer [m+NAP]	windsnelheid [m/s]	Faseverschuiving top [min]	Faseverschuiving voorflank [min]
7	2750	850	-0.4	0	820	791
8	2975	925	-0.4	0	835	733
9	3200	1000	-0.4	0	840	714
16	2750	850	-0.1	0	880	784
17	2975	925	-0.1	0	820	747
18	3200	1000	-0.1	0	830	724
25	2750	850	0.4	0	845	802
26	2975	925	0.4	0	765	769
27	3200	1000	0.4	0	1190	785
34	2750	850	0.9	0	755	886
35	2975	925	0.9	0	755	901
36	3200	1000	0.9	0	645	799
43	2750	850	1.3	0	750	846
44	2975	925	1.3	0	765	837
45	3200	1000	1.3	0	735	801
Gemiddelde					815	795
Standaardafwijking					119	55

Tabel 2 – Faseverschuivingen tussen de bovenrand en het IJsselmeer, berekend op basis van het faseverschil tussen beide toppen en tussen beide voorflanken.

De faseverschuiving van de voorflank van de afvoergolf wordt om beschreven redenen gebruikt in enkele testberekeningen. Met deze testberekeningen wordt onderzocht of deze faseverschuivingen tussen boven- en benedenrand leiden tot een voldoende stabiel meerpeil. Voldoende stabiel wordt volgens Deltares gedefinieerd als een maximale variatie van het meerpeil

in de orde van enkele (maximaal 5) centimeters (mailwisseling met Houcine Chbab, Deltares, 13 mei 2011).

De berekende faseverschuivingen (van de voorflank) variëren behoorlijk sterk over de verschillende randvoorwaardencombinaties: minimaal 714 min en maximaal 901 min. In Figuur 3 wordt de correlatie getoond van de faseverschuivingen met respectievelijk het IJsselmeerpeil en de IJsselafvoer. Er lijkt een positieve correlatie te bestaan tussen de faseverschuiving van de voorflank en het IJsselmeerpeil. Fysisch gezien is deze positieve correlatie niet aannemelijk. Een zwakke negatieve correlatie is eerder te verwachten: de voortplantingssnelheid van een afvoergolf neemt toe bij toenemende diepte, waardoor het faseverschil af zou moeten nemen bij een toenemend meerpeil. De door lineaire regressie gesuggereerde correlatie wordt vooral veroorzaakt door de hoge waarden van de faseverschuiving bij een meerpeil van 0,90 m + NAP. Een mogelijke verklaring hiervoor is het onderlopen van delen van het Kampereiland bij dit meerpeil en bij het passeren van de hoogwatergolf door de IJssel. Dit kan de voorflank van de hoogwatergolf vertragen.

Ook de correlatie tussen de faseverschuiving van de voorflank en de maximale IJsselafvoer is erg zwak. Deze lijkt vooral te worden beïnvloed door de uitschieters omhoog bij 2975 en 3200 m³/s, die bij 2750 m³/s niet aanwezig zijn.

De vraag is nu: gebruiken we de gemiddelde waarde voor de faseverschuiving, of gebruiken we een variabele waarde per combinatie van rivierafvoer en meerpeil?

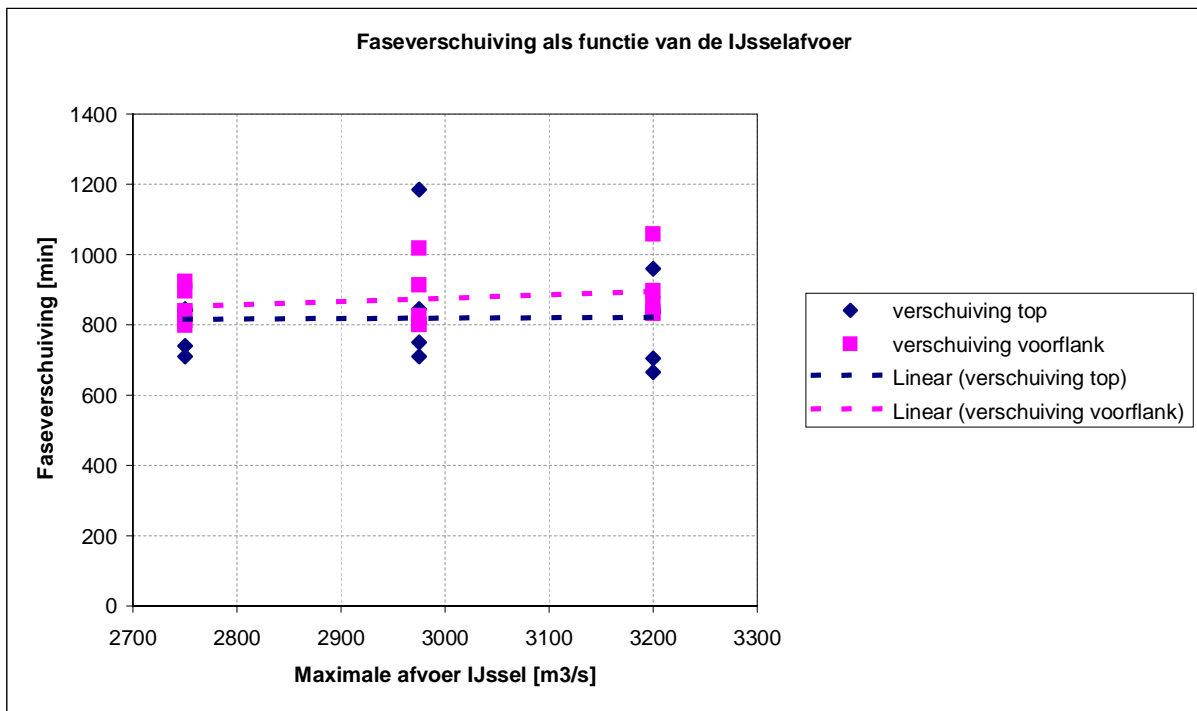
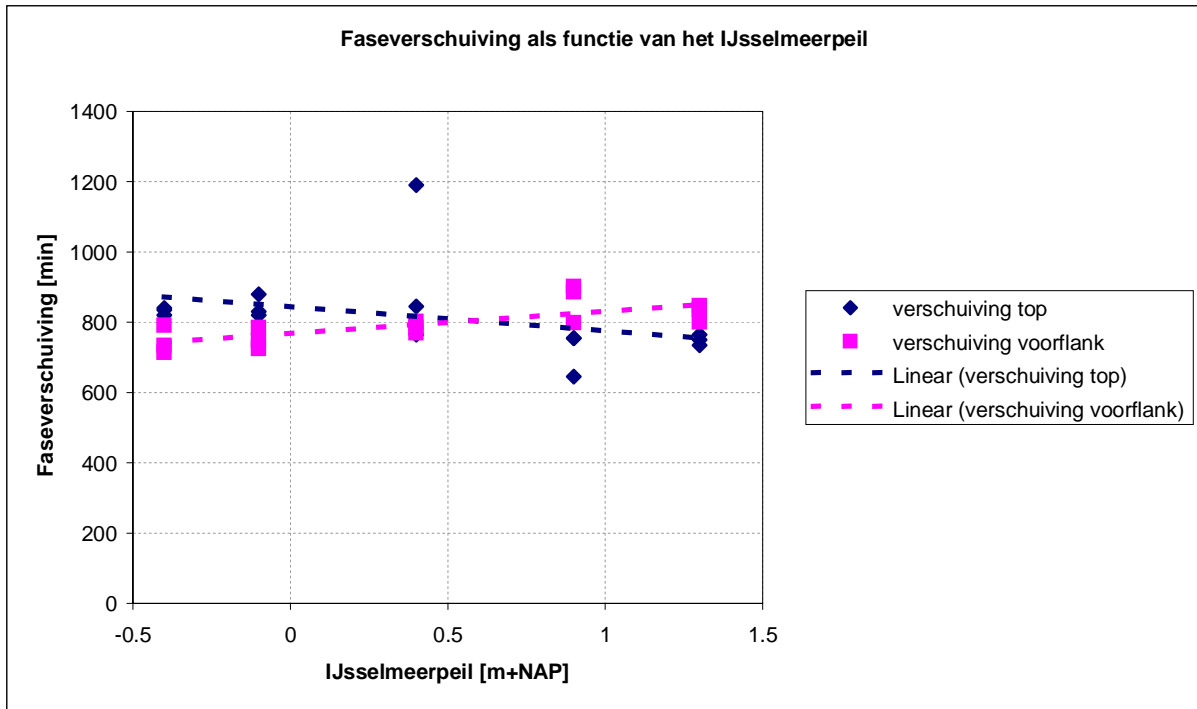
Argumenten voor de gemiddelde waarde voor de faseverschuiving:

