

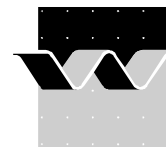
Opdrachtgever:

DG Rijkswaterstaat - Rijksinstituut voor Kust en  
Zee (RIKZ)

## Afstemmen golfparameters en acceptatiecriteria Waddenzee

Report

januari 2007



<b>OPDRACHTGEVER:</b>	RIKZ – Rijksinstituut voor Kust en Zee				
<b>TITEL:</b>	Afstemmen golfparameters en acceptatiecriteria Waddenzee				
<b>SAMENVATTING:</b>	<p>In het kader van de opdracht “SBW-Randvoorwaarden Waddenzee” is een deelproject gedefinieerd waarin de te optimaliseren golfparameters en de acceptatiecriteria moeten worden afgestemd. Deze afstemming vindt plaats tussen het deelproject SBW-Faalmechanismen, waarin de faalmechanismen onderzocht worden en het deelproject SBW-Randvoorwaarden waarin de kwaliteit van golfparameters nabij de keringen wordt onderzocht. Voor SBW-Natuurrandvoorwaarden is het van belang te weten welke golfparameters (bijvoorbeeld welke periodemaat) gebruikt worden in faalmechanismen zodat de verbetering van het golfmodel zich mede hierop kan richten. Deze golfparameters zijn gegeven in Hoofdstuk 3.</p> <p>Daarnaast moet bepaald worden of de modelresultaten al dan niet voldoen aan acceptatiecriteria. Deze acceptatiecriteria waren tot op heden nog niet vastgesteld. De op te stellen acceptatiecriteria hebben zowel een kwantitatief (objectief) als kwalitatief (subjectief) aspect. De kwantitatieve component is dat het golfmodel voldoende nauwkeurige golfparameters moet kunnen afgeven waarmee binnen nog te bepalen tolerantiegrenzen de belasting op de waterkeringen (bijvoorbeeld in termen van steenstabiliteit en golfoverslag) kan worden bepaald. De criteria, of liever gezegd het ambitieniveau, is gegeven in Hoofdstuk 4.</p> <p>De kwalitatieve component zoals beschreven in Hoofdstuk 5 is dat er voldoende technisch vertrouwen moet zijn in de uitkomsten van SWAN: alle relevante fysica is goed (genoeg) gemodelleerd en de trends in de uitkomsten komen overeen met wat op basis van fysische kennis verwacht kan worden. Naast technisch vertrouwen moet er ook bestuurlijk en operationeel vertrouwen zijn: de uitkomsten moeten uitgelegd kunnen worden en moeten voldoende onderbouwd zijn om mogelijk majeure infrastructurele ingrepen te rechtvaardigen. De kwalitatieve component is vooral van belang voor de opschaling van de acceptatie van het golfmodel voor gemeten stormen naar de acceptatie onder (ontwerp)extreme omstandigheden.</p>				
<b>REFERENTIES:</b>	RKZ-1697 SAP bestelnummer “4500041303 pos 20”				
<b>VER</b>	<b>AUTEUR</b>	<b>DATUM</b>	<b>OPMERK.</b>	<b>REVIEW</b>	<b>GOEDKEURING</b>
1.0	Neelke Doorn/ Ap van Dongeren	18-12-2006		Marcel van Gent	Wiel Tilmans
1.1	Neelke Doorn/ Ap van Dongeren	24-1-2007		Marcel van Gent	Wiel Tilmans
<b>PROJECTNUMMER:</b>	H4803.35				
<b>TREFWOORDEN:</b>	golfparameters, SWAN, acceptatiecriteria, Waddenzee				
<b>AANTAL BLADZIJDEN:</b>	63				
<b>VERTROUWELIJK:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> JA, tot maart 2007		<input type="checkbox"/> NEE		
<b>STATUS:</b>	<input type="checkbox"/> VOORLOPIG		<input type="checkbox"/> CONCEPT		<input checked="" type="checkbox"/> DEFINITIEF

Opdrachtgever:

DG Rijkswaterstaat - Rijksinstituut voor Kust en  
Zee (RIKZ)

## Afstemmen golfparameters en acceptatiecriteria Waddenzee

Neelke Doorn en Ap van Dongeren

Report

# Inhoud

## Literatuurlijst

<b>1</b>	<b>Inleiding .....</b>	<b>1—1</b>
1.1	Achtergrond .....	1—1
1.2	Probleemomschrijving .....	1—1
1.3	Doelstelling.....	1—2
1.4	Aanpak .....	1—2
1.5	Afbakening .....	1—3
1.6	Opzet van het rapport .....	1—4
<b>2</b>	<b>Werkwijze .....</b>	<b>2—1</b>
2.1	Opzet .....	2—1
2.2	Fasering .....	2—1
<b>3</b>	<b>Vaststellen golfparameters .....</b>	<b>3—1</b>
3.1	Inleiding en literatuuroverzicht.....	3—1
3.2	Niveaus van toetsing .....	3—1
3.3	Golfparameters relevant voor de Waddenzee .....	3—2
3.4	Toelichting bij de golfparameters .....	3—4
3.4.1	Golfhoogte .....	3—4
3.4.1.1	Alternatieve golfhoogtematen .....	3—5
3.4.1.2	Breken of niet-breken .....	3—5
3.4.2	Golfperiode .....	3—5
3.4.2.1	Gewenste periodemaat.....	3—5
3.4.2.2	Afkapfrequenties .....	3—6
3.4.2.3	Golfsteilheid versus golfperiode .....	3—7

3.4.3	Golfrichting en richtingsverspreiding .....	3—7
3.4.4	Golfspectrum .....	3—7
3.5	Ontbrekende hydrodynamische parameters .....	3—8
3.5.1	Stormduur .....	3—8
3.5.2	Waterstand .....	3—8
3.5.3	Snelheid .....	3—8
3.6	Conclusies .....	3—9
<b>4</b>	<b>Vaststellen kwantitatieve acceptatiecriteria .....</b>	<b>4—1</b>
4.1	Inleiding .....	4—1
4.2	Uitwerking .....	4—1
4.2.1	Golfoploop .....	4—2
4.2.2	Golfoverslag .....	4—2
4.2.3	Zetsteenstabiliteit .....	4—3
4.2.4	Asfaltbekleding .....	4—4
4.2.5	Grasbekleding .....	4—5
4.3	Onzekerheden .....	4—5
4.4	Tolerantiegrenzen .....	4—6
4.4.1	Nauwkeurigheid van de parameters in de sterkteformules .....	4—6
4.4.2	Nauwkeurigheid bij veldmetingen .....	4—7
4.5	Optimaliseren van SWAN .....	4—7
4.6	Conclusies .....	4—8
<b>5</b>	<b>Vaststellen kwalitatieve acceptatiecriteria .....</b>	<b>5—1</b>
5.1	Inleiding .....	5—1
5.1.1	HR-keten .....	5—1
5.2	Technisch vertrouwen .....	5—3
5.2.1	Meetdata .....	5—4

