

Opdrachtgever:

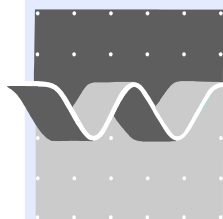
Rijkswaterstaat RIZA Lelystad

## Productieberekeningen Hydraulische Randvoorwaarden 2006

IJburg en de Eem (RI-4393A)

hoofdrapport

december 2005



Opdrachtgever:

Rijkswaterstaat RIZA Lelystad

## Productieberekeningen Hydraulische Randvoorwaarden 2006

IJburg en de Eem (RI-4393A)

hoofdrapport

december 2005

## Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding .....</b>	<b>1—1</b>
1.1	Achtergrond van de studie .....	1—1
1.2	Doelstelling van de studie.....	1—2
1.3	Leeswijzer en overzicht opgeleverde gegevens .....	1—2
<b>2</b>	<b>Schematisatie voor de waterstandsberekeningen.....</b>	<b>2—1</b>
2.1	Beschrijving van het studiegebied .....	2—1
2.2	Aanpassingen aan WAQUA- en Baselineschematisatie .....	2—2
2.3	Effect van aanpassingen in de schematisatie .....	2—3
2.4	Overzicht randvoorwaarden voor de berekeningen .....	2—4
2.5	Overzicht van uitvoerlocaties .....	2—5
<b>3</b>	<b>Stormschematisatie voor productieberekeningen .....</b>	<b>3—1</b>
3.1	Inleiding.....	3—1
3.2	Beschrijving stormschematisatie OOM-studie .....	3—2
3.3	Onderzoek stormschematisatie HR2006.....	3—3
3.3.1	Verschillen ten opzichte van de OOM-studie .....	3—3
3.3.2	Overzicht uit te voeren berekeningen .....	3—4
3.3.3	Resultaten van de berekeningen .....	3—5
3.4	Toe te passen stormschematisatie HR2006.....	3—8
<b>4</b>	<b>Productieberekeningen voor waterstanden .....</b>	<b>4—1</b>
4.1	Controle methode waterstandsberekeningen .....	4—1
4.1.1	Te controleren parameters.....	4—1
4.1.2	Beschrijving en uitleg figuren .....	4—2
4.2	Controle waterstandsberekeningen .....	4—3

4.3	Conclusies op basis van controle van de waterstandsberekeningen .....	4—6
<b>5</b>	<b>Golfcondities voor IJburg .....</b>	<b>5—1</b>
5.1	SWAN schematisatie voor IJburg .....	5—1
5.1.1	Rekenrooster en rekenresolutie.....	5—1
5.1.2	Bodem.....	5—2
5.1.3	Randvoorwaarden .....	5—2
5.1.4	Schematisatie IJburg, dijken en overlaten .....	5—3
5.1.5	Uitvoer .....	5—4
5.2	Initiële SWAN instellingen .....	5—8
5.2.1	Aangepaste White capping formulering .....	5—8
5.2.2	Rekenfrequenties .....	5—9
5.2.3	Stopcriterium en controle nauwkeurigheid.....	5—9
5.3	Correctiefactoren voor de SWAN berekeningen.....	5—11
5.3.1	Inleiding.....	5—11
5.3.2	Residu-onderzoek .....	5—11
5.3.3	Systematische fout .....	5—12
5.3.4	Correctiefactoren .....	5—13
5.3.5	Conclusies correctiefactoren.....	5—14
<b>6</b>	<b>Golfcondities voor de Eemvallei .....</b>	<b>6—1</b>
<b>7</b>	<b>Productieberekeningen voor de golven .....</b>	<b>7—1</b>
7.1	Controle methode golfberekeningen.....	7—1
7.1.1	Te controleren parameters.....	7—1
7.1.2	Beschrijving en uitleg figuren .....	7—2
7.2	Controle golfberekeningen IJburg .....	7—3
7.3	Controle golfberekeningen Eemvallei .....	7—5
7.4	Conclusies op basis van controle van de golfberekeningen.....	7—7

<b>8</b>	<b>Bepalen Hydraulische Randvoorwaarden 2006.....</b>	<b>8—1</b>
8.1	Inleiding.....	8—1
8.2	Overzicht locaties HR2006.....	8—1
8.2.1	IJburg.....	8—2
8.2.2	Eemvallei.....	8—3
8.3	Opname van resultaten in databases Hydra-M.....	8—3
8.3.1	Beknopte beschrijving Hydra-M.....	8—3
8.3.2	Aanmaken Hydra-M database.....	8—4
8.3.3	Dijkprofiel.....	8—8
8.3.4	Meerpeil- en windstatistiek in Hydra-M.....	8—8
8.4	Bepalen van de Hydraulische Randvoorwaarden 2006.....	8—9
8.4.1	HR2006 voor IJburg.....	8—9
8.4.2	HR2006 voor de Eemvallei.....	8—10
8.5	Vergelijking van HR2006 met HR2001 en ontwerprandvoorwaarden IJburg.....	8—12
8.5.1	Vergelijking voor IJburg.....	8—12
8.5.2	Vergelijking voor de Eemvallei.....	8—17
8.6	Vergelijking Hydra-Q.....	8—21
8.7	Oplevering databestanden.....	8—24
<b>9</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen.....</b>	<b>9—1</b>
9.1	WAQUA- schematisatie en de aangepaste stormschematisatie.....	9—1
9.2	Controle waterstandsberekeningen.....	9—2
9.3	SWAN schematisatie en correctiefactoren.....	9—2
9.4	Controle golfberekeningen.....	9—3
9.5	Toepassing Hydra-M.....	9—3
9.6	Hydraulische Randvoorwaarden 2006.....	9—4

## Bijlagen

<b>A</b>	<b>Overzicht van de gepresenteerde locaties in de figuren .....</b>	<b>A-1</b>
<b>B</b>	<b>Voorbeeld van de figuren voor de controle .....</b>	<b>B-1</b>
<b>C</b>	<b>Golfrandvoorwaarden SWAN uit Hydra-M voor HR2001 .....</b>	<b>C-1</b>
<b>D</b>	<b>Convergentiegedrag SWAN modellen (meerpeil -0,4 m+NAP en wind 60°)...</b>	<b>D-1</b>
<b>E</b>	<b>Resultaten analyse aantal SWAN iteraties.....</b>	<b>E-1</b>
<b>F</b>	<b>Resultaten SWAN berekeningen voor testcases .....</b>	<b>F-1</b>
<b>G</b>	<b>Correctie van SWAN berekeningen.....</b>	<b>G-1</b>
<b>H</b>	<b>Voorbeeld van de figuren voor de controle van de golfberekeningen .....</b>	<b>H-1</b>
<b>I</b>	<b>Effect interpolatievorm op HR2006 .....</b>	<b>I-1</b>
<b>J</b>	<b>Voorbeeld Hydra-M database-bestand .....</b>	<b>J-1</b>
<b>K</b>	<b>HR2006 voor IJburg.....</b>	<b>K-1</b>
<b>L</b>	<b>HR2006 voor de Eem .....</b>	<b>L-1</b>
<b>M</b>	<b>Vergelijking HR2006 en HR2001 bij ontwerp frequentie <math>1/n = 1/4000</math> rondom IJburg .....</b>	<b>M-1</b>
<b>N</b>	<b>Invloed piekgolfperiode-formulering op hydraulische randvoorwaarden HR2006 .....</b>	<b>N-1</b>
<b>O</b>	<b>Vergelijking HR2006 en HR2001 bij ontwerp frequentie <math>1/n = 1/4000</math> voor Gooi-en Eemmeer .....</b>	<b>O-1</b>
<b>P</b>	<b>Vergelijking Hydra-Q bij ontwerp frequentie <math>1/n = 1/4000</math> voor IJburg.....</b>	<b>P-1</b>
<b>Q</b>	<b>Vergelijking Hydra-Q bij ontwerp frequentie <math>1/n = 1/4000</math> voor Gooi- en Eemmeer .....</b>	<b>Q-1</b>

# I Inleiding

## I.1 Achtergrond van de studie

Volgens de Wet op de Waterkering moeten iedere 5 jaar de primaire waterkeringen worden getoetst door de desbetreffende beheerders. Voor deze toetsing levert de Minister van Verkeer en Waterstaat de Hydraulische Randvoorwaarden. In 2006 worden voor alle waterkeringen in Nederland nieuwe randvoorwaarden afgegeven en in dat kader is Rijkswaterstaat RIZA Lelystad ( Rijkswaterstaat RIZA) onder andere eindverantwoordelijke voor het leveren van de randvoorwaarden voor het Merengebied.

Voor het vaststellen van de Hydraulische Randvoorwaarden 2001 (HR2001) in het Merengebied is aan het einde van de jaren '90 het probabilistische model Hydra-M ontwikkeld. Hydra-M maakt gebruik van een database met waterstanden en golven, behorend bij een groot aantal combinaties van meerpeil, windrichting en windsnelheid. Voor de Hydraulische Randvoorwaarden 2006 (HR2006) worden voor het overgrote deel van het IJsselmeer en het Markermeer de getallen van de database van HR2001 overgenomen. Een uitzondering daarop vormen de Eemvallei en IJburg en omgeving. Voor beide locaties moeten daarom productieberekeningen worden uitgevoerd ten behoeve van de bepaling van de HR2006.

De Hydraulische Randvoorwaarden moeten breed geaccepteerd worden en moeten daarom consistent zijn en zo veel als mogelijk aansluiten bij reeds beschikbare informatie voor de randvoorwaarden. Eventueel geconstateerde afwijkingen moeten te verklaren zijn en indien mogelijk opgelost worden. Een voorwaarde voor acceptatie is ook dat de gevolgde procedure helder en toegankelijk is en dat men vertrouwen heeft in de kwaliteit van de resultaten. Centraal in het project staat daarom de kwaliteit en de herleidbaarheid van de berekeningen die ten grondslag liggen aan HR2006.

Op 12 juli 2005 hebben WL | Delft Hydraulics (WL) en Witteveen+Bos (W+B) van Rijkswaterstaat RIZA opdracht (kenmerk RI-4393A) gekregen voor het uitvoeren van de productieberekeningen en het bepalen van de HR2006. Dit rapport beschrijft alle activiteiten die zijn uitgevoerd om tot de uiteindelijke Hydraulische Randvoorwaarden 2006 voor IJburg en de Eem te komen. Het project is uitgevoerd door WL in samenwerking met Witteveen+Bos, waarbij de inbreng van Witteveen+Bos zich vooral heeft gericht op het uitvoeren van de waterstands- en golfberekeningen en de inbreng van WL op de controle van de berekeningen en het bepalen van de uiteindelijke Hydraulische Randvoorwaarden.

De projectleiding was in handen van WL, waarbij Simone van Schijndel als projectleider fungeerde. Voor W+B heeft Alfons Smale als projectleider opgetreden. Verder zijn Saskia van Vuren (WL), Johan Dekker (WL) en Robert Zijlstra (W+B) nauw betrokken geweest bij het project. De kwaliteitsborging bij W+B was in handen van Suan Pwa. Frans van der Knaap heeft namens WL de kwaliteitscontrole van het eindrapport uitgevoerd.

## 1.2 Doelstelling van de studie

De doelstelling van het project is de volgende:

*het opleveren van de gecontroleerde en door de opdrachtgever geaccepteerde Hydraulische Randvoorwaarden 2006 voor de locaties IJburg en Eem en de bijbehorende rapportage.*

Vanwege het belang van de Hydraulische Randvoorwaarden zijn de kwaliteit, de navolgbaarheid en de reproduceerbaarheid van de op te leveren getallen een belangrijk aandachtspunt tijdens de uitvoering van dit project. Daarom is ruim aandacht besteed aan de controle van de resultaten en de rapportage van de gebruikte methoden.

## 1.3 Leeswijzer en overzicht opgeleverde gegevens

Hoofdstuk 1 beschrijft de achtergrond van het project en geeft een overzicht van de op te leveren producten. In hoofdstuk 2 wordt een beschrijving van de gebruikte WAQUA schematisatie gegeven. Bovendien wordt hier aangegeven voor welke 216 randvoorwaarden berekeningen zijn uitgevoerd. Gezien het belang van de toe te passen stormschematisatie is de beschrijving van dit onderdeel separaat opgenomen in hoofdstuk 3.

Hoofdstuk 4 beschrijft vervolgens de controle van de productieberekeningen voor de waterstanden en de locaties die op basis van deze controle zijn uitgesloten voor het verder verloop van het project.

Voor de bepaling van de golfcondities is voor de twee studiegebieden gekozen voor een verschillende aanpak. In het gebied rondom IJburg worden de golfcondities bepaald met behulp van het golfmodel SWAN en voor de Eemvallei is de methode Bretschneider toegepast. De schematisatie voor IJburg is beschreven in hoofdstuk 5. Hoofdstuk 6 beschrijft beknopt de aanpak voor de Eemvallei. De controle van de golfberekeningen voor beide deelgebieden wordt beschreven in hoofdstuk 7.

Hoofdstuk 8 beschrijft uiteindelijk hoe de HR2006 zijn bepaald en gecontroleerd. Dit hoofdstuk sluit af met een vergelijking tussen HR2006 en HR2001. Als laatste geeft hoofdstuk 9 nog enkele conclusies en aanbevelingen.

Een deel van de resultaten in dit project is enkel digitaal opgeleverd middels de DVD die achterin dit rapport is opgenomen. De rapportage geeft slechts een voorbeeld en beschrijft de conclusies die op basis van de resultaten getrokken zijn. Wel wordt in een aantal gevallen specifiek verwezen naar de animaties en Excel-bestanden die op de DVD zijn opgenomen. Van deze bestanden wordt eveneens een overzicht gegeven.



Het gaat om de volgende digitale bestanden:

- GIS project waarin alle locaties zijn opgenomen die in dit project worden beschouwd (Definitieve\_locaties.apr);
- Figuren voor de controle van de waterstandsberekeningen;
- Figuren voor de controle van de golfberekeningen;
- Figuren voor de vergelijking tussen HR2006 en HR2001;
- Hydra-M database voor de HR2006 voor IJburg;
- Hydra-M database voor de HR2006 voor de Eemvallei zonder invloed van secundaire keringen;
- Hydra-M database voor de HR2006 voor de Eemvallei met invloed van secundaire keringen;
- Hydra-Q database voor de HR2006 voor IJburg (kopie van Hydra-M database);
- Hydra-Q database voor de HR2006 voor de Eemvallei (kopie van Hydra-M database);
- Tabellen met toetspeilen en illustratiepunten voor de gecontroleerde locaties.

Animaties en Excel bestanden die op de DVD zijn opgenomen:

- Verificatie\_aanpassingen.avi, waarin de resultaten zijn opgenomen voor de verschillen tussen aangepaste WAQUA schematisatie en aangeleverde WAQUA schematisatie;
- Effect\_TLSMOOTH.avi, waarin de verschillen zichtbaar zijn voor de twee berekeningen met de verschillende inspelcondities;
- Effect\_TLSMOOTH.xls, waarin de verschillen zichtbaar zijn voor de maximale waterstanden bij verschillende inspelcondities;
- Definitieve\_locaties.xls, waarin alle locaties zijn opgenomen die zijn gedefinieerd in dit project;
- Resultaten\_stormschematisaties\_rev5.avi, waarin de resultaten worden gepresenteerd voor de 7 berekeningen ten behoeve van de stormschematisatie;
- Resultaten\_stormschematisaties\_reductiecoeff.avi, waarin de resultaten worden gepresenteerd voor het bepalen van de reductiecoëfficiënt bij Nijkerk;
- Vergelijk\_stormen\_rev5.xls, waarin de resultaten voor de berekeningen voor de verschillende stormen zijn opgenomen.

Naast bovengenoemde bestanden zijn de volgende producten aan de opdrachtgever opgeleverd:

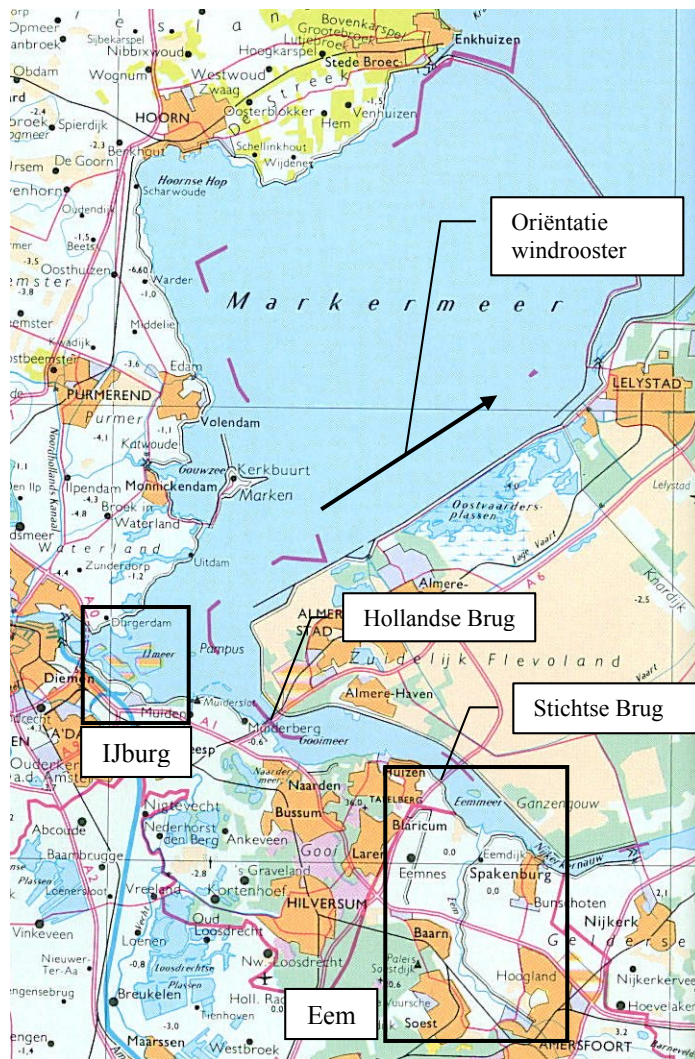
- Bestanden voor de 216 waterstandsberekeningen (SDS-bestanden, 18 DVD's);
- Bestanden voor de 216 golfberekeningen voor IJburg;
- Bestanden voor de 216 golfberekeningen voor Eemvallei;
- Scripts om de figuren voor de controle van de waterstandsberekeningen te genereren met Matlab (paden moeten aangepast worden aan lokaal systeem om scripts te kunnen gebruiken);
- Scripts om de figuren voor de controle van de golfberekeningen te genereren met Matlab (paden moeten aangepast worden aan lokaal systeem om scripts te kunnen gebruiken);
- Hydra-M database voor alle rekenpunten rondom IJburg;
- Hydra-M database voor alle rekenpunten op de Eemvallei zonder invloed van secundaire keringen;

- Hydra-M database voor alle rekenpunten op de Eemvallei met invloed van secundaire keringen;
- Hydra-Q database voor alle rekenpunten rondom IJburg;
- Hydra-Q database voor alle rekenpunten op de Eemvallei;
- Tabellen met  $T_{m0,1}$  en  $T_{m-1,0}$  voor de HR2006 locaties voor IJburg.

## 2 Schematisatie voor de waterstandsberoeeningen

### 2.1 Beschrijving van het studiegebied

Het Markermeer maakt onderdeel uit van het IJsselmeergebied en is in 1976 ontstaan door de aanleg van de Houtribdijk. Het Markermeer staat in open verbinding met het Gooi- en Eemmeer en gaat van daaruit over in het Nijkerkernauw. Voor het bepalen van de HR2006 voor IJburg en de Eemvallei dienen berekeningen voor het totale Markermeer, Gooi- en Eemmeer en Nijkerkernauw systeem als basis. Figuur 2-1 toont een overzicht van het studiegebied waarin de in deze studie beschouwde deelgebieden globaal zijn aangegeven.



Figuur 2-1 Overzicht van het studiegebied

Via sluizen en gemalen staat het systeem in contact met onder andere het IJsselmeer, Noordzeekanaal en het Amsterdam-Rijnkanaal. Het beheer dat wordt gevoerd bij deze sluizen en gemalen is bepalend voor het meerpeil van het Markermeer en de uitwisseling tussen de wateren onderling. De waterbeweging in het systeem wordt hoofdzakelijk veroorzaakt door wind.

Afhankelijk van de combinatie van meerpeil, windrichting en windsnelheid stelt zich een verhang in, waardoor waterstandsverschillen tot enkele meters kunnen optreden; door de geometrie van het systeem is op het Markermeer het verhang het grootst. De snelheden in het Markermeer komen over het algemeen niet boven de 0,5 m/s uit. Door obstakels en vernauwingen kunnen de snelheden in de omgeving van de vernauwingen in het Gooi- en Eemmeer hoger worden, maar met uitzondering van bruggen en dergelijke komen ze niet boven de 1,0 m/s uit. Ook in de omgeving van IJburg blijven de snelheden beperkt. In de Eemvallei stroomt het water in grote delen zelfs helemaal niet. Dit is het gevolg van de secundaire kering die hier aanwezig is. Slechts op de Eem zelf is er duidelijk stroming waar te nemen.

Uit gevoeligheidsberekeningen met het nieuwe WAQUA model blijkt dat de Eemvallei een traag systeem is. Tijdens de storm wordt het water van het Markermeer opgestuwd bij de Stichtse- en Hollandse brug en dit verhang tussen beide bruggen blijft tot enkele uren na de storm intact. Dit heeft tot gevolg dat de hoogste waterstanden op het Gooi- en Eemmeer en de Eem niet tijdens de top optreden, maar tijdens de neergaande flank van de storm.

## 2.2 Aanpassingen aan WAQUA- en Baselineschematisatie

In het kader van het Onafhankelijk Onderzoek Markermeer (OOM-studie) is in 1997 door WL een Delft2D-schematisatie voor het Markermeer gemaakt, waarmee waterstands-berekeningen zijn uitgevoerd [WL | Delft Hydraulics, 1997]. De uitkomsten van deze berekeningen zijn gebruikt voor de vaststelling van de Hydraulische Randvoorwaarden voor het Randvoorwaardenboek 2001 [Rijkswaterstaat, 2001]. In de schematisatie van de OOM-studie ontbreekt echter de monding van de Eem en de Eemvallei en is bovendien de omgeving van IJburg sterk schematisch aanwezig. De door Alkyon en Meander opgeleverde schematisatie is gebaseerd op een WAQUA-schematisatie, die is afgeleid van het oorspronkelijke model dat in de OOM-studie is gebruikt. Deze schematisatie is vervolgens uitgebreid met de monding van de Eem, de Eemvallei, de Eem zelf en de aansluitende buitendijkse gebieden langs het Eemmeer. Daarnaast is de schematisatie van IJburg aangepast. De uitbreiding van de WAQUA-schematisatie is met behulp van Baseline uitgevoerd. Hiertoe is ook de oude WAQUA-schematisatie (de bestaande van Delft2D afgeleide schematisatie) van het Markermeer in Baseline opgenomen. Voor de productieberekeningen is uitgegaan van de WAQUA schematisatie die in april van dit jaar door Alkyon en Meander is opgeleverd [Alkyon & Meander, 2005].

In deze studie dient de door Rijkswaterstaat RIZA opgeleverde schematisatie als uitgangspunt. Er zijn echter nog de volgende aanpassingen aan deze schematisatie doorgevoerd:

- Het bodembestand voor de Eem is op verschillende locaties aangepast:
  - De bodem van de Eem is van -3,2 m+NAP naar -3,8 m+NAP verlaagd.
  - Voor de cellen  $m=294\dots312$ ,  $n=1\dots10$  is de bodem overgenomen uit het door de opdrachtgever aangeleverde bestand 'bodem.v2f\_3'. Dit was nodig omdat in de aangeleverde bodem een verhoging bij de instroom van de Eem aanwezig was. Het nieuwe bodembestand heeft de naam 'bodem.wb1' gekregen, hetgeen is aangepast in de siminp van alle berekeningen.
- De afvoer van de Eem is verplaatst van de Oranjesluizen naar de Balladelaan.
- Zeeburg is geschematiseerd (hoogwatervrij) door schotjes aan te brengen in de schematisatie. Hiervoor is een apart bestand gedefinieerd. Daarnaast is het bestand hwtvrij in de Baseline schematisatie aangepast.
- De in dit project gedefinieerde locaties voor de controle zijn toegevoegd in de betreffende directory. Paragraaf 2.4 beschrijft deze locaties.
- De waarde voor TICVAL is op aangegeven van de opdrachtgever aangepast van 1,00 naar 0,10.
- De inspeeltijd voor de bovenstroomse randvoorwaarde (TLSMOOTH) is aangepast van 0 naar 60 minuten.

## 2.3 Effect van aanpassingen in de schematisatie

Na het doorvoeren van de wijzigingen in paragraaf 2.2 is een berekening uitgevoerd met de aangeleverde instellingen voor de randvoorwaarden. Een aanvullende berekening is uitgevoerd met een Eemafvoer van  $0 \text{ m}^3/\text{s}$  (dit laat specifiek het effect van de Eemafvoer op de resultaten zien). Het doel van de berekeningen is om aan te tonen dat de wijzigingen geen significante invloed hebben op de resultaten. De waterstandsverlopen op de controlepunten voor de berekening voor de oorspronkelijke situatie en de twee genoemde berekeningen zijn zichtbaar in animatie *Verificatie\_aanpassingen.avi*. De animatie laat per frame een locatie zien: de desbetreffende locatie is in de titel weergegeven. De bovenste figuur in de animatie laat het berekende waterstandsverloop zien van de drie berekeningen.

De onderste figuur laat het momentane verschil zien tussen de door Rijkswaterstaat RIZA aangeleverde resultaten van het WAQUA model en de beide berekeningen met aangepaste WAQUA schematisatie. De resultaten geven aan dat het waterstandsverloop over het algemeen niet veel verandert, met uitzondering van de Eemvallei. In de Eemvallei is het effect van de Eem duidelijk zichtbaar. De momentane verschillen tussen de berekeningen zijn in enkele gevallen meer dan 0,50 m. Dit wordt veroorzaakt door een verschuiving van het waterstandsverloop in de tijd als gevolg van de afvoer van de Eem. Deze verschuiving zorgt voor grote momentane verschillen als de berekende waterstand een sterke gradiënt laat zien. Gegeven de overeenkomst in de vorm en amplitude van de waterstandsverlopen worden deze verschillen acceptabel bevonden.

Voor het uitvoeren van de productieberekeningen is ervoor gekozen de berekening niet in te laten spelen en in de eerste drie uur van de storm het debiet op de Eem op te laten lopen van  $0 \text{ m}^3/\text{s}$  naar de gewenste  $75 \text{ m}^3/\text{s}$ , in combinatie met een 'Smoothing time' van één uur.

Omdat in eerste instantie Rijkswaterstaat RIZA uitging van een andere aanpak is een aanvullende berekening gemaakt die de verschillen in aanpak inzichtelijk maakt. Rijkswaterstaat RIZA ging uit van het toepassen van een inspeelperiode van 3 uur, zodat zich een verhang op de Eem kan instellen. Tijdens de storm wordt dan ook de afvoer van de Eem constant op  $75 \text{ m}^3/\text{s}$  gehouden. Beide berekeningen zijn uitgevoerd voor een meerpeil van  $-0,40 \text{ m} + \text{NAP}$ , een windsnelheid van  $42 \text{ m/s}$  en een windrichting van  $300^\circ$ . In de animatie *Effect\_TLSMOOTH.avi* zijn voor alle rekenlocaties op de Eem de absolute waterstanden en het verschil tussen beide berekeningen voor de duur van de storm aangegeven. Daarnaast geeft het Excel bestand *Effect\_TLSMOOTH.xls* een overzicht van de maximale waterstanden voor beide berekeningen en het verschil daartussen. In rood is in dit bestand aangegeven als het verschil in maximale waterstand groter is dan  $0,01 \text{ m}$ .

Het Excel bestand laat zien dat in het algemeen de verschillen in **maximale waterstand** kleiner zijn dan  $0,01 \text{ m}$  (orde 1 à 2 mm). In een aantal gevallen lopen de verschillen in maximale waterstand op tot  $0,03 \text{ m}$  en in twee uitzonderlijke gevallen zijn de verschillen groter dan  $0,05 \text{ m}$ . Het grote verschil op de locaties 352 en 357 wordt veroorzaakt doordat gedurende de gehele berekening beide punten droog staan en aan het einde nog juist onder water lopen. De maximale waterstand treedt hier dus pas aan het einde van de berekening op. De verschillen zijn relatief groot omdat in beide berekeningen het moment van onderlopen iets van elkaar verschilt. Deze verschillen hebben nagenoeg geen invloed op de resultaten van de berekeningen. Ook de verschillen in de orde van  $0,03 \text{ m}$  worden veroorzaakt door juist wel of juist niet droogvallen en hebben derhalve nauwelijks invloed op de eindresultaten.

De animatie laat zien dat de verschillen, zoals verwacht, voornamelijk optreden bij het begin van de storm. Ze worden echter snel kleiner nadat het debiet op de Eem constant is geworden en tijdens de piek van de storm blijven de verschillen in het algemeen beperkt tot  $0,01$  à  $0,02 \text{ m}$ . Indien grotere verschillen zichtbaar zijn, treden die ook op het moment van onderlopen van de desbetreffende locatie. Zodra de locatie verder onderloopt, worden de verschillen kleiner.

Op basis van deze resultaten is in overleg met de opdrachtgever geconcludeerd dat het acceptabel is in de eerste drie uur van de storm het debiet op de Eem op te laten lopen van  $0 \text{ m}^3/\text{s}$  naar de gewenste  $75 \text{ m}^3/\text{s}$ , in combinatie met een ‘Smoothing time’ van één uur.

#### *Aanvullende opmerking*

In een aantal figuren is een foutieve tijdas opgenomen waardoor de resultaten niet zichtbaar zijn. Gezien de beperkte verschillen tussen beide berekeningen is besloten deze figuren niet opnieuw te genereren.

## **2.4 Overzicht randvoorwaarden voor de berekeningen**

Voor het bepalen van de HR2006 is het nodig voor een zeer groot aantal combinaties van meerpeilen en windcondities de waterstanden en golfcondities te bepalen. Gezien het rekenintensieve karakter van WAQUA en SWAN is het niet haalbaar alle wenselijke combinaties door te rekenen. Daarom is het gebruikelijk het aantal combinaties te beperken tot 216 en vervolgens te interpoleren tussen deze resultaten om de uiteindelijke maatgevende belasting te bepalen.

In navolging van de OOM studie [WL | Delft Hydraulics, 1997] en de bepaling van de ontwerprandvoorwaarden voor IJburg [WL | Delft Hydraulics, 1998] zijn de volgende randvoorwaarden gehanteerd:

- Meerpeil 1: - 0,40 m NAP;
- Meerpeil 2: + 0,30 m NAP;
- Meerpeil 3: + 1,30 m NAP.

In combinatie met de windrichting en windsnelheid die staan gegeven in Tabel 2-1.

Tabel 2-1 Overzicht windsnelheden en windrichtingen waarvoor berekeningen moeten worden uitgevoerd.

Windrichting [°]	Windsnelheid [m/s]								
000° - 180° (met een interval van 30°)	15	20	23	26	28	30			
210° - 330° (met een interval van 30°)			22		28	33	36	39	42

In totaal komt het aantal combinaties van randvoorwaarden, en daarmee berekeningen, op 216. Voor zowel de waterstanden als de golven zijn derhalve 216 berekeningen uitgevoerd.

## 2.5 Overzicht van uitvoerlocaties

Binnen dit project dienen hydraulische condities bepaald te worden voor een groot aantal locaties rondom het Markermeer en het Gooi- en Eemmeer, rondom IJburg en in de Eemvallei. Hiertoe zijn drie typen locaties gedefinieerd: rekenlocaties, controlelocaties (beperkte en uitgebreide set) en randvoorwaardenlocaties HR2006. Deze paragraaf geeft een overzicht van de reken- en controlelocaties. Of locaties geschikt zijn om de HR2006 voor te bepalen is afhankelijk van de controle van de waterstands- en golfberekeningen. Deze locaties komen daarom pas in hoofdstuk 8 aan de orde.

De genoemde locaties hebben alle een ander doel. Voor de rekenlocaties worden waterstanden en golven bepaald. De controlelocaties voor de beperkte set dienen slechts om de instellingen van het SWAN model te bepalen. De controlelocaties voor de uitgebreide set worden vervolgens gebruikt om de resultaten van de waterstands- en golfberekeningen in detail te controleren. De randvoorwaardenlocaties HR2006 zijn die locaties die ook daadwerkelijk in het Randvoorwaardenboek 2006 zullen worden opgenomen.

Alvorens de productieberekeningen uit te voeren, zijn de gespecificeerde rekenlocaties gecontroleerd op geografische dekking en geschiktheid voor WAQUA. Daarbij is gekeken of de locaties niet op het land lagen of dat er zich twee locaties in één cel bevonden. Deze controle is uitgevoerd in een GIS/Baseline omgeving. Daarnaast is er gecontroleerd of de controlelocaties geschikt zijn voor het uitvoeren van de voorgeschreven controles. Hierbij is met name gekeken of de dichtheid van de locaties groot genoeg is om de onderlinge consistentie te controleren.