- Eenvoudig, en daardoor weinig werk.
- Aannemelijk vanwege het ontbreken van een duidelijke correlatie tussen de randvoorwaarden en de faseverschuiving.
- Wanneer de invloed van wind wordt toegevoegd aan de berekeningen, zijn mogelijk opnieuw andere faseverschuivingen van kracht, waardoor een variabele waarde van de faseverschuiving geen meerwaarde biedt.

Argumenten voor een variabele waarde van de faseverschuiving, afhankelijk van de combinatie van rivierafvoer en meerpeil:

- De variatie in de berekende faseverschuivingen is zodanig groot, dat een gemiddelde waarde mogelijk nog steeds teveel afwijking in het meerpeil oplevert in de extreme gevallen als berekening 35.
- Minder arbitraire verschijnselen, zoals het onderlopen van grotere polders zoals aanwezig rond het Kampereiland, kunnen de faseverschuiving bij een bepaald meerpeil of een bepaalde rivierafvoer beïnvloeden.

Om beide concepten te testen, worden testberekeningen uitgevoerd met een variabele waarde voor de faseverschuiving in berekening 7 en 36, en met een gemiddelde waarde voor de faseverschuiving voor berekening 35. Bij berekening 35 is het verschil tussen de variabele en gemiddelde waarde namelijk het grootst.



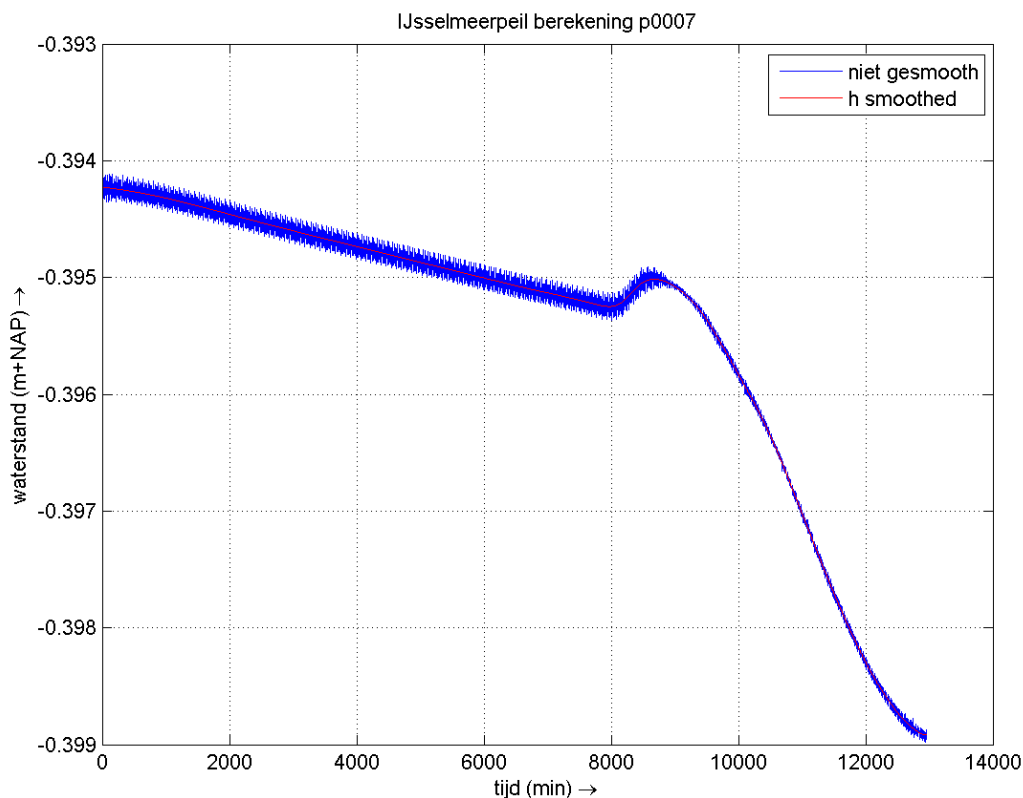
Figuur 3 – Correlatie van de faseverschuivingen van de voorflank en de top met het IJsselmeerpeil (boven) en de maximale IJsselafoer (onder)

3 Testberekeningen

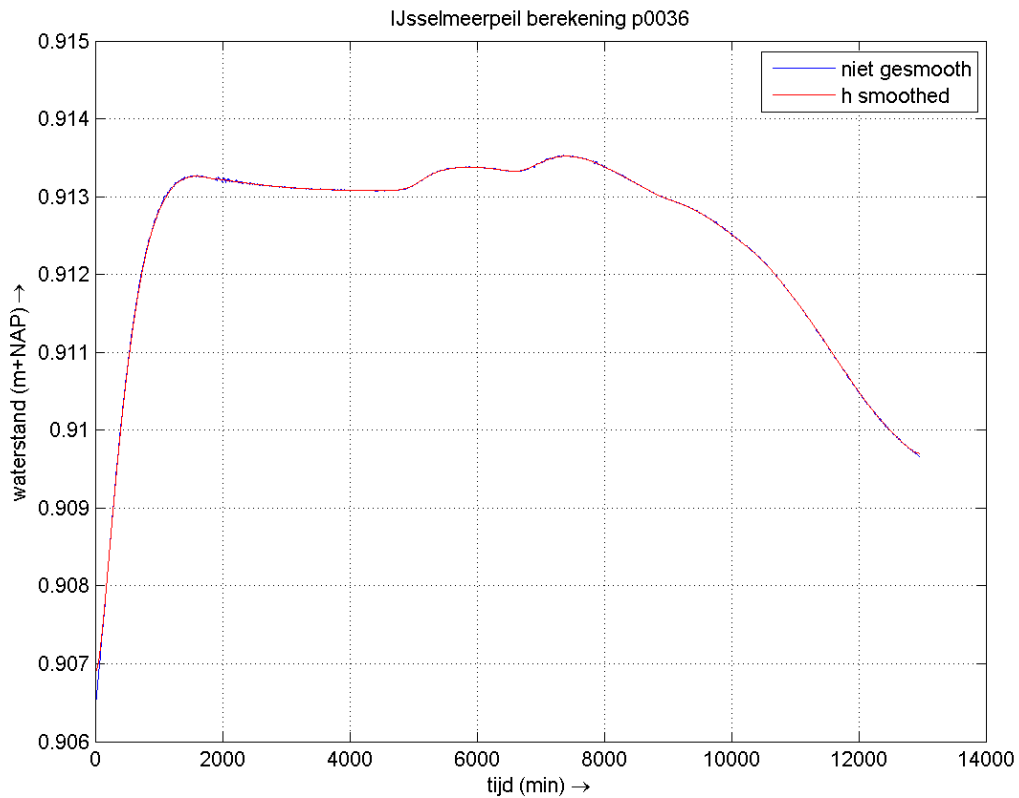
Voor de berekeningen 7 en 36 (zie Tabel 2) zijn testberekeningen uitgevoerd, waarbij een afvoergolf op de benedenrand is opgelegd met de faseverschuiving van de voorflank uit de oorspronkelijke berekening. Deze faseverschuiving bedraagt respectievelijk 791 en 799 minuten voor berekening 7 en 36. Het resulterende meerpeil wordt weergegeven in Figuur 4 (berekening 7) en Figuur 5 (berekening 36). In beide gevallen varieert het meerpeil in de orde van millimeters. Dit is ruim binnen de acceptabele marge van 5 cm. De combinatie van een correct initieel veld en een vertraagde afvoergolf op de benedenrand leidt blijkbaar tot een zeer stabiel meerpeil.