	5.2.1.1	Laboratoriummetingen.....	5—4
	5.2.1.2	Veldmetingen .....	5—5
	5.3	Bestuurlijk vertrouwen.....	5—5
	5.4	Operationeel vertrouwen .....	5—5
	5.5	Conclusies .....	5—6
<b>6</b>		<b>Samenvatting en conclusies .....</b>	<b>6—7</b>
	6.1	Samenvatting.....	6—7
	6.2	Conclusies .....	6—7
<b>A</b>		<b>Overzicht type keringen in Waddenzee.....</b>	<b>A—1</b>
<b>B</b>		<b>Faalmechanismen in HYDRA-K (uit HKV, 2005) .....</b>	<b>B—1</b>
		<u>Golfoploop</u> .....	B—1
		<u>Golfoverslag</u> .....	B—4
		<u>Golfoverslag bij een verticale wand</u> .....	B—6
		<u>Steenzetting</u> .....	B—6
		<u>Asfalt</u> .....	B—8
		<u>Waterbouwasfaltbeton</u> .....	B—9
		<u>Open steenasfalt</u> .....	B—10
		<u>Gras</u> .....	B—10
<b>C</b>		<b>Bespreekverslag expert meeting d.d. 2 oktober 2006.....</b>	<b>C—1</b>
<b>D</b>		<b>Bespreekverslag expert meeting d.d. 12 december 2006.....</b>	<b>D—1</b>
<b>E</b>		<b>Definitie van golfparameters .....</b>	<b>E—1</b>
	E.1	Golfhoogtematen .....	E—1
	E.1.1	Significante golfhoogte $H_s$ (tijddomein).....	E—1
	E.1.2	Significante golfhoogte $H_{m0}$ (frequentiedomein).....	E—1
	E.2	Golfperiodematen .....	E—1
	E.2.1	Gemiddelde golfperiode $T_m$ (tijddomein) .....	E—1

E.2.2	Golfperiode $T_{m02}$ en $T_{m-1,0}$ (frequentiedomein).....	E-1
E.2.3	Piekperiode $T_p$ (frequentiedomein).....	E-2
E.3	Golfrichting .....	E-2

# I Inleiding

## I.1 Achtergrond

Volgens de Wet op de Waterkering (1996) moeten de Nederlandse primaire waterkeringen iedere vijf jaar (2001, 2006, 2011, enz.) getoetst worden op het vereiste beschermingsniveau aan de hand van de Hydraulische Randvoorwaarden (HR) en het Voorschrift op Toetsen op Veiligheid (VTV). De HR dienen elke vijf jaar opnieuw te worden afgeleid en vastgesteld door de Minister van Verkeer en Waterstaat.

Vooraf voor de Waddenzee is er onzekerheid over de kwaliteit van de huidige Randvoorwaarden. Dit komt omdat deze verkregen zijn uit een inconsistente set van metingen en ontwerpwaarden (WL, 2002), terwijl voor de rest van de Nederlandse Kust (de Hollandse Kust en de Zeeuwse/Zuid-Hollandse Delta) vanaf de HR 2006 naar verwachting gebruik wordt gemaakt van het golftransformatiemodel SWAN.

Er zijn op dit moment voor de Waddenzee echter onvoldoende meetgegevens voor de validatie van het golfmodel SWAN, zodat het verkrijgen van betrouwbare en gevalideerde randvoorwaarden met dit model in een gebied als de Waddenzee nog niet mogelijk is. Derhalve is het ook nog onduidelijk in hoeverre onder andere de doordringing van lange golven een rol speelt of kan spelen. Op basis van enkele stormmetingen bij de Emmapolder in Groningen zijn er aanwijzingen dat deining een substantiële bijdrage aan de golfhoogte (orde 30%) kan leveren (pers. comm. F. den Heijer, RIKZ).

Bovenstaande situatie is de directe aanleiding geweest voor de vraag van het deelproject “Sterkte en Belasting Waterkeringen (SBW) – Natuurrandvoorwaarden” aan WL|Delft Hydraulics om een Plan van Aanpak op te stellen waarin de strategie wordt bepaald voor het beantwoorden van de primaire vraagstelling: “Hoe te komen tot betrouwbare Hydraulische Randvoorwaarden voor het jaar 2011 voor het Waddengebied?”

In dit Plan van Aanpak (WL, 2006a) is een strategie aangegeven om te komen tot betere HR waarbij verscheidene activiteiten voor het tijdvak 2006-2009 zijn aangegeven. Het voorliggende rapport beschrijft de werkzaamheden die verricht zijn in het kader van de Activiteiten 2.1 en 2.2 uit het Plan van Aanpak: afstemmen golfparameters en acceptatiecriteria.

## I.2 Probleemomschrijving

In het kader van de opdracht “SBW-Randvoorwaarden Waddenzee” is een deelproject gedefinieerd waarin de te optimaliseren golfparameters en de acceptatiecriteria moeten worden afgestemd. Deze afstemming vindt plaats tussen het deelproject SBW-Faalmechanismen, waarin de faalmechanismen onderzocht worden en het deelproject SBW-Randvoorwaarden waarin de kwaliteit van golfparameters nabij de keringen wordt onderzocht. Voor SBW-Natuurrandvoorwaarden is het van belang te weten welke



golfparameters (bijvoorbeeld welke periodemaat) gebruikt worden in faalmechanismen zodat de verbetering van het golfmodel SWAN zich mede hierop kan richten.

Daarnaast moet bepaald worden of de modelresultaten al dan niet voldoen aan acceptatiecriteria. Deze acceptatiecriteria zijn tot op heden nog niet vastgesteld. De op te stellen acceptatiecriteria hebben zowel een kwantitatief (objectief) als kwalitatief (subjectief) aspect. De kwantitatieve component is dat het golfmodel SWAN voldoende nauwkeurige golfparameters moet kunnen afgeven waarmee binnen nog te bepalen tolerantiegrenzen de belasting op de waterkeringen (bijvoorbeeld in termen van steenstabiliteit en golfoverslag) kan worden bepaald. Men rekent dus als het ware terug vanuit de belastingkant naar het golfmodel SWAN. Voor deze component is het voldoende om stormcondities te beschouwen.

De kwalitatieve component is dat er voldoende technisch vertrouwen moet zijn in de uitkomsten van SWAN: alle relevante fysica is goed (genoeg) gemodelleerd en de trends in de uitkomsten komen overeen met wat op basis van fysische kennis verwacht kan worden. Naast technisch vertrouwen moet er ook bestuurlijk en operationeel vertrouwen zijn: de uitkomsten moeten uitgelegd kunnen worden en moeten voldoende onderbouwd zijn om mogelijk majeure infrastructurele ingrepen te rechtvaardigen. De kwalitatieve component is vooral van belang voor de opschaling van de acceptatie van het golfmodel SWAN voor stormen naar de acceptatie onder extreme omstandigheden.

### 1.3 Doelstelling

Het doel van het deelproject 'afstemmen golfparameters en acceptatiecriteria in de Waddenzee' is drieledig.

1. Vaststellen welke golfparameters van belang zijn voor het deelproject Faalmechanismen (afstemming tussen SWB-faalmechanismen en SBW-Natuurrandvoorwaarden);
2. Vaststellen van de kwantitatieve acceptatiecriteria;
3. Vaststellen van de kwalitatieve acceptatiecriteria om te komen tot breed gedragen criteria op basis waarvan modeluitkomsten worden geaccepteerd om als golftrandvoorwaarden voor de waterkeringen te dienen.