De resulterende set met locaties is in de eerste fase ter goedkeuring aan Rijkswaterstaat RIZA voorgelegd. Na goedkeuring van de set locaties, is deze ten behoeve van de productieberekeningen opgenomen in de Baseline en WAQUA schematisatie, waarbij gebruik is gemaakt van het Arcgis project van de heer Weiland (2005) zoals dat door Rijkswaterstaat RIZA is aangeleverd.

Bijlage A toont in figuren de locaties en nummers voor de beperkte en uitgebreide controleset voor zowel IJburg als de Eemvallei. Uiteindelijk is er voor gekozen de uitgebreide en beperkte controleset voor de Eemvallei gelijk aan elkaar te houden. Voor een meer gedetailleerd overzicht van de locaties met de daarbij behorende locatienummers wordt verwezen naar het ArcView project *Definitieve\_locaties.apr* of het Excel spreadsheet *Definitieve\_locaties.xls*. Hierin zijn ook alle rekenlocaties opgenomen.

Voor de golfberekeningen is op dezelfde locaties uitvoer worden gegenereerd als voor de waterstandsberekeningen.



## 3 Stormschematisatie voor productieberekeningen

### 3.1 Inleiding

In dit project is het streven om de vast te stellen HR2006 voor IJburg en de Eemvallei zo goed mogelijk te laten aansluiten op de waarden die zijn vastgesteld in de OOM-studie, waarbij evidente fouten uit de OOM studie moeten worden verbeterd.

Om dit te kunnen bewerkstelligen zou onder meer dezelfde stormschematisatie gebruikt moeten worden als die in de OOM-studie is toegepast. Deze is echter niet beschikbaar. Er is daarom een nieuwe schematisatie opgesteld. Hierbij geldt de eis dat de schematisatie moet leiden tot modeluitkomsten die de resultaten van de OOM-studie zo goed mogelijk dienen te reproduceren. Door Rijkswaterstaat RIZA is hiervoor een criterium opgesteld van maximaal 0,05 m verschil met de OOM-studie.

Gedurende dit project is echter duidelijk geworden dat de definitie van de storm in de OOM-studie niet altijd aansluit bij het functioneren van het systeem. Zo treden de maximale waterstanden niet op tijdens de piek van de storm, maar pas erna. Een trapeziumvormig verloop van de storm in de tijd zou dus aan te bevelen zijn. Bovendien blijkt uit een analyse van [Geerse, 2005] dat het wellicht beter is een trapeziumvormig verloop toe te passen met een voor- en achterflank van 23 uur en een piek van 2 uur.

Om te bepalen welke stormschematisatie moet worden toegepast is in dit project een aantal deterministische berekeningen uitgevoerd voor het illustratiepunt van locatie dp4.8 Nijkerkersluis. Als randvoorwaarden voor de deterministische sommen worden  $R = 300^\circ\text{N}$ ,  $U_{\text{piek}} = 33 \text{ m/s}$  en een meerpeil van  $-0,40 \text{ m+NAP}$  gebruikt. De resultaten van de deterministische berekeningen zijn vergeleken met de resultaten van de OOM-studie, zoals opgeslagen in de Hydra-M database. Op basis van deze vergelijking is een keuze gemaakt voor de toe te passen stormschematisatie.

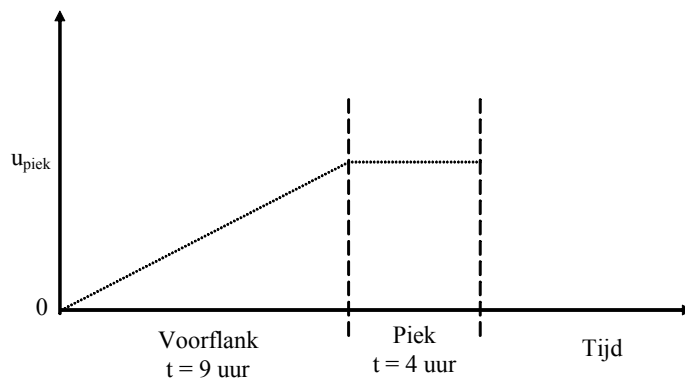
Voor de berekeningen is gebruik gemaakt van het WAQUA model zoals dat beschreven is in hoofdstuk 2.

## 3.2 Beschrijving stormschematisatie OOM-studie

Een beschrijving van de stormschematisatie, zoals gebruikt voor de OOM-studie, is in detail beschreven in [WL | Delft Hydraulics, 1997a]. De belangrijkste kenmerken van de storm zijn hieronder samengevat:

- Verloop windsnelheid

De windsnelheid kent een verloop in de tijd. Hierbij wordt een voorflank gedefinieerd van  $t = 0$  tot  $t = 9$  uur, met een toename in de windsnelheid van 1 m/s tot de piekwindsnelheid. De windsnelheid blijft constant tijdens de piek van de storm, welke 4 uur duurt. Er is geen sprake van een achterflank, de berekening wordt beëindigd aan het einde van de piek van de storm. Figuur 3-1 toont het verloop in de tijd schematisch.



Figuur 3-1 Variatie van de windsnelheid in de tijd tijdens de OOM-studie

- Verloop windrichting

Voor de windrichting wordt voor de hoofdrichtingen  $30^\circ\text{N}$  tot en met  $150^\circ\text{N}$  geen draaiing gedurende de storm aangenomen. Voor de hoofdrichtingen  $180$  tot en met  $360^\circ\text{N}$  wordt een draaiing aangehouden van  $4,4^\circ/\text{uur}$  tijdens de voorflank en  $1,1^\circ/\text{uur}$  tijdens de stormpiek. De initiële windrichting is zodanig gedefinieerd dat de windrichting aan het eind van de voorflank gelijk is aan de hoofdrichting. De windrichting tijdens de voorflank en piek zijn vectorieel geïnterpoleerd. Dat betekent dat de x- en y-vectoren aan het begin en eind van een flank/piek worden bepaald op basis van de op dat moment geldende windrichting. De x- en y-vectoren voor de overige tijdstippen worden bepaald door middel van lineaire interpolatie van de reeds bepaalde x- en y-vectoren. Deze methode is feitelijk incorrect omdat de windrichting daarmee in één uur  $30^\circ$  draait, en de wind dus al na één uur de hoofdrichting heeft.

- Ruimtelijke variatie stormprofiel:

De ruimtelijke variatie van het stormprofiel is zodanig dat rekening wordt gehouden met de grootschalige en kleinschalige ruwheidseffecten, de zogenaamde macro/meso transformatie [WL | Delft Hydraulics, 1997]. Hierbij zijn effecten van bovenwindse objecten meegenomen. Zodoende is het effect van landmassa's in de uitkomsten verdisconteerd.

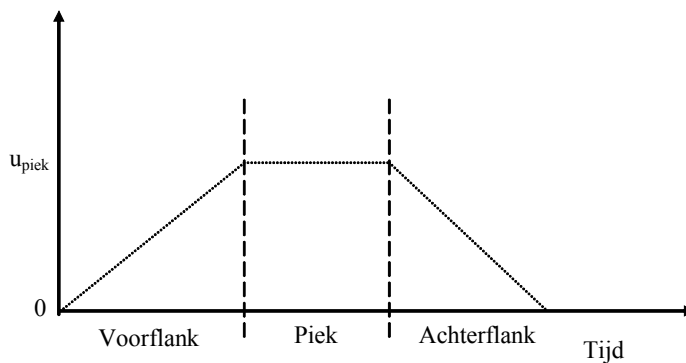
Er wordt opgemerkt dat tijdens de OOM-studie niet de maximale waterstanden zijn uitgevoerd, maar het maximum van de waterstanden op  $t=9$ ,  $t=11$  en  $t=13$  uur. Dit heeft tot gevolg dat de gebruikte maximale waterstand lager is dan de daadwerkelijk berekende waterstand, indien de top van het waterstandsverloop niet op  $t=9$ ,  $t=11$  of  $t=13$  uur valt.

### 3.3 Onderzoek stormschematisatie HR2006

#### 3.3.1 Verschillen ten opzichte van de OOM-studie

Omdat inmiddels is gebleken dat de achterflank ook van belang is, heeft het verloop van de storm een trapeziumvorm. Tijdens de voorflank neemt de windsnelheid lineair toe van 0 m/s naar de piekwindsnelheid. Vervolgens blijft de wind gedurende de duur van de stormpiek constant, waarna de windsnelheid tijdens de achterflank weer afneemt van de piekwindsnelheid naar 0 m/s. De duur van de voor- en achterflank en die van de piek verschilt per som. De door te rekenen piekwindsnelheid is bepaald door de potentiële windsnelheid op 10 meter hoogte naar de open water windsnelheid op 10 meter hoogte te transformeren [De Waal, 2003].

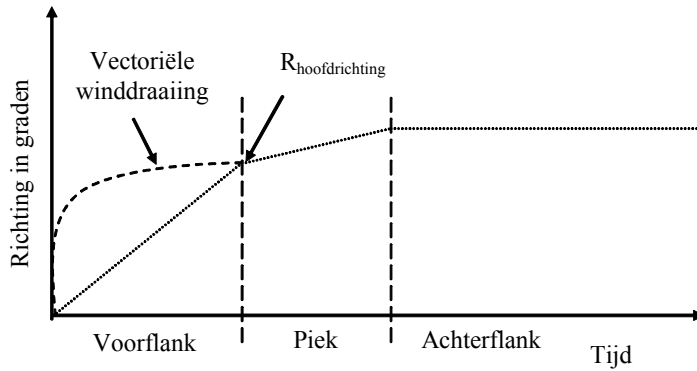
Figuur 3-2 toont het verloop van de windsnelheid.



Figuur 3-2 Variatie van de windsnelheid in de tijd

Het verloop van de windrichting in de tijd is gespecificeerd in  $^{\circ}$ /uur en de windrichting op  $t=0$  is zodanig gekozen dat de windrichting aan het eind van de voorflank gelijk is aan de hoofdrichting. In tegenstelling tot de OOM-studie wordt de draaiing van de wind geïmplementeerd op basis van graden, zodat de storm tijdens de voorflank geleidelijk draait. Dit betekent dat per tijdstip de windrichting wordt bepaald, waarna de x- en y-vectoren van de windsnelheid worden bepaald.

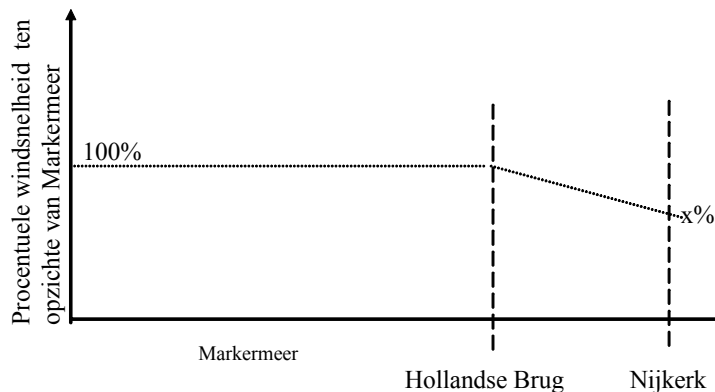
Figuur 3-3 geeft schematisch het verloop van de winddraaiing weer.



Figuur 3-3 Variatie van de windrichting in de tijd

Voor de stormschematisatie is gebruik gemaakt van tijdsafhankelijke ruimtelijke windvelden. De ruimtelijke windvelden zijn geprojecteerd op een rechthoekig rooster waarvan de x-as parallel loopt aan de Oostvaardersdijk; de y-as staat onder een hoek van  $56^\circ$  ten opzichte van het Noorden. De oriëntatie van het rooster is zichtbaar in Figuur 2-1. De windsnelheid vertoont variatie in de ruimte, waarbij voor het Gooi- en Eemmeer een reductie wordt gedefinieerd. De overgang is gelegen bij de Hollandse Brug.

Het gebied ten noordwesten van deze brug heeft een uniforme windsnelheid en in de richting van het zuidoosten neemt de windsnelheid lineair af langs de y-as. Voor de windsnelheid bij Nijkerk is een percentage ( $x\%$ ) van de windsnelheid bij de Hollandse Brug aangehouden; dit verschilt per som. Figuur 3-4 geeft schematisch weer hoe de ruimtelijke variatie is gedefinieerd.



Figuur 3-4 Ruimtelijke variatie van de windsnelheid

### 3.3.2 Overzicht uit te voeren berekeningen

In Tabel 3-1 zijn de specificaties van de stormschematisaties gegeven waarmee de berekeningen zijn uitgevoerd. De stormschematisaties zijn gedurende het project in overleg met Rijkswaterstaat RIZA vastgesteld, op basis van de resultaten van reeds uitgevoerde berekeningen. Er is gestart met een 9-4-9 stormschematisatie omdat deze zo veel mogelijk aansluit bij de stormschematisatie van de OOM-studie. De resultaten van de berekeningen worden in alle gevallen vergeleken met de resultaten van de OOM-studie die zijn opgenomen in de Hydra-M database.

Tabel 3-1 Instellingen voor de berekeningen ten behoeve van de stormschematisatie

Nr	Voorflank		Piek			Achterflank		Nijkerk
	Duur	Winddraai- snelheid	Duur	Winddraai- snelheid	Windsnel- heid*	Duur	Winddraai- snelheid	
1	9	4,4°/uur	4	1,1°/uur	33	9	1,1°/uur	75%
2	9	4,4°/uur	4	1,1°/uur	33	9	0°/uur	100%
3***	9	4,4°/uur**	4	1,1°/uur**	33	9	0°/uur	90%
4***	9	4,4°/uur	4	1,1°/uur	33	9	1,1°/uur	75%
5***	9	4,4°/uur	4	1,1°/uur	33	9	0°/uur	100%
6	23	1,72°/uur	2	0,572°/uur	33	23	0,572°/uur	75%
7	23	1,72°/uur	2	2,2°/uur	33	23	0°/uur	100%

\* de gespecificeerde windsnelheid is de potentiële windsnelheid bij Schiphol

\*\* vectoriële winddraaiing

\*\*\* idem aan 1 en 2, maar zonder Eemafvoer en Eemvallei afgesloten met schotjes

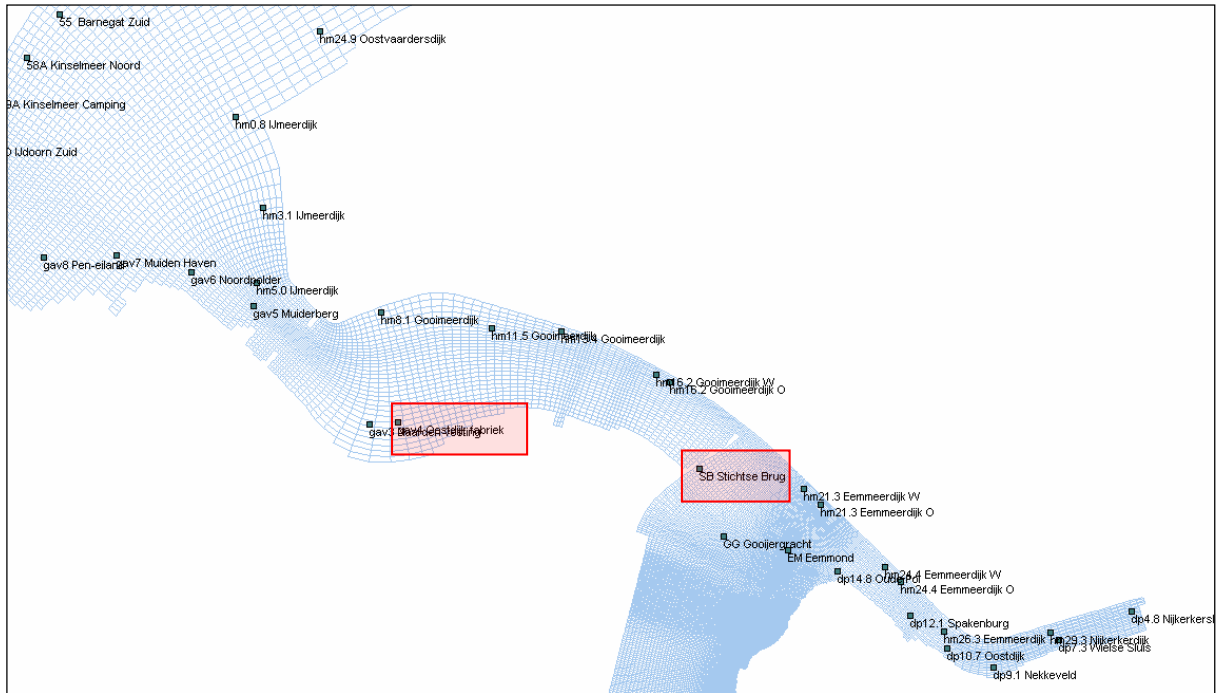
Op basis van bovenstaande berekeningen wordt een keuze gemaakt voor de volgende aspecten:

- Gebruik van stormverloop in de tijd van 9-4-9 of 23-2-23;
- Wel of geen winddraaiing op de achterflank;
- Reductiefactor voor de windsnelheid bij Nijkerk.

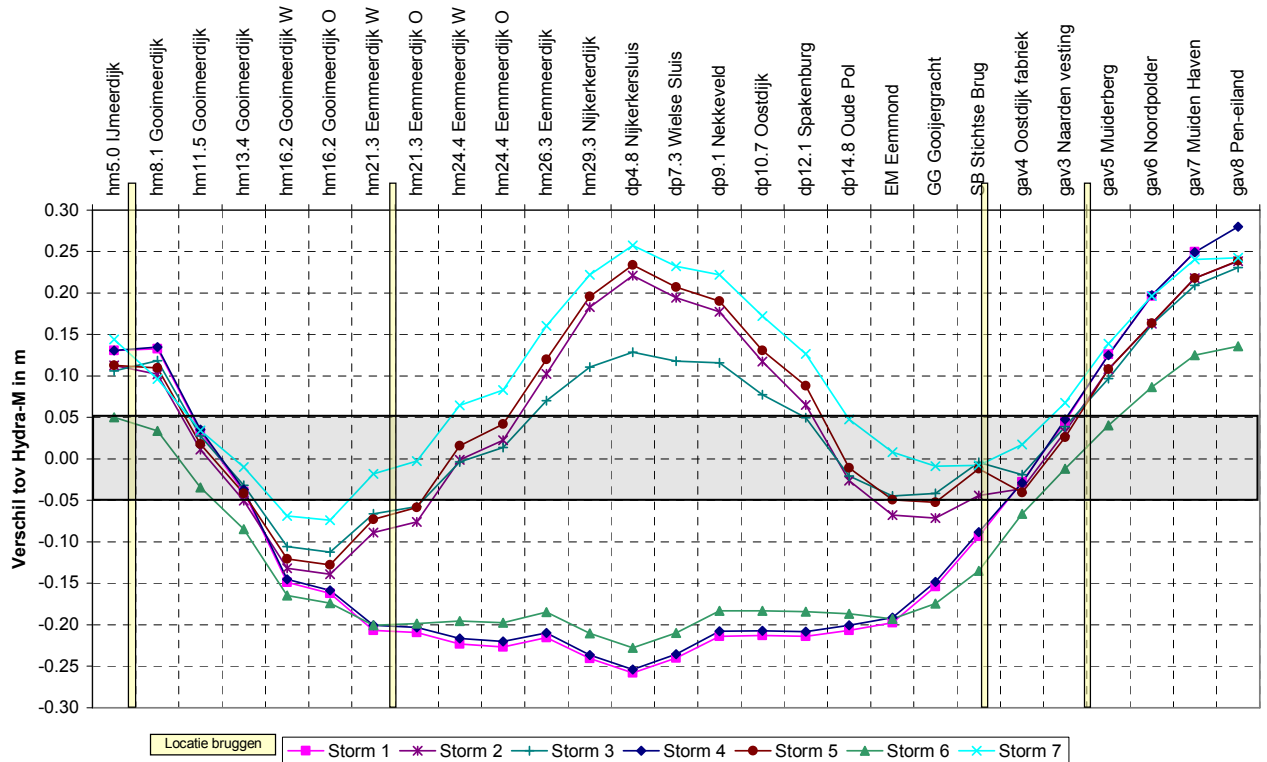
### 3.3.3 Resultaten van de berekeningen

Voor de zeven deterministische stormen zijn WAQUA-berekeningen uitgevoerd. Tijdens deze berekeningen zijn de waterstanden opgeslagen. Deze worden gepresenteerd in de animatie *Resultaten\_stormschematisaties\_rev5.avi*, zoals bijgeleverd bij deze rapportage. De animatie laat per locatie de berekende waterstand zien, Figuur 3-5 toont de gebruikte locaties.

De afbeeldingen laten zien dat twee locaties (SB Stichtse Brug en gav4 Oostdijk fabriek) droogvallen bij een meerpeil van -0,4 m+NAP. In Figuur 3-6 is voor iedere beschouwde stormschematisatie het verschil tussen de maximale waterstanden volgens Hydra-M en de maximale waterstand voor de desbetreffende berekening gepresenteerd. De stormschematisaties worden onderling niet vergeleken.



Figuur 3-5 Locaties waarvoor de WAQUA resultaten worden gepresenteerd (droogvallende locaties)



Figuur 3-6 Verschillen tussen deterministische stormen en de OOM studie zoals opgeslagen in Hydra-M

De volgende algemene conclusies kunnen worden getrokken aan de hand van de uitgevoerde berekeningen:

- Geen van de gebruikte stormschematisaties blijkt in staat te zijn de resultaten volgens Hydra-M te reproduceren binnen het criterium van 0,05 m verschil.
- Ook met een reductie naar 90% bij Nijkerk en vectorieel gemiddelde winddraaiing is het niet mogelijk om de resultaten volgens Hydra-M te reproduceren, terwijl deze stormschematisatie het meest overeenkomt met diegene die is gebruikt in de OOM-studie.
- Een grotere windsnelheid op de randmeren (100% van de windsnelheid op het Markermeer) leidt op het Eemmeer, het Nijkerkernauw en het IJmeer tot een hogere maximale waterstand dan volgens Hydra-M. Voor de overige locaties is de maximale waterstand altijd lager.
- De berekening met stormschematisatie 9-4-9 (vectorieel, 90%) leidt voor de locatie EM Eemmond tot een berekende maximale waterstand die minder dan de gestelde 0,05 m afwijkt van de in de database van Hydra-M opgeslagen berekende maximale waterstanden.
- Een afwijkende winddraaisnelheid tijdens de achterflank heeft geen significante invloed op de eindresultaten.
- De beperkte verschillen tussen berekening 1 en 4 laten zien dat het bergend vermogen van de Eemvallei en de afvoer van de Eem geen significante invloeden hebben op de maximale waterstand op het Gooi- en Eemmeer. Deze conclusie wordt ondersteund door de beperkte verschillen tussen berekening 2 en 5.
- De berekende maximale waterstand op het Markermeer ligt in alle gevallen hoger dan volgens Hydra-M.

Een mogelijke oorzaak voor de structurele verschillen tussen de uitgevoerde berekeningen en de berekeningen die zijn uitgevoerd in het kader van de OOM-studie ligt in de verschillen in de tijdseffecten: uit de berekeningen blijkt dat de randmeren in de uitgevoerde berekeningen minder snel volstromen dan tijdens de eerder uitgevoerde berekeningen. Mogelijke oorzaken voor deze verschillen in tijdseffecten zijn:

- Verschillen in de discretisatie van de tijdsafhankelijke ruimtelijke windvelden.
- Verschillen in de ruwheid en vormgeving van het rekenrooster ter plaatse van de Stichtse en Hollandse Brug.

De volgende onderlinge verschillen tussen de stormschematisaties zijn vastgesteld:

- Er is geen significant verschil in maximale waterstand tussen de 9-4-9 en 23-2-23 stormen. Een 23-2-23 schematisatie levert beperkt hogere waterstanden op in het oosten van het Gooi- en Eemmeer ten opzichte van de 9-4-9 stormschematisaties.
- Voor de simulaties met de windreducties geldt dat een 23-2-23 schematisatie beperkt lagere waterstanden oplevert in het westen van het Gooi- en Eemmeer ten opzichte van de 9-4-9 stormschematisaties.
- De winddraaiing op basis van graden in plaats van vectoren leidt initieel tot een waterstandsval op het Gooi- en Eemmeer. Het toepassen van vectorieel draaiing is een evidente fout in de OOM-studie en is derhalve niet gebruikt voor de productiesommen.

- De berekeningen waarin de reductiefactor voor de windsnelheid wordt gevarieerd, geven aan dat het mogelijk is om met een reductiefactor tussen de 75% en 100% bij Nijkerk een maximale waterstand te berekenen binnen het gestelde criterium.

Op basis van de bovengenoemde conclusies is besloten om een 9-4-9 stormschematisatie te gebruiken. Een 23-2-23 schematisatie leidt niet tot significante verbetering en de 9-4-9 storm is overeenkomstig de aanpak in de OOM-studie. Daarnaast wordt gekozen voor winddraaiing conform de OOM-studie, dat wil zeggen, zonder winddraaiing op de achterflank. Er is onvoldoende informatie beschikbaar om het toepassen van winddraaiing op de achterflank te kunnen onderbouwen.

De reductiecoëfficiënt voor Nijkerk dient zodanig gekozen te worden dat de resultaten van de OOM-studie op de locatie EM Eemmond, bij toepassing van vectoriele winddraaiing en zonder de Eemvallei, binnen de gestelde criteria liggen. In dat geval wordt de schematisatie uit de OOM-studie het meest benaderd. Hiertoe is berekening 3 vergeleken met de resultaten van de OOM-studie. Animatie *Resultaten\_stormschematisaties\_reductiecoeff.avi* presenteert de berekende waterstandsverlopen voor de berekening met vectoriële winddraaiing en 90% procent van de potentiële windsnelheid bij Nijkerk. De resultaten laten zien dat het waterstandsverloop op het Gooi- en Eemmeer vertraagd reageert op de windsnelheid. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat er een beperkte hoeveelheid water de randmeren in kan stromen.

### 3.4 Toe te passen stormschematisatie HR2006

Voor het uitvoeren van de productieberekeningen zijn de instellingen toegepast zoals deze worden gepresenteerd in Tabel 3-2.

Tabel 3-2 Instellingen OOM studie en HR2006

		OOM-studie	HR2006
Voorflank	Duur	9 uur	9 uur
	Winddraaiing	39,6°	39,6°
	Interpolatie winddraaiing	vectorieel	graden
	Start windsnelheid	1 m/s	0 m/s
	Eindwindsnelheid	piekwind	piekwind
Piek	Duur	4 uur	4 uur
	Winddraaiing	4,4°	4,4°
	Interpolatie winddraaiing	vectorieel	graden
	Start windsnelheid	piekwind	piekwind
	Eindwindsnelheid	piekwind	piekwind
Achterflank	Duur	n.v.t.	9 uur
	Winddraaiing	n.v.t.	0°
	Interpolatie winddraaiing	n.v.t.	graden
	Start windsnelheid	n.v.t.	piekwind
	Eindwindsnelheid	n.v.t.	0 m/s
Windsnelheid	Ruimtelijke verdeling	macro/meso windvelden	lineair Hollandse Brug naar Nijkerk (90%)
	Transformatie $U_p \rightarrow U_{ow}$	WL (1997)	Hydra-B



Ter vergelijking zijn in deze tabel tevens de instellingen zoals deze zijn aangegeven in de rapportage van de OOM-studie gepresenteerd. Naast de verschillen in de instellingen voor het genereren van de windvelden is er een significante verbetering aangebracht in het rekenrooster [Alkyon en Meander, 2005] en zijn enkele beperkte wijzigingen doorgevoerd in de WAQUA schematisatie, zoals vermeld in hoofdstuk 2. Kort samengevat omvat de stormschematisatie de volgende wijzigingen:

- Een verbetering van de definitie van de winddraaiing in de voorflank en gedurende de piek van de storm.
- Het toevoegen van een achterflank in de beschrijving van de storm, omdat in werkelijkheid de maximale waterstanden na de piek van de storm optreden.
- Het wijzigen van de manier waarop de ruimtelijke variatie van de wind is gedefinieerd. Doordat de gebruikte stormschematisatie in detail beschreven is in dit rapport, is tevens de reproduceerbaarheid gewaarborgd.

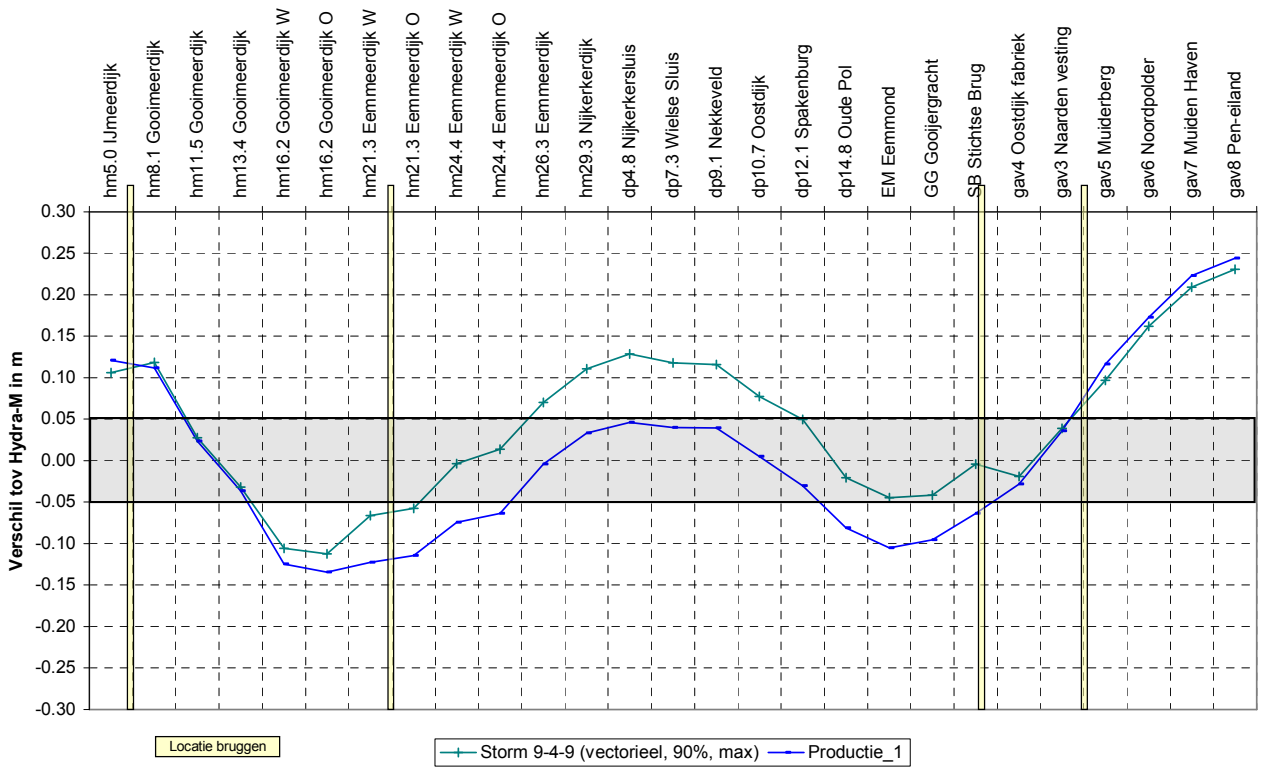
De resultaten van de stormschematisatie met de instellingen die zo veel als mogelijk aansluiten bij de OOM-studie leiden voor een groot aantal, maar niet alle, locaties tot een reproductie van de resultaten van de OOM-studie (zoals ook opgenomen in Hydra-M) binnen de door Rijkswaterstaat RIZA gestelde criteria. Dit wordt veroorzaakt doordat de openingen in de bruggen als gevolg van de gewijzigde stormschematisatie minder water doorlaten waardoor de waterstanden op het Gooi- en Eemmeer lager zijn dan voorheen.

Om zo veel als mogelijk aan te sluiten bij de waterstanden zoals deze zijn bepaald in de OOM-studie is het nodig de wind te reduceren op het Gooi- en Eemmeer. Hiervoor wordt een reductiecoëfficiënt van 90% toegepast. Omdat de stormschematisatie op een aantal punten verbeterd is, wordt het toepassen van deze reductiecoëfficiënt acceptabel bevonden.