Opmerking: de instabiliteit in Figuur 4 wordt veroorzaakt door lichte instabiliteit bij één van de vier uitvoerlocaties, op basis waarvan een representatief meerpeil wordt bepaald. De instabiliteit is alleen lokaal aanwezig, en van verwaarloosbaar kleine grootte.

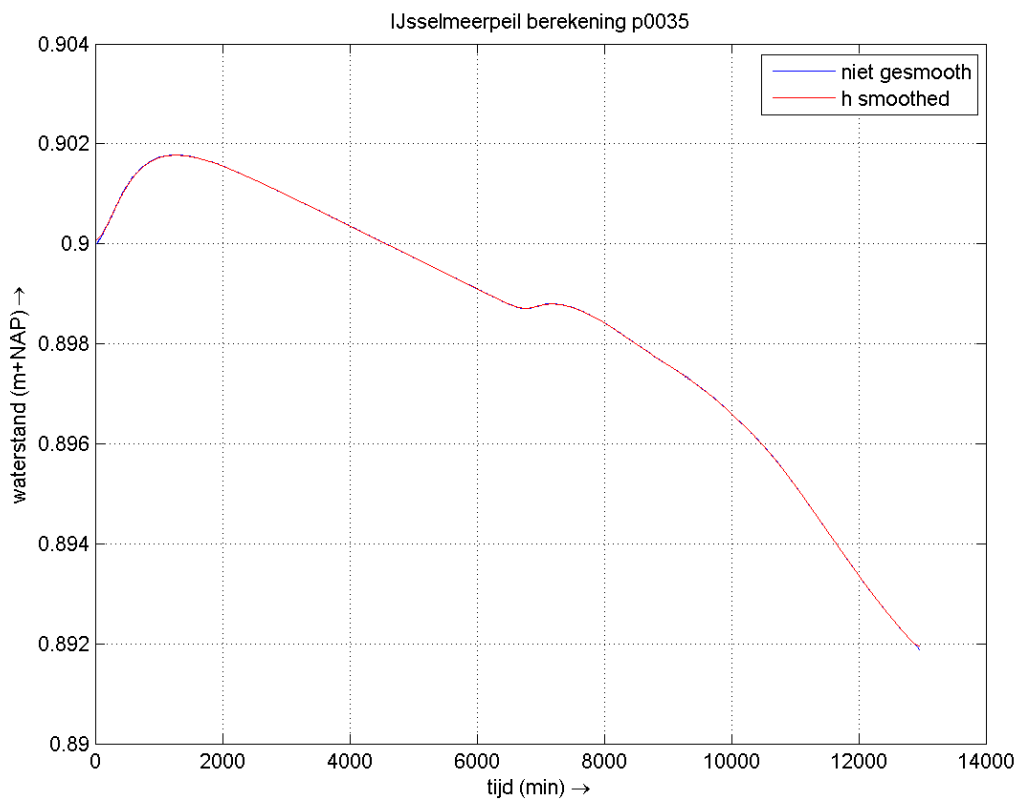
Vervolgens wordt berekening 35 uitgevoerd met de gemiddelde faseverschuiving van 795 min. De faseverschuiving voor deze specifieke berekening is ingeschat op 901 min, zie Tabel 2. Hiermee is het verschil tussen de gemiddelde waarde en de specifieke waarde voor de afzonderlijke berekening het grootst. Het 'te vroeg' onttrekken van water uit het IJsselmeer resulteert inderdaad in een daling van het meerpeil, zie Figuur 6. De daling bedraagt echter slechts 8 mm. Dit is ruim binnen de gestelde marge van 5 cm. De gemiddelde waarde van de faseverschuiving is blijkbaar afdoende om een voldoende stabiel meerpeil te realiseren. Om deze reden wordt het belangrijkste argument voor de gemiddelde waarde van de faseverschuiving: de eenvoud, doorslaggevend.



Figuur 4 – Meerpeil berekening 7 met afvoergolf op de benedenrand, met een faseverschuiving ten opzichte van de bovenrand. Maximaal debiet op de IJssel: 2750 m³/s, debiet op de Vecht: 850 m³/s, meerpeil: -0,4 m + NAP



Figuur 5 – Meerpeil berekening 36 met afvoergolf op de benedenrand, met een faseverschuiving ten opzichte van de bovenrand. Maximaal debiet op de IJssel: $3200 \text{ m}^3/\text{s}$, debiet op de Vecht: $1000 \text{ m}^3/\text{s}$, meerpeil: $0,9 \text{ m} + \text{NAP}$



Figuur 6 – Meerpeil berekening 35 met afvoergolf op de benedenrand, met een faseverschuiving ten opzichte van de bovenrand. Maximaal debiet op de IJssel: $2975 \text{ m}^3/\text{s}$, debiet op de Vecht: $925 \text{ m}^3/\text{s}$, meerpeil: $0,9 \text{ m} + \text{NAP}$

4 Conclusies

Uit het onderzoek volgen de volgende conclusies:

- De ongewenste toename van het meerpeil in de oorspronkelijke set met productieberekeningen met een afvoergolf op de IJssel kan worden voorkomen door ook op de benedenrand bij de Afsluitdijk een afvoergolf op te leggen.
- Deze afvoergolf op de benedenrand is van dezelfde vorm en grootte als de som van de instromende debieten en lateralen. Er wordt alleen een faseverschuiving toegepast ten opzichte van de afvoergolf op de bovenrand van de IJssel, om rekening te houden met de looptijd van de golf.
- De faseverschuiving wordt gebaseerd op de oorspronkelijke set productieberekeningen met een constante afvoer op de benedenrand. Het faseverschil tussen de voorflank van de afvoergolf op de IJssel en de voorflank van het stijgende meerpeil uit deze berekeningen wordt opgelegd aan twee testberekeningen zonder windinvloed.
- De drie uitgevoerde testberekeningen tonen aan dat de benadering met een vertraagde afvoergolf op de benedenrand leidt tot een voldoende stabiel meerpeil. De geringe afwijkingen (maximaal orde 1 cm) zijn acceptabel, gezien het door Deltares gestelde maximum van 5 cm (mailwisseling met Houcine Chbab, Deltares, 13 mei 2011).
- Daarnaast is een testberekening uitgevoerd, waarbij de gemiddelde waarde voor de faseverschuiving werd opgelegd, terwijl dit gemiddelde duidelijk verschilde van de specifiek voor die berekening bepaalde faseverschuiving. Ook bij deze testberekening bleef de afwijking in het meerpeil kleiner dan 1 cm. Voorgesteld wordt daarom ook om de constante, gemiddelde faseverschuiving van de voorflank van de golf van 795 minuten te gebruiken voor alle productieberekeningen. Graag vernemen wij de mening van Deltares hierover.