### 1.4 Aanpak

#### 1. Afstemming golfparameters SBW-Faalmechanismen en SBW-Natuurrandvoorwaarden

De projectleiders SBW-Faalmechanismen en SBW-Natuurrandvoorwaarden dienen in een vroeg stadium afstemming te hebben zodat de acceptatie van het golfmodel SWAN zich onder meer kan richten op de parameters (bijvoorbeeld de periodemaat) die van belang zijn. Deze afstemming heeft plaats in de vorm van een vergadering met deskundigen op het gebied van golfmodellering en faalmechanismen. Het product van deze vergadering is een overzicht van gekoppelde golfparameters en belastingparameters en hun afhankelijkheid. Dit stuk vormt de basis voor de acceptatiecriteria, zie hieronder.

## 2 Vaststellen kwantitatieve acceptatiecriteria

Inventarisatie en vaststelling van het effect van onzekerheidsmarges in golfparameters op de belasting van de waterkering en de terugvertaling van de tolerantie marges in de belasting naar de eisen aan onzekerheidsmarges in de golfparameters. Dit onderdeel wordt uitgevoerd in nauw overleg met het deelproject Faalmechanismen, waar de vertaalslag van golfparameters naar belasting wordt gemaakt.

## 3 Vaststellen kwalitatieve acceptatiecriteria

Vaststellen in samenwerking met technisch-inhoudelijke experts, beleidsbepalers en ENW om te bepalen waar de kwalitatieve acceptatiegrens van het golfmodel SWAN ligt.

De punten 1) en 2) zijn besproken in een ééndaagse vergadering, gehouden in oktober 2006. De deelnemers aan deze vergadering waren een aantal technisch-inhoudelijke golfmodel experts en waterkering experts, die uitgenodigd waren in overleg met de Projectleiders SBW-Randvoorwaarden en -Faalmechanismen. De Projectleider SBW-Randvoorwaarden heeft de vergadering voorgezeten. Voor de vergadering is een startnotitie opgesteld met een overzicht van de golfparameters in SWAN en HYDRA-K, en de parameters in de maatgevende faalmechanismen. De resultaten van de vergadering zijn vastgelegd in een vergaderverslag (zie bijlage C). Op basis hiervan is een conceptrapportage opgesteld, welke heeft gediend als startnotitie voor een tweede bijeenkomst. Hiervoor zijn, naast een aantal beleidsbepalers van Rijkswaterstaat enkele andere afnemers van het SBW-product, uitgenodigd. De resultaten van deze tweede bijeenkomst zijn vastgelegd in een tweede vergaderverslag (zie bijlage D). Op basis hiervan is de conceptrapportage uitgewerkt tot het voorliggende rapport.

## 1.5 Afbakening

Bij de totstandkoming van het voorliggende rapport zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd, mede ter afbakening van het project:

- Op dit moment is er geen serieus alternatief is voor het golfmodel SWAN. SWAN is state-of-the-art. Het is het beste model dat nu voorhanden, ook beter dan vergelijkbare modellen als STWAVE of TOMAWAC, en het staat dus vast dat SWAN het te gebruiken golfmodel is.
- Er wordt in deze studie alleen gekeken naar relevante sterkte-functies. Dat betekent dat alleen sterkte functies worden bekeken die:
  - zijn opgenomen in de huidige VTV en HYDRA-K, én
  - waarin golfparameters voorkomen, én
  - nodig zijn voor toetsing van keringen die voorkomen in het Waddenzee-gebied.

Naast de genoemde uitgangspunten wordt het volgende terminologie gehanteerd om onderscheid te maken tussen gemeten/waargenomen gebeurtenissen en de ontwerpomstandigheden waarvoor geen waarnemingen of metingen beschikbaar zijn:

- ‘stormen’: **waargenomen/bemeten** gebeurtenissen met extreme wind;
- ‘extreme omstandigheden’: de zeer extreme gebeurtenissen (waaronder: zeer extreme wind) waarvoor de waterkeringen getoetst moeten worden, maar waarvan

**geen waarnemingen/metingen** beschikbaar zijn. Dit zijn de zogenaamde HR-condities.

## **I.6 Opzet van het rapport**

Het rapport is als volgt ingedeeld. Hoofdstuk 2 bevat een korte beschrijving van de gekozen werkwijze. In de Hoofdstuk 3 worden de golfparameters beschreven. De Hoofdstukken 4 en 5 bevatten een beschrijving van de kwantitatieve, respectievelijk kwalitatieve acceptatiecriteria. Aan het eind van de hoofdstukken 4, 5 en 6 worden de belangrijkste punten samengevat. Bijlage A bevat een overzicht van het type waterkeringen in het Waddenzeegebied. In Bijlage B worden de faalmechanismen beschreven (deze tekst is overgenomen uit HKV, 2005). Bijlage C en D tenslotte, bevatten de bespreekverslagen van de twee bijeenkomsten waarop het voorliggende rapport is gebaseerd.

## 2 Werkwijze

### 2.1 Opzet

In het kader van de opdracht “SBW-Randvoorwaarden Waddenzee” wordt een deelproject uitgevoerd waarin de te optimaliseren golfparameters en de acceptatiecriteria worden afgestemd. Deze afstemming vindt plaats tussen het deelproject SBW-Faalmechanismen, waarin de faalmechanismen onderzocht worden en het deelproject SBW-Randvoorwaarden waarin de kwaliteit van golfparameters nabij de keringen wordt onderzocht.

Om deze afstemming te bereiken is een tweetal expert meetings georganiseerd om aan de hand van een vooraf geschreven startnotitie de volgende drie punten te bespreken:

1. Vaststellen welke golfparameters van belang zijn voor het deelproject Faalmechanismen (afstemming tussen SWB-faalmechanismen en SBW-Natuurrandvoorwaarden);
2. Vaststellen van de kwantitatieve acceptatiecriteria;
3. Vaststellen van de kwalitatieve acceptatiecriteria om te komen tot breed gedragen criteria op basis waarvan modeluitkomsten worden geaccepteerd om als golftrandvoorwaarden voor de waterkeringen te dienen.

Voor deze bijeenkomsten is een aantal technisch-inhoudelijke golfmodelexperts en waterkeringexperts, evenals enkele beleidsbepalers van Rijkswaterstaat uitgenodigd. Het doel van de bijeenkomsten is om afstemming te bereiken tussen de deelprojecten SBW-Randvoorwaarden en SBW-faalmechanismen en duidelijkheid te krijgen over de kwantitatieve en kwalitatieve acceptatiecriteria van het golfmodel SWAN.

### 2.2 Fasering

De werkzaamheden van deze studie vallen uiteen in drie deelfases:

1. inventarisatie en schrijven startnotitie
2. expert meeting 1 en schrijven tussennotitie
3. expert meeting 2 en schrijven concept eindrapportage (het voorliggende rapport).

#### **Fase I: Inventarisatie en schrijven startnotitie**

In deze fase is de beschikbare literatuur geraadpleegd en een startnotitie geschreven. Deze startnotitie bevatte een eerste inventarisatie van de relevante golfparameters voor de Waddenzee, evenals een lijst van vragen die betrekking hebben op (het vaststellen van) de acceptatiecriteria van het golfmodel SWAN. In samenspraak met de Opdrachtgever is een lijst van te interviewen inhoudelijk deskundigen en belanghebbenden opgesteld, zie Tabel 2-1. De lijst van te interviewen personen omvat deskundigen van RIKZ, DWW, RIZA, Bouwdienst, Directie Noordzee, deelprojectleiders SBW en WL|Delft Hydraulics. De startnotitie is rondgestuurd aan de te interviewen personen.