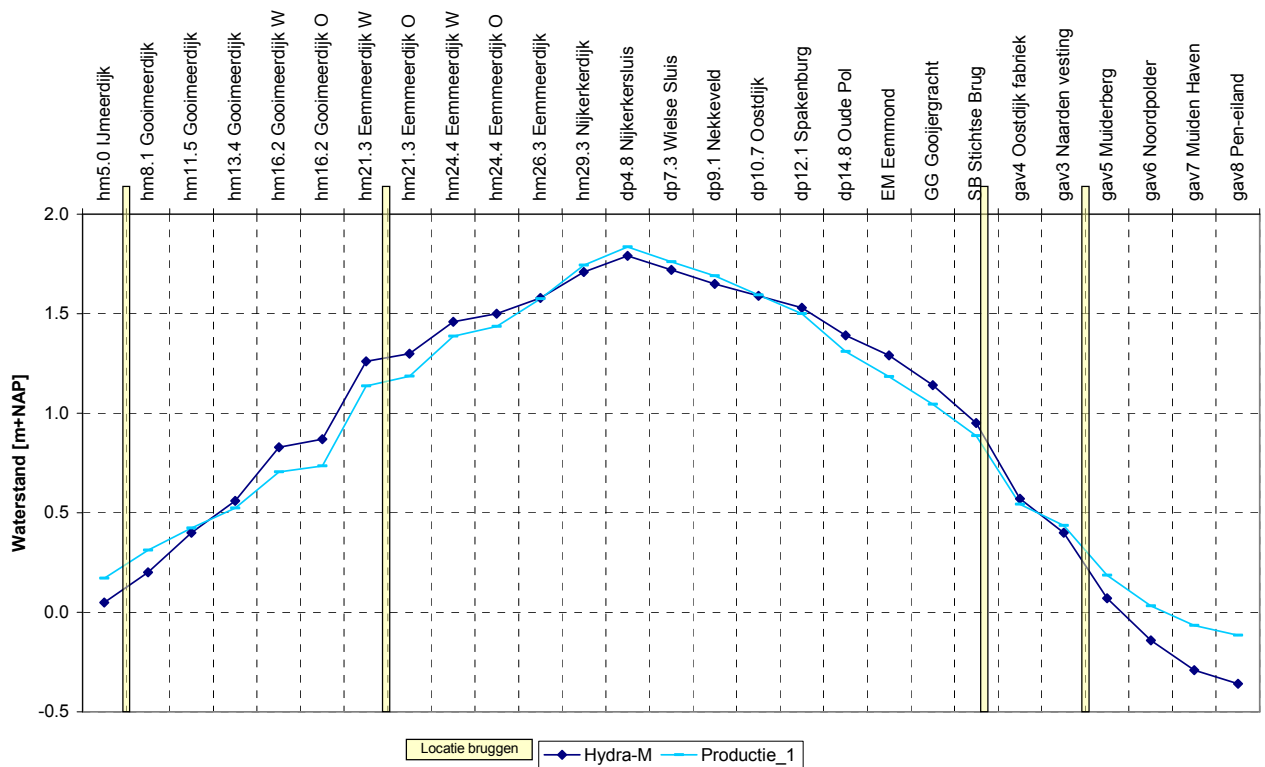
Ter verificatie van bovenstaand punt is ook een berekening uitgevoerd met de reductie coëfficiënt van 90% bij Nijkerk voor een stormschematisatie van 9-4-9 met correcte winddraaiing op tijdens de voorflank/piek en geen winddraaiing tijdens de achterflank. Dit zijn de instellingen die tevens gebruikt zijn voor de productieberekeningen. Verder zijn zowel de Eemvallei als de afvoer van de Eem meegenomen in de schematisatie. In Figuur 3-7 zijn de verschillen tussen de berekende maximale waterstanden voor de productieberekening en Hydra-M gepresenteerd.

Animatie *Resultaten\_stormschematisaties\_reductiecoeff.avi* presenteert de berekende waterstandsverlopen voor de locaties in Gooi- en Eemmeer. Zowel in de animatie als in de afbeelding zijn de resultaten van de vectoriële som opgenomen. Figuur 3-8 toont de absolute waterstanden voor de productieberekening en de resultaten volgens OOM.

De animatie en de afbeelding laten zien dat de toepassing van de correcte winddraaiing (op basis van graden in plaats van vectoren) leidt tot minder opwaaiing dan de vectoriële winddraaiing. Dit is te verklaren door het feit dat de windrichting bij vectoriële windrichting eerder de windrichting van de piek bereikt. Hierdoor stroomt er gedurende langere tijd water de Randmeren in. Bij correcte winddraaiing verloopt het draaien van de wind gelijkmatiger en ontstaat er in een later stadium van de storm een 'stationaire' situatie.



Figuur 3-7 Verschillen tussen berekening met productie-instellingen en de OOM studie zoals opgeslagen in Hydra-M



Figuur 3-8 Absolute waterstanden voor de berekening met productie-instellingen en volgens de OOM studie zoals opgeslagen in Hydra-M

## 4 Productieberekeningen voor waterstanden

Om de HR2006 te kunnen bepalen moeten in totaal 216 waterstandsberekeningen uitgevoerd worden. Voor deze berekeningen zijn de instellingen gebruikt zoals aangegeven in het voorgaande hoofdstuk. Dit rapport beschrijft de resultaten van deze berekeningen niet in detail, maar geeft aan hoe de controle is uitgevoerd en welke locaties worden afgekeurd, omdat de WAQUA resultaten hier niet betrouwbaar zijn. De resultaten van de WAQUA berekeningen zijn aan de opdrachtgever opgeleverd in de vorm van de SDS-bestanden van de berekeningen.

### 4.1 Controle methode waterstandsberekeningen

Bij de controle van de waterstandsberekeningen wordt gekeken naar de fysische en de numerieke juistheid van de berekeningen. De controle heeft een tweeledig doel:

1. Identificeren en eventueel afkeuren van foutieve individuele berekeningen;
2. Identificeren en eventueel uit te sluiten locaties voor het vervolg van het bepalen van de Hydraulische Randvoorwaarden.

De controle is uitgevoerd voor alle locaties uit de uitgebreide controle set voor zowel IJburg als de Eemvallei en de locaties op de as van de Eem.

#### 4.1.1 Te controleren parameters

Afwijkende resultaten moeten verklaarbaar zijn vanuit de lokale omstandigheden.

De controle van de waterstandsberekeningen richt zich voornamelijk op de parameters waterstand (zowel momentaan als maximaal) en stroomsnelheid, waarbij de volgende aspecten nadrukkelijk aan de orde komen:

- Fysische verklaarbaarheid van waterstanden;
- Consistentie ten opzichte van omliggende rekenpunten;
- Aanwezigheid van spikes in waterstandsvelden;
- Realiteitsgehalte van de stroomsnelheden;
- Numerieke instabiliteiten en gevolgen voor waterstanden.

In de oorspronkelijke opzet was aangegeven dat voor de controle van de waterstandsberekeningen kwantitatieve criteria zouden worden gedefinieerd voor de acceptatie van de resultaten. Tijdens de controle is gebleken dat het voor de controle van de waterstandsberekeningen niet zinvol is dergelijke eisen te definiëren. In de meeste gevallen zijn de verschillen in waterstand of stroomsnelheid ten opzichte van twee locaties namelijk te verklaren vanuit de lokale omstandigheden. Bovendien is het sterk afhankelijk van het te beoordelen deelgebied en de randvoorwaarden welke verschillen in waterstand of stroomsnelheid kunnen optreden.

Daarom is na overleg met de opdrachtgever besloten voor iedere berekening afzonderlijk te bepalen of de uitschieters in de resultaten te verklaren zijn op basis van de lokale omstandigheden.

De controle heeft zich verder gericht op de kwalitatieve aspecten, waarbij ruim aandacht is besteed aan de te verwachten trends in de resultaten. Nemen op de te verwachten benedenwindse locaties de waterstanden toe bij toenemende windsnelheid? Nemen de waterstanden toe in de richting van de wind? Sluit het verhang in de waterstand aan bij de windrichting?

Voor de numerieke juistheid is in eerste instantie gekeken of de berekeningen op de juiste manier zijn afgerond. Daarnaast is het verloop in de tijd van de waterstand en de stroomsnelheid gebruikt om te zien of daar onlogische sprongen zichtbaar waren, hetgeen zou kunnen duiden op numerieke instabiliteiten.

Locaties kunnen afgekeurd worden omdat de resultaten van de waterstandsberekeningen op dat punt niet betrouwbaar zijn. Voor de afgekeurde locaties zijn in het vervolg van de studie wel de golfcondities bepaald, maar deze zijn niet meer gecontroleerd.

#### **4.1.2 Beschrijving en uitleg figuren**

Voor de controle van de waterstandsberekeningen zijn voor iedere berekening voor de vier deelgebieden Markermeer, IJburg, Eemvallei en de as van de Eem de volgende figuren op één pagina samengevoegd:

- Waterstand;
- Waterdiepte;
- Stroomsnelheid in x-richting;
- Stroomsnelheid in y-richting;
- Stroomsnelheid;
- Maximale waterstand.

Voor alle parameters worden de waarden op  $t = 13$  uur in de figuren opgenomen. Omdat de maximale waterstand niet per definitie op dat tijdstip optreedt, is deze parameter toegevoegd aan de figuren. Voor ieder van de deelgebieden wordt de controle uitgevoerd voor de uitgebreide set controlelocaties. In Bijlage A zijn deze locaties zichtbaar.

Daarnaast is in Bijlage B een voorbeeld zichtbaar van het resultaat. Voor een meerpeil van  $0,30 \text{ m+NAP}$ , een windsnelheid van  $30 \text{ m/s}$  en een windrichting van  $60^\circ$  worden voor de omgeving van IJburg de genoemde parameters gepresenteerd. Omdat WAQUA in drooggevallen punten de bodemhoogte als waarde geeft, is in de figuren door middel van een kruis aangegeven als het een droog punt betreft. In alle overige gevallen is de waarde aangegeven door middel van een driehoek.

Voor de volledigheid geeft Bijlage A in tabelvorm de namen en mn-coördinaten van de locaties. Tevens is in deze tabellen aangegeven welke plaatsaanduiding is toegepast in de figuren.

Voorts worden voor alle berekeningen het ruimtelijke waterstandsveld en het ruimtelijke beeld van de snelheid gepresenteerd op het tijdstip  $t = 13$  uur. Een voorbeeld van deze figuur is eveneens zichtbaar in Bijlage B. Als laatste wordt voor 10 locaties het verloop in de tijd van de waterstand en de stroomsnelheid gepresenteerd. Tabel 4-1 toont de locaties en Bijlage B geeft een voorbeeld.

Tabel 4-1 Overzicht van de 10 locaties waarvoor het verloop in de tijd wordt gepresenteerd

Locatie	Gebied	m-coörd.	n-coörd.	x-coörd.	y-coörd
1	Nijkerkersluis	426	522	160277.4	474683.4
2	Eemmond	301	498	151157.3	476063.9
3	Eem (Eem_contr_uitgebr_13)	297	226	149610.2	469206.3
4	Amersfoort	303	5	154023.0	464275.5
5	IJburg (IJb_cont_uitgebr_101)	94	483	131374.0	484145.0
6	IJburg (IJb_cont_uitgebr_114)	81	502	130910.0	487169.0
7	Zeeburg / Oranjesluizen (Zeeburg_4)	58	478	126445.8	487652.6
8	Krabbersgatsluizen	23	609	147907.8	522372.5
9	Houtribsluizen	100	583	158271.8	503655.1
10	Markermeer midden	57	566	145002.2	506001.1

Op de DVD met de digitale figuren staan de figuren met een vaste schaalverdeling op de y-as. In de directory 'Figuren\_met\_locaties' staan de figuren voor ieder van de deelgebieden en in de directory 'Figuren\_ruimtelijk\_beeld\_tijd' staan de figuren met het ruimtelijk waterstands- en snelheidsveld en het verloop in de tijd op de 10 locaties.

## 4.2 Controle waterstandsberekeningen

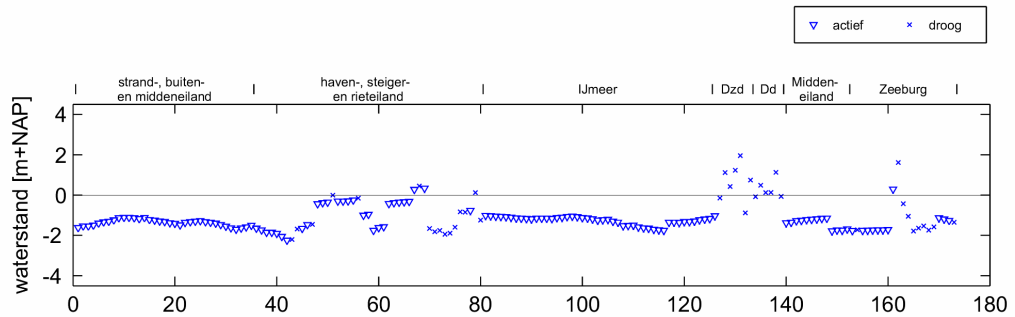
Alvorens de daadwerkelijke controle voor de genoemde parameters te beginnen is gecontroleerd of alle berekeningen op de juiste wijze zijn afgerond. Hiertoe is gecontroleerd of in alle waqpro-m.\* bestanden de opmerking 'SIMONA – programm ended successfully' voorkomt. Dit was voor alle berekeningen het geval. Daarnaast is in geen van de figuren met het verloop van de tijd een onrechtmatigheid geconstateerd ten aanzien van de beschikbare informatie. Op basis van deze beide punten is geconcludeerd dat alle berekeningen op de juiste wijze zijn uitgevoerd.

### Fysische verklaarbaarheid van waterstanden

In de uiteindelijke presentatie van de figuren is er voor gekozen het Froude-getal niet te laten zien. Voor alle berekeningen geldt dat het Froude-getal op de gekozen locaties ruim onder de één blijft en dat er dus nergens superkritische stroming optreedt. Uit de ruwe data blijkt dat in een beperkt aantal gevallen het Froude-getal iets hoger is, maar dat heeft te allen tijde te maken met droogval.

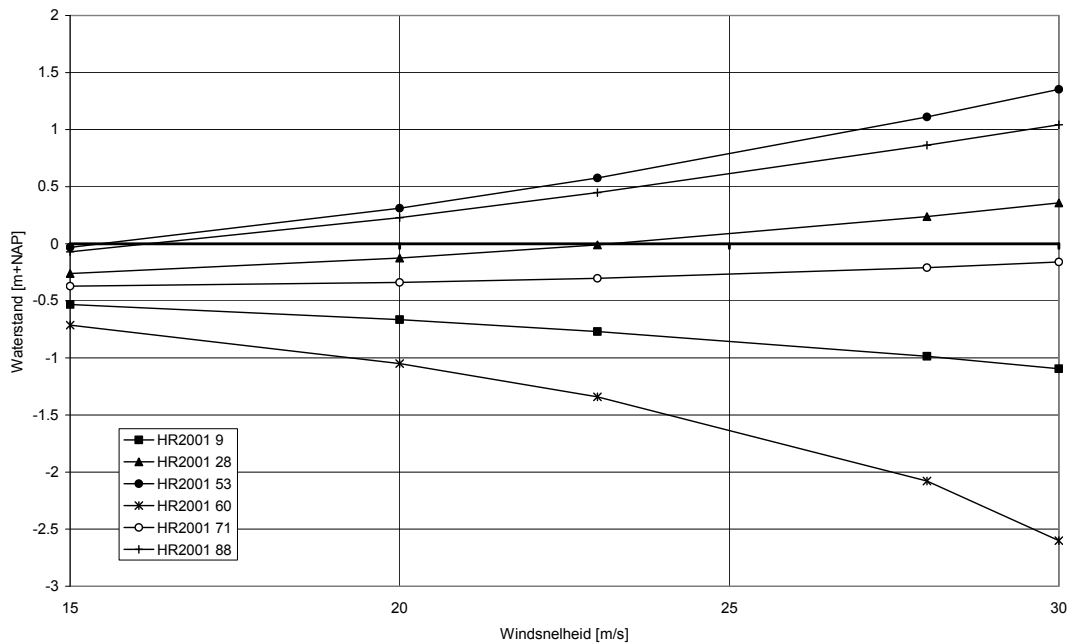
De figuren laten in het algemeen een logisch verloop van de waterstanden zien. Hoewel het verloop rondom het Haven-, Steiger- en Rieteiland en in de omgeving van Zeeburg bij relatief lage meerpeilen grillig kan zijn als de wind uit het zuiden of westen komt. Dit is een rechtstreeks gevolg van de geometrie ter plaatse. Naast elkaar liggende punten in de controlebestanden liggen in werkelijkheid rondom de eilanden. Ter illustratie toont Figuur 4-1 de waterstanden in de omgeving van IJburg en Zeeburg voor de berekening met een meerpeil van 0,30 m+NAP, en een wind met snelheid 28 m/s en richting 240°.

Door de smalle doorgang tussen de eilanden en de vaste oever én lokale obstakels zoals de dam, verloopt de waterstand in de tijd in dit gebied anders dan aan de zuidoost- en noordoostzijde van de eilanden.



Figuur 4-1 Voorbeeld van het grillige verloop van de waterstanden in de omgeving van Zeeburg en IJburg

Voor het overige vertonen de waterstanden de te verwachten trends. Bij toenemende windsterkte nemen de waterstanden op de diverse locaties volgens verwachting toe of af, hetgeen voor een aantal locaties uit de controle set voor HR2001 wordt geïllustreerd in Figuur 4-2. Voor een overzicht van de locatienummers wordt verwezen naar Bijlage A-1. De locaties waarvoor de waterstanden afnemen liggen aan de bovenwindse zijde en die waarvoor ze toenemen aan de benedenwindse zijde.



Figuur 4-2 Trend in waterstanden bij toenemende windsterkte bij een meerpeil van -0,40 m+NAP en een wind met richting 30°

De figuren met het ruimtelijk beeld van de waterstanden laten zien dat in alle gevallen het juiste verhang over het gebied wordt ingesteld.

Op de as van de Eem wordt in het grootste deel van de berekeningen een verhang over de totale lengte van de rivier van circa 0,80 m berekend. Dit sluit niet geheel aan bij een eerdere studie naar de hoogwaterstanden op de Eem [WL | Delft Hydraulics, 2000] waarin met behulp van SOBEK het verhang op circa 0,30 m is bepaald. De verschillen kunnen verklaard worden door de manier waarop de randvoorwaarden gedefinieerd zijn en door het verschil tussen 1D- en 2D-modellering. In het SOBEK model wordt de afvoer op de Eem bepaald door de neerslag, terwijl in de huidige aanpak een naar verhouding hogere afvoer op de rand van het model staat. Door deze relatief hoge afvoer op de bovenstroomse rand van het model zijn de waterstanden in het bovenstroomse deel van de Eem ook relatief hoog. Daar komt bij dat de waterstanden in het gebied beïnvloed worden door het onderlopen van de gebieden achter de secundaire keringen. In het SOBEK model is dit onderlopen op eenvoudige wijze geschematiseerd, terwijl in de huidige aanpak dit gebied in detail in de 2D schematisatie is opgenomen. Het is redelijk aan te nemen dat met de huidige aanpak het vollopen van de gebieden achter de secundaire keringen beter geschematiseerd is.

### **Consistentie ten opzichte van omliggende rekenpunten**

In het algemeen is de consistentie ten opzichte van omliggende rekenpunten groot. In gevallen dat dat niet zo is, is dat altijd te verklaren vanuit de lokale omstandigheden. Vaak is het ook een gevolg van de manier waarop het gebied geschematiseerd is. Een voorbeeld van een punt dat op het eerste gezicht niet consistent lijkt, is de kleinere waterdiepte in locatie 33 op de Eem. Dit kan echter verklaard worden doordat de rivier op dat punt smaller is en het controlepunt relatief dicht tegen de oever aanligt. Door interpolatie van de bodemgegevens ligt de bodem op die locatie daarom hoger dan op de overige locaties, waardoor de waterdiepte kleiner is.

De sprong in de waterstanden voor de figuren van het Markermeer wordt veroorzaakt door de keuze van de nummering van de locaties.

Voor de omgeving van Zeeburg en Ijburg vertonen de waterstanden een grilliger verloop, waardoor de resultaten minder consistent lijken. De verklaring hiervoor is reeds aan de orde gekomen bij de beschrijving van de fysische verklaarbaarheid. In geen van de berekeningen is geconstateerd dat de berekende resultaten niet kloppen.

In de richting van de Hollandse brug vertonen de waterdieptes nogal eens uitschieters. Dit is te verklaren door de aanwezigheid van de vaargeul. Lokaal is hierdoor de waterdiepte groter. Daar komt bij dat de waterstand op die punten een glad verloop vertoont.

### **Aanwezigheid van spikes in waterstandsvelden**

De figuren voor het Markermeer en Gooi- en Eemmeer en de rivieras van de Eem vertonen geen spikes in de waterstanden.

De waterstanden in de figuur voor de complete Eemvallei vertonen met name veel droge punten aan de westzijde. Dit is echter in overeenstemming met de verwachtingen. Voor een aantal berekeningen is het verloop in de tijd van de waterstanden bestudeerd om te zien of de resultaten voor het westelijk deel van de Eemvallei betrouwbaar zijn. Dit blijkt het geval te zijn.

Daarnaast lijken de eerste vier punten in de Eemvallei nogal eens af te wijken van de verwachtingen, maar dit komt met name door de locatie van deze punten. Ze liggen loodrecht op de monding van de Eem waardoor de waterstand meer beïnvloed wordt door het meer dan door de rivier.

Voor Zeeburg zijn met uitzondering van twee punten geen spikes in de waterstanden zichtbaar. Het gaat hierbij om de twee locaties (nummer 9 en 10) op de uiterste noordoostelijke hoek van Zeeburg. De waterstandsresultaten voor deze twee punten lijken niet betrouwbaar.

De waterstanden bij IJburg vertonen een grilliger verloop. Als de waterstanden bij IJburg hoog genoeg zijn om droogvallen te voorkomen is er geen probleem. Maar zodra de waterstanden lager worden, komt het voor dat in een aantal punten toch een waterstand wordt berekend. Dit treedt met name op bij de locaties langs de Diemerzeedijk achter het Haveneiland. De resultaten voor de maximale waterstanden zijn op deze punten derhalve niet betrouwbaar.

### **Realiteitsgehalte van de stroomsnelheden**

In het algemeen zijn de stroomsnelheden laag. Zeker in de omgeving van IJburg en Zeeburg komen de stroomsnelheden vaak niet boven de 0,5 m/s. In geen van de berekeningen zijn snelheden geconstateerd die niet overeenkomen met de verwachtingen.

Opvallend is dat de grootte en de richting van de stroomsnelheid op de Eem sterk afhankelijk is van de windrichting en windsnelheid. In het geval van sterke noordenwind is de invloed zo groot dat de waterstand op het Gooi- en Eemmeer de condities op de Eem domineert. In het benedenstroomse deel van de Eemvallei stroomt het water de Eem op.

Daarnaast valt het op dat de stroomsnelheden aan de bovenstroomse zijde van de Eem relatief hoog zijn. De Eem is hier smal waardoor de stroomsnelheden op kunnen lopen. Voor het overige laten de ruimtelijke beelden van de snelheden duidelijk de geometrie van het gebied zien. In de smalle openingen van de bruggen loopt de snelheid op en bovendien zijn de vaargeulen duidelijk zichtbaar.

### **Numerieke instabiliteiten en gevolgen voor waterstanden**

In de gecontroleerde berekeningen zijn geen incorrecte waterstanden ten gevolge van numerieke instabiliteiten geconstateerd.

## **4.3 Conclusies op basis van controle van de waterstandsberekeningen**

Het doel van de controle was te bepalen of het nodig was individuele berekeningen af te keuren en om te bepalen of locaties afgekeurd moesten worden voor het bepalen van de Hydraulische Randvoorwaarden 2006.



In het algemeen kan gesteld worden dat de waterstandsberekeningen correct zijn uitgevoerd. De berekeningen zijn alle tot een goed einde gekomen en er zijn geen numerieke instabiliteiten geconstateerd. Er is daarom geen reden individuele berekeningen af te keuren. Hieronder worden per deelgebied de conclusie besproken ten aanzien van de locaties en wordt aangegeven of locaties zijn afgekeurd voor het verdere verloop van de studie.

### **Markermeer**

De resultaten voor het Markermeer en het Gooi- en Eemmeer vertonen in alle gevallen logische resultaten en er is geen reden controlelocaties voor deze set van punten af te keuren.

### **IJburg**

Zoals geconstateerd zijn de resultaten voor IJburg in grote lijnen betrouwbaar. Het zo nu en dan grillige verloop kan logisch verklaard worden door de geometrie van het gebied en is geen reden voor afkeuren van individuele berekeningen of locaties.

Een uitzondering daarop wordt gevormd door de resultaten voor een aantal locaties langs de Diemerzeedijk achter het Strandeiland. De hoge waterstanden die daar optreden bij lage windsnelheden zijn niet realistisch. Daarom zijn voor IJburg de volgende locaties rondom het Haven-, Steiger en Rieteiland in overleg met de opdrachtgever afgekeurd in het verdere verloop van de studie:

- Locaties 131, 132 en 133 volgens tabel A-2;
- Locaties 67, 68 en 69 volgens tabel A-2.

Daarnaast moet bij de controle van de golfberekeningen extra aandacht worden besteed aan de resultaten rondom IJburg. De geometrie in dit gebied is erg onregelmatig en de resultaten kunnen hierdoor op het eerste oog afwijken van hetgeen verwacht wordt. Met name op locaties tussen eilanden, waar maar een beperkt aantal rekencellen beschikbaar is.

### **Zeeburg**

In het algemeen zijn de resultaten rondom Zeeburg logisch. Alleen twee punten op de noordoostelijke hoek van Zeeburg vertonen vaak een afwijking ten opzichte van het te verwachten patroon. Daarom worden de punten 9 en 10 bij Zeeburg afgekeurd voor het verdere verloop van de studie.

### **Eemvallei**

De resultaten voor de Eemvallei vertonen weinig tot geen onrechtmatigheden. Wel is opvallend dat voor een groot aantal combinaties van wind- en meerpeil het westelijk deel van de vallei droog staat. Onder bepaalde omstandigheden staat hier wel water, maar de controlepunten liggen veelal buiten dit gebied dat onder water komt te staan. De resultaten zijn echter wel logisch dus er is geen reden om controlelocaties af te keuren.

## 5 Golfcondities voor IJburg

### 5.1 SWAN schematisatie voor IJburg

#### 5.1.1 Rekenrooster en rekenresolutie

Voor de schematisatie is uitgegaan van de aanpak zoals voorgesteld door [Witteveen+Bos, 2004a]. In deze aanpak wordt slechts een deel van het Markermeer doorgerekend om rekentijd te besparen. Het Markermeer wordt afgekapt tussen Marken en de Oostvaardersplassen. Op de modelrand worden golfrandvoorwaarden opgelegd zoals deze zijn opgeslagen in de Hydra-M database [Rijkswaterstaat, 2001]. De rekenresolutie voor het gereduceerde Markermeermodel is 160 m, conform [Bottema, 2004].

Het gereduceerde Markermeermodel is niet geschikt voor het bepalen van de golfrandvoorwaarden in IJburg vanwege de resolutie van 160 meter; om met voldoende nauwkeurigheid de eilanden van IJburg te kunnen schematiseren is een fijnere resolutie nodig dan 160 m. Er is gekozen voor het toepassen van een genest rekenrooster met een resolutie van 20 m. Deze resolutie wordt voldoende geacht omdat (i) de bodemvariaties in de directie omgeving van IJburg beperkt zijn, (ii) de resolutie aansluit bij de resolutie van de WAQUA schematisatie en (iii) de schematisatie van de watergangen tussen de eilanden nog net mogelijk is.

Zowel het gereduceerde Markermeer rekenrooster als het geneste IJburg rooster, zijn (in tegenstelling tot het voorstel in [Witteveen+Bos, 2004a])  $+34^\circ$  t.o.v. het noorden gedraaid (tegen de klok in). Door deze draaiing komt het SWAN rekenrooster beter overeen met de Baseline schematisatie van het Markermeer.

De golfrandvoorwaarden van het geneste IJburg model worden verkregen uit het gereduceerde Markermeer model. Om interpolatiefouten bij de overdracht te minimaliseren is de rand van het geneste model zodanig gekozen dat deze exact samenvalt met het rekenrooster van het gereduceerde Markermeer model

De coördinaten van de hoekpunten van beide rekenroosters zijn gegeven in Tabel 5-1 en gepresenteerd in afbeelding 5-1.

Tabel 5-1 RD-coördinaten rekenroosters

rekenrooster gereduceerd Markermeer model		rekenrooster genest IJburg model	
x-coördinaat [m]	y-coördinaat [m]	x-coördinaat [m]	y-coördinaat [m]
130900	478300	128037	482545
144828	487694	132282	485408
138028	497776	128342	491244
124100	488381	124100	488381

### 5.1.2 Bodem

De bodemschematisatie voor het SWAN model is gebaseerd op de bodemhoogte in de Baseline schematisatie zoals aangeleverd door Rijkswaterstaat RIZA. De bodemligging voor het SWAN model dient op een regelmatig rooster te liggen, echter in de Baseline schematisatie is een curvilineair rooster aanwezig. De resolutie van de bodeminformatie in de Baseline schematisatie is ongeveer 20 x 40 m in de omgeving van IJburg. Om tot een regelmatig bodemrooster te komen is de informatie uit Baseline geïnterpoleerd op een 40 x 40 m rooster dat 34° gedraaid is. Deze bodemresolutie (40 x 40 m) is tevens gebruikt voor eerder uitgevoerde berekeningen op het Markermeer in Witteveen+Bos (2004a) en Bottema(2004).

Het resulterende bodemrooster met een resolutie van 40 x 40 m is gebruikt als bodemfile voor zowel het gereduceerde Markermeermodel als het geneste IJburg model. Aangezien SWAN tijdens het inlezen zelf de informatie van het bodembestand naar het gekozen rekenrooster interpoleert, is het interpoleren van een 20 x 20 m bodemfile niet noodzakelijk (er dient hoe dan ook te worden geïnterpoleerd, ofwel vanuit Baseline ofwel door SWAN). Om interpolatiefouten te minimaliseren is ervoor gezorgd dat de coördinaten van het bodembestand exact overeenkomen met die van zowel het geneste als het Markermeer rekenrooster.

### 5.1.3 Randvoorwaarden

Voor het SWAN model zijn 3 sets randvoorwaarden nodig:

- windsnelheid en windrichting;
- golfrandvoorwaarden voor de noordelijke rand van het gereduceerde Markermeer model;
- waterstanden.

#### Windsnelheid en windrichting

De windsnelheden en windrichtingen komen overeen met de WAQUA berekeningen. In totaal gaat het om 6 windsnelheden voor 12 windrichtingen. Er is gerekend met een stationaire, uniforme windsnelheid en windrichting, optredend tijdens de piek van de storm.

De gebruikte windsnelheid is getransformeerd van potentiële windsnelheid bij Schiphol naar ‘open water’ windsnelheid boven het Markermeer, conform de procedure voor de WAQUA berekeningen.

## **Golfrandvoorwaarden**

De golfrandvoorwaarden aan de noordelijke rand van het gereduceerde Markermeer model worden, overeenkomstig met het advies van [Witteveen+Bos, 2004a] uit de Hydra-M database gehaald [Rijkswaterstaat, 2001].

Het rekenrooster is zodanig gekozen dat het Hydra-M punt 46 “Marken” exact op de grens van het rekenrooster ligt. Op de andere oever komt het rooster halverwege tussen Hydra-M punt Hm19.5 en Hm22.5 uit. Hier is derhalve een fictief Hydra-M punt gedefinieerd met de coördinaten ( $x = 141868$  m,  $y = 492070$  m). De golfparameters voor dit punt zijn lineair geïnterpoleerd uit de gegevens van Hm19.5 ( $x = 143252$  m,  $y = 492896$  m) en Hm22.5 ( $x = 140844$  m,  $y = 491468$  m). De gebruikte randvoorwaarden zijn te zien in Bijlage C.

De (geïnterpoleerde) golfcondities op de Hydra-M locaties (hoekpunten van de rand van het model) worden vervolgens door SWAN gebruikt om de golfrandvoorwaarden langs de gehele rand te interpoleren. Hiervoor gebruikt SWAN spectrale interpolatie, zoals gespecificeerd in de SWAN manual, paragraaf 4.3.3.

## **Waterstanden**

Het benodigde waterstandsveld wordt verkregen uit de WAQUA sommen die tevens in het kader van dit project zijn gemaakt. Er wordt uitgegaan van het maximale waterstandsveld zoals door WAQUA opgeslagen in het SDS-bestand. Dit maximale waterstandsveld bestaat uit de door WAQUA berekende maximale waterstand op het curvilineaire WAQUA rooster gedurende de gehele stormperiode.

Om de waterstandsvelden in het SWAN model te kunnen inlezen moeten, net als voor het bodembestand, de resultaten van de WAQUA sommen van het curvilineaire rooster naar een regelmatig rooster geïnterpoleerd worden. Hiertoe zijn de berekende maximale waterstanden geïnterpoleerd (‘nearest value’) naar de rekenroosters van SWAN, zowel het gereduceerde Markermeemodel als het geneste IJburg model. Het resultaat van de interpolatie is een tweetal waterstandsvelden met resolutie van respectievelijk  $160 \times 160$  m en  $20 \times 20$  m (beiden  $34^\circ$  geroteerd).

### **5.1.4 Schematisatie IJburg, dijken en overlaten**

De eilanden van IJburg zijn niet opgenomen in het bodembestand van de Baseline schematisatie, in plaats hiervan zijn de eilanden door middel van schotjes hoogwatervrij gemaakt. Voor de golfberekeningen betekent hoogwatervrij dat er geen transmissie van golfenergie door het betreffende gebied mag plaatsvinden. Dijken (o.a. strekdam IJburg, Diemerzeedijk, Durgerdam) die bij hoogwater overstromen zijn als overlaat in de Baseline schematisatie aanwezig.