C Overzicht toetspeilen

Concept toetspeilen voor de Vechtdelta op de HR2006 locaties voor 4 verschillende normfrequenties

Locatie	X-coörd	Y-coörd	1250	2000	4000	10000
Vecht_36.00	222107	503258	5,194	5,247	5,326	5,428
Vecht_37.00	221238	503703	5,052	5,108	5,189	5,293
Vecht_38.00	220494	504139	4,946	5,004	5,089	5,198
Vecht_39.00	219482	504193	4,860	4,920	5,007	5,118
Vecht_40.00	218489	504239	4,734	4,799	4,893	5,014
Vecht_41.00	217574	504074	4,685	4,751	4,846	4,969
Vecht_42.00	216672	503528	4,624	4,692	4,789	4,915
Vecht_43.00	216375	502600	4,554	4,624	4,725	4,854
Vecht_44.00	215541	502219	4,483	4,554	4,655	4,785
Vecht_45.00	214515	502126	4,435	4,507	4,610	4,741
Vecht_46.00	213637	501920	4,127	4,194	4,291	4,417
Vecht_47.00	212890	502554	3,886	3,951	4,046	4,168
Vecht_48.00	212011	502970	3,809	3,875	3,970	4,093
Vecht_49.00	211258	503603	3,649	3,716	3,811	3,934
Vecht_50.00	210472	504152	3,462	3,532	3,630	3,758
Vecht_51.00	209618	503804	3,313	3,381	3,480	3,608
Vecht_52.00	208788	504158	3,176	3,244	3,342	3,469
Vecht_53.00	208005	504065	2,941	3,007	3,102	3,225
Vecht_54.00	207118	504403	2,826	2,892	2,988	3,113
Vecht_54.55	206596	504489	2,798	2,864	2,960	3,084
Vecht_55.00	206382	504847	2,590	2,648	2,732	2,841
Vecht_56.00	206372	505793	2,528	2,589	2,677	2,791
Vecht_57.00	205539	506311	2,440	2,501	2,589	2,703
Vecht_58.00	204945	507018	2,339	2,401	2,490	2,604
Vecht_59.00	204455	507851	2,233	2,295	2,385	2,500
Vecht_60.00	203558	508243	2,173	2,235	2,326	2,442
Spooldersluis Noord	200419	502829	2,187	2,250	2,341	2,458
ZwarteWater_01.00	202280	503484	2,195	2,258	2,350	2,467
ZwarteWater_02.00	201724	503910	2,187	2,250	2,342	2,458
ZwarteWater_02.65	201381	504741	2,180	2,242	2,334	2,450
ZwarteWater_03.00	201604	505344	2,179	2,242	2,334	2,450
ZwarteWater_03.25	201635	505929	2,174	2,237	2,328	2,445
ZwarteWater_04.00	201882	506605	2,173	2,235	2,326	2,443
ZwarteWater_04.60	202309	507025	2,173	2,236	2,327	2,444
ZwarteWater_05.55	202934	507724	2,174	2,237	2,328	2,444
ZwarteWater_06.55	203413	508626	2,157	2,219	2,310	2,426
ZwarteWater_07.00	203566	509017	2,134	2,196	2,286	2,402
ZwarteWater_08.00	203560	510002	2,075	2,138	2,228	2,344
ZwarteWater_09.00	203115	510880	2,009	2,070	2,159	2,274
ZwarteWater_10.00	202459	511610	1,896	1,952	2,032	2,136
ZwarteWater_11.00	202270	512553	1,853	1,909	1,990	2,094
ZwarteWater_12.00	202870	513320	1,834	1,890	1,971	2,076
ZwarteWater_13.00	202398	514124	1,789	1,844	1,925	2,029
ZwarteWater_14.00	201749	514871	1,761	1,816	1,895	1,998
ZwarteWater_15.00	201749	515856	1,748	1,802	1,881	1,984
ZwarteWater_16.00	201520	516772	1,723	1,777	1,856	1,959
ZwarteWater_17.00	200625	516620	1,683	1,736	1,815	1,917
ZwarteWater_18.00	199919	515978	1,619	1,673	1,753	1,859
ZwarteWater_19.00	198997	516133	1,549	1,599	1,674	1,774
ZwarteWater_20.00	198229	516730	1,491	1,540	1,613	1,713
ZwarteMeer_WsRW_38.00	195498	518841	1,414	1,460	1,529	1,624
ZwarteMeer_WsRW_39.00	196089	518694	1,429	1,475	1,545	1,640
ZwarteMeer_WsRW_40.00	197264	516980	1,462	1,509	1,580	1,678
ZwarteMeer_WsRW_41.00	197211	517920	1,466	1,512	1,582	1,679

ZwarteMeer_WsRW_42.00	196780	518308	1,451	1,497	1,568	1,663
ZwarteMeer_WsRW_43.00	197487	517414	1,470	1,517	1,589	1,687
ZwarteMeer_WsZL_44.00	195285	518622	1,408	1,454	1,523	1,619
ZwarteMeer_WsZL_45.00	194751	517769	1,402	1,448	1,517	1,613
ZwarteMeer_WsZL_46.00	194123	516937	1,390	1,436	1,505	1,600
ZwarteMeer_WsZL_47.00	193174	516576	1,370	1,416	1,486	1,582
ZwarteMeer_WsZL_48.00	192225	516262	1,352	1,398	1,468	1,564
ZwarteMeer_WsZL_49.00	191275	515941	1,335	1,381	1,451	1,546
ZwarteMeer_WsZL_50.00	190330	515627	1,320	1,366	1,436	1,531
ZwarteMeer_WsZL_51.00	189400	515313	1,307	1,353	1,423	1,518
ZwarteMeer_WsZL_52.00	188435	514991	1,293	1,339	1,408	1,503
ZwarteMeer_WsZL_53.00	187482	514674	1,283	1,328	1,397	1,492
ZwarteMeer_WsZL_54.00	186537	514352	1,269	1,315	1,386	1,480
GDGS_01	190919	509164	1,396	1,451	1,538	1,689
GDGS_02	191048	510003	1,388	1,441	1,525	1,669
GDGS_03	190993	510555	1,377	1,428	1,509	1,646
GDGS_06	191758	511074	1,385	1,436	1,518	1,656
GDGS_07	192258	511059	1,394	1,446	1,530	1,671
GDGS_08	192341	511803	1,386	1,437	1,519	1,653
GDGS_09	193125	511912	1,401	1,452	1,532	1,661
GOGS_01	193590	511693	1,412	1,462	1,542	1,666
GOGS_02	194160	511719	1,426	1,474	1,552	1,669
GOGS_03	194824	512425	1,434	1,483	1,560	1,675
GOGS_04	195124	513138	1,433	1,481	1,557	1,668
GOGS_05	195537	513718	1,436	1,483	1,558	1,664
VEGS_01	197782	513705	1,487	1,539	1,616	1,723
ZMGS_13	196196	516019	1,437	1,484	1,555	1,652
ZMGS_14	196723	516507	1,447	1,493	1,565	1,662

Concept toetspeilen voor de HR2011 locaties in het Zwarte Meer voor de geldende normfrequenties van omliggende dijkkringgebieden.