## Fase 2: 1<sup>e</sup> Expert meeting en schrijven tussennotitie

Tijdens een expert meeting op 2 oktober 2006 is de startnotitie aan de hand van een aantal vooraf geformuleerde vragen inhoudelijk besproken. De projectleider SBW-randvoorwaarden, ir. A. Roelfzema, heeft deze bijeenkomst voorgezeten. Deskundigen die de sessies niet konden bijwonen hebben hun inbreng per email geleverd. De volgende personen waren aanwezig bij de expert meeting of hebben per email een bijdrage geleverd:

Tabel 2-1: Lijst van aanwezige personen bij expert meeting

<b>Voornaam</b>	<b>Naam</b>	<b>Organisatie</b>	<b>Aanwezig / mail</b>
Marcel	Bottema	RWS, RIZA	email 13 okt.
Ferdinand	Diermanse	WL   Delft Hydraulics	aanwezig
Neelke	Doorn	WL   Delft Hydraulics	aanwezig
Ap	van Dongeren	WL   Delft Hydraulics	aanwezig
Robert	't Hart	RWS, DWW	aanwezig
Gijs	Hoffmans	RWS, DWW (PL SBW-faalmechanismen)	aanwezig
Annette	Kieftenburg	RWS, RIKZ	aanwezig
Mark	Klein Breteler	WL   Delft Hydraulics	aanwezig
Herman	Peters	RWS, DNZ	aanwezig
Andries	Roelfzema	RWS, RIKZ (PL SBW-randvoorwaarden)	aanwezig
Hans	Waal, de	RWS, RIZA	aanwezig

Deze personen hebben voorafgaand aan de interviews de startnotitie ontvangen. In de startnotitie werden per onderzoeksvraag subvragen gesteld. De startnotitie is op basis van deze expert meeting en aanvullende literatuur uitgewerkt tot een tussennotitie dat de basis vormde voor fase 3.

## Fase 3: 2<sup>e</sup> Expertmeeting en schrijven concept eindrapportage

Tijdens een bijeenkomst van de deelprojectleiders SBW, evenals enkele afnemers van het SBW-product, is op 12 december 2006 deze tussennotitie besproken. Aan de hand hiervan is het voorliggende rapport aangepast en uitgebreid tot concept eindrapport. In het rapport is geprobeerd zoveel mogelijk de consensus uit de twee bijeenkomsten op te nemen. Waar de meningen van de verschillende deskundigen sterk uiteen liepen is geprobeerd aan de verschillende posities zo goed mogelijk recht te doen.

Tabel 2-2 Lijst van genodigden voor bespreking van de notitie

<b>Voornaam</b>	<b>Naam</b>	<b>Organisatie</b>	<b>Aanwezig</b>
Houcine	Chbab	RWS, RIZA	afwezig
Frank	Heijer, den	RWS, RIKZ	aanwezig
Gijs	Hoffmans	RWS, DWW (PL SBW-faalmechanismen)	aanwezig
Hans	Janssen	RWS, Bouwdienst	aanwezig
Govertine	Raat, de	RWS, DWW	afwezig
Andries	Roelfzema	RWS, RIKZ (PL SBW-randvoorwaarden)	aanwezig
Pieter Koen	Tonnon	WL   Delft Hydraulics	aanwezig
Hans	Waal, de	RWS, RIZA	aanwezig

## 3 Vaststellen golfparameters

### 3.1 Inleiding en literatuuroverzicht

Elke type waterkering reageert verschillend onder belastingen en verschillende typen waterkeringen hebben ook verschillende bezwijkmechanismen. Bezwijkmechanisme is het optreden van een bezwijkmechanisme waarbij een bezwijkmechanisme wordt gedefinieerd als breuk, vormverandering, verlies van samenhang of schade aan (onderdelen van) de dijk als gevolg van belastingen of belastingeffecten die de sterkte overtreffen, waardoor de capaciteit om water te keren nadelig kan worden beïnvloed. Een sequentie van verschillende mechanismen en processen (faaltraject) treedt op voordat een waterkering daadwerkelijk faalt. De waterkering faalt als het de waterkerende functie niet kan vervullen. Er kan dus sprake zijn van falen (d.w.z., niet vervullen van de functie) zonder dat er sprake is van bezwijken. Omdat het binnen SBW gaat om het vervullen van de waterkerende functie kijken we naar faalmechanismen en niet naar bezwijkmechanismen. Het faalgebied wordt gevormd door die combinaties waarvoor de kering faalt. De grens tussen falen en niet-falen van een waterkering is gedefinieerd in de vorm van de betrouwbaarheidsfunctie  $Z$ , die de relatie tussen de sterkte  $R$  en de belasting  $S$  weergeeft. Als functie van  $R$  en  $S$  is de grenstoestandsfunctie in het algemeen gedefinieerd als  $Z = R - S$ . Falen is dan gedefinieerd als de situatie waarbij de functie kleiner is dan nul, ofwel waarbij de sterkte kleiner is dan de belasting.

Er is een aanzienlijke hoeveelheid literatuur beschikbaar op het gebied van faalmechanismen van verschillende soorten waterkeringen. In de huidige studie is gebruik gemaakt van een aantal bronnen:

- Hydra-K functionele documentatie v. 3.0 (HKV, 2005)
- “De Veiligheid van de primaire waterkeringen in Nederland, Achtergrondrapport” (DWW, 2002).

Met aanvullende informatie uit:

- het door DWW uitgevoerde VNK-project (de Veiligheid van Nederland in Kaart; zie [www.projectvnk.nl](http://www.projectvnk.nl));
- diverse TAW-publicaties;
- het 6<sup>e</sup> kader EU onderzoeksproject **FLOODsite** (zie [www.floodsite.net](http://www.floodsite.net)).

### 3.2 Niveaus van toetsing

Alvorens dieper in te gaan op de verschillende faalmechanismen en de bijbehorende golfparameters is het van belang onderscheid te maken tussen drie niveaus van toetsing (VTV, V&W, 2004):

1. eenvoudige of geometrische toetsmethodes. Hierbij wordt aan de hand van elementaire informatie, zoals de afmetingen van de waterkering en de globale opbouw en samenstelling van de ondergrond, de waterkering getoetst aan veilige afmetingen. Voor

het uitvoeren van deze toets volstaat elementaire kennis over de waterkering en de mogelijke bezwijkmechanismen. Deze toets kan worden uitgevoerd door de beheerder zelf.

2. gedetailleerde toetsmethodes. De veiligheid van de waterkering wordt getoetst aan de toetsrandvoorwaarden met gebruikmaking van toetsmethodes en -criteria, zoals beschreven in de TAW-leidraden en technische rapporten. De gedetailleerde toetsmethode veronderstelt kennis over de mogelijke bezwijkmechanismen en methodes. Deze toets kan worden uitgevoerd door ter zake kundige beheerders en deskundigen.
3. geavanceerde toetsmethodes. Indien algemeen geaccepteerde methodes, zoals beschreven in de TAW-leidraden en technische rapporten, niet toereikend zijn om een oordeel uit te spreken over de waterstaatkundige toestand van de waterkering kan een beroep worden gedaan op deskundigen om alsnog tot een oordeel te komen. Hierbij kan gebruik worden gemaakt van de meest recente kennis en inzichten. Wel moet worden aangetoond of aannemelijk gemaakt dat de gebruikte methode op zijn minst gelijkwaardig is aan algemeen geaccepteerde methodes.