In SWAN worden de hoogwatervrije gebieden en dijken door ‘obstacles’ geschematiseerd. Er kan in SWAN gekozen worden voor 2 typen obstacles; een overstroombare dam of een golfdoorlatende dam. Voor beide typen moet de transmissie en reflectie van golfenergie gespecificeerd worden. Bij een overstroombare dam wordt de transmissie door SWAN uitgerekend aan de hand van de waterstand en de hoogte van de dam.

Bij een golfdoorlatende dam wordt een transmissiecoëfficiënt ingesteld. In het kader van dit project is met Rijkswaterstaat RIZA afgesproken dat reflectie niet wordt meegenomen. De reflectiecoëfficiënt is voor alle ‘obstacles’ op 0 gesteld.

In de SWAN schematisatie zijn alle relevante overlaten en hoogwatervrije gebieden uit de Baseline schematisatie opgenomen. De coördinaten van de ‘obstacles’ zijn overgenomen uit de Baseline schematisatie. Voor het geneste model en het gereduceerde Markermeer model zijn de ‘obstacles’ apart geschematiseerd. In SWAN mag een gridlijn van het rekenrooster namelijk slechts één keer doorsneden worden om een goede werking van ‘obstacles’ te verzekeren. Derhalve zijn verschillende schematisaties van de ‘obstacles’ nodig als de rekenresolutie verandert.

Tabel 5-2 laat zien welke eilanden en dammen in de SWAN schematisaties zijn opgenomen en hoe. In het geval van een overstroombare dam is de hoogte van de dijk overgenomen uit de Baseline schematisatie.

Tabel 5-2 ‘Obstacle’ definities

<b>Locatie</b>	<b>gereduceerd Markeermeer model</b>	<b>genest IJburg model</b>
Buiteneiland	geen golftransmissie	geen golftransmissie
Centrumeiland	geen golftransmissie	geen golftransmissie
Haveneiland	geen golftransmissie	geen golftransmissie
Middeneiland	geen golftransmissie	geen golftransmissie
Rieteiland oost	geen golftransmissie	geen golftransmissie
Rieteiland west	geen golftransmissie	geen golftransmissie
Steigereiland	geen golftransmissie	geen golftransmissie
Strandeiland	geen golftransmissie	geen golftransmissie
Zeeburg	geen golftransmissie	geen golftransmissie
Diemerzeedijk	overstroombare dam	overstroombare dam
Overdiemen	overstroombare dam	overstroombare dam
Overdiemen, eilandje	geen golftransmissie	geen golftransmissie
Durgerdam, dijk	overstroombare dam	overstroombare dam
Durgerdam, eiland	geen golftransmissie	geen golftransmissie
Strekdam	overstroombare dam	overstroombare dam
‘t Hoofd (3 eilanden)	overstroombare dam	ligt buiten rekenrooster
Pampus	geen golftransmissie	ligt buiten rekenrooster
Marken	geen golftransmissie	ligt buiten rekenrooster

### 5.1.5 Uitvoer

Het SWAN model voert 3 verschillende sets data uit:

- data op de uitvoerlocaties;
- data op test locaties;
- data voor het gehele rekenrooster.

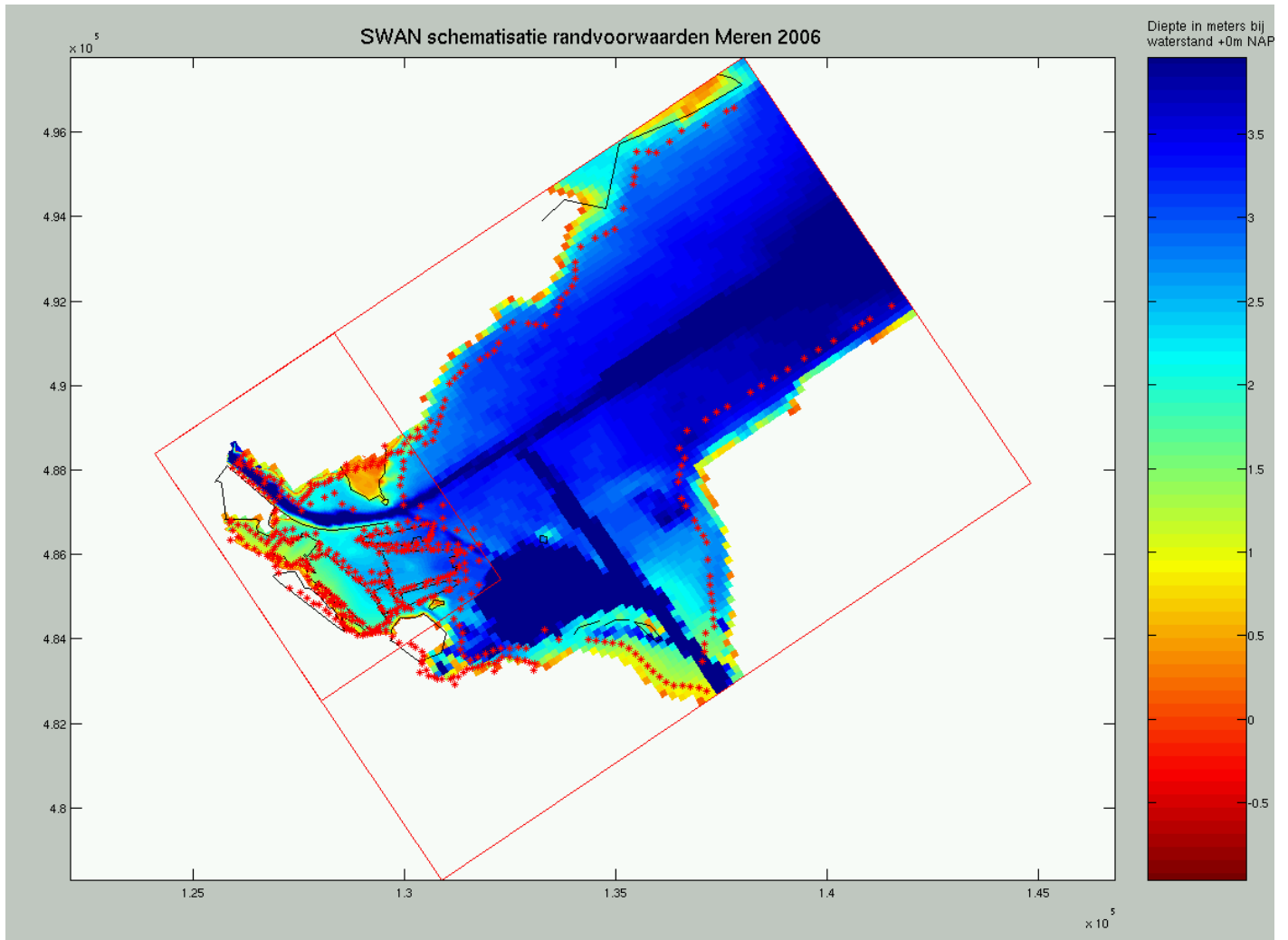
## Uitvoerlocaties

De belangrijkste uitvoer is de uitvoer op de uitvoerlocaties. Deze data is uiteindelijk nodig voor het vullen van de Hydra-M database. De uitvoerlocaties zijn identiek aan die in de Baseline schematisatie uitgezonderd de locaties die buiten het rekenrooster van het gereduceerde Markermeer model vallen. De golfparameters die uitgevoerd worden zijn te zien in Tabel 5-3. Naast deze golfparameters wordt ook het 1D golfspectrum uitgevoerd.

Tabel 5-3 Uitvoerparameters uitgevoerd voor het gehele grid

Afkorting	Uitvoerparameter	Eenheid
HS	Significante golfhoogte	[ m ]
DIR	Golfrichting van de golfperiode	[ ° t.o.v. Noord]
PDIR	Golfrichting van de piek golfperiode	[ ° t.o.v. Noord]
TM01	Spectrale golfperiode ( $m_0/m_1$ )	[ s ]
RTP	Relatieve piek golfperiode	[ s ]
TMM10	Spectrale golfperiode ( $m_{.1}/m_0$ )	[ s ]
TM02	Spectrale golfperiode ( $m_0/m_2$ ) <sup>0,5</sup>	[ s ]
DSPR	Richtingsverspreiding	[ ° ]
DEP	Diepte	[ m ]
QB	Fractie brekende golven	[ - ]
WLEN	Gemiddelde golflengte	[ m ]
STEEP	Golfsteilheid	[ - ]
DHS	Verandering in de golfhoogte in de laatste iteratie	[ m ]
DRTM01	Verandering in de golfperiode in de laatste iteratie	[ s ]
XP	X coördinaat	[ m ]
YP	Y coördinaat	[ m ]

Een overzicht van alle uitvoerlocaties is gegeven in Figuur 5-1. In de afbeelding zijn tevens de afmetingen van de rekenroosters zichtbaar evenals de bodemligging en de obstacles.



Figuur 5-1 Voorgestelde SWAN schematisatie: uitvoerlocaties, obstacles en bodemhoogte

Het geneste IJburg model voert op dezelfde locaties als het gereduceerde Markermeer model de golfparameters uit. De locaties die buiten het geneste rekenrooster vallen worden door SWAN gevuld met exception value (meestal -999, -9, o.i.d.). Tijdens de postprocessing kunnen deze exception values aangevuld worden met de resultaten van het gereduceerde Markermeer model. Hiermee wordt dan eenvoudig een uitvoerfile van het gehele model verkregen.

### Testlocaties

Er zijn testlocaties gedefinieerd binnen IJburg en op 3 raaien in het Markermeer. Op de testlocaties worden voor elke iteratiestap de golfparameters  $H_s$  en  $T_{m-1,0}$  en een aantal brontermen weggeschreven. Hiermee kan het convergentiegedrag van het model onderzocht worden, zie paragraaf 5.2.3. De 3 raaien lopen vanaf IJburg in de richtingen  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  en  $90^\circ$ .

Uiteraard zijn deze 3 raaien alleen aanwezig in het gereduceerde Markermeer model aangezien deze punten buiten het geneste Ijburg rekenrooster vallen. Tabel 5-4 geeft de coördinaten van de opgenomen testlocaties.

Tabel 5-4 Coördinaten testlocaties

Test locaties Ijburg		Test locaties gereduceerd Markeermeer model			
x-coördinaat [m]	y-coördinaat [m]	x-coördinaat [m]	y-coördinaat [m]	x-coördinaat [m]	y-coördinaat [m]
126750	486240	131000	487900	137500	485500
127160	486720	132000	488900	132000	487000
128400	486200	133000	489900	132850	487500
128600	487040	134000	490900	133700	488000
129000	485760	135000	491900	134550	488500
130000	486900	136000	492900	135400	489000
130200	487700	137000	493900	136250	489500
131500	484500	138000	494900	137100	490000
131500	486500	132500	485500	137950	490500
131500	487500	133500	485500	138800	491000
131500	485500	134500	485500	139650	491500
128000	487500	135500	485500	140500	492000
		136500	485500		

## Rekenrooster

Tot slot worden op het gehele rekenrooster de eindresultaten weggeschreven. De golfparameters worden uitgevoerd in een Matlab file zodat deze eenvoudig en snel met Matlab kunnen worden gebruikt in de postprocessing. De golfparameters worden elk in een aparte file opgeslagen. De golfparameters die worden uitgevoerd zijn gelijk aan de parameters gegeven in Tabel 5-3.

## Overzicht bestandsnamen

De resultaten van de SWAN sommen komen in een directory terecht met een naam die gelijk is aan de somcode. In de subdirectory nest\_ijburg zijn de resultaten van de geneste model te vinden. In Tabel 5-5 is te zien welke uitvoer door een run van het model wordt gegenereerd.



Tabel 5-5 Overzicht uitvoerbestandsnamen

Filenaam	Bevat
<somcode>_outpnt.nh.tab	golfparameters op uitvoerlocaties, ASCII tabel, geen kopregel (handig voor postprocessing Matlab)
<somcode>_nst1_outpnt.nh.tab	idem, maar voor genest IJburg model
<somcode>_outpnt.tab	golfparameters op uitvoerlocaties, ASCII tabel, met kopregel
<somcode>_nst1_outpnt.tab	idem, maar voor genest IJburg model
<somcode>_outpnt.s1d	1D golfspectrum op uitvoerlocaties, ASCII
<somcode>_nst1_outpnt.s1d	idem, maar voor genest IJburg model
<somcode>_tst.par	testuitvoer ASCII format gereduceerd Markermeer model
<somcode>_nst1_tst.par	idem, maar voor genest IJburg model
<somcode>_grd.<par>.mat	uitvoer voor 1 golfparameter (<par> = golfparameter, zie Tabel 3.3 voor afkortingen) op rekenrooster, Matlab file
<somcode>_nst1_grd.<par>.mat	idem, maar voor genest IJburg model

Daarnaast toont Tabel 5-6 de bestanden die verband houden met de uitvoer van resultaten:

Tabel 5-6 Overzicht overige bestandsnamen

Filenaam	Bevat
<somcode>.swn	SWAN input bestand
<somcode>_nst1.swn	idem, maar voor genest IJburg model
<somcode>.prt	print file, verslag inlezen input file en rekestijd
<somcode>_nst1.prt	idem, maar voor genest IJburg model
outpnt.txt	coördinaten uitvoerlocaties
outpnt.naam.txt	naamgeving uitvoerlocaties

## 5.2 Initiële SWAN instellingen

De instellingen van het SWAN model zijn, conform de eisen in de opdrachtomschrijving, zoveel mogelijk conform [Bottema, 2004] gekozen. Het startpunt van de inputfiles voor de huidige berekeningen is dan ook de SWN-file van het Markermeer model uit [Bottema, 2004]. Op een aantal punten zijn veranderingen aangebracht welke in deze paragraaf worden toegelicht. Tot slot is er een controle van de nauwkeurigheid van de resultaten opgenomen.

### 5.2.1 Aangepaste White capping formulering

Conform het advies in [Witteveen+Bos, 2004a] en de opdrachtomschrijving is een aangepaste whitecapping formulering in het model toegepast. In de SWAN input file is daartoe de volgende regel extra toegevoegd:

“ WCAP KOM 2.36E-5 3.02E-3 2.0 1.0 1.0 “

Meer achtergrond informatie over de effecten van deze regel is te vinden in [Witteveen+Bos, 2004b].

## 5.2.2 Rekenfrequenties

In de SWAN input file moeten de hoogste en laagste rekenfrequentie en het aantal rekenfrequenties worden gedefinieerd. Er is gebruik gemaakt van de optie waarbij SWAN zelf het aantal rekenfrequenties optimaal bepaalt wanneer de hoogste en laagste frequenties (FLOW & FHIGH) worden opgegeven (zie SWAN manual onder CGRID commando).

Conform [Bottema, 2004] is de waarde van FLOW in alle berekeningen 0,08. De FHIGH is per berekening bepaald. Bottema (2004) adviseert de volgende procedure voor de bepaling van FHIGH:

- Schat de piekfrequentie binnen een rekencel met de formule van [Kahma & Calkoen, 1992]:

$$T_p = \left( 2\pi * \left( \frac{gx}{U_{10}^2} \right)^{0.27} \right) / \left( \frac{13,7g}{U_{10}} \right)$$

waarin

g      gravitatieconstante (9,8 m/s<sup>2</sup>)

x      strijklengte (m)

U<sub>10</sub>    windsnelheid (m/s)

Voor de bepaling van FHIGH moet x gelijk worden gesteld aan de ruimtelijke resolutie Δx (afmeting rekenrooster).

- FHIGH dient zo gekozen te worden dat  $1,5/T_p < FHIGH < 7/T_p$ . Er is in dit geval uitgegaan van  $1,6/T_p$ . Er wordt uitgegaan van  $FHIGH = 1,6/T_p$  om het aantal rekencellen in frequentiedomein te minimaliseren. De resulterende FHIGH voldoet aan de eisen zoals gespecificeerd in [Bottema, 2004]. Hierbij is T<sub>p</sub> afhankelijk van de aansturende condities en derhalve voor iedere som afzonderlijk bepaald.
- Het aantal gebruikte rekenfrequenties wordt door SWAN bepaald en in de print file genoemd.

## 5.2.3 Stopcriterium en controle nauwkeurigheid

Een set belangrijke keuzes in het model zijn de stopcriteria. Het model stopt met de iteratie wanneer de gewenste convergentie op een vooraf gedefinieerd aantal rekenpunten is bereikt of wanneer het maximaal aantal toegestane iteraties dat het model mag maken, is bereikt. Het aantal iteraties moet dus voldoende hoog zijn om de gewenste convergentie van het model te bereiken.

In [Bottema, 2004] wordt gebruik gemaakt van een relatief stopcriterium. De berekening stopt wanneer zowel golfhoogte als golfperiode in alle rekencellen minder dan 0,1% is veranderd ten opzichte van de vorige iteratie. Daarnaast wordt de berekening afgebroken als het maximaal aantal toegestane iteraties wordt overschreden (circa 40 tot 60).

Er is voor gekozen dit stopcriterium te handhaven ondanks het feit dat de nieuwste SWAN versie een geavanceerder stopcriterium bevat. Het stopcriterium van [Bottema, 2004] is dusdanig streng (0,1% verandering is bij een golf van 1,0 m is slechts 1 mm) dat vrijwel alle berekeningen stoppen na het maximaal aantal iteraties, omdat de geëiste convergentie niet snel in alle rekencellen gehaald is. Juist in berekeningen met scherpe hoeken (zoals het geneste IJburg model) blijven convergentieproblemen bestaan en zal pas na zeer veel iteraties de gewenste convergentie bereikt worden.

Het maximum aantal iteraties is na enkele testruns op 60 vastgesteld. Bij maximaal 60 iteraties wordt op circa 70% a 80% van de rekencellen (afhankelijk van de som) aan de convergentie-eis (zijnde 0,1% verandering in de laatste iteratie) voldaan. Ter controle is onderzocht op welke locaties nog geen convergentie is bereikt.

De bereikte convergentie voor een tweetal testcases ( $u=15$  m/s en  $u=30$  m/s) is weergegeven in Bijlage D. De berekeningen zijn uitgevoerd voor een meerpeil van  $-0,4$  m+NAP met windrichting  $60^\circ$ . In Figuur D.1. en D.2. is de absolute verandering in de significante golfhoogte in de laatste ( $60^\circ$ ) iteratiestap weergegeven. Het verschil bedraagt voor alle locaties minder dan 1 centimeter. In Figuur D.3 en D.4 is vervolgens de relatieve verandering ( $\Delta H_{sig}/H_{sig}$ ) gegeven. De afbeeldingen laten zien dat deze verandering overal minder dan 1% is en op een groot deel van het rekenrooster kleiner dan 0,1% (zoals geëist).

Op de uitvoerlocaties, de set locaties waar uiteindelijk de interesse naar uitgaat, is de relatieve verandering (voor zowel golfperiode als golfhoogte) in de laatste iteratiestap kleiner dan 0,8%. Met uitzondering van 3 locaties, is de relatieve verandering zelfs kleiner dan 0,45%. De maximale absolute verandering op de uitvoerlocaties is 0,0045 m voor de golfhoogte en 0,005 s voor de periode. De locaties waar convergentieproblemen optreden zijn goed te zien in Figuur D.4. Tussen Rieteiland en Haveneiland liggen slechts 2 rekencellen tussen de obstacles wat voor instabiliteiten zorgt.

De convergentie van de SWAN modellen is nader beschouwd voor een twaalfstal locaties. De resultaten van deze vergelijking zijn zichtbaar in Bijlage E. In Figuur E.1 zijn de locaties waarvoor de analyse is uitgevoerd zichtbaar. Figuur E.2 en Figuur E.3 laten de convergentie van respectievelijk  $H_s$  en  $T_{m0,1}$  van het grote modelgebied zien voor locatie 5 voor verschillende condities, Figuur E.4 en Figuur E.5 doen dat voor locatie 7. De afbeeldingen laten zien dat de convergentie op deze locaties voldoende is.

Tot slot is gekeken naar de convergentie van het geneste model. Figuur E.6 en Figuur E.7 laten de convergentie van de  $H_s$  zien voor alle locaties voor respectievelijk het grove en het geneste model, Figuur E.8 en Figuur E.9 laten de convergentie van  $T_{m0,1}$  zien. Op basis van de figuren kan gesteld worden dat de convergentie van het geneste model overeenkomt met de convergentie van het grote model. Er kan op basis van Figuur E.2 tot en met E.9 geconcludeerd worden dat aan de convergentie-eis wordt voldaan.

Er wordt geconcludeerd dat 60 iteraties voldoende zijn om op het gehele rekenrooster voldoende nauwkeurigheid te bereiken. Binnen deze 60 iteraties wordt niet overal het stopcriterium gehaald, maar nadere analyse van de veranderingen in de laatste iteratie wijzen uit dat de veranderingen acceptabel klein zijn.

## 5.3 Correctiefactoren voor de SWAN berekeningen

### 5.3.1 Inleiding

Ondanks het feit dat SWAN gekalibreerd is voor verschillende situaties, blijken er bij toepassing van SWAN in het IJsselmeer en Slotermeer toch nog verschillen te ontstaan tussen meting en berekening. Deze verschillen zijn al eerder vastgesteld en gerapporteerd door [Bottema, 2004] en [Witteveen+Bos, 2004a].

Aan het gebruik van SWAN voor het bepalen van de golfrandvoorwaarden voor IJburg is door [Witteveen+Bos, 2004a] een aantal restricties gesteld. Eén van de restricties is het bepalen en toepassen van een correctiefactor. Deze correctiefactor dient de onzekerheid in het model (verschil tussen meting en berekening bij hindcasten van stormen) in rekening te brengen.

Voor de bepaling van de correctiefactoren wordt gebruik gemaakt van de SWAN testcases zoals aangereikt door Rijkswaterstaat RIZA en beschreven in [Bottema, 2004]. Het betreffen de cases SL-A tot en met SL-D en de cases Y-A tot en met Y-F (zonder FL25 in alle cases, zonder FL-9 bij Y-E en zonder FL-2 bij Y-F). De SWAN schematisatie zoals aangeleverd door Rijkswaterstaat RIZA wordt gebruikt voor de betreffende testcases. De aangeleverde SWAN schematisatie is op één punt aangepast: de aangepaste whitecapping formulering van Rogers et al (2002) wordt toegepast.

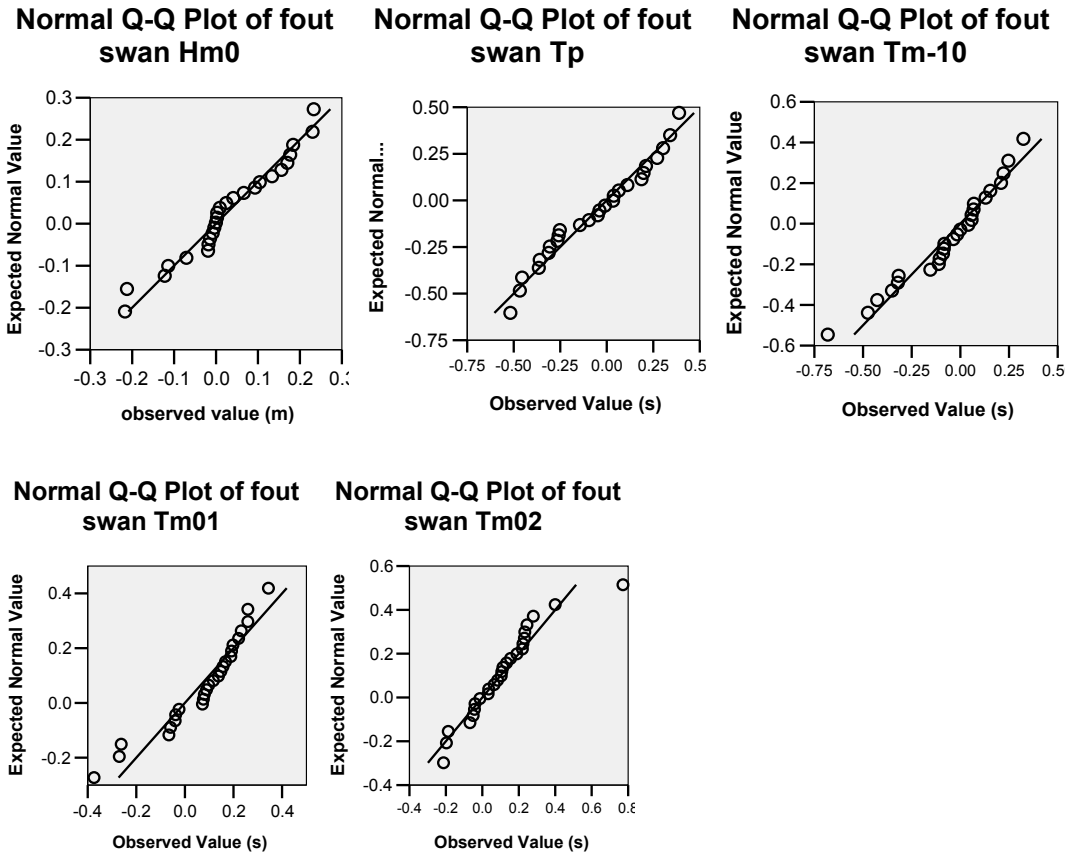
De resultaten van de berekeningen zijn gepresenteerd in Bijlage E. De gepresenteerde metingen en berekeningen zijn gebruikt in een residu-onderzoek. In het residu-onderzoek worden de verschillen tussen meting en berekening nader bestudeerd en vervolgens gebruikt om correctiefactoren te bepalen.

### 5.3.2 Residu-onderzoek

Het is belangrijk dat de modelberekeningen geen systematische fouten bevatten. Dit kan onderzocht worden met een eenvoudig residu-onderzoek. De fout van een goed model is in de regel normaal verdeeld. De QQ-plots in Figuur 5-2 tonen aan dat dit zeer goed opgaat voor de modelfouten van de SWAN berekeningen. Zeker als je bedenkt dat er maar 26 cases zijn om de foutanalyse op te baseren.

In de QQ-plot staat de empirische kansverdeling van de modelfouten weergegeven tegen de theoretisch geschatte normaalverdeling. Als de modelfouten goed op de rechte lijn liggen, is de modelfout goed normaal verdeeld. Zoniet, mist het model meestal nog belangrijke informatie.

De 'expected normal value', verticale as geeft aan welke waarde bij een meting verwacht zou worden op basis van het rangnummer van de dataset en een op alle modelfouten geschatte normaalverdeling. Het rangnummer van de data is het volgnummer van de meetwaarden in een van klein naar groot geordende reeks. De observed value geeft logischerwijs de werkelijk gemeten waarde (in dit geval de modelfout).



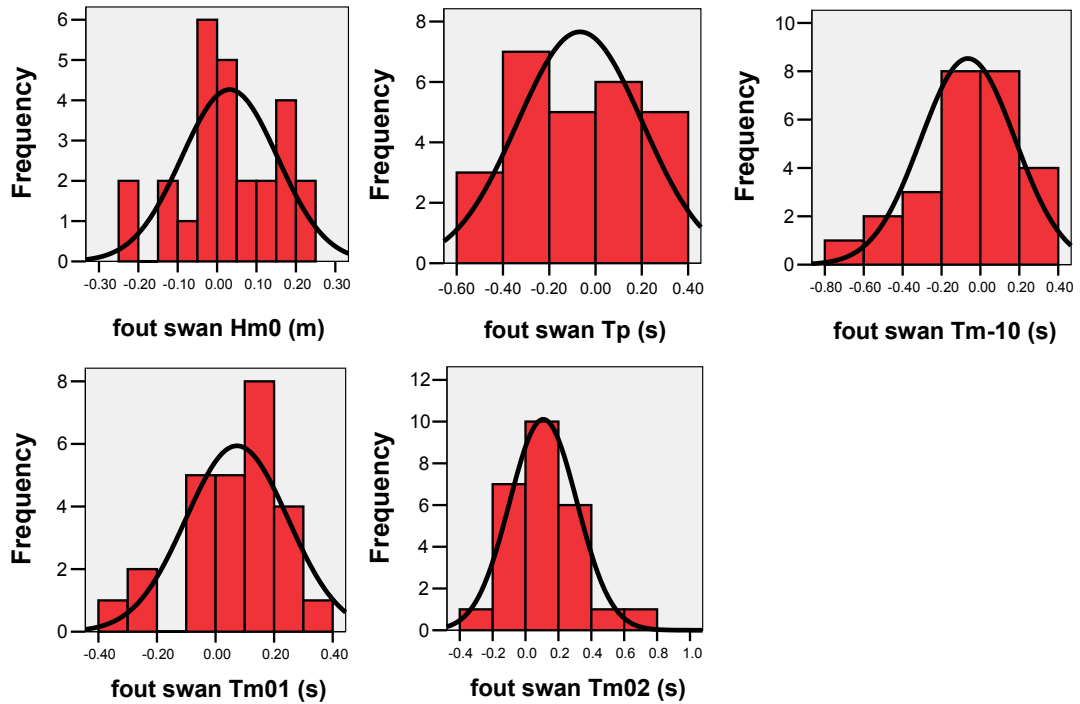
Figuur 5-2 QQ-plots modelfouten SWAN berekeningen

### 5.3.3 Systematische fout

De systematische fout kan worden bepaald door de gemiddelde modelfout te vergelijken met de gemiddelde absolute fout (Tabel 5-7). De gemiddelde fout blijkt toch wel redelijk veel af te wijken van nul. De histogrammen van de fout (zie Figuur 5-3) laten dit ook zien: de top van de geplote normaalverdelingen wijkt zichtbaar af van nul. De histogrammen laten daarnaast ook zien dat er een zeer beperkte hoeveelheid gegevens beschikbaar is voor het uitvoeren van het residu onderzoek.

Tabel 5-7 Gemiddelde fout en gemiddelde absolute fout van SWAN berekeningen

variabele	gemiddelde fout	gemiddelde absolute fout	verhouding
Hm0 [m]	0.03	0.09	34%
Tp [s]	-0.07	0.23	-29%
Tm-10 [s]	-0.06	0.19	-35%
Tm01 [s]	0.07	0.16	46%
Tm02 [s]	0.11	0.17	63%



Figuur 5-3 Histogrammen van de SWAN fout

### 5.3.4 Correctiefactoren

Door middel van het toepassen van een correctiefactor is het mogelijk iets betere modelresultaten te verkrijgen. De correctiefactor is vastgesteld met behulp van optimalisatie van de Root Mean Square Error (RMSE) van het verschil tussen meting en SWAN berekening, wat inhoudt dat grotere fouten zwaarder wegen bij de bepaling van de correctiefactor. Omdat geoptimaliseerd wordt met de RMSE wordt niet alleen voor de systematische modelfout gecorrigeerd, maar wordt ook voor een deel van de spreiding van de modelfout gecorrigeerd.

De modelresultaten van de wel en niet gecorrigeerde SWAN berekeningen worden vergeleken op basis van de standaarddeviatie van de fout en de gemiddelde absolute fout. Over het algemeen lijken de modelresultaten iets beter na correctie met de correctiefactor (zie Tabel 5-8). In de afbeeldingen G.1. tot en met G.5. zijn de metingen geplot samen met de wel en niet gecorrigeerde SWAN berekeningen. Bovendien is in de afbeeldingen de absolute fout van de modelberekeningen weergegeven.

Tabel 5-8 Correctiefactoren SWAN berekeningen voor en na correctie

variabele	correctiefactor	st.dev fout swan	gem. abs fout swan	st.dev fout na correctie	gem. abs fout na correctie
Hm0	0,964	0,122	0,093	0,121*	0,095
Tp	1,022	0,271	0,232	0,267*	0,225*
Tm-10	1,025	0,243	0,186	0,238*	0,186
Tm01	0,975	0,175	0,160	0,174*	0,131*
Tm02	0,954	0,205	0,171	0,192*	0,134*

\* verbeteringen ten opzichte van niet gecorrigeerd model

Het blijkt dat de gevonden correctiefactoren de afzonderlijke golfparameters met niet meer dan 5% corrigeren. Dit komt niet overeen met de geadviseerde correctiefactor uit [Witteveen+Bos, 2004a]. De genoemde correctiefactor van 10% zoals voorgesteld in [Witteveen+Bos, 2004a] is gebaseerd op: (i) vergelijking met alle beschikbare metingen van Rijkswaterstaat RIZA en vervolgens aan de veilige kant gaan zitten (de spreiding van de modelfout op empirische wijze meenemen), (ii) vergelijking met Bretschneider en Young & Verhagen en (iii) algemene kennis van SWAN (o.a. een RIKZ notitie over SWAN-berekeningen).

Het uitgevoerde residu-onderzoek voor dit project heeft alleen betrekking op de aangeleverde metingen. Alle overige elementen (welke wel van belang zijn) kunnen niet in een residu onderzoek worden betrokken. Deze informatie dient op basis van 'expert judgement' te worden toegevoegd aan de correctiefactoren. Als gevolg van het niet meenemen van deze 'expert judgement' in het residu onderzoek zijn de correctiefactoren kleiner dan geschat door [Witteveen+Bos, 2004a].