Locatie	x coor	y coor	Toetsoeil
DR7_001_ZM	195235	519110	1,525
DR7_005_ZM	195309	518745	1,521
DR7_009_ZM	195093	518409	1,52
DR7_014_ZM	194828	517985	1,517
DR7_019_ZM	194560	517562	1,515
DR7_024_ZM	194274	517135	1,509
DR7_029_ZM	193848	516854	1,5
DR7_034_ZM	193374	516695	1,49
DR7_039_ZM	192900	516536	1,48
DR7_044_ZM	192425	516378	1,472
DR7_048_ZM	192046	516250	1,465
DR7_053_ZM	191572	516091	1,457
DR7_058_ZM	191098	515934	1,448
DR7_063_ZM	190623	515778	1,44
DR7_068_ZM	190149	515619	1,433
DR7_073_ZM	189675	515459	1,426
DR7_078_ZM	189201	515299	1,419
DR7_083_ZM	188727	515142	1,412
DR7_088_ZM	188252	514984	1,406
DR7_093_ZM	187778	514825	1,401
DR7_098_ZM	187304	514665	1,394
DR7_103_ZM	186831	514504	1,388
DR7_108_ZM	186357	514345	1,384

DR7_113_ZM	185887	514175	1,377
DR7_116_ZM	185660	514104	1,381
DR10_146_ZM	191145	508905	1,373
DR10_156_ZM	191474	509253	1,35
DR10_161_ZM	191587	509661	1,346
DR10_166_ZM	191630	510107	1,34
DR10_171_ZM	191657	510592	1,331
DR10_176_ZM	191760	511001	1,436
DR10_181_ZM	192150	510926	1,446
DR10_186_ZM	192429	511285	1,446
DR10_191_ZM	192709	511706	1,448
DR10_196_ZM	193207	511690	1,456
DR10_201_ZM	193597	511508	1,466
DR10_206_ZM	194074	511655	1,474
DR10_211_ZM	194498	511868	1,482
DR10_216_ZM	194765	512335	1,482
DR10_221_ZM	195024	512777	1,483
DR10_226_ZM	197899	513659	1,464
DR10_231_ZM	198336	513808	1,474
DR10_241_ZM	198515	514152	1,477
DR10_246_ZM	198338	514596	1,476
DR10_251_ZM	198285	515072	1,478
DR10_256_ZM	198559	515439	1,5
DR10_261_ZM	198586	515952	1,503
DR10_266_ZM	198890	516115	1,595
DR10_271_ZM	199179	515746	1,611
DR10_276_ZM	199673	515904	1,65
DR10_281_ZW	200268	515938	1,701
DR9_353_ZW	199763	516428	1,616
DR9_358_ZW	199333	516687	1,565
DR9_363_ZW	198906	516910	1,53
DR9_368_ZW	198437	517056	1,501
DR9_373_ZM	198039	517386	1,331
DR9_378_ZM	197844	517829	1,219
DR9_382_ZM	197556	518106	1,268
DR9_387_ZM	197200	518431	1,212
DR9_388_ZM	197130	518520	1,152
DR9_389_ZM	197095	518614	1,087
DR9_390_ZM	197059	518707	1,268
DR9_393_ZM	196839	518790	1,777
DR9_399_ZM	196230	518862	1,433
DR9_404_ZM	195768	518989	1,42
DR9_409_ZM	195316	519180	1,411

D Keuze golfparamaters uit SWAN berekeningen

Memo

Aan
MARIKE OLIEMAN

Datum
15 augustus 2011

Aantal pagina's
10

Van
Hans de Waal

Doorkiesnummer
+31 (0)88 33 58 501

E-mail
hans.dewaal@deltares.nl

Onderwerp
Keuze golfperiodemaat uit SWAN

1 Samenvatting

Ten behoeve van de definitieve HR2011 bepaling moet op korte termijn een keuze gemaakt worden ten aanzien van de te gebruiken golfperiodemaat uit het golfmodel SWAN in het probabilistische model Hydra-Zoet voor de zoete wateren. De strikte randvoorwaarden wat betreft planning, tijd en budget nopen tot een pragmatische oplossing.

Het in deze memo onderbouwde voorstel is als volgt:

t.b.v. golfoverslag: $T_{m-1,0} =$	t.b.v. bekledingen: $T_p =$
$1.09 * T_{m-1,0}(\text{SWAN})$	$T_p(\text{SWAN})$

De correctiefactor op de SWAN uitvoerparameter $T_{m-1,0}$ is gebaseerd op metingen in het IJsselmeer en Slotermeer. Voor andere zoete wateren waar SWAN berekeningen voor de HR worden uitgevoerd zijn geen metingen beschikbaar. Voor die gebieden moest een pragmatische keuze gemaakt worden 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.

Met de onderbouwing in deze memo verwachten wij dat deze aanpak op voldoende draagvlak kan rekenen.

De aanleiding voor de hernieuwde keuze van de te gebruiken golfperiodemaat lag in gevonden onverwacht hoge benodigde kruinhoogtes in zeer voorlopige resultaten met Hydra-Zoet in het IJsselmeergebied. Met bovenstaande aanpak zijn dergelijke resultaten ten aanzien van de benodigde kruinhoogte op voorhand nog steeds niet uitgesloten.

2 Probleembeschrijving

2.1 Aanleiding



In zeer voorlopige resultaten met het probabilistische model Hydra-Zoet voor het IJsselmeergebied zijn onverwacht hoge benodigde kruinhoogtes geconstateerd. Deze resultaten moeten kunnen worden verklaard om vertrouwd te kunnen worden. De tot op heden gehanteerde keuze ten aanzien van de te gebruiken golfperiodemaat uit het golfmodel SWAN lijkt een rol te spelen, terwijl deze keuze slecht onderbouwd blijkt. Dit is aanleiding geweest deze keuze nader tegen het licht te houden. Een eventueel herziene keuze moet echter wel op korte termijn gemaakt worden.

2.2 Probleem

Het probleem kan als volgt worden geformuleerd:

Ten behoeve van de definitieve HR2011 bepaling moet op korte termijn een keuze gemaakt worden ten aanzien van de te gebruiken golfperiodemaat uit het golfmodel SWAN in het probabilistische model Hydra-Zoet voor het IJsselmeergebied. We streven daarbij naar een keuze voor een werkwijze die op voldoende draagvlak kan rekenen. De strikte randvoorwaarden wat betreft planning, tijd en budget nopen tot een pragmatische oplossing.

2.3 Aanpak en positionering onderhavige memo

Na de constatering van het probleem heeft de aanpak bestaan uit enkele discussies, mailwisselingen en raadpleging van rapporten over de golfmetingen in het IJsselmeer en de SWAN performance in de Nederlandse wateren. Het is nu tijd voor een beslisdocument (onderhavige memo) met een presentatie van een overzicht (samenvatting) van de problematiek en formulering van de voorkeursoplossing.

De analyse in deze memo heeft primair betrekking op het gebruik van SWAN resultaten in de HR2011 voor meren. Voor het gebruik van SWAN resultaten in HR2011 voor de andere zoete wordt een pragmatische keuze gemaakt.

De doelgroep van deze memo bestaat uit het WTI2011 projectmanagement bij zowel Waterdienst als Deltares.

3 Achtergrond

Golfcondities worden doorgaans samengevat in drie parameters: hoogte, periode en richting. Omdat sprake is van onregelmatige golven bestaan verschillende manieren om een 'representatieve' waarde te bepalen. In onderhavige memo staat de representatieve parameter voor de golfperiode centraal waarbij de beschouwing beperkt blijft tot twee parameters: de piekperiode T_p en de gewogen gemiddelde periode $T_{m-1,0}$.