Voor de bepaling van de hydraulische randvoorwaarden langs de kust wordt gebruik gemaakt van het software pakket HYDRA-K. Daarnaast kan HYDRA-K gebruikt worden voor het berekenen van een faalkans van een waterkering en voor het berekenen van de benodigde sterkte en/of dimensie van de waterkering voor een gegeven veiligheids criterium. Hoewel de rol van HYDRA-K in de toetsing nu nog niet helemaal scherp is, zal dat verbeterd worden in de nieuwe VTV. Hierin wordt HYDRA-K ook expliciet genoemd. Op dit moment wordt HYDRA-K ingezet voor de eenvoudige toetsing van bekledingen en voor de gedetailleerde toetsing van de hoogte.

### 3.3 Golfparameters relevant voor de Waddenzee

In Appendix A is een overzicht gegeven waarin aangegeven wordt welke type keringen aanwezig zijn in de dijkringen rond de Waddenzee (exclusief eilandse Noordzeekust) en op welke criteria er getoetst wordt. Dit overzicht is gebaseerd op het Voorschrift Toetsen op Veiligheid (V&W, 2004). Het merendeel van de keringen zijn zeedijken, met daarbij kunstwerken en aansluitingsconstructies. Duinen aan de Waddenzee-zijde komen alleen voor op Texel (Zuidwest zijde). Uit deze bron is niet duidelijk uit welk type zeedijken elke dijkkring bestaat. Met een gele markerings is aangegeven welke toetscriteria niet relevant zijn voor de huidige studie omdat ze niet voorkomen in de Waddenzee. Daarnaast wordt het criterium 'duinen' niet meegenomen omdat de duinenkust zich aan de Noordzee-kant van Schiermonnikoog en Texel bevindt en derhalve voor deze studie ook niet relevant is.

De toetscriteria in het onderste deel van de tabel vertalen zich slechts na een interpretatieslag in faalmechanismen conform de HYDRA-K documentatie (HKV, 2005). De in HYDRA-K geïmplementeerde faalmechanismen zijn:

- Golfploop;
- Golfoverslag;
- Golfoverslag bij een verticale wand;
- Steenzetting;
- Asfaltbekleding;
- Grasbekleding;

- Bekleding breuksteen;
- Bekleding betonblokken in 2 lagen;
- Bekleding betonelementen in 1 laag;
- Havendammen – teenconstructie;
- Havendammen – stabiliteit toplaag bodembescherming
- Havendammen – grensvlakstabiliteit.

Bovenstaande HYDRA-K faalmechanismen zijn ruwweg te verdelen in falen als gevolg van te geringe hoogte van de waterkering (golfoploop, golfoverslag en golfoverslag bij een verticale wand) en falen als gevolg van instabiliteit (de overige faalmechanismen). Tabel 3-1 beschrijft hoe de toetscriteria vertaald zijn naar faalmechanismen. De derde kolom in de tabel bevat de ‘aard’ van het faalmechanisme, te weten falen als gevolg van een hydrodynamische belasting, geotechnisch falen of falen door overige oorzaken (menselijke fouten, bediening).

Tabel 3-1 Vertaling toetscriteria VTV naar faalmechanismen conform HYDRA-K

Toetscriterium VTV	Faalmechanisme HYDRA-K	Type faalmechanisme
<b>DIJKEN EN DAMMEN</b>		
Hoogte	golfoploop & golfoverslag	hydrodynamisch
Stabiliteit	-	geotechnisch
Piping	-	geotechnisch
Macrostabiliteit binnentalud	-	geotechnisch
Afschuiving	-	geotechnisch
Macrostabiliteit buitentalud	-	geotechnisch
Asfalt	asfaltbekleding	hydrodynamisch
Gras		hydrodynamisch
Beton	bekleding betonblokken- en elementen, bekleding breuksteen	hydrodynamisch
	steenzetting	hydrodynamisch
<b>KUNSTWERKEN</b>		
Hoogte	golfoverslag bij een verticale wand	hydrodynamisch
Stabiliteit	havendammen <sup>*)</sup>	geotechnisch
Piping	-	geotechnisch
Constructie	havendammen <sup>*)</sup>	overig
Afsluitmiddelen	-	overig
Constructie	-	overig
Bediening	-	overig
Aansluitingsconstructie	-	overig



\*) De faalmechanismen die betrekking hebben op de havendammen worden niet verder behandeld in het huidige rapport omdat deze in de toetsing worden de havendammen niet meegenomen.

In Tabel 3-2 zijn, per relevant faalmechanisme, de benodigde golfparameters gegeven. Er is een onderscheid gemaakt tussen de benodigde golfparameters, volgend uit de beschrijving van de faalmechanismen in HYDRA-K, en de genodigde golfparameters volgens de gedetailleerde toetsing. De faalmechanismen zelf zijn in detail beschreven in Appendix B. In Appendix E is een definitie van de golfparameters opgenomen.

Het zij opgemerkt dat in de tabel alleen parameters staan vermeld die door SWAN uitgevoerd kunnen worden. Hydraulische parameters die wel benodigd zijn voor de bepaling van de faalmechanismen maar die niet door SWAN uitgerekend worden, zoals de stormduur en de waterstand, zijn niet opgenomen in de tabel. Voor de volledigheid zijn deze parameters wel vermeld in Sectie 3.5.

Tabel 3-2 Faalmechanisme en bijbehorende golfparameters volgens eenvoudige en gedetailleerde toetsmethode (methode volgens HYDRA-K grijs gearceerd)

FAALMECHANISME	RELEVANT VOOR WADDENZEE	BENODIGDE GOLFPARAMETERS	
		EENVOUDIGE TOETSMETHODE	GEDETAILLEERDE TOETSMETHODE
Golfoploop;	x	-	$H_{m0}, T_{m-1,0}^{**}), \theta$
Golfoverslag;	x	-	$H_{m0}, T_{m-1,0}^{**}), \theta$
Golfoverslag bij een verticale wand;	x	-	$H_s, \theta$
Steenzetting;	x	$H_s, T_p$	$H_s, T_p, \theta$
Asfaltbekleding;	x	$H_s$	$H_s, T_m$
Grasbekleding;	x	$H_s, T_p$	$H_s, T_p$
Bekleding breuksteen;	x	$H_s, T_m$ of $T_{m-1,0}^{*)}$	$H_s, T_p$
Bekleding betonblokken in 2 lagen;		$H_s, T_m$ of $T_{m-1,0}^{*)}$	$H_s, T_p$
Bekleding betonelementen in 1 laag;		$H_s$	$H_s, T_p$

\*) is gelijk verondersteld op diep water

\*\*) In HYDRA-K (HKV, 2005; bijlage B) wordt voor de faalmechanismen golfoploop en golfoverslag gebruik gemaakt van de piekperiode  $T_p$ . De meest recente gedetailleerde toetsmethode gaat echter uit van de spectrale golfperiode  $T_{m-1,0}$ . In de nieuwe versie van HYDRA-K, waarin het rekenhart van PC-toets wordt opgenomen, zal ook gebruik worden gemaakt van de  $T_{m-1,0}$  i.p.v. de  $T_p$ .

Uit bovenstaand overzicht blijkt dat de volgende integrale golfparameters uit SWAN invoer zijn voor de berekening van de faalmechanismen:  $H_s, H_{m0}, T_m/T_{m02}, T_{m-1,0}, T_p, \theta$ .

### 3.4 Toelichting bij de golfparameters

#### 3.4.1 Golfhoogte

Hoewel ze strikt genomen niet hetzelfde zijn, worden de (tijddomein) significante golfhoogte  $H_s$  en de spectrale golfhoogte  $H_{m0}$  in de sterkteformules door elkaar gebruikt.