Het toepassen van de correctiefactoren heeft in een aantal gevallen geleid tot een reductie van de spreiding van de modelfout. De totale spreiding is echter nog steeds significant. Een verdere reductie van de spreiding zou kunnen worden bereikt door (i) de correctiefactoren afhankelijk te maken van bijvoorbeeld windsnelheid of waterdiepte of (ii) de correctiefactoren te bepalen op basis van een selectie van meetpunten (bv. hoge windsnelheden). Bij de start van het project heeft Rijkswaterstaat RIZA reeds aangegeven niet te voelen voor oplossing (i). Oplossing (ii) is in dit geval niet realistisch omdat er na selectie te weinig meetpunten overblijven voor het uitvoeren van een residu onderzoek.

### 5.3.5 Conclusies correctiefactoren

Met behulp van standaard residu-onderzoek zijn de statistische eigenschappen van de modelfouten (verschil tussen meting en berekening) in kaart gebracht. Het residu onderzoek toonde aan dat de modelfouten normaal verdeeld zijn met een beperkte systematische modelfout voor alle golfparameters. De spreiding van de modelfout is aanzienlijk voor alle golfparameters, dit is te zien aan de standaarddeviatie van de (absolute) fout.

Met behulp van de statistische eigenschappen van de modelfout is een optimalisatie uitgevoerd van een correctiefactor. Met behulp van een optimalisatie op basis van RMSE ('best guess') is de systematische modelfout geminimaliseerd, met als secundair effect in sommige gevallen een vermindering van de spreiding van de modelfout. De resulterende correctiefactoren zijn gespecificeerd per golfparameter en corrigeren in alle gevallen minder dan 5% (de factoren liggen tussen 0,95 en 1,05).

Voor de golfsimulaties zijn de hier bepaalde correctiefactoren toegepast.

## 6 Golfcondities voor de Eemvallei

De golfcondities in de Eemvallei zijn bepaald met behulp van Bretschneider formuleringen uit Hydra-B. Voorafgaand aan de Bretschneider berekeningen zijn de effectieve strijklengtes en waterdieptes bepaald. Voor de vaststelling van deze getallen is gebruik gemaakt van de door Rijkswaterstaat RIZA beschikbaar gestelde methoden. Deze paragraaf beschrijft hoe deze methode toegepast is voor het bepalen van de golfcondities in de Eemvallei.

### Stap I: Fetch

De eerste stap voor het vaststellen van de golfcondities in de Eemvallei bestaat uit het bepalen van de effectieve strijklengtes. De effectieve strijklengte hangt sterk af van het wel of niet meenemen van de secundaire waterkeringen in de procedure. In overleg met de opdrachtgever is besloten twee sets van berekeningen uit te voeren: (i) zonder secundaire keringen en (ii) met secundaire keringen. Voor het bepalen van de HR2006 is uitgegaan van de resultaten *zonder secundaire keringen*.

#### *Zonder secundaire keringen*

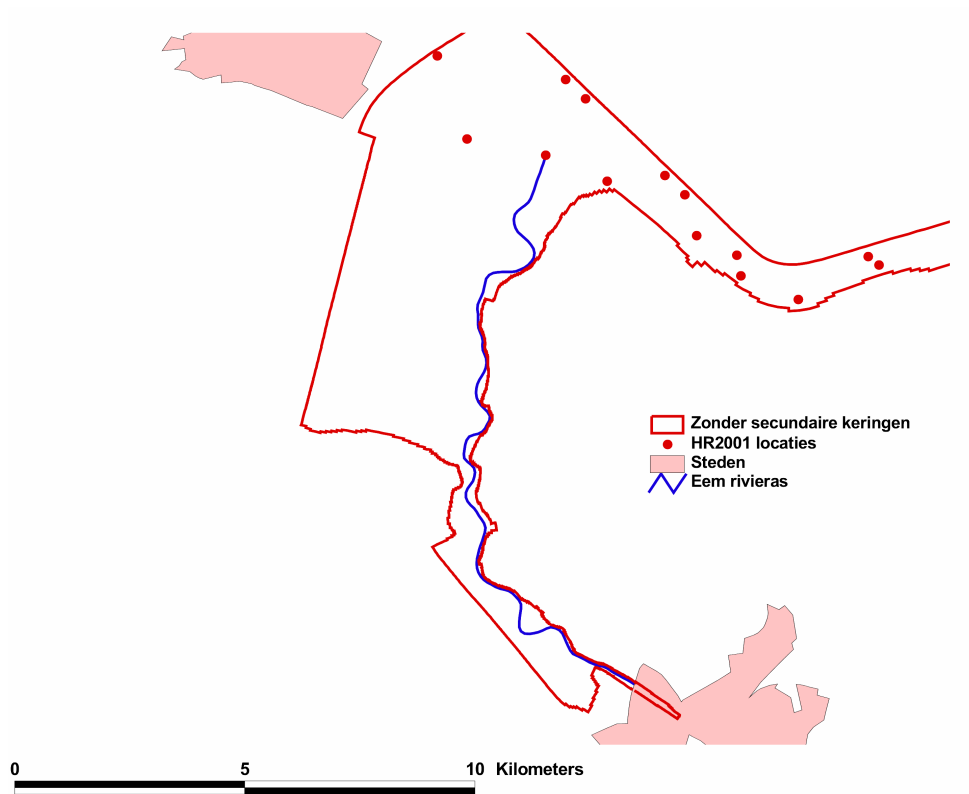
Voor het vaststellen van de effectieve strijklengte wordt gebruik gemaakt van door Rijkswaterstaat RIZA aangeleverde software: Fetch [HKV, 2002]. Deze software gebruikt als invoer: (i) een bestand met de coördinaten van de gevraagde locaties en (ii) een shape file met de omhullende van het beschouwde gebied. De shape-file voor de berekening waarbij de secundaire keringen niet zijn meegenomen bevat de omhullende van de gehele Eemvallei. De benodigde omhullende is gebaseerd op de aangepaste Baseline schematisatie uit fase 1 van dit project. Figuur 6-1 toont de gebruikte contouren.

#### *Met secundaire keringen*

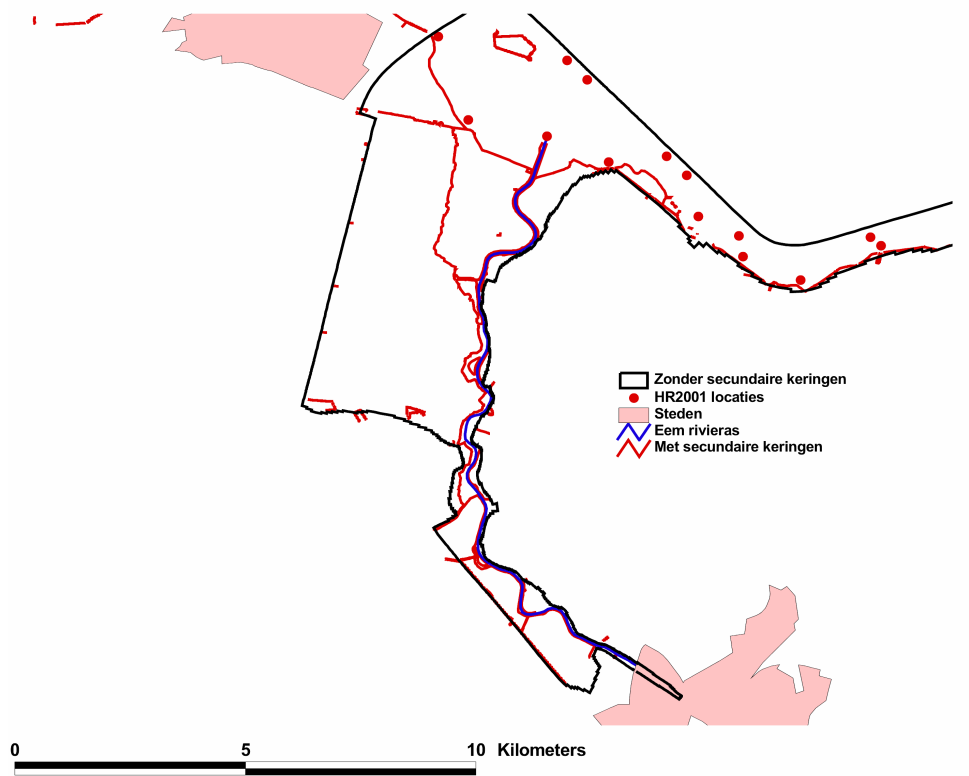
Voor de berekeningen met secundaire keringen wordt aangenomen dat de secundaire keringen oneindig hoog zijn. Dit houdt in dat voor de meeste locaties de strijklengtes korter zijn, omdat er aan de loefzijde van de locatie een secundaire kering ligt. Ten behoeve van het pakket Fetch is de Eemvallei opgedeeld in deelgebieden, welke begrensd worden door ofwel een bandijk ofwel een secundaire kering. Dit resulteert in circa 20 deelgebieden (en dus ook 20 shape files) waarbinnen de strijklengtes dienen te worden bepaald. De ligging van de secundaire keringen is gebaseerd op de aangepaste Baseline schematisatie uit fase 1 van dit project. Figuur 6-2 toont de gebruikte contouren.

De uitvoer van Fetch bestaat uit de effectieve strijklengte per locatie, per windrichting (er zijn 12 windrichtingen beschouwd).





Figuur 6-1 Contouren die gebruikt zijn om de strijklengtes in de Eemvallei te bepalen zonder secundaire keringen



Figuur 6-2 Contouren die gebruikt zijn om de strijklengtes in de Eemvallei te bepalen met secundaire keringen

## Stap 2: Fetch2GIS

De uitvoerbestanden van Fetch zijn vervolgens geconverteerd naar GIS formaat met behulp van het door Rijkswaterstaat RIZA aangeleverde pakket Fetch2GIS. Deze exercitie is uitgevoerd voor de cases met en zonder secundaire waterkeringen, zie [Alkyon, 2005].

## Stap 3: Effectieve bodemligging

Met behulp van de door Rijkswaterstaat RIZA aangeleverde GIS-applicatie is over de in stap 1 vastgestelde strijklengtes de effectieve bodemligging bepaald op basis van de bodem die is opgenomen in Baseline. De effectieve bodemligging is een gemiddelde van de bodemligging langs de strijkrichting. Een nadere toelichting voor de gevolgde methode is gepresenteerd in de rapportage behorende bij de software. De bepaling van de effectieve bodemligging is uitgevoerd voor de cases met en zonder secundaire keringen. Het resultaat is de gemiddelde bodemligging per locatie, per windrichting voor beide cases.

De voor deze stap benodigde bodemligging is gebaseerd op de aangepaste bodemschematisatie zoals opgenomen in de aangepaste Baseline schematisatie uit fase 1 van dit project.

## Stap 4: Bretschneider

De berekende effectieve bodemligging uit stap 3 is (per locatie, per windrichting, per windsnelheid, per meerpeil) gecombineerd met de maximale waterstandsvelden volgend uit de WAQUA berekeningen. In combinatie met de in stap 1 bepaalde strijklengtes zijn vervolgens (per locatie, per windrichting, per windsnelheid, per meerpeil) de golfcondities uitgerekend. Voor de bepaling van de golfcondities is gebruik gemaakt van de Bretschneider formuleringen uit Hydra-B.

De gebruikte windsnelheid voor de berekeningen is gelijk aan 92,5% van de openwater windsnelheid op het Markermeer. Dit komt overeen met de openwater windsnelheid ter plaatse van de monding van de Eem, uitgaande van de ruimtelijke windvelden zoals gebruikt in de WAQUA schematisatie.

## 7 Productieberekeningen voor de golven

Om de HR2006 te kunnen bepalen moeten in totaal 216 golfberekeningen uitgevoerd worden. Voor deze berekeningen wordt uitgegaan van de waterstandsberekeningen die in hoofdstuk 4 aan de orde zijn gekomen en zijn de instellingen gebruikt zoals aangegeven in het voorgaande hoofdstuk. Dit rapport beschrijft de resultaten van deze berekeningen niet in detail, maar geeft aan hoe de controle is uitgevoerd en welke locaties worden afgekeurd, omdat de SWAN resultaten hier niet betrouwbaar zijn. De resultaten van de SWAN berekeningen zijn aan de opdrachtgever opgeleverd in de vorm van de invoerbestanden voor de berekeningen.

### 7.1 Controle methode golfberekeningen

Bij de controle van de waterstandsberekeningen wordt gekeken naar de fysische en de numerieke juistheid van de berekeningen. De controle heeft een tweeledig doel:

1. Identificeren en eventueel afkeuren van foutieve individuele berekeningen;
2. Identificeren en eventueel uit te sluiten locaties voor het vervolg van het bepalen van de Hydraulische Randvoorwaarden.

#### 7.1.1 Te controleren parameters

Zoals aangegeven in de inleiding wordt bij de controle gekeken naar de fysische en de numerieke juistheid van de berekening met als doel eventuele onbetrouwbare punten uit te sluiten voor het vervolg van het bepalen van de Hydraulische Randvoorwaarden. Afwijkende resultaten moeten verklaarbaar zijn vanuit de lokale omstandigheden.

De controle van de golfberekeningen richt zich voornamelijk op de parameters significante golfhoogte  $H_s$  en piekperiode  $T_p / T_{pm}$ , waarbij de volgende aspecten nadrukkelijk aan de orde komen:

- Fysische verklaarbaarheid van golfcondities;
- Consistentie ten opzichte van omliggende rekenpunten;
- Aanwezigheid van spikes in golfvelden;
- Realiteitsgehalte van de golfparameters;
- Numerieke effecten en gevolgen voor golfparameters.

In de oorspronkelijke opzet was aangegeven dat voor de controle van de golfberekeningen kwantitatieve criteria zouden worden gedefinieerd voor de acceptatie van de resultaten. Tijdens de controle is gebleken dat het voor de controle van de golfberekeningen niet zinvol is dergelijke eisen te definiëren. In de meeste gevallen zijn de verschillen in golfhoogte of golfperiode ten opzichte van twee locaties namelijk te verklaren vanuit de lokale omstandigheden. Bovendien is het sterk afhankelijk van het te beoordelen deelgebied en de randvoorwaarden welke verschillen in de golfparameters kunnen optreden.

Daarom is na overleg met de opdrachtgever besloten voor iedere berekening afzonderlijk te bepalen of de uitschieters in de resultaten te verklaren zijn op basis van de lokale omstandigheden.

De controle heeft zich verder gericht op de kwalitatieve aspecten, waarbij ruim aandacht is besteed aan de te verwachten trends in de resultaten. Nemen de golfhoogte en golfperiode toe bij toenemende windsnelheid? Nemen de golfhoogte en golfperiode toe bij hoger meerpeil (en dus grotere waterdiepte)?

Voor de numerieke juistheid is in eerste instantie gekeken of de berekeningen op de juiste manier zijn afgerond. Daarnaast is het verloop in de tijd van de waterstand en de stroomsnelheid gebruikt om te zien of daar onlogische sprongen zichtbaar waren, hetgeen zou kunnen duiden op numerieke instabiliteiten.

Locaties kunnen afgekeurd worden omdat de resultaten van de golfberekeningen op dat punt niet betrouwbaar zijn.

## 7.1.2 Beschrijving en uitleg figuren

### Resultaten in locaties

Voor de controle van de golfberekeningen zijn voor iedere berekening voor de deelgebieden IJburg en Eemvallei figuren gemaakt die het verloop van de belangrijkste parameters van locatie tot locatie geven. Deze figuren zijn in digitale vorm beschikbaar voor elk van de 216 beschouwde combinaties van meerpeil, windrichting en windsnelheid. Elk van deze bestanden bevat zes figuren. Bijlage H geeft voor ieder van de figuren een voorbeeld:

- Resultaten Bretschneider berekeningen as van de Eem;
- Resultaten Bretschneider berekeningen locaties Eemvallei;
- Resultaten SWAN berekeningen 19 geselecteerde (controle beperkte set) locaties IJburg (genest rooster);
- Resultaten SWAN berekeningen 19 geselecteerde (controle beperkte set) locaties IJburg (grof+genest rooster);
- Resultaten SWAN berekeningen alle 173 locaties IJburg (genest rooster, controle uitgebreide set);
- Resultaten SWAN berekeningen alle 173 locaties IJburg (grof+genest rooster, controle uitgebreide set).

Voor de Bretschneider berekeningen voor de Eemvallei zijn alleen de significante golfhoogte  $H_s$  en de piekperiode  $T_p$  beschikbaar. De figuren voor de as van de Eem en de locaties in de Eemvallei geven de resultaten van de berekeningen met en zonder secundaire keringen (in rood en blauw, zie Figuur 9-1 en Figuur 9-2). Voor de waterdiepte, de overige periodematen en de golfrichting zijn geen resultaten beschikbaar. De laatste wordt in Hydra-M gelijk aan de windrichting verondersteld. De nummering van de locaties langs de as van de Eem en in de Eemvallei is gegeven in Bijlage A.

De figuren voor IJburg met resultaten van de SWAN berekeningen geven de resultaten voor de volgende parameters:

- Waterdiepte;
- Significante golfhoogte  $H_s$ ;
- Golfperiodes  $T_p$ ,  $T_{m-10}$  en  $T_{m02}$ ;
- Golfperiodes  $T_{pb}$  en  $T_{pbeq}$ ;
- Golfrichting.

Voor de locaties rondom IJburg wordt eveneens verwezen naar Bijlage A.

### Ruimtelijke golfveld en 1D spectra

Naast figuren van de resultaten van de berekeningen in de diverse locaties zijn voor elke berekening ook plots van de ruimtelijke verdeling van de golfhoogte en golfperiode en plots van de 1D spectra in enkele geselecteerde locaties gemaakt. Ook deze figuren zijn in digitale vorm beschikbaar voor elk van de 216 beschouwde combinaties van meerpeil, windrichting en windsnelheid. Elk van deze bestanden bevat drie figuren (zie voorbeeld in Bijlage H, Figuur 9-7, Figuur 9-8 en Figuur 9-9):

- Ruimtelijke verdeling van significante golfhoogte  $H_s$  en golfperiode  $T_{m01}$  (grof model);
- Ruimtelijke verdeling van significante golfhoogte  $H_s$  en golfperiode  $T_{m01}$  (genest model);
- 1D spectra in 10 geselecteerde locaties in het gebied van IJburg.

### Numerieke controles

Naast de beschreven plots die gebruikt zijn voor een visuele controle van de resultaten zijn met behulp van Matlab scripts ook enkele numerieke controles uitgevoerd. Deze betreffen:

- De consistentie van de golfcondities met de windsnelheid;
- De consistentie van de golfcondities met het meerpeil;
- Het voorkomen van afwijkende (met name hoge) waarden.

## 7.2 Controle golfberekeningen IJburg

Alvorens de daadwerkelijke controle voor de genoemde parameters te beginnen is gecontroleerd of alle berekeningen op de juiste wijze zijn afgerond. Hiertoe is gecontroleerd of in directories het bestand *norm\_end* aanwezig was. Dit was voor alle berekeningen het geval.

### Consistentie ten opzichte van omliggende locaties

Uit de visuele inspectie van de figuren met de resultaten in de locaties blijkt dat de consistentie van de resultaten ten opzichte van omliggende locaties goed is. Sprongen kunnen goed worden verklaard uit veranderingen in de locale geometrie.

## Consistentie golfcondities met windsnelheid

Over het algemeen mag verwacht worden dat de golfhoogte en golfperiode toenemen bij toenemende windsnelheid. De consistentie van de significante golfhoogte  $H_s$  en de representatieve golfperiode  $T_{pm}$  (het maximum van  $T_{pb}$  en  $T_{pbeq}$ ) met de windsnelheid is gecontroleerd met behulp van een Matlab script. De significante golfhoogte is op een enkele uitzondering na volledig consistent met de windsnelheid. De uitzonderingen betreffen de locaties 76 en 77 voor wind uit  $240^\circ$  en  $270^\circ$ .

De golfperiode  $T_{pm}$  neemt voor een veel groter aantal locaties en condities af bij toenemende windsnelheid. Uit analyse van de locaties waar dit optreedt, blijkt dat dit met name situaties zijn waarbij de locatie voor de betreffende windrichting in de lijn van een obstakel ligt (bijvoorbeeld bij de hoek van een eiland). In een dergelijk geval bevat het spectrum zowel golfcomponenten die voor het obstakel gegenereerd zijn en daar omheen komen als componenten die in de lijn zijn gegenereerd. Bij toenemende windsnelheid verandert de verhouding tussen deze twee componenten, waardoor de representatieve periode  $T_{pm}$  afneemt.

## Consistentie golfcondities met meerpeil

Over het algemeen mag verwacht worden dat de golfhoogte en golfperiode toenemen bij toenemende windsnelheid en hoger meerpeil. De consistentie van de significante golfhoogte  $H_s$  en de representatieve golfperiode  $T_{pm}$  (het maximum van  $T_{pb}$  en  $T_{pbeq}$ ) met het meerpeil is gecontroleerd met behulp van een Matlab script. In 5 locaties zijn de golfhoogtes voor enkele van de 72 windcondities niet consistent met het meerpeil. De afname van de significante golfhoogte is maximaal 0,05 m. Het betreft met name de locaties 15, 17, 18, 22 en 35 aan de noordzijde van het Buiteneiland.

Ook voor de consistentie van het meerpeil geldt dat de golfperiode  $T_{pm}$  in een veel groter aantal locaties afneemt met toenemend meerpeil. Ook hier springen de locaties 15, 17, 18 en 22 weer in het oog. In de meeste gevallen betreft het afluiddige richtingen (bijv. wind uit  $180^\circ N$  in de locaties 17 en 18).

Andere opvallende locaties zijn 30 en 31 waar ook voor noordoostelijke richtingen de golfperiode  $T_{pm}$  afneemt met toenemend meerpeil, in enkele gevallen met ongeveer 0.5 s. Hiervoor is geen duidelijke verklaring, maar waarschijnlijk speelt de strekdam hierin een rol.

## Afwijkende waarden

Tenslotte zijn de resultaten nog gecontroleerd op afwijkende, extreme grote, waarden voor de golfhoogte of golfperiode. Deze bleken niet voor te komen. Golfhoogtes groter dan  $H_s = 2,0$  m en golfperiodes groter dan  $T_p = 5,5$  s blijken slechts in ongeveer 5 locaties voor te komen. De hoogste condities hebben golfhoogtes tot  $H_s = 2,3$  m en golfperiodes tot  $T_p = 5,8$  s. Dit lijkt voor de betreffende locaties realistisch.

## 7.3 Controle golfberekeningen Eemvallei

Bij de controle van de resultaten van de Bretschneider berekeningen zijn nog enkele inconsistenties in het uitvoeren van de procedures en de toepassing van de invoerbestanden naar voren gekomen. Deze inconsistenties zijn geëlimineerd en de berekeningen gecorrigeerd.

### Consistentie ten opzichte van omliggende locaties

Uit de visuele inspectie van de figuren met de resultaten in de locaties blijkt dat de consistentie van de resultaten ten opzichte van omliggende locaties voor de as van de Eem goed is. Voor de locaties in de Eemvallei gaat dit slechts ten dele op. Met name aan de westzijde zijn de verschillen in de representatieve bodemligging van locatie tot locatie soms vrij groot, waardoor ook grote verschillen in de golfhoogte en golfperiode ontstaan.

### Consistentie golfcondities met windsnelheid

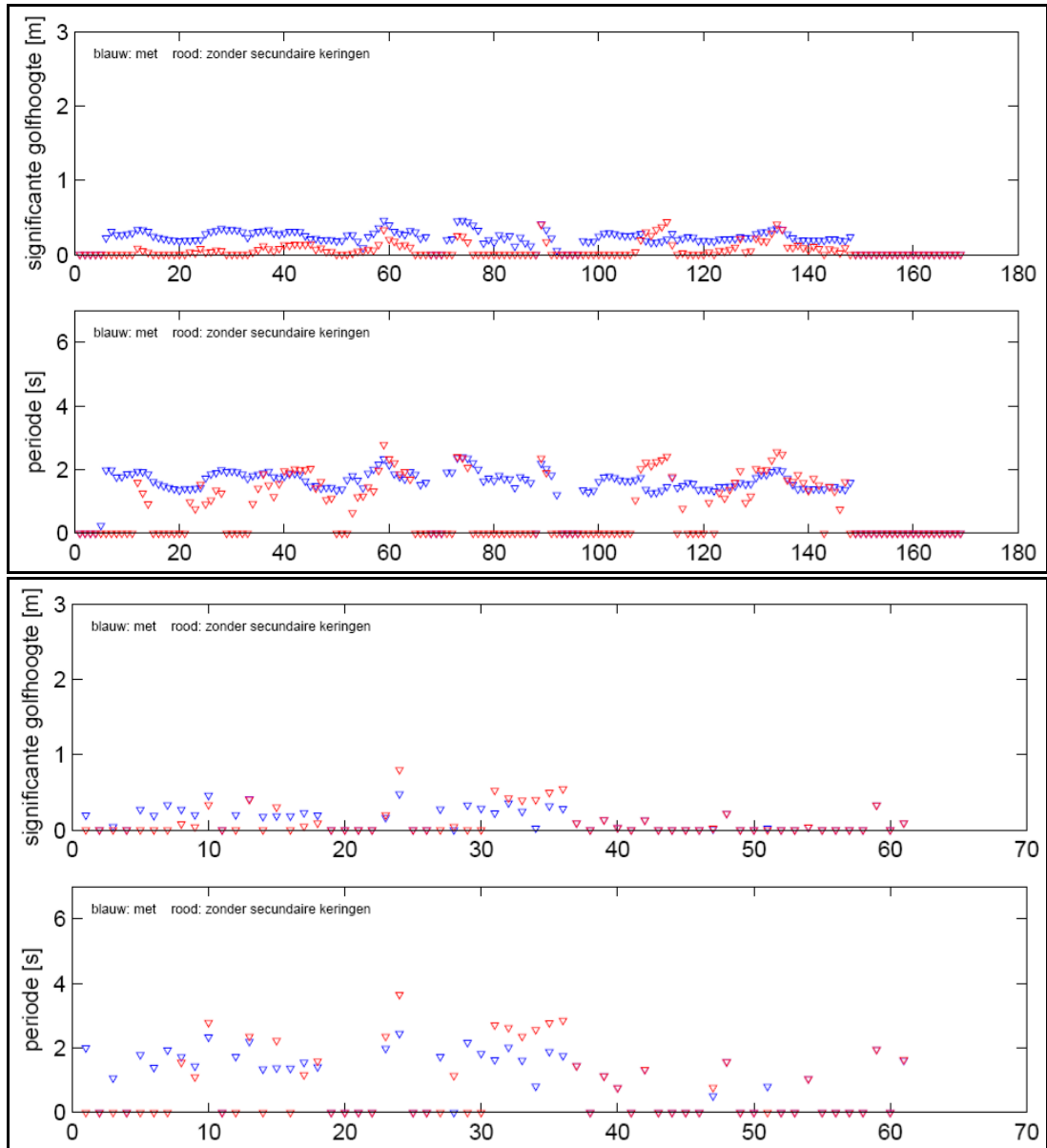
Over het algemeen mag verwacht worden dat de golfhoogte en golfperiode toenemen bij toenemende windsnelheid en hoger meerpeil. Deze consistentie van de golfcondities met windsnelheid en meerpeil is gecontroleerd met behulp van een Matlab script. Uit de resultaten bleek dat alle gevallen waarbij toenemende windsnelheid leidt tot lagere golfcondities optreden bij wind uit zuidoostelijke tot zuidwestelijke richting. Bij deze windrichtingen treedt afwaaiing op, waardoor de diepte kleiner wordt.

### Consistentie golfcondities met meerpeil

In een zeer klein aantal gevallen bleken de golfcondities af te nemen bij hoger meerpeil. De verschillen zijn echter altijd minder dan 0.01 m, resp. 0.01 s. Deze zijn niet verder onderzocht.

### Consistentie met / zonder secundaire keringen

Voor de Eemvallei zijn berekeningen uitgevoerd voor de situatie met en de situatie zonder secundaire keringen. Omdat zonder de secundaire keringen de strijklengtes over het algemeen langer zijn, werd verwacht dat de golfcondities ook hoger zouden zijn. Dit is met de bovengenoemde Matlab script ook nagegaan. Uit deze controle bleek echter dat in een groot aantal locaties de golfhoogte en golfperiode zonder de secundaire keringen lager zijn dan in de situatie met de secundaire keringen. Figuur 7-1 geeft hiervan een voorbeeld. Het verschil tussen de resultaten kan worden verklaard uit een verschil in de representatieve diepte voor de twee situaties.



Figuur 7-1 Voorbeeld waarbij Bretschneider resultaten langs de as van de Eem (boven) en in de Eemvallei (onder) met secundaire keringen hogere waarden geven dan zonder secundaire keringen (meerpeil -0.4 m+NAP, windsnelheid 28 m/s, windrichting 240°N).

### Afwijkende waarden

Tenslotte zijn de resultaten nog gecontroleerd op afwijkende, extreme grote, waarden voor de golfhoogte of golfperiode. Deze bleken niet voor te komen. De hoogste condities hebben golfhoogtes tot  $H_s = 1.5$  m en golfperiodes kleiner dan  $T_p = 5.0$  s. Dit lijken voor het betreffende gebied realistische waarden.



## 7.4 Conclusies op basis van controle van de golfberekeningen

Het doel van de controle was te bepalen of het nodig was individuele berekeningen af te keuren en om te bepalen of locaties afgekeurd moesten worden voor het bepalen van de Hydraulische Randvoorwaarden 2006.

Hieronder worden voor beide deelgebieden de conclusies besproken ten aanzien van de locaties en wordt aangegeven of locaties zijn afgekeurd voor het bepalen van de HR2006.

### IJburg

De resultaten van de SWAN berekeningen voor IJburg lijken in grote lijnen betrouwbaar. Wat vooral opvalt is dat de golfperiode  $T_{pm}$  in een vrij groot aantal locaties afneemt bij toenemende windsnelheid en/of hoger meerpeil. Een deel van de gevallen betreft afluiddige windrichtingen die naar verwachting niet maatgevend zijn voor de betreffende locaties. In ander deel van de gevallen treedt dit op in locaties die voor de betreffende windrichting enigszins afgeschermd liggen. De afname kan in die gevallen verklaard worden uit een andere balans tussen de lokaal opgewekte golven met een korte periode en golven met een langere periode die om het obstakel heen komen.

In de beschrijving van de SWAN schematisatie in hoofdstuk 5 is geconstateerd dat enkele locaties in smalle stroken water liggen waar het rooster slechts 2 natte cellen bevat tussen de eilanden die als obstakel geschematiseerd zijn. Dit heeft tot gevolg dat de resultaten hier minder betrouwbaar zijn. Met name het kanaal tussen het Rieteiland en het Haveneiland werd hierbij genoemd. Om deze locaties nader te onderzoeken, zijn hiervoor in het volgende hoofdstuk wel de HR2006 bepaald. Naar aanleiding van die resultaten wordt aangegeven of de locaties in de uiteindelijke database voor de HR2006 worden opgenomen. In dit stadium is het aan te bevelen terughoudend om te gaan met de resultaten van de golfberekeningen en daarmee de resultaten voor de kruinhoogten en illustratiepunten. Meer specifiek gaat het om de volgende locaties:

- Locatie 52, tussen Haven- en Rieteiland;
- Locatie 165, tussen Midden- en Strandeiland;
- Locatie 170, tussen Haven- en Centrumeiland.

### Eemvallei

De resultaten van de Bretschneider berekeningen voor de Eemvallei vertonen weinig tot geen onrechtmatigheden. Wat wel opvallend is, is dat in een vrij groot aantal locaties de golfcondities zonder secundaire keringen lager zijn dan met secundaire keringen. Dit wordt veroorzaakt door de representatieve waterdiepte. Volgens afspraak zijn de waarden zonder secundaire keringen opgenomen in de HR2006 database.

## 8 Bepalen Hydraulische Randvoorwaarden 2006

### 8.1 Inleiding

Voor het vaststellen van de HR2001 in het merengebied is het programma Hydra-M toegepast. Hydra-M maakt gebruik van een database met waterstanden en golven, behorend bij een groot aantal combinaties van meerpeilen en windcondities, waarvan de individuele statistische karakteristieken bekend zijn. Voor de HR2006 voor het Markermeer en omgeving wordt de database uit 2001 grotendeels overgenomen, met uitzondering van de locaties IJburg en de Eemvallei. Dit betreffen nieuwe locaties die, onder andere door de aanleg van eilandengroep IJburg, aan de database moeten worden toegevoegd.

In dit project wordt de Hydra-M database voor de nieuwe locaties aangemaakt en worden voor een aantal van deze locaties het toetspeil, de benodigde kruinhoogte en illustratiepunten (maatgevende combinatie van waterstand, significante golfhoogte, piekperiode en golfvalsrichting) voor verschillende toetsfrequenties met Hydra-M bepaald. Alvorens de HR2006 te bepalen, zijn eerst de resultaten van de productieberekeningen in de Hydra-M database verwerkt. Vervolgens is Hydra-M gebruikt om de HR2006 voor de nieuwe locaties vast te stellen.