Beide parameters zijn afgeleid uit het golfspectrum: de wijze waarop de golfenergie(dichtheid) verdeeld is over de golffrequenties. Als golven op relatief eenduidige wijze veroorzaakt zijn door wind, dan heeft het spectrum een karakteristieke vorm, met 1 duidelijke piek. De spectrale

vorm en daarmee de verhoudingen tussen de golfperiodematen liggen dan relatief vast en de periodematen zijn dus relatief goed (eenduidig) in elkaar om te rekenen.

De piekperiode is de periode (reciproke van de frequentie) waarbij de golfenergie(dichtheid) maximaal is. Deze periodemaat wordt van oudsher veel gebruikt, maar verliest aan populariteit omdat deze maat de volgende nadelen heeft:

1. Als het spectrum niet 1 eenduidige piek vertoont, dan vormt de piekperiode een minder eenduidige (en dus minder representatieve) golfperiodemaat. Dit is bijvoorbeeld aan de orde bij:
 - a een spectrum met 2 (of meer) pieken met ongeveer gelijke hoogte (gemengd golfveld, zoals in een gedeeltelijk afgeschermd gebied)
 - b een breed spectrum zonder uitgesproken piek ('platgeslagen' spectrum, zoals bij ondiepe voorlanden)
2. Zowel bij de tijdreeksanalyse van het golfmeetsignaal als in de golfmodellering is doorgaans sprake van discrete frequenties waar de golfenergie(dichtheid) wordt bepaald. Dit discrete karakter kan tot een enigszins springerig gedrag leiden. (Er zijn wel smoothing methodes beschikbaar om de springerigheid te reduceren, maar de essentie blijft overeind).

De gewogen gemiddelde periode heeft bovenstaande nadelen niet: deze maat heeft een veel minder grillig karakter. (Hier kan overigens nog wel sprake zijn van gevoeligheid voor het gekozen frequentiebereik voor de gewogen middeling).

Belangrijke vragen zijn nu:

- Hoe goed kunnen we deze periodematen berekenen?
- Welke periodematen hebben we nodig (zijn het meest relevant) voor onze beoogde toepassing?

Hierop gaan de volgende twee paragrafen in.

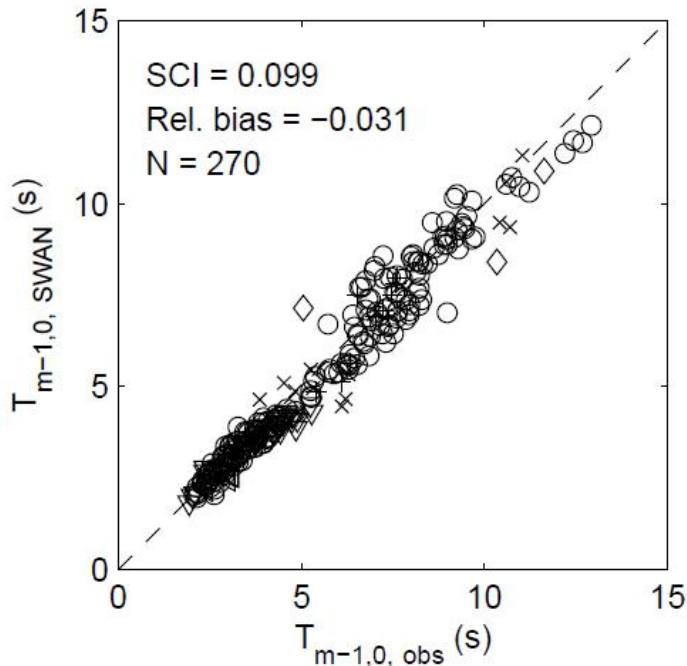
3.1.1 Golfmodellering

SWAN is een spectraal model: het berekent het golfspectrum en leidt daar de golfparameters uit af. De eerder (en in sommige gebieden nog steeds) voor de HR bepaling gebruikte golfmodellen Bretschneider en HISWA berekenen de golfparameters rechtstreeks (m.b.v. parametrisaties), dus zonder de spectrale vorm te berekenen. In die laatste gevallen is geen informatie over de spectrale vorm beschikbaar en kunnen alternatieve periodematen alleen bepaald worden met behulp van de standaard omrekeningsfactoren die voor een 'normaal' golfspectrum gelden. Waarbij dus in feite een aanname wordt gemaakt ten aanzien van de spectrale verdeling, welke op alle locaties en onder alle omstandigheden wordt toegepast.

Bij de afregeling en beoordeling van SWAN wat betreft de reproductie van meetresultaten, wordt wat betreft de golfperiode doorgaans gekeken naar gewogen gemiddelde periode ($T_{m-1,0}$ en T_{m01}) en hooguit zijdelings naar de piekperiode. De SWAN performance aangaande $T_{m-1,0}$ in een brede set meetgegevens is goed te noemen, zoals in Figuur 1 (Figuur 11 uit Deltares, 2011) is te zien. Daar zijn resultaten van hindcasts van stormen getoond in het Amelanders Zeegat (205 waarnemingen), oostelijke Waddenzee (13 waarnemingen), IJsselmeer (34 waarnemingen), Slotermeer (5 waarnemingen), Norderneyer Zeegat (4 waarnemingen) en de Oosterscheldemonding (9 waarnemingen). De relatieve bias bedraagt -3.1%. De verhouding van het aantal waarnemingen over de gebieden geeft aan dat bij de calibratie en validatie van



SWAN (zie Deltares, 2010) de nadruk op de Waddenzee heeft gelegen, ook al is in de weging rekening gehouden met het relatief grote aantal Amelander Zeegat waarnemingen. In de Waddenzee is de performance van SWAN ten opzichte van de versie uit 2006 sterk verbeterd (zie Deltares, 2010, 2011).



Figuur 1. SWAN performance wat betreft de $T_{m-1,0}$ in een brede set meetgegevens (Amelander Zeegat, oostelijke Waddenzee, IJsselmeer, Slotermeer, Norderneyer Zeegat, Oosterscheldemonding)

3.1.2 Toepassingsmodellen

In de huidige HR zijn golfbelastingen (en dus de golfperiodemaat) primair voor twee aspecten van belang:

- golfploop/golfoverslag
- de stabiliteit van bekledingen

Van oudsher maakten beide 'vakgebieden' gebruik van T_p als representatieve golfperiodemaat, simpelweg omdat deze parameter lange tijd het meest gangbaar en dus beschikbaar was. Bij golfploop / overslag is echter inmiddels overgestapt op $T_{m-1,0}$, omdat onderzoek bij ondiepe voorlanden heeft uitgewezen dat deze parameter een duidelijker relatie heeft met golfploop/overslag dan T_p (Van Gent, 2001). Bij bekledingen is een dergelijke analyse nog niet uitgevoerd. Maar gezien het wat grillige karakter van T_p is het goed denkbaar dat ook voor dit vakgebied een duidelijker relatie gevonden zal kunnen worden met $T_{m-1,0}$ dan met T_p .