### 3.4.1.1 Alternatieve golfhoogtematen

Er bestaan alternatieve golfhoogtematen voor de genoemde golfhoogtematen  $H_s$  of  $H_{m0}$ . De  $H_{max}$  wordt als onbetrouwbaar beschouwd omdat deze sterk afhankelijk is van een toevallige piek, maar  $H_{2\%}$  of  $H_{10\%}$  vertonen bij voldoende lange meting wel stabiel gedrag. Via de formulering van Battjes en Groenendijk (2000) is deze parameter ook te berekenen.  $H_{x\%}$  kan relevant zijn, omdat de verhouding tot  $H_s$  iets zegt over de afwijking van de Rayleighverdeling, en dus over de vraag in hoeverre sprake is van al vóór de kering brekende golven.  $H_{x\%}$  is echter een parameter uit het tijddomein, terwijl SWAN alleen fysische processen in het frequentiedomein beschouwt. Hier ligt een fundamenteel probleem met de brug van belasting (met SWAN) naar sterkte. Het is namelijk niet voor niets dat tijddomein modellen (bijvoorbeeld SKYLLA, ODIFLOCS, e.d.) nodig zijn om echt iets te leren over de wijze waarop inkomende golven de constructie belasten en dat golfmodellering in frequentiedomein hier niet afdoende voor is.

### 3.4.1.2 Breken of niet-breken

De sterkte-deskundigen zijn geïnteresseerd in het type golfbreking tegen het talud. Hierop voortbouwend ligt het voor de hand dat het relevant is om te weten in hoeverre - bij gegeven golfhoogtemaat en golfperiode-maat - er sprake is van al vóór de constructie brekende golven of niet. Het aandeel gebroken golven kan meegenomen worden via de  $Q_b$ . Er bestaan inmiddels aanzienlijk geavanceerdere benaderingen hiervoor dan de klassieke Battjes en Janssen (1978) formulering. SWAN kan dit als uitvoer genereren, maar het is niet de verwachting dat er op korte termijn iets gedaan wordt met de parameter  $Q_b$ . Vooral nog is het een handig bijproduct dat naast de brekerparameter  $\xi$  gebruikt kan worden.

## 3.4.2 Golfperiode

### 3.4.2.1 Gewenste periodemaat

Waar vroeger met name de piekperiode  $T_p$  werd gebruikt, zien we voor de golfoploop- en golfoverslagformules een verschuiving naar de spectrale parameter  $T_{m-1,0}$ . Voor steenzettingen levert de  $T_{m-1,0}$  geen hogere nauwkeurigheid op dan de  $T_p$ . Bij het gebruik van spectrale periodematen is het belangrijk om eenduidigheid te hebben over de afkapfrequenties. Hierop zal in Sectie 3.4.2.2 dieper worden ingegaan.

Omdat in veel formules het aantal golfklappen een belangrijke parameter is, moet er ook een goede schatting gegeven kunnen worden van de gemiddelde golfperiode. De spectrale periodemaat  $T_{m02}$  wordt als een goed alternatief beschouwd voor de gemiddelde periode  $T_m$  uit het tijddomein.

Hierop aansluitend is ook de duur van de belasting van belang. Deze bepaalt immers, samen met de gemiddelde golfperiode, het aantal golfklappen. De duur is echter geen parameter die door SWAN wordt uitgerekend en deze valt daarom buiten het kader van het huidige deelproject.

### 3.4.2.2 Afkapfrequenties

Zowel de laagfrequente als de hoogfrequente afkapgrenzen hebben een grote invloed op de waarde van de berekende golfperiodematen. Hoewel het hier primair om afstemming gaat tussen de betrokkenen bij de veldmetingen en het fysisch modelonderzoek en het voor SWAN vooral in het gebruik van SWAN en in mindere mate bij de ontwikkeling van SWAN van belang is de afkapfrequenties in acht te nemen, wordt de problematiek van de afkapfrequenties hier toch nader besproken.

Belangrijk is dat de afkapfrequenties niet zomaar veranderd kunnen worden. Het moet ook aansluiten op wat er gebruikt is in fysisch modelonderzoek. Bij verandering van de afkapfrequenties moeten alle onderzoeken opnieuw geanalyseerd worden, wat een aanzienlijke inspanning is. Hier is afstemming nodig tussen degenen die betrokken zijn bij die veldmetingen en degenen die betrokken zijn bij het fysisch modelonderzoek.

Als er afgekapt wordt moet men wel verdisconteren dat er energie niet meegenomen wordt. Als de betreffende fysische processen wel beïnvloed worden door deze energie zal dit op de één of andere wijze verdisconteerd moeten worden in de te gebruiken toetsmethoden.

#### Laagfrequente afkapgrenzen

De laagfrequente afkapgrens is met name van belang voor de periodemaat  $T_{m-1,0}$ . Op ondiep water kan het wel of niet meenemen van de laagste frequenties meer dan 100% schelen in de waarde van de  $T_{m-1,0}$ . Op diep water is de golfperiode minder gevoelig voor de hoogte van de laagfrequente afkapgrens. Professor Battjes heeft het RIKZ in het verleden geadviseerd als laagfrequente afkapgrens de helft van de piekfrequentie te nemen.

In de veldmetingen wordt  $f = 0.03$  Hz als afkapfrequentie gehanteerd maar naar aanleiding van opmerkingen van het Hydraulic Review Team wordt er gewerkt aan een lagere afkapfrequentie om ook surfbeat mee te kunnen nemen. Hoewel deze surfbeat golven, met een periode van enkele minuten, eerder een waterstandsfenomeen dan een golf zijn en daarom bij voorkeur niet bij het korte-golfsignaal moeten worden meegenomen, wordt het belang van het meten van surfbeat wel door alle betrokkenen onderschreven.

Samenvattend zijn er dus drie processen:

1. de korte golven ( $f = 0.03$  Hz – 500/800/1000 mHz). De standaard afkapfrequentie van  $f=0.03$  Hz in de metingen lijkt een goede keuze te zijn. De energie aan de bovenkant is echt de gemeten energie. Er wordt geen analytische staart toegevoegd. Bij het IJsselmeer gelden overigens andere grenzen;
2. surfbeat, met perioden van enkele minuten;
3. waterstandsvariatië (10 minuten gemiddeld).

#### Hoogfrequente afkapgrenzen

De waarde van de hoogfrequente afkapgrens is vooral bepalend voor de waarde van de  $T_{m02}$  en de  $T_{m01}$  en in mindere mate voor de waarde van de  $H_{m0}$  en de  $T_{m-1,0}$ .

In de Leidraad monitoring (Bottema, 2006) worden de volgende waarden aanbevolen:

- $f_{\text{afkap; hoogfrequent}} > 1.3 \cdot f_p$  voor  $H_{m0}$  onderschatting en  $T_{m-1,0}$  overschatting  $< 10\%$
- $f_{\text{afkap; hoogfrequent}} > 2 \cdot f_p$  voor  $T_{m01}$  overschatting  $< 10\%$
- $f_{\text{afkap; hoogfrequent}} > 2.7 \cdot f_p$  voor  $T_{m02}$  overschatting  $< 10\%$

Een verdubbeling van de nauwkeurigheid vraagt een nog eens 25-50% hogere afkapfrequentie (voor zover de instrumentrespons en footprinteffecten dan niet gaan overheersen). Omdat de wave rider-instrumenten in de Waddenzee slechts tot ongeveer 0.5 Hz betrouwbaar meten, is het nauwkeurig meten van de  $T_{m02}$  in vrijwel alle windzeegedomineerde situaties (inclusief de stormachtige) problematisch. Gezien het belang van de  $T_{m02}$  voor het bepalen van het aantal golfklappen is dit een punt van zorg. Op diep water bij de Hollandse kust kan er tot 1.0 Hz betrouwbaar worden gemeten dus hier worden geen problemen verwacht met de hoogfrequente afkapgrenzen.