Ter controle van de resultaten voor de nieuwe HR2006 locaties én om te toetsen of de Hydra-M database van de HR2001 op het Markermeer voor de situatie na de aanleg van IJburg nog steeds bruikbaar zijn, is voor een aantal bestaande locaties uit de database van HR2001 nieuwe berekeningen gemaakt. Op deze locaties zijn de nieuwe HR2006 vergeleken met de HR2001.

Voor beide gebieden wordt een database geleverd met de resultaten voor alle rekenlocaties én één met uitsluitend de resultaten voor de HR 2006 locaties.

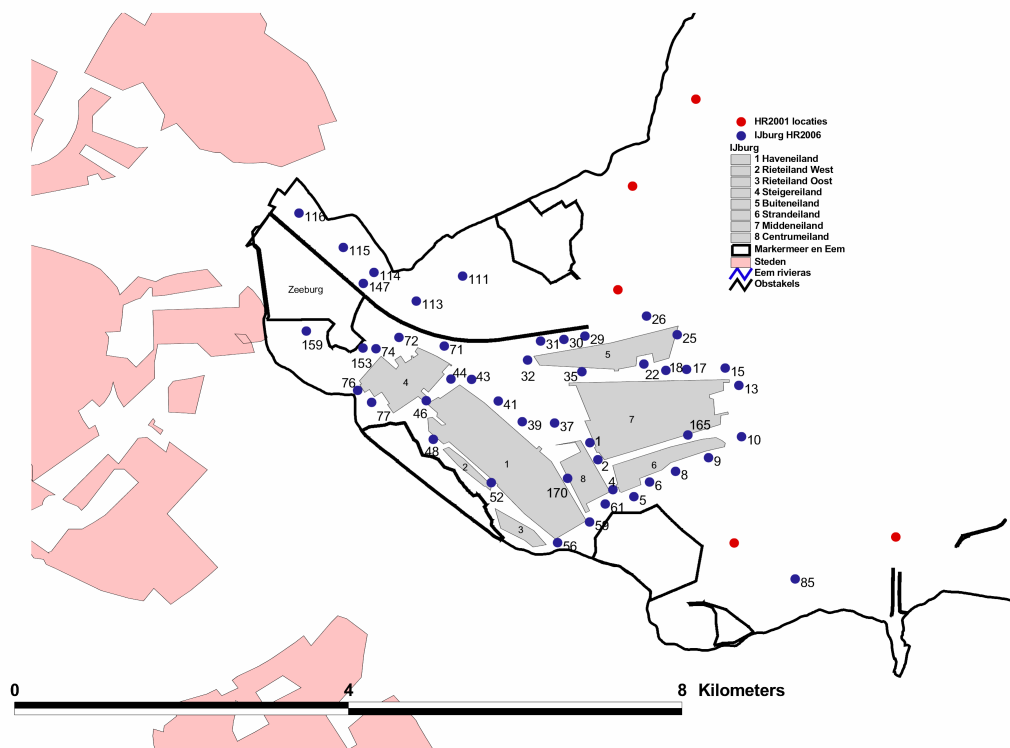
Alvorens de HR2006 te kunnen bepalen, is in overleg met de opdrachtgever bepaald welke locaties worden opgenomen in de HR2006.

### 8.2 Overzicht locaties HR2006

De locaties waarvoor de HR2006 zijn bepaald, zijn in overleg met de opdrachtgever vastgesteld. Hierbij is rekening gehouden met de resultaten van de controle van zowel de waterstandsberekeningen als de golfberekeningen. Daarnaast is er gekeken of de set voldoende dekking geeft om op alle zijden van de IJburg eilanden en in de Eemvallei de randvoorwaarden te kunnen bepalen.

## 8.2.1 IJburg

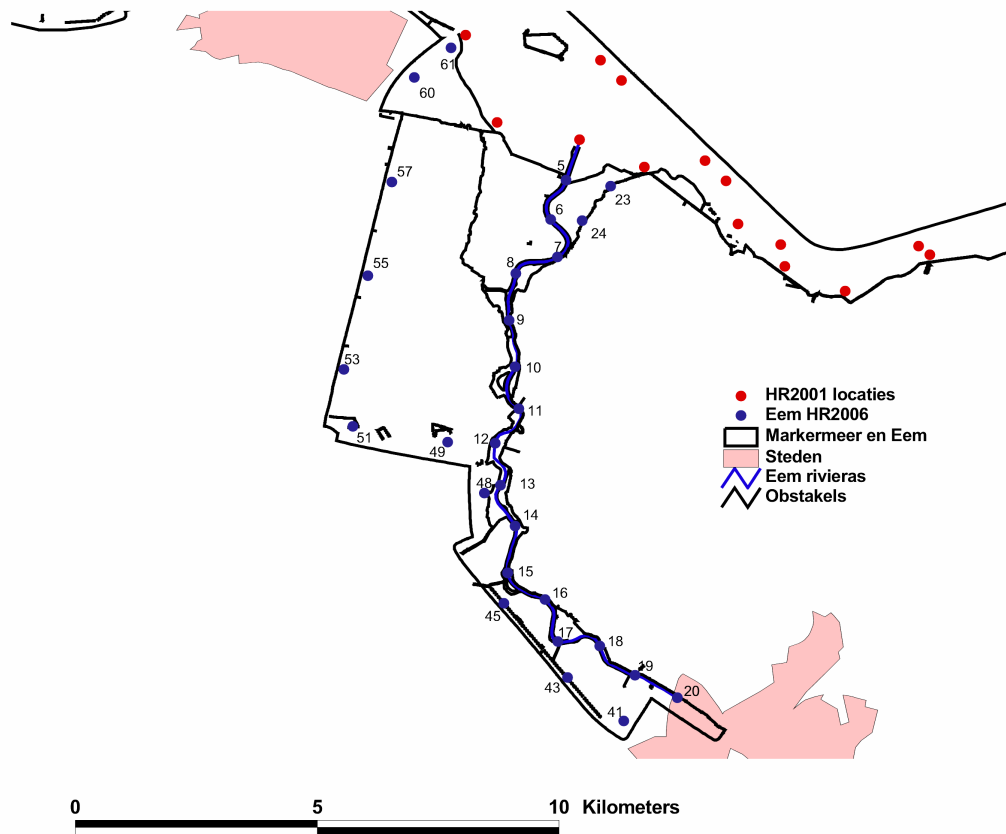
Rondom IJburg worden in eerste instantie 47 locaties opgenomen in de HR2006 database. Figuur 8-1 toont een overzicht van de locatie met de bijbehorende nummers. De nummers zijn afgeleid uit de uitgebreide controle set.



Figuur 8-1 Overzicht HR2006 locaties rondom IJburg

## 8.2.2 Eemvallei

Voor de Eemvallei worden in eerste instantie 29 locaties opgenomen in de HR2006 database. Figuur 8-2 toont een overzicht van de locatie met de bijbehorende nummers. De nummers zijn afgeleid uit de uitgebreide controle set.



Figuur 8-2 Overzicht HR2006 locaties op de Eemvallei

## 8.3 Opname van resultaten in databases Hydra-M

### 8.3.1 Beknopte beschrijving Hydra-M

Het programma Hydra-M is een belangrijk hulpmiddel voor de toetsing en het ontwerp van waterkeringen in het merengebied. Het programma is in de jaren 1995 en 1996 ontwikkeld voor het IJsselmeer en Ketelmeer en in de jaren daarna ook toegepast op het Markermeer en bij de aanleg van IJburg.

Langs meren worden grote belastingen op de waterkeringen veroorzaakt door hoge meerpeilen, harde wind of een combinatie van beide.

De uiteindelijke belasting op een waterkering is daarnaast afhankelijk van het profiel van de kering. In Hydra-M kunnen met behulp van hydraulische randvoorwaarden ter plaatse van de teen van de dijk en het profiel van de waterkering voor verschillende toetsfrequenties het toetspeil, de benodigde kruinhoogte en illustratiepunten (maatgevende combinatie van waterstand, significante golfhoogte, piekperiode en golfvalsrichting) van een dijk worden bepaald. De waterstand ter plaatse van de teen van de dijk wordt bepaald door de gemiddelde waterstand van het meer (afhankelijk van de vullingsgraad, het meerpeil) en lokale effecten, zoals op- en afwaaiing door storm.

Daarnaast is het golfklimaat, uitgedrukt in een golfhoogte, een golfperiode en een golfrichting van belang voor golfoploop en golfoverslag. Golfoploop en -overslag op een dijk zijn afhankelijk van het dijkprofiel (profiel, voorland, doorlatendheid en ruwheid van de bekleding van de kering). Het onzekere karakter van het meerpeil en de stormcondities hebben geleid tot de ontwikkeling van het probabilistische dijktoetsprogramma Hydra-M.

### **8.3.2 Aanmaken Hydra-M database**

De invoer van Hydra-M wordt gevormd door de resultaten van de 216 waterstandsberekeningen en golfberekeningen die in het voorgaande zijn beschreven. Elke combinatie van meerpeil en windcondities heeft een eigen kans van voorkomen die met behulp van de vastgestelde individuele statistieken kan worden bepaald. Verschillende combinaties van deze randvoorwaarden kunnen tot eenzelfde belasting van de waterkering leiden. Met een probabilistische berekening kan worden vastgesteld met welke frequentie een bepaalde belasting wordt overschreden. Deze berekening wordt in Hydra-M uitgevoerd met een variant op de Riemann integratie techniek [Van der Made, 1969].

Voor het aanmaken van de Hydra-M database is het nodig een aantal keuzes ten aanzien van de invoer te maken. Deze keuzes worden hieronder beschreven.

#### **Interpolatie en reproductiefuncties**

In [Beyer & Blaakman, 1999] zijn twee methoden besproken om het aantal berekeningen op basis van deze 216 berekeningen uit te breiden voor combinaties van meerpeilen en windcondities die niet zijn doorgerekend met WAQUA en SWAN/ Bretschneider, te weten:

- Een eenvoudige vorm van interpolatie (bilineair) tussen de modelresultaten;
- Een geavanceerde vorm van interpolatie, waarbij gebruik gemaakt wordt van reprofuncties, die opgesteld zijn voor de fysische grootheden waterstand, significante golfhoogte, piekperiode en gemiddelde golfrichting.

In dit project wordt voor de genoemde fysische grootheden gebruikt gemaakt van de eenvoudige vorm van interpolatie, met uitzondering van gemiddelde golfrichting. Voor de golfrichting wordt gebruik gemaakt van de reprofunctie. In Bijlage I is het effect van de twee interpolatievormen voor vier willekeurige locaties weergegeven. Het effect van de verschillende interpolatievormen op toetspeilen, benodigde kruinhoogten en illustratiepunten blijkt beperkt.

De reprofunctie voor de golfrichting per windrichting bestaat uit de gemiddelde waarde van de berekende golfrichtingen voor alle combinaties van windsnelheid en meerpeil [Beyer & Blaakman, 1999]. In de reprofunctie is de golfrichting uitgedrukt in de richting waar de golven naar toe gaan. Dit is tegengesteld aan de nautische conventie, waarin de golfrichting in Swan is uitgedrukt. De nautische conventie geeft de richting aan waar de wind die de golven opwekt vandaan komt. Er bestaat dus een verschil van  $180^\circ$  tussen wind- en golfrichting.

Voor de 216 combinaties van meerpeil en stormcondities zijn vervolgens de golfrichtingen in cartesische conventie in de Hydra-M database opgenomen, zie volgende paragraaf. In de cartesische conventie wordt de golfrichting uitgedrukt ten opzichte van de x-as. De positieve golfrichting is de richting tegen de klok in ten opzichte van de x-as.

### **Invoer waterstands- en golfberekeningen in Hydra-M – hydrvw\_r.\***

De waterstands- en golfberekeningen voor de 216 combinaties van meerpeil en stormcondities vormen samen met de reprofuncties voor de golfrichting, op verschillende locaties langs het Markermeer de invoer voor de nieuwe Hydra-M database HR2006.

In het Hydra-M databasebestand, hydrvw\_r.yb of hydrvw\_r.mm, staan de hydraulische randvoorwaarden en reproconstanten per locatie als volgt weergegeven [WL | Delft Hydraulics 1997c]:

- op de eerste regel staan de x- en y-coördinaten van de betreffende locatie met het aantal windrichtingen;
- op de volgende regels staan per windrichting, achtereenvolgens de constanten van de reprofuncties en de modelgegevens gesorteerd naar combinaties van meerpeil en windsnelheid (eerst de laagste snelheden gecombineerd met oplopende meerpeilen). De volgende modelgegevens zijn opgenomen: (1) de significante golfhoogte, (2) de golfrichting, (3) de golfperiode, (4) de waterdiepte, (5) de stroomsnelheid, (6) de stroomrichting, (7) de golflengte, (8) de waterdiepte en (9) de waterstand t.o.v. NAP.

Een voorbeeld van een Hydra-M databasebestand is gegeven in Bijlage J. De uitgangspunten en aannamen die bij het aanmaken van de Hydra-M databasebestanden voor verschillende modelgegevens voor IJburg en de Eemvallei zijn gemaakt, staan hieronder vermeld.

### **IJburg**

Voor de golfberekeningen bij IJburg is het golfmodel SWAN toegepast. In Tabel 8-1 staan de modelgegevens van het Hydra-M databasebestand voor IJburg.

In Hydra-M wordt gebruik gemaakt van een representatieve piekperiode. De piekperiode die door SWAN wordt bepaald, is de periode die hoort bij de maximale energiedichtheid in het spectrum ( $T_p$ ). Dit is tevens de periodemaat waarvoor in paragraaf 5.3 een correctiefactor is bepaald. Deze periodemaat komt goed overeen met de piekperiode van een eentoppig spectrum. Voor een meertoppig en/of breed spectrum is deze piekperiodemaat echter minder geschikt om toe te passen in de golfoploop- en golfoverslagformules.

In de studie naar de Hydraulische Randvoorwaarden voor IJburg [WL | Delft Hydraulics, 1998] is daarom een methode toegepast die ontwikkeld is door Roskman [1997]. Door het gebruik van deze methode wordt aangesloten bij de procedure die door RIKZ wordt gehanteerd langs de Nederlandse zee kust. Bovendien vormt het feit dat  $T_p$  discreet wordt bepaald dan geen probleem meer.

De methode houdt in dat op basis van het door SWAN uitgevoerde 1-D golfspectrum een periodemaat, de maatgevende piekperiode, wordt berekend die representatief is voor een arbitrair spectrum. Deze maatgevende piekperiode  $T_{pm}$  is gelijk aan de maximale waarde van de  $T_{pb}$  en  $T_{pbeq}$  :

$$T_{pm} = \max(T_{pb}, T_{pbeq})$$

Deze piekperiodematen kunnen uit het 1-D golfspectrum worden bepaald en zijn voor de bepaling van de HR2006 voor omgeving IJburg toegepast.

$T_{pb}$  is de piekperiode voor een enkeltoppig (en eventueel een breed spectrum):

$$T_{pb} = \frac{\int_{f_1}^{f_2} \frac{1}{f} E(f) df}{\int_{f_1}^{f_2} E(f) df}$$

Hierin vormen  $f_1$  en  $f_2$  het integratie-interval. Het integratie-interval ontsluit 40% van de piek energiedichtheid, zie [Roskam, 1997].

Voor meertoppige en/of brede spectra wordt de piekperiode bepaald door  $T_{pbeq}$  :

$$T_{pbeq} = \sqrt[4]{T_{pb1}^4 \frac{m_0^{(1)}}{m_0} + T_{pb2}^4 \frac{m_0^{(2)}}{m_0}}$$

Hierin zijn  $T_{pb1}$  en  $T_{pb2}$  de piekperioden behorende bij de individuele spectra,  $m_0$  de totale golfvariantie, en  $m_0^{(1)}$  en  $m_0^{(2)}$  de totale golfvariantie van de individuele spectra. Zie verder [Roskam, 1997] en [Van der Meer, 1993]. Er wordt van uitgegaan dat de correctiefactor die voor  $T_p$  is bepaald ook representatief is voor de maatgevende piekperiode  $T_{pm}$ . Dat betekent dat voor  $T_{pm}$  een correctiefactor van 1,022 is toegepast.

Tabel 8-1 Modelgegevens in Hydra-M-databasebestanden voor IJburg

<b>Modelgegevens in Hydra-M-databasebestanden voor IJburg</b>		
Significante golfhoogte	$H_{sig}$	Significante golfhoogte volgt uit de SWAN resultaten. Om de SWAN berekeningen beter af te stemmen op metingen is, conform de memo over de SWAN schematisatie en correctiefactoren, een correctiefactor van 0.964 toegepast.
Golfrichting	$\theta$	Golfrichting in cartesische conventie. De golfrichting uit SWAN in nautische conventie is als volgt omgerekend: $\theta = 270 - \theta_{SWAN}$ als $\theta < 0$ , dan $\theta = \theta + 360$
Piekgolfperiode in Hydra-M	$T_{pm}$	De maatgevende piekperiode $T_{pm}$ is gelijk aan de maximale waarde van piekperiodes $T_{pb}$ en $T_{pbeq}$ . Voor deze periodemaat is een correctiefactor van 1.022 toegepast.
Waterdiepte	$d$	Waterdiepte volgt uit de SWAN resultaten
Absolute stroomsnelheid en stroomrichting	$u, u_{richting}$	De stroomsnelheden in x- en y-richting uit de WAQUA resultaten zijn omgerekend naar de absolute snelheid en de richting
Golflengte	$L$	Golflengte volgt uit de SWAN resultaten
Waterstand t.o.v. NAP	$h$	Voor de waterstand t.o.v. NAP is de maximale waterstand tijdens de WAQUA simulatie gebruikt

### Eemvallei

Voor de bepaling van windgedreven waterstanden en golven in de Eemvallei is het eenvoudige 1-D golfgroeimodel Bretschneider gebruikt. Met behulp van de formules van Bretschneider zijn de golfhoogte en golfperiode in geval van golfgroei door wind berekend. De golflengte wordt niet direct door het model uitgevoerd, maar kan met behulp van de waterdiepte uit de WAQUA resultaten en de piekperiode uit de Bretschneider resultaten worden afgeleid. In Tabel 8-2 staan de modelgegevens van het Hydra-M databasebestand voor de Eemvallei.

Tabel 8-2 Modelgegevens in Hydra-M-databasebestanden voor IJburg

<b>Modelgegevens in Hydra-M-databasebestanden voor Eemvallei</b>		
Significante golfhoogte	$H_{sig}$	Significante golfhoogte volgt uit de Bretschneider resultaten
Golfrichting	$\theta$	Golfrichting is gelijkgesteld aan de windrichting. De golfrichting in Hydra-M is in cartesische conventie. De windrichting in nautische conventie is als volgt omgerekend naar cartesische conventie: $\theta = 270 - \theta_{wind}$ als $\theta < 0$ , dan $\theta = \theta + 360$
Piekgolfperiode	$T_p$	Piekgolfperiode volgt uit de Bretschneider resultaten
Waterdiepte	$d$	Waterdiepte volgt uit de WAQUA resultaten
Absolute stroomsnelheid en stroomrichting	$u, u_{richting}$	De stroomsnelheden in x- en y-richting uit de WAQUA resultaten zijn omgerekend naar de absolute snelheid en de richting
Golflengte	$L$	De golflengte is als volgt afgeleid: $L_0 = \frac{g}{2\pi} T^2$ $L = L_0 \left( 1 - e^{-\left(2\pi \frac{d}{L_0}\right)^{1.25}} \right)^{0.4}$ $d$ is de waterdiepte t.o.v. NAP uit de WAQUA resultaten $T$ is de gemiddelde golfperiode, $T = T_p / 1.25$ , met $T_p$ de piekperiode uit de Bretschneider resultaten
Waterstand t.o.v. NAP	$h$	Voor de waterstand t.o.v. NAP is de maximale waterstand tijdens de WAQUA simulatie gebruikt

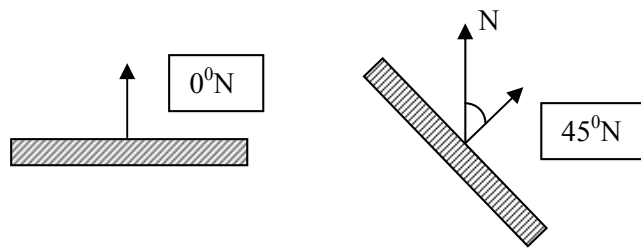


Naast de hydrvw\_r-invoerbestanden zijn locatiebestanden aangemaakt waarin de locaties met bijbehorende x- en y-coördinaten staan gespecificeerd.

### 8.3.3 Dijkprofiel

Niet alleen de hydraulische condities, maar ook het profiel van de waterkering is bepalend voor de uiteindelijke belasting op de dijk. De golfoploop en -overslag op een dijk zijn afhankelijk van het dijkprofiel (profiel, voorland, doorlatendheid en ruwheid van de bekleding van de kering).

Voor het bepalen van illustratiepunten en kruinhoogten is uitgegaan van een standaard dijkprofiel met een 1:4 talud zonder berm of voorland, een grasbekleding en een toelaatbaar overslagdebiet van 1 l/s/m. Per locatie is de dijknormaal ten opzichte van de Noord gespecificeerd. De dijknormaal, de loodlijn op de dijk, is hierbij vanaf de dijk gericht. Figuur 8-3 geeft schematisch de definitie van de dijknormaal.



Figuur 8-3 Definitie van dijknormaal

### 8.3.4 Meerpeil- en windstatistiek in Hydra-M

Tot slot zijn bestanden voor de windstatistiek en de meerpeilstatistiek in Hydra-M vereist. Voor de HR2006 wordt ervan uitgegaan dat de windstatistiek ten opzichte van de HR2001 niet verandert. Voor de HR2006 worden dezelfde combinaties van 6 windsnelheden en 12 windrichtingen toegepast als voor de HR2001.

Door de aanleg van de eilandengroep IJburg, kan voor de HR2006 echter wel een beperkte verandering in de meerpeilstatistiek van het Markermeer ontstaan ten opzichte van de HR2001. Aangezien voor de HR2006 de Hydra-M database HR2001 grotendeels wordt overgenomen, met uitzondering van de nieuwe locaties in de Eemvallei en in de omgeving van IJburg, heeft de opdrachtgever aangegeven de meerpeilstatistiek van de HR2001 aan te willen houden. Er is aangenomen dat de aanleg van de eilandengroep IJburg een beperkte invloed heeft op de meerpeilstatistiek van het Markermeer en de hydraulische randvoorwaarden niet beïnvloed.

## 8.4 Bepalen van de Hydraulische Randvoorwaarden 2006

Voor alle HR2006 locaties rondom IJburg en op de Eem, zoals die zijn gedefinieerd in paragraaf 8.2, zijn met behulp van Hydra-M voor vijf herhalingstijden de toetspeilen, illustratiepunten en kruinhoogten berekend. Voor beide deelgebieden zijn de volgende consistentietesten uitgevoerd om de HR2006 te controleren:

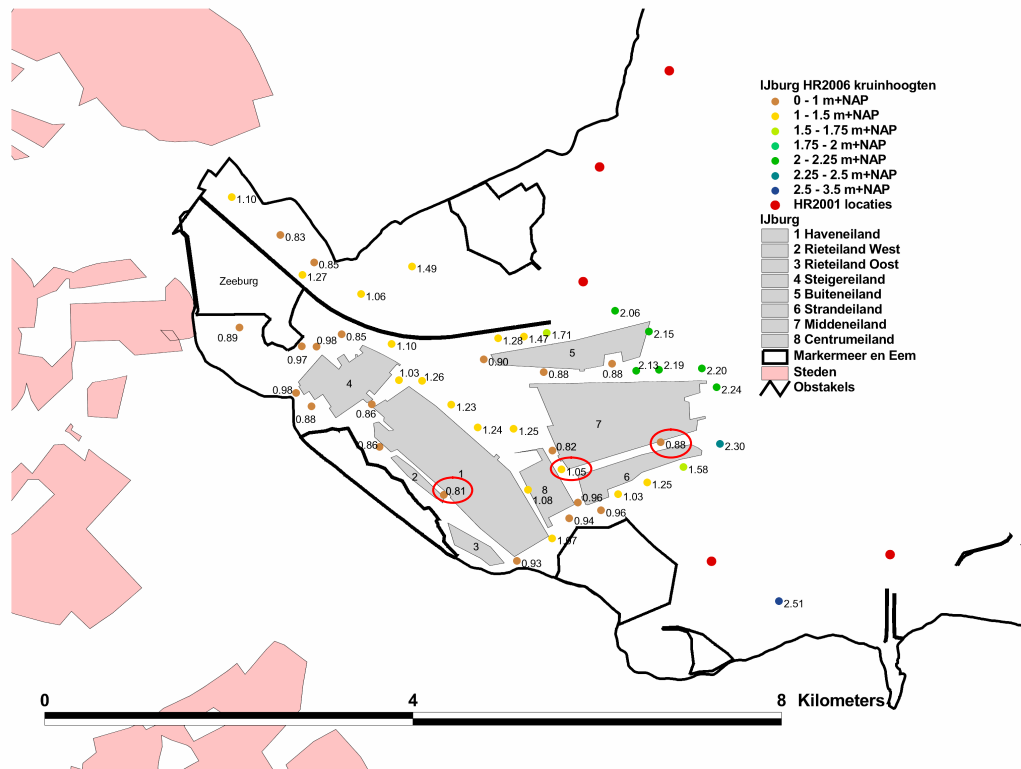
1. Ruimtelijk verloop van toetspeilen, illustratiepunten en kruinhoogten langs de kustlijn
2. Relatie tussen toetspeilen, illustratiepunten en kruinhoogten én herhalingstijd

In Bijlagen K en L zijn de complete resultaten voor respectievelijk IJburg en de Eem opgenomen. De informatie wordt in de volgende tabellen en figuren gepresenteerd:

- Tabel met het overzicht van de locaties voor de HR2006 waarin de dijknormaal is aangegeven;
- Tabellen met de toetspeilen, kruinhoogten en illustratiepunten voor achtereenvolgens 1/1000, 1/1250, 1/2000, 1/4000 en 1/10.000;
- Figuren met de toetspeilen, kruinhoogten, illustratiepunten en condities (meerpeil en windcondities) behorende bij de illustratiepunten voor achtereenvolgens 1/1000, 1/1250, 1/2000, 1/4000 en 1/10.000;
- Figuren met de toetspeilen, kruinhoogten en illustratiepunten voor achtereenvolgens 1/1000, 1/1250, 1/2000, 1/4000 en 1/10.000;
- Figuren waarin de toetspeilen, kruinhoogten en illustratiepunten voor alle herhalingstijden in één figuur zijn opgenomen.

### 8.4.1 HR2006 voor IJburg

Voor de omgeving IJburg laten de figuren in Bijlage K een consistent ruimtelijk verloop van toetspeilen, illustratiepunten en kruinhoogten langs de kustlijn beeld zien. In Figuur 8-4 zijn de benodigde kruinhoogten bij een toetsfrequentie van 1/4000 grafisch weergegeven. De figuur laat een consistent ruimtelijk verloop van de kruinhoogte zien. De benodigde kruinhoogten voor de eilanden aan de meerzijde (locaties 8-29 op het Buiteneiland, Strandeiland en Middeneiland) zijn beduidend hoger dan de benodigde kruinhoogten voor de andere eilanden (Haveneiland, Rieteiland, Steigereiland en Centrumeiland). Daarbij nemen de benodigde kruinhoogten in de richting van het vasteland af. Het is zichtbaar dat de benodigde kruinhoogten in de zone tussen de vaste oever en het Haveneiland duidelijk lager zijn doordat op deze locaties minder invloed van de golven merkbaar is.



Figuur 8-4 Benodigde kruinhoogten voor 1/4000 rondom IJburg

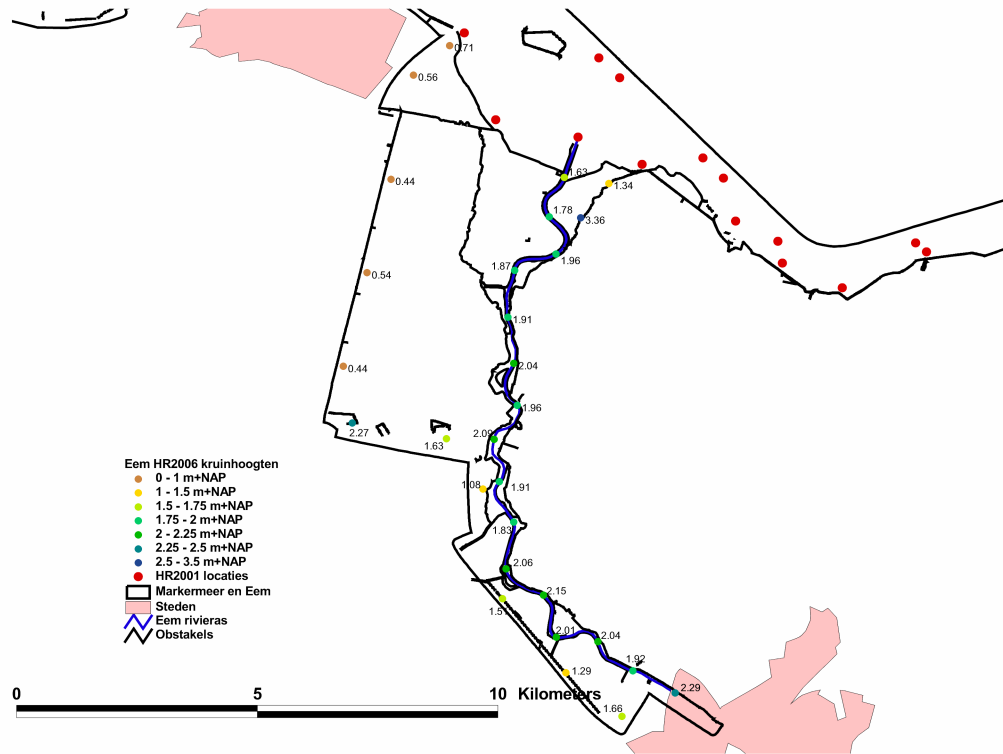
Op de in paragraaf 7.4 genoemde locaties (in rood omcirkeld) tussen de eilanden lijken de resultaten ook logisch. Daarom is besloten deze locaties in de database voor HR2006 op te nemen. De met Hydra-M berekende resultaten geven een goede eerste inschatting van de benodigde kruinhoogte, maar voor concrete studies wordt aangeraden de situatie in meer detail te bestuderen.

Het kan voorkomen dat elkaar in nummer opvolgende locaties een groot verschil vertonen in benodigde kruinhoogten, maar dat kan altijd verklaard worden vanuit de locatie. Een voorbeeld hiervan is een verschil in kruinhoogte van meer dan 70 cm tussen locatie 9 en 10. Dit wordt veroorzaakt doordat locatie 10 aan de meerzijde ligt, terwijl locatie 9 juist om de hoek van het Strandeiland ligt en daardoor minder geëxposeerd wordt.

Voor alle locaties is gecontroleerd of een hogere herhalingstijd resulteert in een toename van toetspeilen, illustratiepunten en kruinhoogten. Een afname in terugkeertijd leidt op alle locaties tot een toename in toetspeil, illustratiepunt en kruinhoogte.

### 8.4.2 HR2006 voor de Eemvallei

Voor de Eemvallei laten de figuren in Bijlage L een consistent beeld zien voor de locaties op de rivieras van de Eem. In Figuur 8-5 zijn de benodigde kruinhoogten bij een toetsfrequentie van 1/4000 grafisch weergegeven. De figuur laat een consistent ruimtelijk verloop van de kruinhoogten op de rivieras van de Eem zien.



Figuur 8-5 Benodigde kruinhoogten voor 1/4000 in de Eemvallei

Voor alle locaties op de rivieras van de Eem is gecontroleerd of een hogere herhalingstijd resulteert in een toename van toetspeilen, illustratiepunten en kruinhoogten. Dit is inderdaad het geval. Een afname in herhalingstijd leidt op alle locaties tot een toename in toetspeil en kruinhoogte.

Voor de locaties aan de westzijde en aan de oostzijde van de Eem zijn echter ruimtelijke fluctuaties in het verloop van toetspeilen, illustratiepunten en kruinhoogten zichtbaar. Dit heeft met name te maken met de compartimentering door de secundaire waterkeringen in dit gebied. Als gevolg hiervan treedt zeer vaak droogval op in het gebied. In de eerste tabel van Bijlage L is per HR2006 locatie het aantal combinaties weergegeven waarvoor er droogval optreedt tijdens de 216 doorgerekende combinaties van meerpeil en stormcondities. Voor de locaties aan de westzijde en aan de oostzijde van de Eem varieert dit aantal tussen 115 (Eem\_contr\_uitgebr\_23) en 214 (Eem\_contr\_uitgebr\_45). Op de rivieras van de Eem treedt in geen van deze combinaties droogval op.

Op een aantal locaties treedt hierdoor een fout op in de Hydra-M berekening. Dit is te verklaren doordat er in het geval van droogval met Bretschneider toch vaak golfcondities zijn berekend. Ter bepaling van de windgedreven golven is voor de Eemvallei het Bretschneider golfmodel gebruikt. Met behulp van drie invoerparameters, de strijklengte, de effectieve waterdiepte over de strijklengte en de windsnelheid, zijn de significante golfhoogte en de golfpiekperiode in geval van golfgroei door wind met de eenvoudige formules van Bretschneider bepaald.