4 Analyse

4.1 Globale oplossingsvarianten

In grote lijnen zijn de volgende opties voor de werkwijze beschikbaar:

nr	kenmerk	t.b.v. golfoverslag: $T_{m-1,0} =$	t.b.v. bekledingen: $T_p =$
1	Alleen T_p uit SWAN gebruiken	$T_p(\text{SWAN}) / C_1$	$T_p(\text{SWAN})$
2	Alleen $T_{m-1,0}$ uit SWAN gebruiken	$T_{m-1,0}(\text{SWAN})$	$T_{m-1,0}(\text{SWAN}) * C_1$
3	Beide SWAN periodematen gebruiken	$T_{m-1,0}(\text{SWAN})$	$T_p(\text{SWAN})$

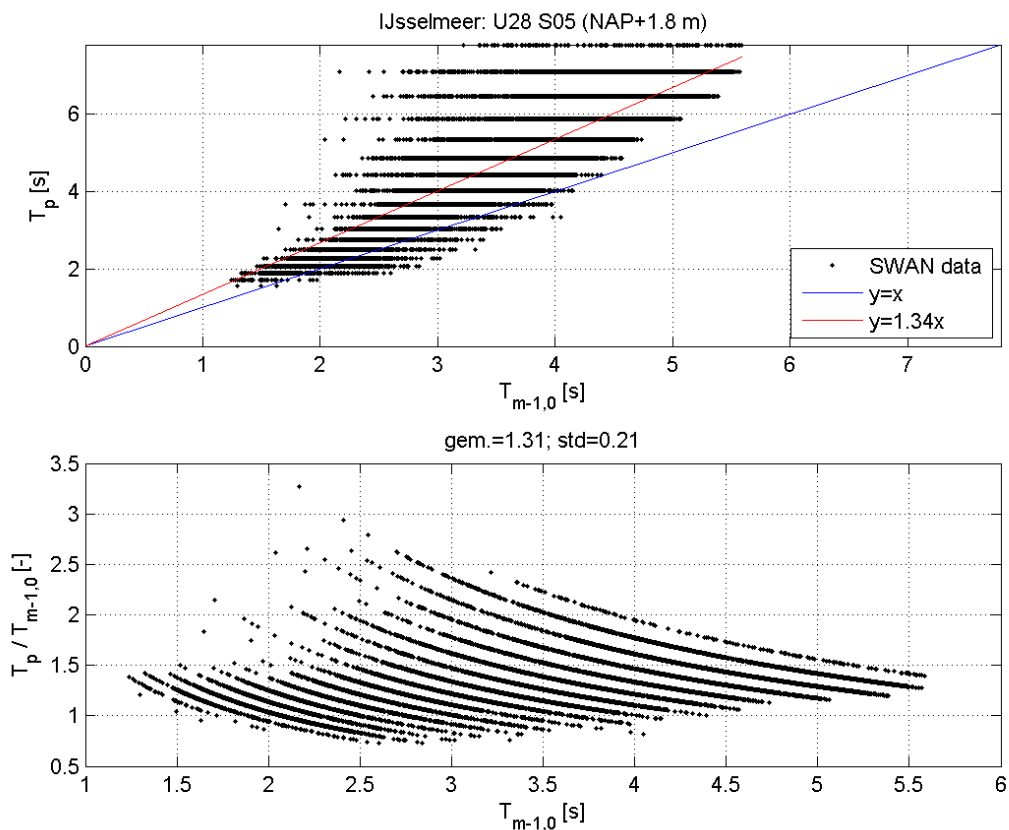
In het kort zijn de belangrijkste karakteristieken van de 3 aanpakken:

- Aanpak 1 bouwt voort op traditie en huidige programmacode Hydra-Zoet.
- Aanpak 2 bouwt voort op de kracht van $T_{m-1,0}$ (c.q. omzeilt de zwakte van T_p).
- Aanpak 3 kiest voor SWAN (vermijdt het gebruik van een omrekenfactor C_1);

Voor de volledigheid zij vermeld dat voor de HR bepaling langs de kust gebruik wordt gemaakt van aanpak 3.

4.2 Afweging

In Aanpak 1 en 2 wordt gebruik gemaakt van een omrekenfactor C_1 . Deze parameter geeft de verhouding van T_p tot $T_{m-1,0}$. Voor de HR uitvoerlocaties langs het IJsselmeer is de variatie in de door SWAN berekende verhouding zeer aanzienlijk, zie Figuur 2. Door de aanwezigheid van ondiepe voorlanden en variatie in maatgevende strijklengte is de ruimtelijke variatie van de spectrale vorm groot. Daarmee dus ook de variatie in de verhouding tussen de twee periodematen. Door één vaste waarde voor C_1 te kiezen wordt een forse fout (scatter) geïntroduceerd.

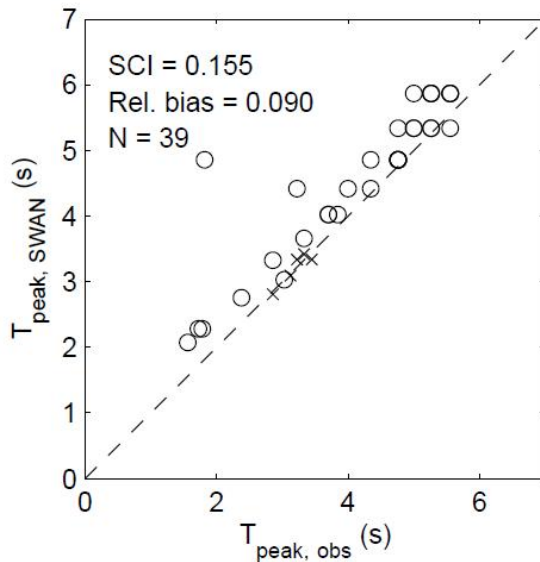


Figuur 2. Voorbeeld van variatie in (door SWAN berekende) verhouding tussen T_p en $T_{m-1,0}$.

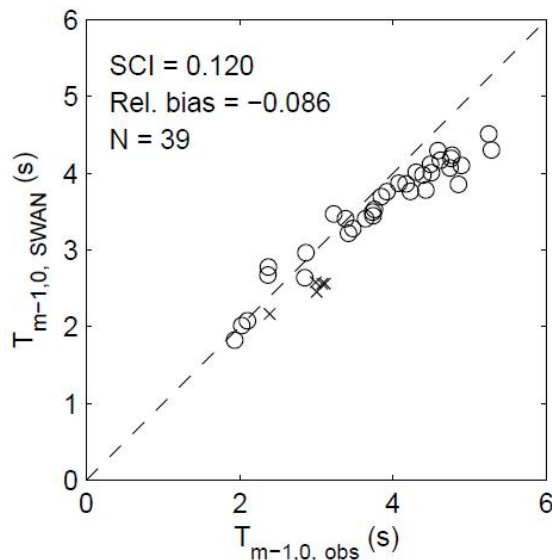
Aanpak 1 kent inhoudelijk alleen maar nadelen. Het zal zeer moeilijk worden hier breed draagvlak voor te krijgen. Wat ons betreft valt deze optie af.

In vergelijking met aanpak 3 is aanpak 2 alleen aantrekkelijk als SWAN de $T_{m-1,0}$ voor de meren zoveel beter kan berekenen dan de T_p dat de aan het gebruik van C_1 gekoppelde fout wordt gecompenseerd.

De performance van SWAN voor de twee periodematen T_p en $T_{m-1,0}$ is gegeven in Figuur 3 resp. Figuur 4. Dit betreft een uitsnede uit Figuur 1 waarbij alleen de waarnemingen in het IJsselmeer en het Slotermeer zijn beschouwd.



Figuur 3. Performance van SWAN m.b.t. T_p voor de meren (o : IJsselmeer; x: Slotermeer).



Figuur 4. Performance van SWAN m.b.t. $T_{m-1,0}$ voor de meren (o : IJsselmeer; x: Slotermeer).

Uit deze figuren blijkt dat de SWAN performance voor beide parameters globaal genomen gelijk is, waarbij SWAN de piekperiode overschat en de gemiddelde periode onderschat. Dit betekent dat aanpak 3 (het vermijden van het gebruik van omrekenfactor C_1) de voorkeur verdient.