### 3.4.2.3 Golfsteilheid versus golfperiode

Tijdens de expert meeting ontstond er enige discussie over de vraag in termen waarvan de golf uitgedrukt moet worden: de golfhoogte en **golfsteilheid** of de golfhoogte en **golfperiode**. Voor de deskundigen die betrokken zijn bij de modellering van de dijkbelasting zijn golfhoogte en golfsteilheid interessanter omdat deze laatste een onderdeel is van de brekerparameter, die weer veel zegt over het type golfbelasting. Dit betekent echter niet dat de golfsteilheid een onafhankelijke parameter is. De golfsteilheid is een functie van de golfhoogte en de golfperiode en niet vice versa.

In feite is dit (slechts) een overdrachtsprobleem tussen belasting en sterkte. De golvendeskundigen kijken liever naar hoogte en periode. Het ligt dus aan de invalshoek welke parameter men prefereert. Daar rekening mee houden is afdoende. Wel is het van belang om aan te geven op welke periodemaat de golfsteilheid is gebaseerd en vice versa.

### 3.4.3 Golfrichting en richtingsverspreiding

Waar de golfrichting van belang is, gaat het om de hoofdrichting bij de  $T_p$ . Voor de stabiliteit van steenzettingen speelt de richtingsverspreiding geen rol. Voor golfoploop wel, zij het alleen in een vorm die onderscheid maakt tussen langkammige en kortkammige golven. Langkammige golven zijn doorgaans alleen in lab-omstandigheden mogelijk c.q. aan de orde.

### 3.4.4 Golfspectrum

Tot op heden wordt er vanuit de sterktekant wel gewerkt met integrale parameters (zoals de  $T_{m-1,0}$ ) die afhankelijk zijn van de spectrale vorm, maar niet met de spectrale vorm zelf. Met betrekking tot de vorm wordt er hoogstens onderscheid gemaakt tussen een smal, breed en dubbelpiekig spectrum. Deze spectra zouden – als het verschillende golfsystemen (deining en windzee) betreft – gesplitst kunnen worden in twee of drie delen die superponeerbaar zijn. Met name voor de geavanceerde toetsing wordt dit als nuttig ervaren. J.W.W. Seijffert (1991) heeft hiervoor een methode gepresenteerd, die gerelateerd is aan de golfoploop. Tevens kan het vergelijken van de berekende spectrale vorm met de gemeten spectrale vorm bijdragen aan het technisch vertrouwen in het golfmodel SWAN (zie Sectie 5.3).

Een tweede punt met betrekking tot het golfspectrum betreft de aannames die ten grondslag liggen aan de huidige benadering (te weten een superpositie van sinussen). De vraag is of deze aannames nog wel geldig zijn bij sterk brekende golven en of er bijvoorbeeld niet meer rekening moet worden gehouden met gebonden golven. Het valt echter buiten het kader van SBW om dieper in te gaan op alternatieven voor de huidige benadering van het golfspectrum.

## **3.5 Ontbrekende hydrodynamische parameters**

### **3.5.1 Stormduur**

Voor de berekening van de faalmechanismen is informatie over het verloop van de storm als functie van tijd (zowel waterstandsverloop als verloop van de golfhoogte) benodigd. Een lange storm met een lagere golfhoogte kan soms belangrijker zijn dan een korte stormduur met een hogere golfhoogte. Los daarvan is de stormduur van belang omdat deze indirect als parameter voorkomt in de formules. Zowel voor het toetsen van steenzettingen en grasbekledingen volgens HYDRA-K als voor de geavanceerde toetsing van asfaltbekledingen is het aantal golven van belang. Deze informatie wordt verkregen door de stormduur te delen door de gemiddelde periode.

Op dit moment wordt in HYDRA-K een soort matrix met alle combinaties van waterstand en golfhoogte gegenereerd. Door de storm op te knippen in verschillende stukken met een “stationair” verloop wordt het instationaire karakter benaderd. Dit opknippen in stationaire sommen leidt niet tot een “explosie” van het aantal te maken runs.

### **3.5.2 Waterstand**

Tijdens de expert-meeting werd het belang van de waterstand herhaaldelijk benadrukt. Het wordt door de sterkte-deskundigen als positief ervaren dat in HYDRA-K nu met stappen van 1 m in plaats van 2 m wordt gerekend voor de waterstand.

### **3.5.3 Snelheid**

Tijdens de bijeenkomst ontstond er discussie of de snelheid langs/tegen/in de waterkering niet apart als hydraulische invoerparameter voor de sterkteformules benodigd is. Voor met name grasbekledingen maar ook voor de stabiliteit van bijvoorbeeld (breuk)steen is deze snelheid zeer belangrijk. Op dit moment wordt de snelheid impliciet, via de golfhoogte en golfperiode, meegenomen in de formules voor overslag en overloop.

Bezien vanuit de individuele stenen zijn de drag- en liftkrachten primair bepalend voor falen en dit zou het opnemen van de snelheid als aparte parameter rechtvaardigen. De meerderheid van de aanwezigen was het er echter over eens dat het bij de faalmechanismen gaat om de bulkparameters en deze kunnen goed afgeleid worden van de golfhoogte en de golfperiode. In het kader van Delft Cluster zijn er formules afgeleid om voor onregelmatige golven op basis van de golfhoogte en de golfperiode een overslagdebiet en snelheden op de waterkering te bepalen (Van Gent, 2002).

## 3.6 Conclusies

- De golfparameters die gebruikt worden in de formules voor de faalmechanismen zijn gegeven in Tabel 3-1. Het betreft zowel tijddomein en frequentie-domein grootheden.
- De golfparameters worden uitgerekend met een frequentie-domein model (SWAN) zodat het wenselijk is om voor de in de formules gebruikte tijddomeingrootheden spectrale alternatieven te gebruiken, als dat mogelijk is.
- Aan de sterktekant wordt er op dit moment en in de naaste toekomst weinig gedaan met het tijddomein karakter. Aangezien de vraagkant van “Sterkte” leidend is is spectrale modellering vooralsnog voldoende.
- De berekende spectrale golfparameters zijn sterk afhankelijk van de gehanteerde afkapgrenzen. Dit punt heeft een afstemming tussen degenen die betrokken zijn bij de veldmetingen en het fysisch modelonderzoek, met name op het punt van het verdisconteren van de afgekapte energie in toetsmethoden. Voor SWAN is het vooral in het gebruik dat het belang van de afkapfrequenties in acht moeten worden genomen. Voor de ontwikkeling van SWAN is dit punt van minder belang.
- Alhoewel de formules van de faalmechanismen uitgaan van integrale grootheden is het voor het bereiken van technisch vertrouwen in het model noodzakelijk om ook de spectrale vorm op te leveren.

Naast de golfparameters moeten met behulp van data of andere modellen ook andere grootheden worden bepaald, met name waterstand en stormduur.