In geval van droogval is de met WAQUA berekende waterdiepte ter plaatse van de teen van de dijk gelijk aan nul, maar de effectieve waterdiepte, die bepaald wordt door te middelen over de strijklengte, is in dat geval niet altijd gelijk aan nul. De effectieve waterdiepte per locatie is bepaald op basis van (1) waterstandsberekeningen in WAQUA en (2) de effectieve bodemligging over de totale strijklengte per windrichting. Ondanks het feit dat er droogval optreedt, worden er toch golfcondities berekend. Het feit dat er tijdens droogval in het ene geval wel en in het andere geen golfcondities worden berekend, leidt tot problemen tijdens de interpolatie tussen modelgegevens bij de verschillende meerpeil en stormcondities in Hydra\_M. Hierdoor zijn de resultaten op de locaties waar relatief vaak droogval optreedt niet betrouwbaar. Daarom wordt aangeraden de locaties 23 tot en met 61 alsnog uit de HR2006 database te verwijderen.

## **8.5 Vergelijking van HR2006 met HR2001 en ontwerprandvoorwaarden IJburg**

Voor het bepalen van de Hydraulische Randvoorwaarden 2006 worden de randvoorwaarden uit 2001 grotendeels overgenomen, met uitzondering van de nieuwe locaties in de Eemvallei en in de omgeving van IJburg. Om te bepalen of de nieuwe randvoorwaarden consistent zijn met de randvoorwaarden uit 2001, is voor een aantal bestaande locaties uit de database van de HR2001, nieuwe HR berekeningen gemaakt. Op die locaties zijn de nieuwe HR2006 vergeleken met de HR2001. Bij de bepaling van deze set locaties is onderscheid gemaakt tussen locaties rond het Gooi- en Eemmeer en het Markermeer en omgeving IJburg.

### **8.5.1 Vergelijking voor IJburg**

De vergelijking voor IJburg is uitgevoerd voor de beperkte controle set locaties zoals deze ook beschreven staan in Bijlage A, wederom met uitzondering van locaties 10 en 14. Voor de volledigheid toont Tabel 8-3 nogmaals een overzicht. Voor de locaties in deze set die rondom IJburg liggen ontbreken de gegevens in de Hydra-M database van de HR2001, omdat de ontwerprandvoorwaarden voor IJburg destijds niet geaccepteerd zijn. De aanleg van de eilandengroep IJburg is uitgevoerd in twee fasen. Voor het eerste deel zijn de Hydraulische Randvoorwaarden in twee leveringen door WL | Delft Hydraulics opgeleverd in 1998 en 1999. Voor het tweede deel is dit in 2002 gebeurd. Het betreft in beide gevallen slechts een oplevering van de databestanden die nog niet in de Hydra-M database HR2001 zijn opgenomen. Voor de vergelijking zijn deze door WL opgeleverde gegevens gebruikt. Indien relevant wordt naar deze set gegevens gerefereerd als HR-IJburg.

Tabel 8-3 Overzicht van de locaties rondom IJburg waarvoor de vergelijking tussen HR2006 en HR2001 is uitgevoerd

Locaties Markermeer en IJburg						
	Naam locaties HR2001-database		Naam locaties HR2006-database	x-coördinaat	y-coördinaat	richting dijknormaal
1.	53A Uitdam Zuid	mm <sup>1</sup>	IJb_con beperkt_1	133659	491857	120
2.	59D IJdoorn Zuid	mm	IJb_con beperkt_2	129980	487180	160
3.	hm24.9 Oostvaardersdijk	mm	IJb_con beperkt_3	138759	490169	280
4.	hm0.8 IJmeerdijk	mm	IJb_con beperkt_4	136500	487903	282
5.	gav7 Muideren Haven	mm	IJb_con beperkt_5	133315	484217	0
6.	gav8 Pen-eiland	mm	IJb_con beperkt_6	131374	484145	330
7.	Strand-eiland14	yb	IJb_con beperkt_7	131067	485168	171
8.	Strand-eiland15	yb	IJb_con beperkt_8	131465	485421	88
9.	Strand-eiland18	yb	IJb_con beperkt_9	131430	486035	87
10.	Buiten-eiland32	yb	IJb_con beperkt_11	130327	486866	346
11.	HAVE045	yb	IJb_con beperkt_12	128834	485599	41
12.	HAVE059	yb	IJb_con beperkt_13	128465	484867	225
13.	STEI080	yb	IJb_con beperkt_15	127900	486506	20
14.	59A Kinselmeer Camping	mm	IJb_con beperkt_16	130158	488423	46
15.	58A Kinselmeer Noord	mm	IJb_con beperkt_17	130917	489467	22
16.	55 Barneгат Zuid	mm	IJb_con beperkt_18	131805	490623	62
17.	hm3.1 IJmeerdijk	mm	IJb_con beperkt_19	137225	485483	262

<sup>1</sup> mm betekent dat de gebruikte data voor Markermeer afkomstig is uit de Hydra-M HR2001 database. yb betekent dat de gebruikte data voor IJburg afkomstig is uit de Hydra-M HR-IJburg database.

Bij de vergelijking tussen de Hydraulische Randvoorwaarden 2001 en 2006 is het nodig rekening te houden met onderstaande aspecten:

- het verschil in WAQUA schematisatie voor de productiesommen van de HR2001 en de HR2006;
- het verschil in golfmodel dat gebruikt is voor de productiesommen van de HR2001 en HR2006;
- het effect van de aanleg van eilandengroep IJburg op waterstands- en golfberekeningen.

Tabel 8-4 geeft een overzicht van de verschillen in aanpak tussen HR2006 en HR2001. Opvallend in deze tabel is dat de piekperiode  $T_p$  die behoort bij de maximale energiedichtheid in het spectrum niet wordt toegepast. In plaats daarvan wordt voor deze maat 1,25 keer  $T_{m01}$  gebruikt. In het vervolg van de beschouwing over de piekperiodes wordt dan ook met  $T_p$  altijd gerefereerd aan de hieronder genoemde definitie.

Tabel 8-4 Overzicht van de gebruikte modellen en parameters voor de berekeningen rondom IJburg.

Locaties Markermeer en IJburg			
	HR2001-Markermeer	HR-IJburg	HR2006
Type golfmodel	HISWA	SWAN	SWAN
Waterbewegingsmodelschematisatie	1997 – Delft2D	2001 – Delft2D	2005 - WAQUA
Effect aanleg eilandengroep IJburg	beperkt meegenomen	wel meegenomen	wel meegenomen
Piekperiode in Hydra-M	$T_p = 1.25 \cdot T_{m01}$ met $T_{m01}$ de gemiddelde golfperiode	$T_{pm} = \max(T_{pb}, T_{pbeq})$	$T_{pm} = \max(T_{pb}, T_{pbeq})$ en een correctiefactor van 1,022

Voor de omgeving Markermeer en IJburg staan de toetspeilen, kruinhoogten en illustratiepunten bij een toetsfrequentie van 1/4000 voor de HR2001 en de HR2006 in Figuur 8-6. Figuur 8-7 toont de verschillen en in Figuur 8-8 zijn de toetscondities zichtbaar.

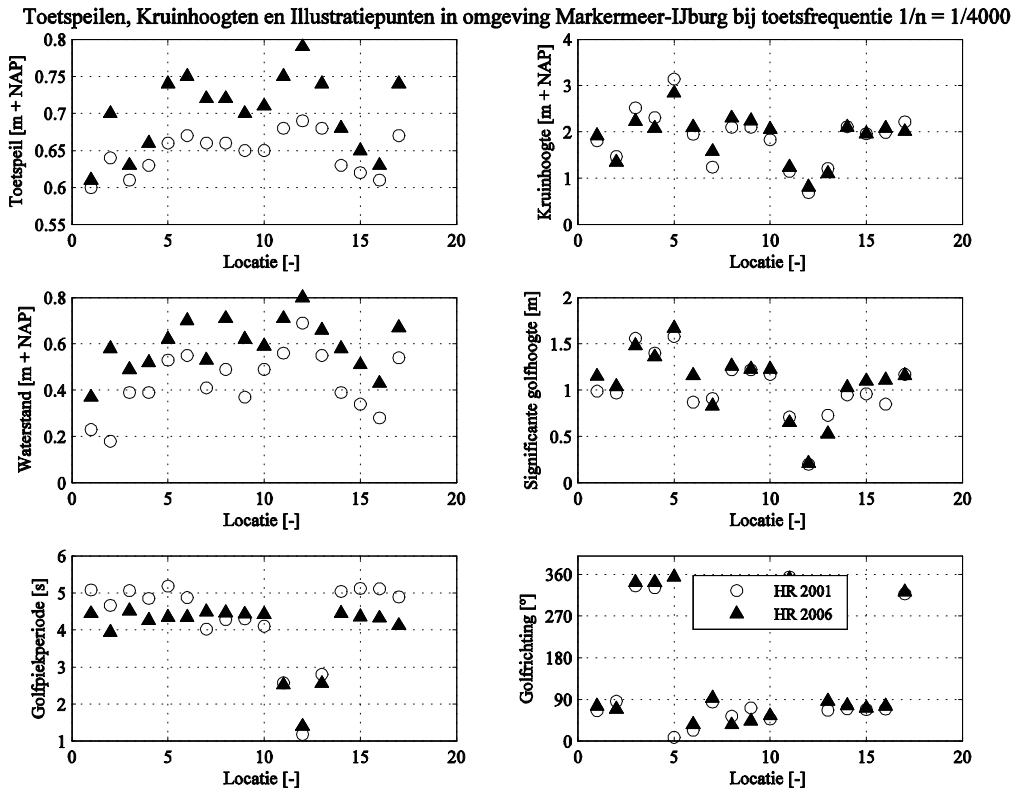
De verschillen in de toetspeilen tussen de HR2001 en HR2006 blijven beperkt tot maximaal 0,1 m. Deze verschillen zijn verwaarloosbaar, aangezien de toetspeilen in het Hydraulische Randvoorwaarden boek worden afgerond op 0,1 m nauwkeurig. Bovendien zijn bij de vergelijking in het kader van de definitie van de stormschematisatie al verschillen tussen HR2006 en HR2001 in deze orde van grootte geconstateerd.

Voor de HR2001 komen de resultaten dus uit twee verschillende databases, namelijk de officiële HR2001 database met het Markermeer en de HR-IJburg database. Aan elk van de databases liggen andere rekenmodellen en uitgangspunten ten aanzien van de golfpiekperiode ten grondslag. In Figuur 8-7 is zichtbaar dat de golfpiekperioden voor de officiële HR2001 met het Markermeer structureel hoger zijn dan voor de HR2006 (locaties 1-6 en 14-17). Voor de HR-IJburg liggen de golfpiekperioden juist lager dan die van de HR2006. Als gevolg hiervan worden voor de officiële HR2001 hogere kruinhoogten en voor de HR-IJburg lagere kruinhoogten bepaald ten opzichte van de HR2006.

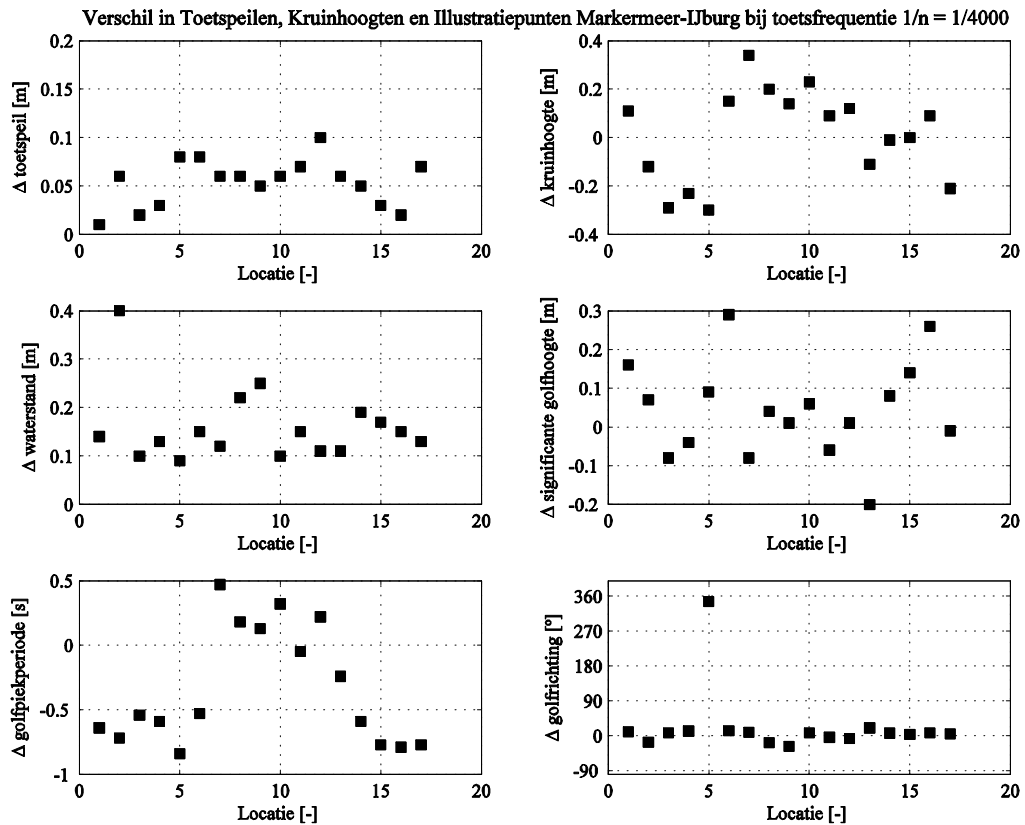
De verschillen rondom IJburg worden naar alle waarschijnlijkheid veroorzaakt door het toepassen van een aangepaste formulering voor whitecapping. Uit onderzoek van Witteveen+Bos [2004a] blijkt dat de golfperiode systematisch wordt onderschat door SWAN. Het toepassen van een aangepaste whitecapping formulering in SWAN blijkt in dit verband een aanmerkelijke verbetering in de golfperiodevoorspelling te geven. Voor HR-IJburg is de aangepaste whitecapping formulering niet toegepast.

De verschillen op het Markermeer worden vermoedelijk veroorzaakt door het verschil tussen HISWA en SWAN. Het is op basis van deze studie niet mogelijk vergaande conclusies te trekken ten aanzien van de oorzaak van de verschillen in piekperiodes. Daarvoor is het nodig aanvullend onderzoek te verrichten.

De numerieke resultaten voor de vergelijking tussen HR2001 en HR2006 van de omgeving Markermeer en IJburg staan in Bijlage M.

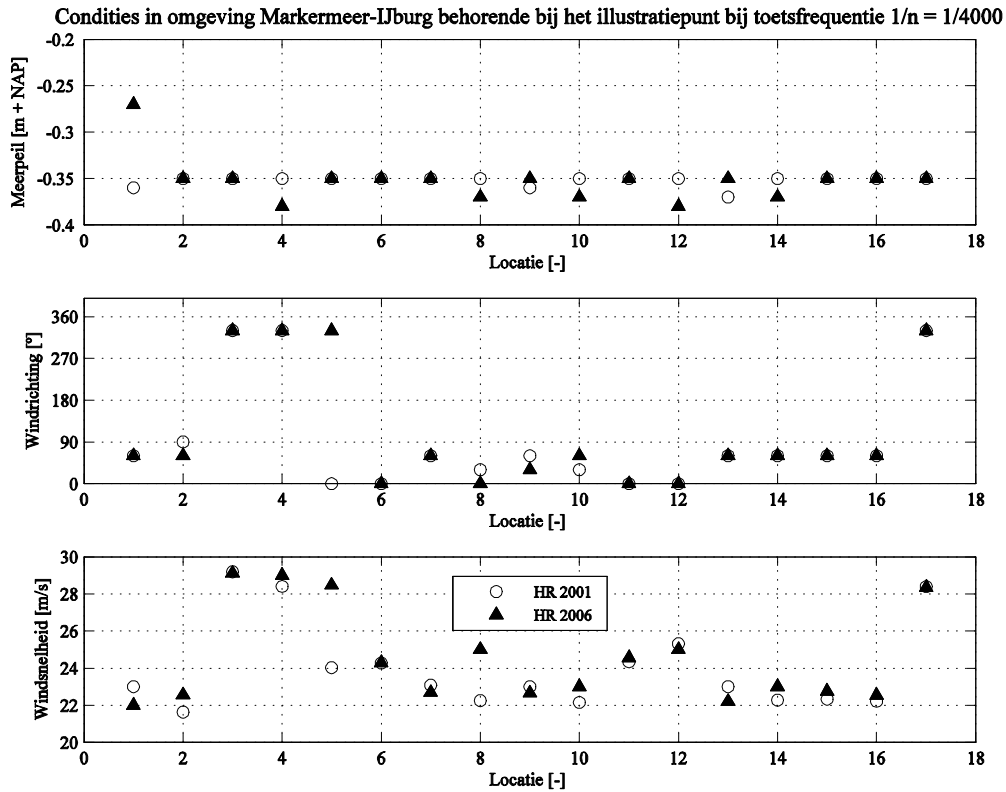


Figuur 8-6 Toetspeilen, kruihoogten en illustratiepunten voor 1/4000 rondom IJburg



Figuur 8-7 Vershil in toetspeilen, kruihoogten en illustratiepunten voor 1/4000 rondom IJburg



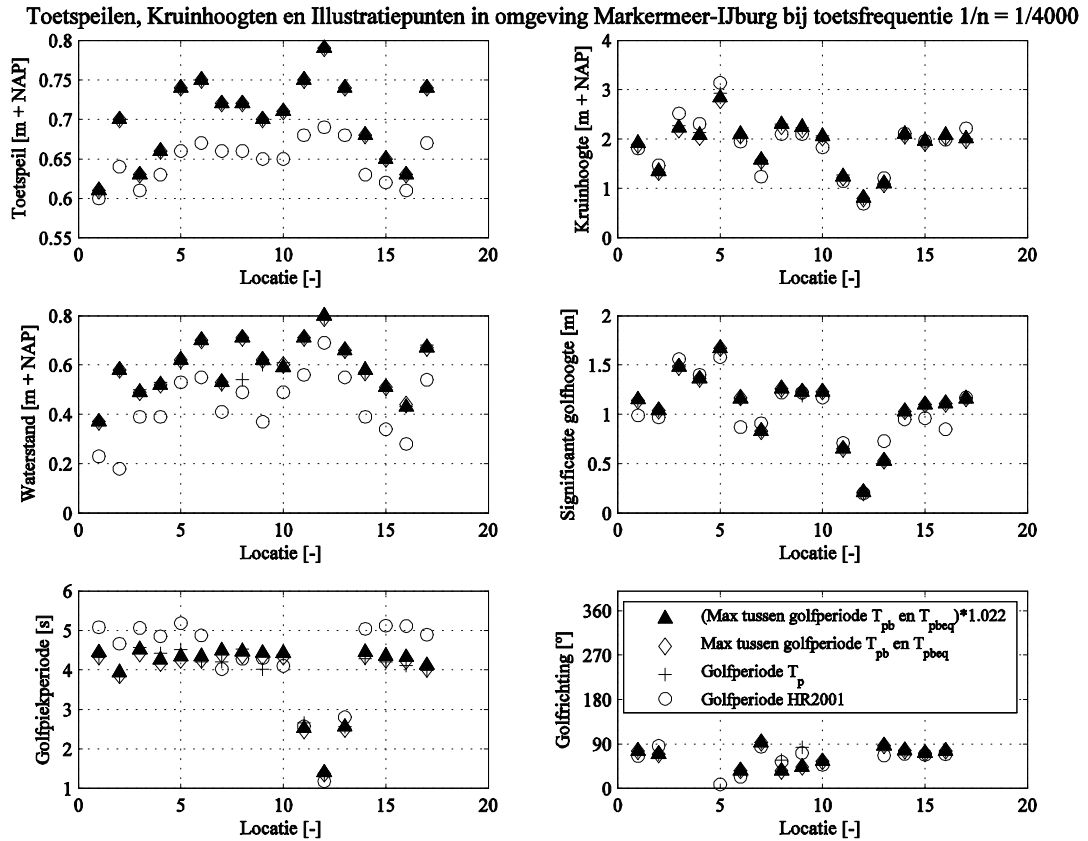


Figuur 8-8 Conditie behorende bij de illustratiepunten voor 1/4000 rondom IJburg

Om te kijken of de verschillen in kruinhoogten kunnen worden verklaard door de verschillen in definitie van de representatieve piekperiode in Hydra-M, is het effect van de piekperiode-formulering op (1) de golfpiekperioden en (2) de Hydraulische Randvoorwaarden onderzocht voor een toetsfrequentie van 1/4000. Hiertoe zijn de productiesommen voor de HR2006 gebruikt, waarvoor de piekperiodematen  $T_p (= 1,25 \cdot T_{m01})$ ,  $T_{pb}$  en  $T_{pbeq}$  uit de SWAN resultaten kunnen worden afgeleid. De piekperiodematen  $T_p (= 1,25 \cdot T_{m01})$ ,  $T_{pb}$  en  $T_{pbeq}$  zijn voor een aantal locaties uit Tabel 8-3 als functie van de 216 combinaties meerpeil en stormcondities weergegeven in Bijlage N.

In de figuren is zichtbaar dat de  $T_{pb}$  en  $T_{pbeq}$ , met uitzondering van een paar locaties en meerpeil-windstorm-combinaties, nagenoeg gelijk zijn aan elkaar. Er is overwegend sprake van enkeltoppige golfspectra. Het verschil tussen de golfperioden  $T_p = 1,25 \cdot T_{m01}$  en het maximum van de  $T_{pb}$  en  $T_{pbeq}$  varieert per locatie en per stormconditie. Indien er sprake is van een meertoppig en/of breed spectrum, dus als  $T_{pb}$  en  $T_{pbeq}$  niet gelijk zijn aan elkaar, neemt het verschil tussen de golfperioden  $T_p = 1,25 \cdot T_{m01}$  en het maximum van de  $T_{pb}$  en  $T_{pbeq}$  toe (zie locatie 11 en 19).

Het effect van de periodematen op de toetspeilen, kruinhoogten en illustratiepunten is te zien in Figuur 8-9. Naast de resultaten voor de verschillende representatieve periodematen voor HR2006 zijn ook de resultaten voor HR2001 opgenomen.



Figuur 8-9 Invloed golfpiekperiodeformulering op de toetspeilen, kruinhoogten en illustratiepunten voor  $1/4000$  rondom IJburg

De illustratiepunten zijn goed te vergelijken, omdat de meerpeil- en stormcondities niet veranderen door het gebruik van een andere golfperiodeformulering. Het effect van de golfperiodeformulering is terug te zien in verschillen in golfpiekperioden en kruinhoogten.

Het toepassen van piekperiodemaat  $T_p = 1,25 \cdot T_{m01}$  geeft min of meer gelijke golfpiekperioden in het illustratiepunt in vergelijking tot de formulering van [Roskam, 1997] met het maximum van periodematen  $T_{pb}$  en  $T_{pbeq}$ .

Naast de invloed van de te gebruiken definitie voor de maatgevende periode in Hydra-M is ook gekeken naar de invloed van de toegepaste correctiefactor. Om de invloed van de correctiefactor zichtbaar te maken, zijn in Figuur 8-9 voor alle locaties rondom IJburg de kruinhoogten en illustratiepunten zichtbaar met en zonder correctiefactor. Het is duidelijk zichtbaar dat de verschillen beperkt zijn.

### 8.5.2 Vergelijking voor de Eemvallei

De vergelijking voor de Eemvallei is slechts voor een beperkt aantal punten mogelijk doordat in 2001 de Eemvallei nog niet in de schematisatie was opgenomen. Tabel 8-5 geeft een overzicht van de locaties waarvoor de vergelijking is uitgevoerd. In Bijlage A is een figuur opgenomen waarin deze locaties staan aangegeven.

Tabel 8-5 Overzicht van de locaties in de Eemvallei waarvoor de vergelijking tussen HR2006 en HR2001 is uitgevoerd

<b>Locaties Gooi- en Eemmeer</b>					
	<i>Naam locaties HR2001-database</i>	<i>Naam locaties HR2006-database</i>	<i>x-coördinaat</i>	<i>y-coördinaat</i>	<i>richting dijknormaal</i>
1.	dp12.1 Spakenburg	Gooi_Eem_reken_57	154527	474609	40
2.	dp14.8 Oude Pol	Eem_contr_uitgebr_1	152583	475790	355
3.	dp7.3 Wielse Sluis	Gooi_Eem_reken_33	158491	473973	350
4.	dp9.1 Nekkeveld	Gooi_Eem_reken_43	156741	473224	12
5.	GG Gooijergracht	Eem_contr_uitgebr_3	149539	476711	47
6.	hm21.3 Eemmeerdiijk O	Gooi_Eem_reken_258	152115	477583	225
7.	hm24.4 Eemmeerdiijk W	Gooi_Eem_reken_270	153843	475918	225
8.	hm26.3 Eemmeerdiijk	Gooi_Eem_reken_282	155404	474187	225
9.	hm29.3 Nijkerkerdiijk	Gooi_Eem_reken_9	158262	474157	162
10.	SB Stichtse Brug	Gooi_Eem_reken_99	148889	478515	62

Bij de vergelijking tussen de Hydraulische Randvoorwaarden 2001 en 2006 is het nodig rekening te houden met onderstaande aspecten:

- het verschil in WAQUA schematisatie voor de productiesommen van de HR2001 en de HR2006;
- het verschil in golfmodel dat gebruikt is voor de productiesommen van de HR2001 en HR2006;

Tabel 8-6 geeft een overzicht van de verschillen in aanpak tussen HR2006 en HR2001.

Tabel 8-6 Overzicht van de gebruikte modellen en enkele parameters voor de berekeningen in de Eemvallei

<b>Locaties Gooi- en Eemmeer</b>		
	<i>HR2001</i>	<i>HR2006</i>
Type golfmodel	HISWA	Bretschneider
Waterbewegingsmodelschematisatie	1997 - Delft2D	2005 - WAQUA

Voor het Gooi- en Eemmeer zijn de toetspeilen, kruinhoogten en illustratiepunten bij een ontwerpfrequentie van 1/4000 in Figuur 8-10 weergegeven. Figuur 8-11 geeft de verschillen tussen de HR2001 en de HR2006 en Figuur 8-12 toont de ontwerpcondities.

De toetspeilen tussen de HR2001 en HR2006 komen goed met elkaar overeen. De verschillen in toetspeilen tussen de HR2001 en de HR2006 blijven beperkt tot maximaal 0,1 m en vallen dus binnen de marge van 0,1 m.

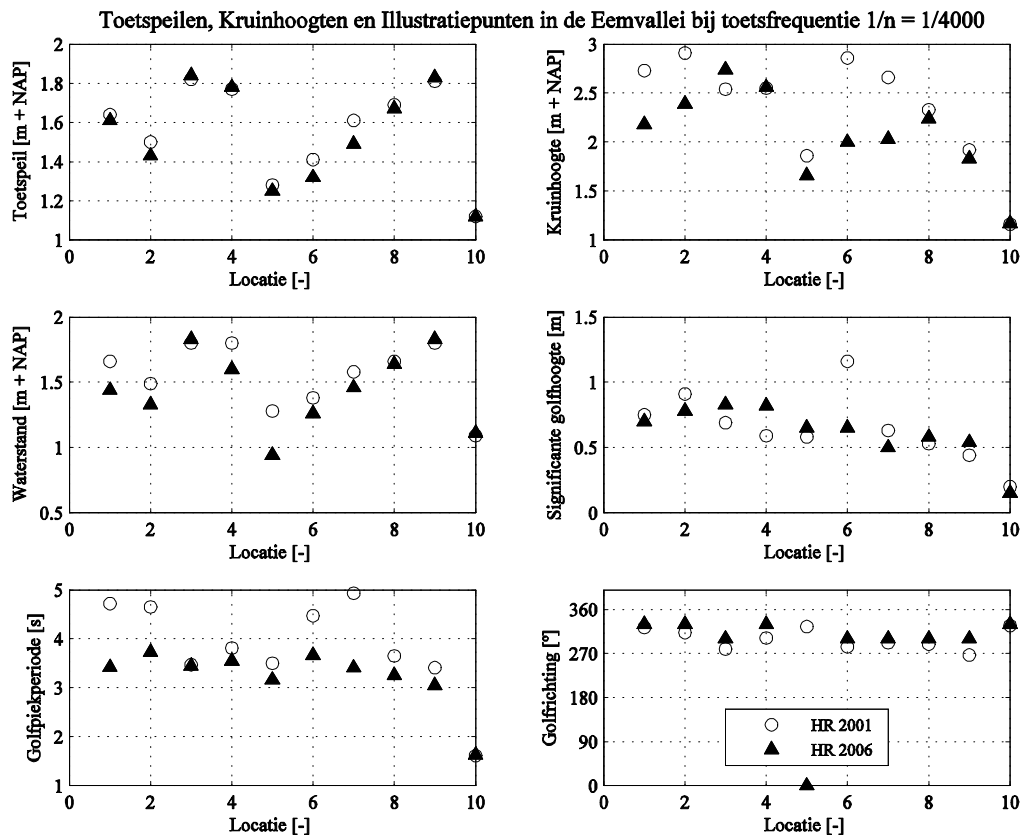
De grootste verschillen in de kruinhoogten en de illustratiepunten zijn waargenomen langs de Eemmeerdiijk, ter plaatse van locaties 1, 2, 6 en 7. Deze verschillen zijn met name te verklaren door het verschil in de gebruikte golfmodellen HISWA (HR2001) en Bretschneider (HR2006). In de figuren is te zien dat de verschillen in golfpiekperiode tussen de HR2001 en de HR2006 berekeningen op deze locaties groot zijn. Op locatie 6 is bovendien het verschil in significante golfhoogte groot. Als gevolg daarvan zijn de verschillen tussen de berekende kruinhoogten voor de HR2001 en de HR2006 groot.

Het eenvoudige Bretschneider golfmodel maakt gebruik van slechts drie invoerparameters, de strijklengte, de waterdiepte en de windsnelheid.

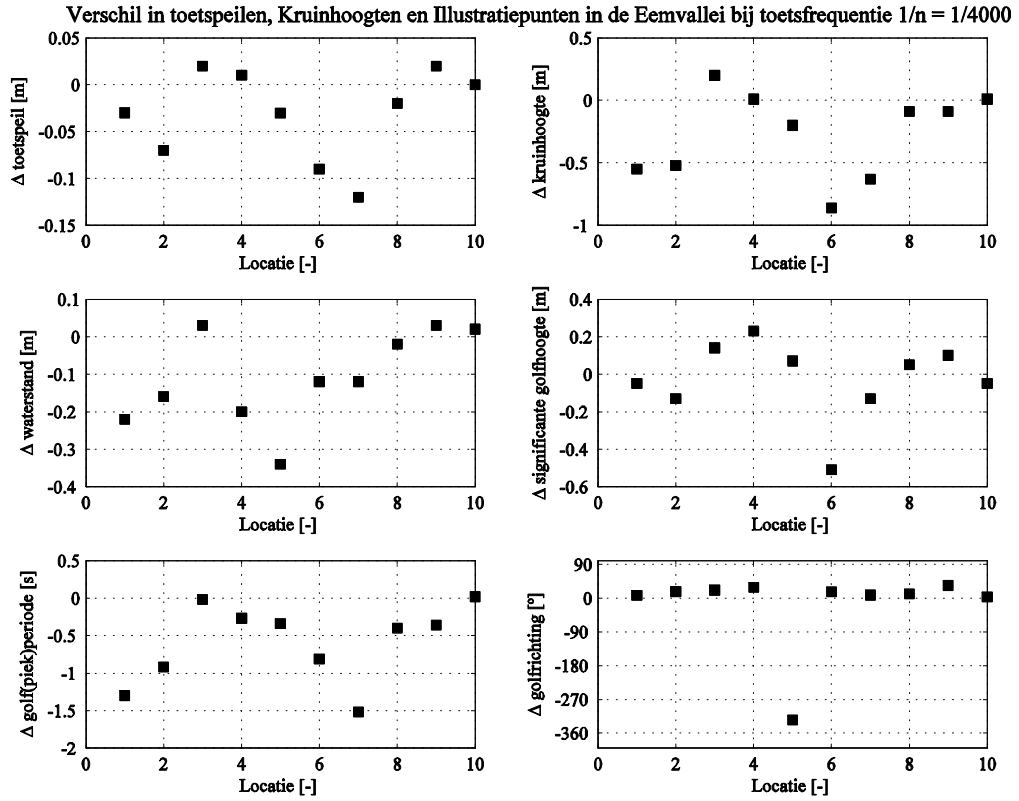
De effectieve waterdiepte per locatie is bepaald op basis van waterstandsberekeningen in WAQUA en de effectieve bodemligging over de strijklengte per windrichting. Er geldt dus één bodemligging per locatie. Er wordt geen rekening gehouden met ruimtelijke variaties in de bodemligging. Ter plaatse van locaties 1, 2, 6 en 7, loopt de vaargeul evenwijdig aan de Eemmedijk. In de richting loodrecht op de dijk varieert de bodemhoogte dus aanzienlijk. Daarnaast ligt in de omgeving van locatie 6 het eiland ‘Dode Hond’, waardoor de invloed van de aanpak met Bretschneider vermoedelijk groter is.