Toch is hiermee het verhaal nog niet af. De performance van SWAN zoals getoond in en Figuur 3 en Figuur 4 roept namelijk nog wel aanvullende vragen op. Daarop wordt in de volgende paragraaf ingegaan.



4.3 Nadere uitwerking voorkeursoplossing

Uit Figuur 3 blijkt dat SWAN T_p grosso modo overschat en uit Figuur 4 blijkt dat SWAN $T_{m-1,0}$ grosso modo onderschat. Dit samengevoegd betekent dat de door SWAN berekende spectrumvorm duidelijk anders (breder) is dan de gemeten spectrumvorm. Dit zijn constatering die we niet zomaar kunnen negeren in aanpak 3.

De overschatting van T_p

De overschatting van T_p is het kleinste probleem. De T_p wordt alleen gebruikt voor de berekening van de maatgevende golfbelasting voor de bekleding. Zowel de bepaling van wat maatgevend is (de Q-variant binnen Hydra) als de toepassing binnen de bekledingtoetsing bevatten aanzienlijke vereenvoudigingen en benaderingen. Daarom stellen we voor deze overschatting te accepteren bij het gebruik van de SWAN rekenresultaten in het kader van HR2011 voor de meren.

De spectrumvorm en de onderschatting van $T_{m-1,0}$

Zoals al in Figuur 1 getoond, is de overall performance van SWAN wat betreft $T_{m-1,0}$ goed. Echter, de performance wat betreft de spectrumvorm (en, in het verlengde daarvan en in iets mindere mate, de $T_{m-1,0}$) voor het Slotermeer en IJsselmeer is onbevredigend. Dit is reeds eerder geconstateerd en is aanleiding geweest voor het plannen van nader onderzoek in SBW kader. Dit nader onderzoek zal naar alle waarschijnlijk in de toekomst tot SWAN resultaten voor de $T_{m-1,0}$ leiden die - op de golfmeetlocaties - hoger zijn dan het huidige SWAN geeft. Hierbij gaan we er van uit dat de metingen geen fouten bevatten. Ook dat zal in SBW kader geverifieerd moeten worden.

De meetlocaties op het IJsselmeer bevinden zich over het algemeen in de diepere, open delen van het IJsselmeer. De SWAN performance op de golfmeetlocaties in de meren is daarom representatief voor slechts een deel van de HR locaties langs de meren. Voor dit deel van de locaties weten we op voorhand al dat de toekomstige SWAN verbetering zal leiden tot zwaardere golfcondities in een volgende HR editie. De consequenties van de toekomstige SWAN verbetering voor andere HR locaties zijn op voorhand onbekend.

We willen vermijden dat we in de HR2011 golfcondities afgeven waarvan we op voorhand weten dat ze in een volgende HR editie zullen worden vervangen door zwaardere golfcondities. Daarom stellen we voor de golfcondities voor de HR2011 al opwaarts bij te stellen. Omdat deze bijstelling op dit moment pragmatisch moet zijn, stellen we voor 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 wordt gereduceerd tot nul. Dit betekent dat de door SWAN geproduceerde $T_{m-1,0}$ moet worden vermenigvuldigd met een factor 1.09 (@Check!, en figuurtje opnemen?).

Het verdient wellicht de voorkeur dat de golfcondities in de Hydra-Zoet database(s) bestaan uit de gecorrigeerde SWAN resultaten. De toegepaste correctie zou bij voorkeur in de meta-informatie van de database vermeld moeten worden.

Terzijde:

De matige SWAN performance ten aanzien van de spectrumvorm betekent dat de informatie in Figuur 2 minder betrouwbaar is dan op voorhand gedacht. Echter, de stelling dat de variatie in de verhouding $T_p / T_{m-1,0}$ op de HR locaties aanzienlijk zal zijn, blijft ons inziens overeind.

Het gebruik van SWAN resultaten in HR2011 voor andere zoete wateren

De correctiefactor op de SWAN uitvoerparameter $T_{m-1,0}$ is gebaseerd op metingen in het IJsselmeer en Slotermeer. Voor andere zoete wateren waar SWAN berekeningen voor de HR worden uitgevoerd zijn geen metingen beschikbaar. Voor die gebieden moet een pragmatische keuze gemaakt worden tussen consistentie met het IJsselmeer (correctiefactor 1.09) of consistentie met de Kust (geen correctiefactor).

De andere zoete wateren vertonen wat betreft golfmodellering ons inziens een sterkere overeenkomst met het IJsselmeer dan met de Kust: het dominante golfverschijnsel is meer de lokale golfgroei door wind (zoals op het IJsselmeer) dan de golfbreking op een voorland van gegeven golfcondities vanuit diep water (zoals bij de Kust).

Daarom bevelen wij een keuze voor consistentie met het IJsselmeer aan: het hanteren van een correctiefactor van 1.09 op $T_{m-1,0}$.

5 Conclusies

Ten behoeve van de definitieve HR2011 bepaling stellen wij de volgende keuze voor ten aanzien van de te gebruiken golfperiodemaat uit het golfmodel SWAN in het probabilistische model Hydra-Zoet voor de zoete wateren:

t.b.v. golfoverslag: $T_{m-1,0} =$	t.b.v. bekledingen: $T_p =$
$1.09 * T_{m-1,0}(\text{SWAN})$	$T_p(\text{SWAN})$

Dit heeft de volgende voordelen:

- Het kiest voor gebruik van de meer stabiele $T_{m-1,0}$ en vermijdt - waar mogelijk - het gebruik van de toch wat grillige T_p .
- Het sluit aan bij de gevraagde periodemaat in de golfoverslagformules.
- Het vermijdt het gebruik van een omrekenfactor tussen periodematen. Anders geformuleerd: het laat het spectrale karakter van het gekozen golfmodel tot z'n recht komen.
- Het sluit aan bij aanpak bij de HR voor de kust (afgezien van de correctiefactor op $T_{m-1,0}$).

Enige 'smet' op deze keuze is het gebruik van een correctiefactor op de $T_{m-1,0}$. Toch is ook dit goed te verdedigen:

- Het past binnen de randvoorwaarden (is pragmatisch).
- Het doet recht aan het streven naar 'best guess' HR (met vermindering van onderschatting).
- Het doet recht aan het geplande SBW onderzoek ter verkenning van de mismatch tussen berekende en gemeten spectrale vorm en mogelijke verbetering van de performance van



SWAN op de meren: dat dient er nu op gericht te zijn de correctiefactor overbodig te maken.

Met deze kenmerken verwachten wij dat deze aanpak op voldoende draagvlak kan rekenen.

Het is overigens op voorhand niet te zeggen of met deze keuze de benodigde kruinhoogtes in het IJsselmeergebied duidelijk anders (lager?) zullen uitpakken dan met de aanpak in de voorlopige analyses (waarin de aanleiding voor de discussie over de periodemaat lag). Mogelijk vergt de verklaring van de nieuwe (nog te berekenen) benodigde kruinhoogtes straks dus nog steeds vervolgwerk.

6 Referenties

Deltares (2010). SWAN calibration and validation for HBC2011. Deltares report 12000103-020. May 2010.

Deltares (2011). Improvements in spectral wave modeling in tidal inlet seas. Deltares report 1202119.006, May 2011.

Van Gent, M.R.A. (2001), Wave run-up on dikes with shallow foreshores, ASCE, Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol.127, No 5, pp.254-262, September/October 2001 issue.

Kopie aan

Marcel Bottema, Houcine Chbab, Jacco Groeneweg, Annette Kieftenburg