Bretschneider is in principe een puntmodel, waarbij voor iedere locatie een afzonderlijke golfgroei-berekening wordt gemaakt. Er wordt geen rekening gehouden met de afhankelijkheid van condities op andere locaties. Met behulp van de strijklengte, de effectieve waterdiepte en de windsnelheid per locaties zijn de significante golfhoogte en de golfpiekperiode in geval van golfgroei door wind bepaald met de formules van Bretschneider. Het effect van fysische processen zoals, refractie, shoaling, breaking, transmissie, wordt dan ook niet meegenomen.

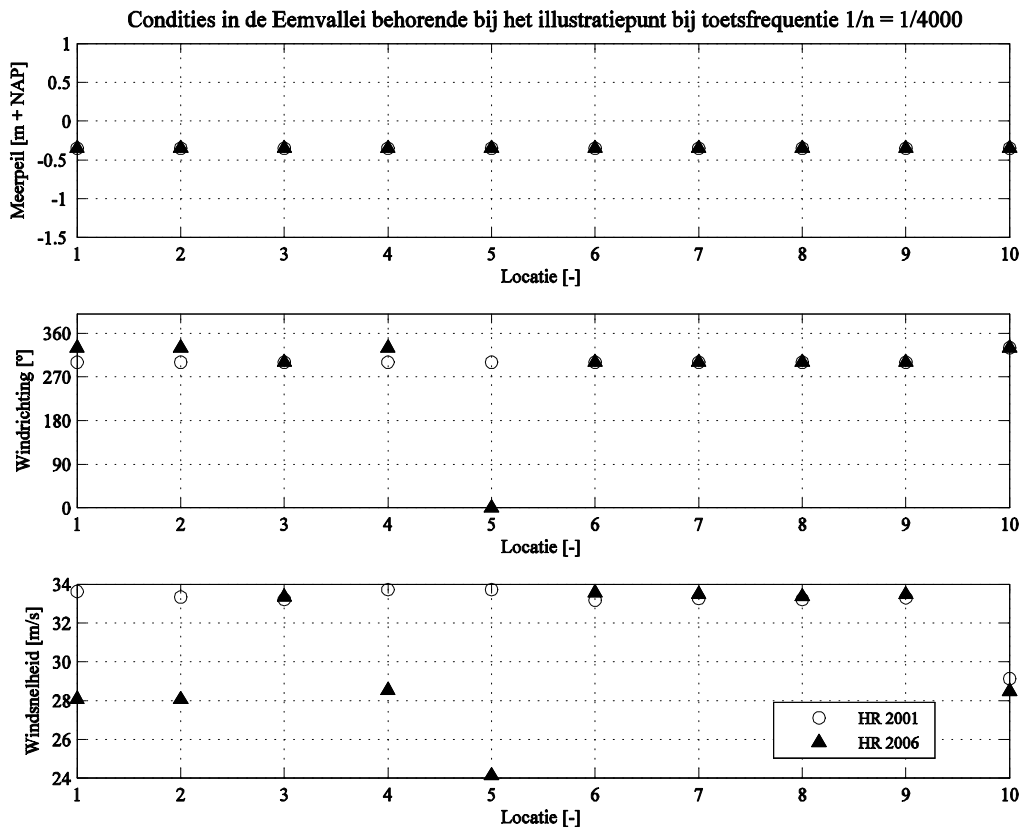
De numerieke resultaten voor de vergelijking tussen HR2001 en HR2006 voor het Gooi- en Eemmeer staan in Bijlage N.



Figuur 8-10 Toetspeilen, kruihoogten en illustratiepunten voor 1/4000 in de Eemvallei



Figuur 8-11 Vershil in toetspeilen, kruinhoogten en illustratiepunten voor 1/4000 in de Eemvallei



Figuur 8-12 Ontwerpcndities voor 1/4000 in de Eemvallei

## 8.6 Vergelijking Hydra-Q

De vergelijking voor Hydra-Q is uitgevoerd voor een herhalingstijd van 4000 jaar in de punten die ook zijn gebruikt voor de vergelijking tussen de HR2006 en de HR2001. Dat betekent dat voor de vergelijking ook wordt uitgegaan van dezelfde databases. Voor de invoerparameters van Hydra-Q wordt uitgegaan van een standaard dijk zoals deze is gedefinieerd in paragraaf 0; een dijk met een 1:4 talud zonder berm of voorland, een grasbekleding en een toelaatbaar overslagdebiet van 1 l/s/m. Voor Hydra-Q betekent dat de parameters  $a$  en  $b$  respectievelijk 2 en 0 zijn. Per locatie is de dijk normaal ten opzichte van de Noord gespecificeerd. De  $Y_{\max}$  en  $Y_{\min}$  zijn bepaald op basis van de resultaten voor de kruinhoogten en toetspeilen voor zowel IJburg als de Eemvallei. In geen van de gevallen komt de berekende kruinhoogte boven 3 m+NAP, zodat deze waarde wordt aangenomen voor  $Y_{\max}$ . Voor  $Y_{\min}$  wordt voor zowel IJburg als de Eemvallei een waarde van -3 m+NAP aangehouden. Voor de  $Y_{\text{stap}}$  is 0,5 m genomen.

Hydra-Q geeft de aanbevolen golfcondities in de betreffende locatie voor diverse hoogtes ten opzichte van NAP. De resultaten zijn gebaseerd op het totaal aan waterstands- en golfberekeningen zoals dat ook in Hydra-M is opgenomen. Hydra-Q geeft voor alle aangegeven stappen ( $Y_{\text{stap}}$ ) één combinatie van golfcondities voor het ontwerp van de dijkbekleding en geeft uiteindelijk voor iedere beschikbare windrichting de randvoorwaarden. Vanwege de verschillen tussen de resultaten voor HR2006 en HR2001, kan het voorkomen dat in het ene geval voor de desbetreffende windrichting wel toetscondities worden gegeven, terwijl in het andere geval voor die windrichting geen resultaten beschikbaar zijn. Voor de vergelijking wordt daarom voor iedere locatie een keuze gemaakt uit de beschikbare golfcondities.

### IJburg

Tabel 8-7 geeft een overzicht van de invoerparameters voor de locaties rondom IJburg waarvoor de vergelijking is uitgevoerd.

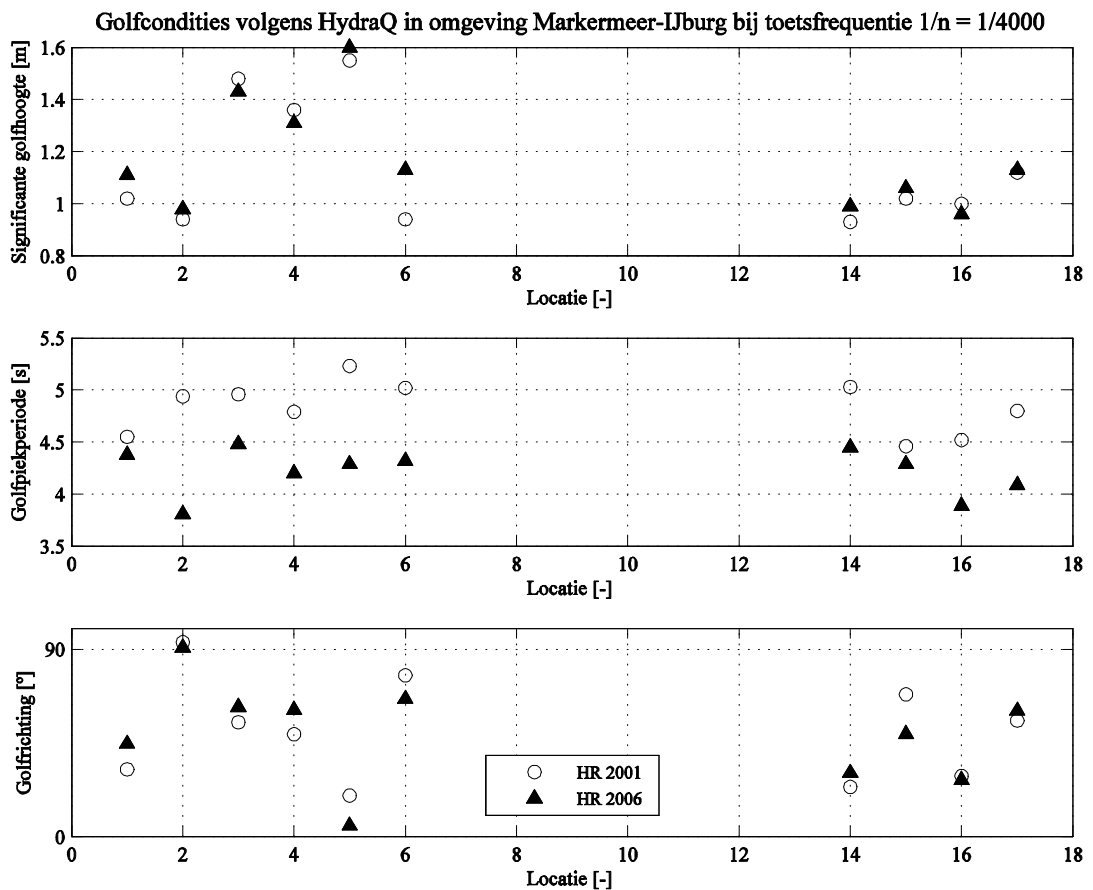
Tabel 8-7 Overzicht invoerparameters voor Hydra-Q voor IJburg

Locaties Markermeer en IJburg									
	<i>Naam locaties HR2001-database</i>	<i>x-coörd.</i>	<i>y-coörd</i>	<i>richting dijknormaal</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>Y<sub>min</sub></i>	<i>Y<sub>max</sub></i>	<i>Y<sub>stap</sub></i>
1.	53A Uitdam Zuid	133659	491857	120	2	0	-3	3	0.5
2.	59D IJdoorn Zuid	129980	487180	160	2	0	-3	3	0.5
3.	hm24.9 Oostvaardersdijk	138759	490169	280	2	0	-3	3	0.5
4.	hm0.8 IJmeerdijk	136500	487903	282	2	0	-3	3	0.5
5.	gav7 Muiden Haven	133315	484217	0	2	0	-3	3	0.5
6.	gav8 Pen-eiland	131374	484145	330	2	0	-3	3	0.5
14.	59A Kinselmeer Camping	130158	488423	46	2	0	-3	3	0.5
15.	58A Kinselmeer Noord	130917	489467	22	2	0	-3	3	0.5
16.	55 Barnegat Zuid	131805	490623	62	2	0	-3	3	0.5
17.	hm3.1 IJmeerdijk	137225	485483	262	2	0	-3	3	0.5

Figuur 8-13 toont de golfcondities voor de 10 genoemde locaties rondom IJburg. In de figuur zijn zowel de resultaten voor HR2001 als voor HR2006 opgenomen. De golfrichting is, conform de uitvoer van Hydra-Q, aangegeven ten opzichte van de dijknormaal.

De resultaten laten zien dat de verschillen overeenkomen met de verschillen die geconstateerd zijn bij de vergelijking van de resultaten van Hydra-M. Bovendien vertonen de resultaten hetzelfde patroon als de HR2006. Vergelijk hiervoor Figuur 8-13 met Figuur 8-7 uit het hoofdrapport. De resultaten voor de vergelijking van Hydra-Q geven geen aanleiding tot het aanpassen van de conclusies die zijn getrokken op basis van de vergelijking van Hydra-M resultaten.

De numerieke resultaten voor de vergelijking tussen HR2001 en HR2006 voor IJburg zijn opgenomen in Bijlage P.



Figuur 8-13 Golfcondities voor de bekleding van de dijk voor 1/4000 rondom IJburg

## Eemvallei

Tabel 8-8 geeft een overzicht van de invoerparameters voor de locaties in de Eemvallei waarvoor de vergelijking is uitgevoerd.

Tabel 8-8 Overzicht invoerparameters voor Hydra-Q voor de Eemvallei

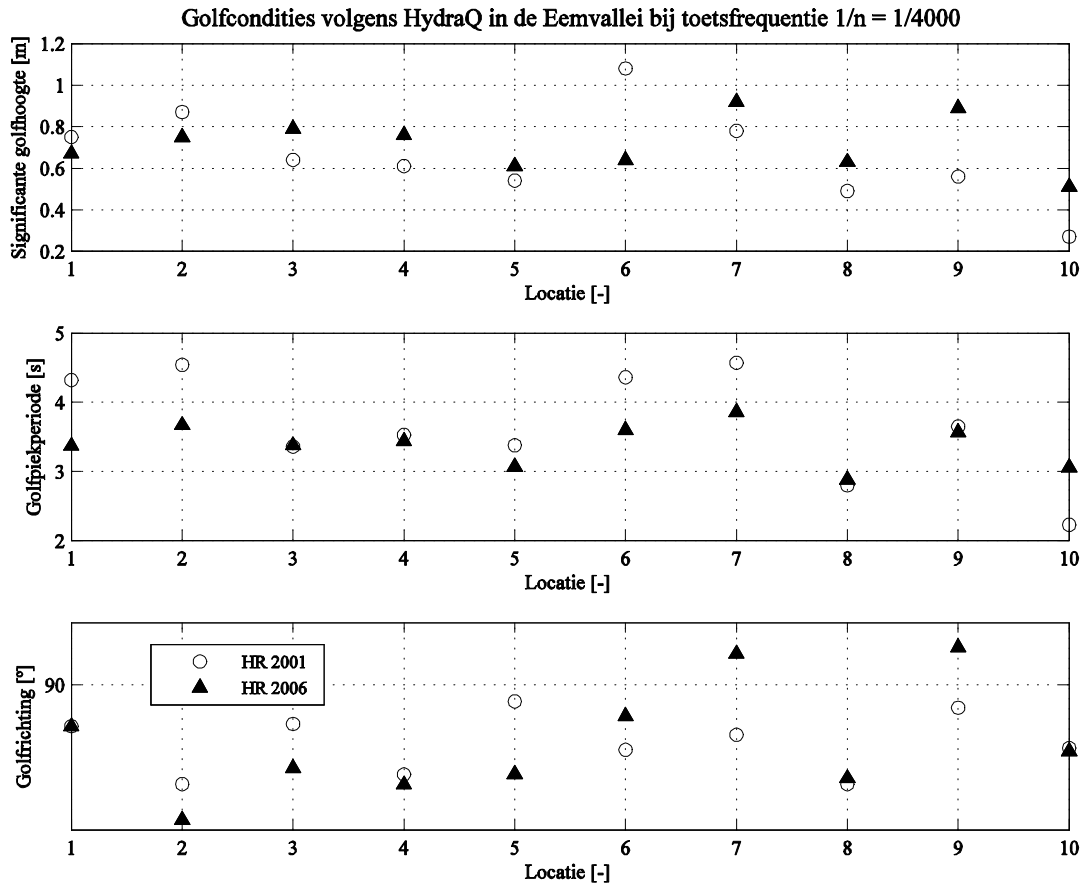
<b>Locaties Gooi- en Eemmeer</b>									
	<i>Naam locaties HR2001-database</i>	<i>x-coörd.</i>	<i>y-coörd</i>	<i>richting dijknormaal</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>Y<sub>min</sub></i>	<i>Y<sub>max</sub></i>	<i>Y<sub>stap</sub></i>
1.	dp12.1 Spakenburg	154527	474609	40	2	0	-3	3	0.5
2.	dp14.8 Oude Pol	152583	475790	355	2	0	-3	3	0.5
3.	dp7.3 Wielse Sluis	158491	473973	350	2	0	-3	3	0.5
4.	dp9.1 Nekkeveld	156741	473224	12	2	0	-3	3	0.5
5.	GG Gooijergracht	149539	476711	47	2	0	-3	3	0.5
6.	hm21.3 Eemmeerdijk O	152115	477583	225	2	0	-3	3	0.5
7.	hm24.4 Eemmeerdijk W	153843	475918	225	2	0	-3	3	0.5
8.	hm26.3 Eemmeerdijk	155404	474187	225	2	0	-3	3	0.5
9.	hm29.3 Nijkerkerdijk	158262	474157	162	2	0	-3	3	0.5
10.	SB Stichtse Brug	148889	478515	62	2	0	-3	3	0.5

Figuur 8-14 toont de golfcondities voor de 10 genoemde locaties in de Eemvallei. In de figuur zijn zowel de resultaten voor HR2001 als voor HR2006 opgenomen. De golfrichting is, conform de uitvoer van Hydra-Q, aangegeven ten opzichte van de dijknormaal.

Voor de Eemvallei geldt ook dat de verschillen overeenkomen met de verschillen die geconstateerd zijn bij de vergelijking van de resultaten van Hydra-M. De vergelijking van Figuur 8-14 met Figuur 8-10 uit het hoofdrapport laat ook hier hetzelfde patroon zien. De resultaten voor de vergelijking van Hydra-Q geven geen aanleiding tot het aanpassen van de conclusies die zijn getrokken op basis van de vergelijking van Hydra-M resultaten.

De numerieke resultaten voor de vergelijking tussen HR2001 en HR2006 voor IJburg zijn opgenomen in Bijlage Q.





Figuur 8-14 Golfcondities voor de bekleding van de dijk voor 1/4000 in de Eemvallei

## 8.7 Oplevering databestanden

In paragraaf 1.3 is een globaal overzicht gegeven van de opgeleverde gegevens van dit project. Gezien de complexiteit van de op te leveren informatie voor Hydra-M wordt in deze paragraaf in meer detail ingegaan op de structuur van de opgeleverde gegevens.

Bij de oplevering van databestanden is onderscheid gemaakt tussen databases voor omgeving IJburg en de Eemvallei. Voor beide gebieden zijn de volgende databases geleverd:

- Vergelijking HR2001 HR2006: met de HR2001 database en een database met nieuwe HR2006 resultaten voor de locaties waarvoor de vergelijking is uitgevoerd;
- Database HR2006: met de resultaten voor de HR 2006 locaties;
- Rekendatabase: met de resultaten voor alle rekenlocaties HR 2006 locaties (deze locatie zijn in tabelvorm gegeven in Bijlage 8 en 9).

Bij de Database HR 2006 is onderscheid gemaakt tussen (1) een database met uitsluitend Hydra-M-invoer voor de nieuwe locaties die aan de HR2001 worden toegevoegd en (2) een database waarin de HR2001-database is aangevuld met de HR2006-Hydra-M-invoer voor de nieuwe locaties.

De locaties van omgeving IJburg en de Eemvallei zijn toegevoegd aan respectievelijk de Markermeer locaties en de Gooi- en Eemmeer locaties. Het hydrvw\_r-mm is uitgebreid met de HR2006-invoer van omgeving IJburg en de Eemvallei.

De oplevering voor Hydra-M is als volgt gestructureerd:

1. Vergelijking HR2001 HR2006
  - a) IJburg
    - i) Hydra-M\_bestanden – invoer voor Hydra-M
      - HR2006 – een database met nieuwe HR2006 resultaten voor de locaties waarvoor de vergelijking is uitgevoerd
      - HR2001 – originele database van de HR2001 en HR-IJburg
    - ii) Matlab – hierin staan matlabscripts om Hydra-M bestanden aan te maken uit WAQUA-SWAN/Bretschneider resultaten
    - iii) Matlab\_plaatjes\_res – hierin staan matlabscripts om figuren te maken van de Hydra-M resultaten voor de vergelijkende studie tussen de HR2001 en de HR2006
  - b) Eemvallei (zie idem IJburg), met onderscheid naar database voor de situatie met en de situatie zonder keringen.
2. Database HR2006
  - a) IJburg
    - i) Hydra-M\_bestanden – invoer voor Hydra-M
      - HR2006
      - HR2001 aangevuld met HR2006
    - ii) Matlab – hierin staan matlabscripts om Hydra-M bestanden aan te maken uit WAQUA-SWAN/Bretschneider resultaten
    - iii) Matlab\_plaatjes\_res – hierin staan matlabscripts om figuren te maken van de Hydra-M resultaten
  - b) Eemvallei (zie idem IJburg), met onderscheid naar database voor de situatie met en de situatie zonder keringen.
3. Rekendatabase
  - a) IJburg
    - i) Hydra-M\_bestanden – invoer voor Hydra-M
      - HR2006
    - ii) Matlab – hierin staan matlabscripts om Hydra-M bestanden aan te maken uit WAQUA-SWAN/Bretschneider resultaten
  - b) Eemvallei (zie idem IJburg), met onderscheid naar database voor de situatie met en de situatie zonder keringen.

Voor het gebruik van de bovengenoemde databases moet het initialisatie-bestand van Hydra-M (start.hmd) worden gewijzigd. Het initialisatiebestand is aanwezig in de hoofddirectory van Hydra-M. Per gebied wordt de naam, de geografische begrenzing van het gebied, naam van de bestanden met de locaties, de randvoorwaarden en meerpeil- en windstatistiek gespecificeerd.

Voor Hydra-Q kunnen dezelfde databases en bestanden (hydrvw\_r.\* en of\_mpdag.\*) worden gebruikt als voor Hydra-M.

## 9 Conclusies en aanbevelingen

Dit rapport beschrijft de totstandkoming van de Hydraulische Randvoorwaarden 2006 voor de omgeving van IJburg en de Eemvallei. Op basis van een set van 216 waterstands- en golfberekeningen zijn met behulp van Hydra-M de HR2006 bepaald voor beide deelgebieden. Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de conclusies die naar aanleiding van deze studie getrokken kunnen worden. Bovendien wordt een aantal aanbevelingen gedaan.

In het algemeen kan gesteld worden dat de verschillen tussen HR2006 en HR2001, gegeven de verschillen in toegepaste modellen en methoden, acceptabel zijn en verklaard kunnen worden uit de omstandigheden ter plaatse. De controle van waterstands- en golfberekeningen en de HR2006 heeft slechts voor een beperkt aantal punten uitgewezen dat de resultaten niet betrouwbaar zijn. Het gaat in totaal om 9 punten op een totaal van meer dan 1500 punten. In deze paragraaf wordt aangegeven om welke locaties het gaat.

### 9.1 WAQUA- schematisatie en de aangepaste stormschematisatie

#### Conclusies

- De wijzigingen die in het kader van deze opdracht zijn aangebracht in de WAQUA- en Baselineschematisatie hebben geen significante invloed op de resultaten.
- Voor de productieberekening is de stormschematisatie toegepast met de volgende kenmerken:
  - Het verloop van de storm is 9-4-9 (in uren).
  - In de voorflank van de storm draait de wind met 4,4°/uur, tijdens de piek is de draaiing 1,1°/uur en in de achterflank draait de wind niet. De draaiing van de wind is geïmplementeerd op basis van graden, zodat de storm tijdens de voorflank geleidelijk draait en aan het einde van de voorflank de hoofdrichting bereikt.
  - Van de Hollandse brug tot aan Nijkerk neemt de wind tot 90% van de oorspronkelijke sterkte af.
- De studie naar de stormschematisatie heeft uitgewezen dat de manier waarop de storm geschematiseerd wordt grote invloed heeft op de waterstanden in het Markermeer. Het is niet mogelijk gebleken de resultaten die ten grondslag hebben gelegen aan de HR2001 (OOM-studie) te reproduceren binnen de gestelde eis van maximaal 0,05 m verschil in waterstand op alle HR2001 locaties op Gooi- en Eemmeer. Er is echter wel voor gekozen deze stormschematisatie toe te passen, omdat deze op een aantal punten verbeterd is ten opzichte van de OOM-studie. Zo is de definitie van de winddraaiing aangepast en is ook de achterflank van de storm meegenomen.

## Aanbevelingen

- De aangepaste stormschematisatie leidt tot verschillen in waterstanden met de OOM-studie, niet alleen op Gooi- en Eemmeer, maar ook op het Markermeer. Gezien de invloed van de stormschematisatie op de waterstanden is het aan te bevelen de representativiteit van deze stormschematisatie nader te onderzoeken. De definitie van de winddraaiing en de toepassing van een achterflank zijn in ieder geval een verbetering ten opzichte van de eerder toegepaste stormschematisatie.
- De verschillen in waterstanden zijn relatief groot door het toepassen van verschillende modellen en methoden. Gezien de ontwikkelingen van de WAQUA schematisatie na de OOM-studie is het gerechtvaardigd om aan te nemen dat de meest recente schematisatie betrouwbaarder is dan diegene die is gebruikt voor HR2001. Daarnaast is tijdens deze studie gebruik gemaakt van een meer realistische stormschematisatie, wat bijdraagt aan de betrouwbaarheid van de hier gepresenteerde resultaten. Het verdient aanbeveling om het gebruik van de resultaten van de OOM-studie voor locaties buiten het beschouwde projectgebied te heroverwegen.

## 9.2 Controle waterstandsberekeningen

### Conclusies

- Alle 216 waterstandsberekeningen zijn correct uitgevoerd.
- De resultaten voor het Markermeer en het Gooi- en Eemmeer vertonen in alle gevallen logische resultaten.
- De resultaten voor IJburg zijn in grote lijnen betrouwbaar. Op basis van de controle zijn voor IJburg de volgende locaties rondom het Haven-, Steiger en Rieteiland in overleg met de opdrachtgever afgekeurd:
  - Locaties 131, 132 en 133 volgens tabel A-2 in Bijlage A;
  - Locaties 67, 68 en 69 volgens tabel A-2 in Bijlage A.
- De resultaten voor de Eemvallei vertonen geen onrechtmatigheden. Wel is opvallend dat voor een groot aantal combinaties van wind- en meerpeil het westelijk deel van de vallei droog staat.

## 9.3 SWAN schematisatie en correctiefactoren

### Conclusies

- Het residu-onderzoek toont aan dat de modelfouten normaal verdeeld zijn.
- De vastgestelde correctiefactoren voor de golfparameters voor IJburg liggen alle tussen 0,95 en 1,05. Dit betekent dat de resultaten met niet meer dan 5% gecorrigeerd worden.

## 9.4 Controle golfberekeningen

### Conclusies

- Alle 216 golfberekeningen zijn correct uitgevoerd.
- De resultaten van de SWAN berekeningen voor IJburg lijken in grote lijnen betrouwbaar. Voor een aantal locaties zijn de resultaten minder betrouwbaar doordat slechts een beperkt aantal cellen beschikbaar is om te rekenen. Deze locaties zijn wel opgenomen in de database, maar het is aan te bevelen terughoudend om te gaan met de resultaten van de golfberekeningen en daarmee de resultaten voor de kruinhoogten en illustratiepunten. Meer specifiek gaat het om de volgende locaties:
  - Locatie 52, tussen Haven- en Rieteiland;
  - Locatie 165, tussen Midden- en Strandeiland;
  - Locatie 170, tussen Haven- en Centrumeiland.
- De resultaten van de Bretschneider berekeningen voor de Eemvallei vertonen weinig tot geen onrechtmatigheden.

### Aanbevelingen

- In een vrij groot aantal locaties op de Eemvallei zijn de golfcondities zonder secundaire keringen lager dan met secundaire keringen. Dit wordt veroorzaakt door de representatieve waterdiepte. Volgens afspraak zijn de waarden zonder secundaire keringen opgenomen in de HR2006 database. Het is aan te bevelen meer in detail te kijken naar de invloed van de secundaire keringen. De waterstandsberekeningen zijn uitgevoerd met de secundaire keringen.

## 9.5 Toepassing Hydra-M

### Conclusies

- In de huidige studie zijn de reproconstanten alleen voor de parameter golfrichting toegepast. Dit betekent dat tussen de resultaten die in Hydra-M zijn opgeslagen lineair wordt geïnterpoleerd. Vergelijking van resultaten met en zonder toepassing van reproconstanten laat zien dat de verschillen tussen beide interpolatiemethoden beperkt zijn.
- De vergelijking van HR2006 met HR2001 geeft geen aanleiding tot het wijzigen van de oorspronkelijk bepaalde correctiefactoren.

### Aanbevelingen

- Het is onduidelijk hoe Hydra-M omgaat met interpoleren in het geval er in een groot aantal combinaties van wind- en meerpeil droogval optreedt. Het is aan te bevelen dit nader uit te zoeken.

- Bij de golfberekeningen is geconstateerd dat de invloed van secundaire keringen op de resultaten significant is. Het is onbekend in welke mate dit invloed heeft op de bepaling van de toetspeilen, kruinhoogten en illustratiepunten. Het is aan te bevelen deze invloed te kwantificeren door ook voor de situatie met secundaire keringen de HR2006 te bepalen.

## 9.6 Hydraulische Randvoorwaarden 2006

### Conclusies voor Ijburg

- Voor alle locaties is gecontroleerd of een hogere herhalingstijd resulteert in een toename van toetspeilen, illustratiepunten en kruinhoogten. Dit is het geval. Een afname in toetsfrequentie leidt op alle locaties tot een toename in toetspeil, illustratiepunt en kruinhoogte.
- De vergelijking van de resultaten voor de HR2006 met die voor de HR2001 laat op het Markermeer significante verschillen zien in de piekperiodes. Deze verschillen kunnen vermoedelijk verklaard worden door het verschil in aanpak.

### Aanbevelingen voor Ijburg

- De verschillen in piekperiodes tussen HR2006 en HR2001 vragen nader onderzoek naar de toe te passen representatieve periodemaat in Hydra-M, waarbij ook gekeken moet worden naar de verschillen in aanpak (HISWA versus SWAN).
- Gezien de verschillen in piekperiodes (en daaruit volgend de kruinhoogten) verdient het aanbeveling om het gebruik van de resultaten van HR2001 voor locaties buiten het beschouwde projectgebied te heroverwegen. Dit sluit aan bij de aanbeveling die is gedaan bij de beschouwing over de waterstandsberekeningen.

### Conclusies voor de Eemvallei

- Voor alle locaties is gecontroleerd of een hogere herhalingstijd resulteert in een toename van toetspeilen, illustratiepunten en kruinhoogten. Dit is het geval. Een afname in toetsfrequentie leidt op alle locaties tot een toename in toetspeil, illustratiepunt en kruinhoogte.
- In de locaties 23 tot en met 61 treedt in meer dan 100 van de 216 berekening droogval op. Hierdoor zijn de resultaten op deze locaties niet betrouwbaar. Er is besloten deze locaties uit de HR2006 database te verwijderen.

## Literatuur

- Alkyon 2005. Consistentie uitvoerlocaties voor HR2006. A1525
- Alkyon & Meander 2005. Uitbreiding WAQUA schematisatie Markermeer, 2 fase. Definitieve schematisatie en afregeling stromingsmodel. Marknesse
- Beyer, D., & Blaakman, E. J. 1999. Achtergronden Hydraulische Belasting Dijken IJsselmeergebied. Deelrapport 8 Reproductiefuncties. Rijkswaterstaat RIZA rapport 99.045. Rijkswaterstaat RIZA.
- Bottema 2004. Testmemo SWAN40.20.a
- Geerse, C.P.M. 2005. Voorstel keuze stormduur Vecht- en IJsseldelta. Interne Rijkswaterstaat RIZA notitie. 7 maart 2005
- HKV 2002. FETCH, Programma voor het berekenen van effectieve strijklengtes, PR559
- Holthuijsen, L.H., N. Booij, R.C. Ris, IJ. G. Haagsma, A.T.M.M. Kieftenburg, E.E. Kriezi, M. Zijlema, A.J. van der Westhuysen 2005. SWAN User Manual SWAN Cycle III version 40.41
- Khama, K.K., C.J. Calkoen 1992. Reconciling discrepancies in the observed wave growth rate of waves, *J. Phys. Oceanogra.* 22., p 1271-1285
- Made, J.W. van der 1969. Design levels in the transition zone between the tidal reach and the river regime reach. *Association International d' Hydrologie Scientifique*. Actes du Colloque de Bucarest. Hydrologie des deltas.
- Rijkswaterstaat 2001. Hydraulische Randvoorwaarden 2001 voor het toetsen van primaire waterkeringen.
- Roskam, A. P. 1997. Piekperioden van brede of meertoppige golfspectra. Werkdocument RIKZ/OS-97.130x. Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ.
- Waal, J.P. de 2003. Windmodellering voor bepaling waterstanden en golven, een analyse van bouwstenen, Rijkswaterstaat RIZA werkdocument 2003.118x.
- Witteveen+Bos 2004a. Advies golfrandvoorwaarden IJburg
- Witteveen+Bos 2004b. Functionality, computational grids and resolution of the wave model SWAN
- WL | Delft Hydraulics 1997. Onafhankelijk Onderzoek Markermeer, Technisch inhoudelijke en intergrerende studie. H3211, Delft
- WL | Delft Hydraulics 1997a. Onafhankelijk Onderzoek Markermeer, Technisch inhoudelijke en intergrerende studie. Verslag fase 1b-3, Stormprofiel en windvelden. H3211, Delft
- WL | Delft Hydraulics 1998. Hydraulische randvoorwaarden voor IJburg, Deelrapport A, dataset met waterstanden en golven. H3274, Delft
- WL | Delft Hydraulics 2000. Hoogwaterstanden op de Eem. H3658, Delft