## 4 Vaststellen kwantitatieve acceptatiecriteria

### 4.1 Inleiding

Tot op heden zijn er geen kwantitatieve acceptatiecriteria vastgesteld voor SWAN. Toch kan het wenselijk zijn om te kijken binnen welke tolerantiegrenzen SWAN de hydraulische randvoorwaarden moet geven om de belastingfuncties met voldoende nauwkeurigheid te kunnen bepalen (bijvoorbeeld in termen van steenstabiliteit en golfoverslag). Hiertoe zal eerst bekeken worden hoe de verschillende belastingfuncties afhangen van de golfparameters. Vervolgens zal een paragraaf gewijd worden aan de manier waarop er met onzekerheid kan of moet worden omgegaan. De laatste paragraaf vormt een beknopte weerslag van de discussie. Het zal blijken dat het moeilijk is om te komen tot kwantitatieve acceptatiecriteria. Uit de eerste expert meeting bleek een voorkeur te bestaan voor een soort prioriteringsinstrument waarbij wordt gekeken hoe verschillende onzekerheden doorwerken. Hierbij wordt niet *a priori* aangegeven wanneer een bepaalde parameter met voldoende nauwkeurigheid wordt voorspeld, maar wordt bekeken (of de verbetering van) welke hydraulische parameter de grootste reductie in de totale onzekerheid geeft. Tijdens de tweede bijeenkomst werd er de voorkeur aangegeven om niet te spreken van kwantitatieve acceptatiecriteria maar van een ambitieniveau waarnaar gestreefd dient te worden.

### 4.2 Uitwerking

De tolerantiegrenzen worden uitgewerkt door het bepalen van de afgeleiden van een aantal van de belastingfuncties (faalmechanismen) die in Appendix B zijn beschreven. Als een faalmechanisme

$$f = f(H_s)$$

dan geeft de lokale afgeleide

$$\frac{\partial f}{\partial H_s}(H_s)$$

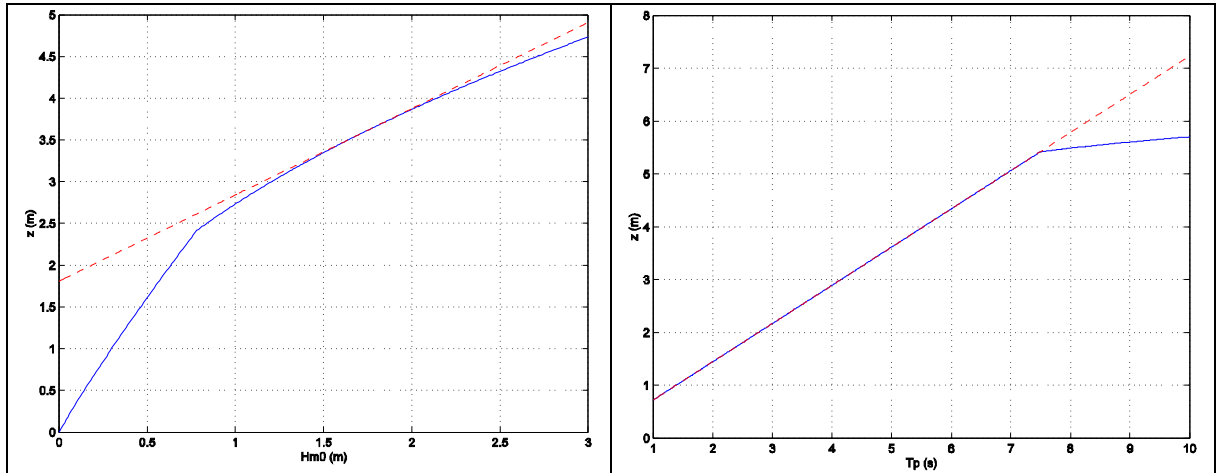
inzicht in de variatie van de waarde van  $f$  door een variatie in  $H_s$ , en omgekeerd.

Hiertoe zijn de van de faalmechanismen “golfoploop”, golfoverslag”, “zetsteenstabiliteit”, “asfaltbekleding” (waterbouwafsluit op zand), en “stroming over gras” deze afgeleiden bepaald om verder inzicht te krijgen in de gevoeligheid. De faalmechanismen voor “havendammen”, “breuksteen”, “asfalt op klei” zijn niet verder uitgewerkt omdat ze niet van toepassing zijn op de situatie in de Waddenzee en/of slechts voor zeer kleine delen van de dijkkring gelden.

De onderstaande afgeleiden zijn bepaald zonder toepassing van reductiefactoren ( $\gamma$ 's), en met een kruinhoogte van 3 m, een hellingshoek van de kering van 1:4 en zijn bepaald rond de ontwerpfuncties  $H_s=1.75$  m en een  $T_p = 5$  s, i.e. een golfsteilheid van 4.5% (redelijke waarden voor de Waddenzee kust uit Randvoorwaardenboek). De onderstaande grafieken zijn bedoeld om een indicatie te geven van de gevoeligheid van de belastinggroottheden door variatie van de golfhoogte en de periode.

### 4.2.1 Golfploop

De gevoeligheid van golfploop ( $z_{2\%}$ ) voor de golfhoogte en de golfperiode kan verkregen worden door de afgeleide van vgl. (1) in Appendix B te bepalen. Grafisch kan de formule en de raaklijn (waarvoor we de afgeleide gebruiken) in het toetspunt als volgt worden weergegeven:

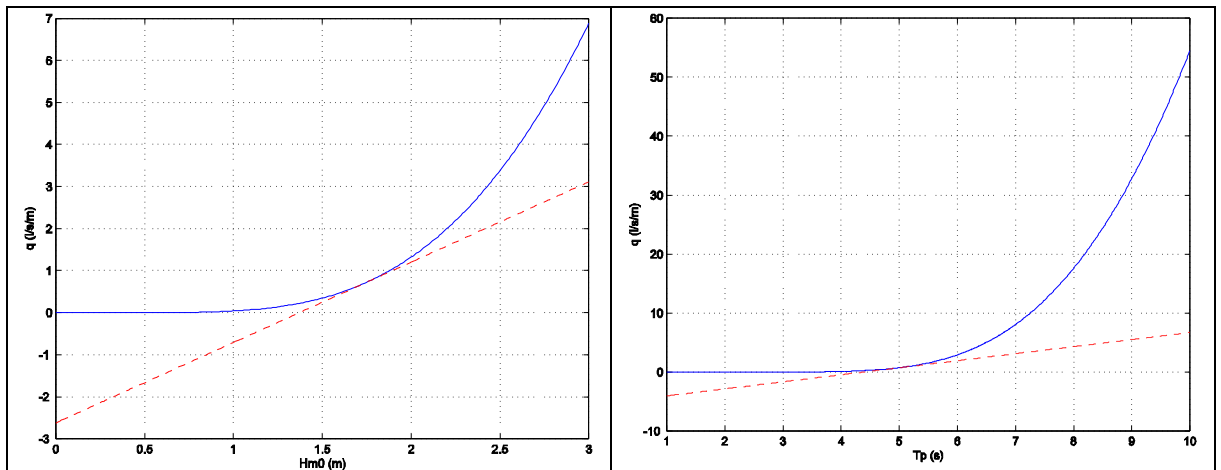


Figuur 4-1: blauwe lijn: vergelijking (1) uit Appendix B; rode lijn: raaklijnen in de toetspunten.

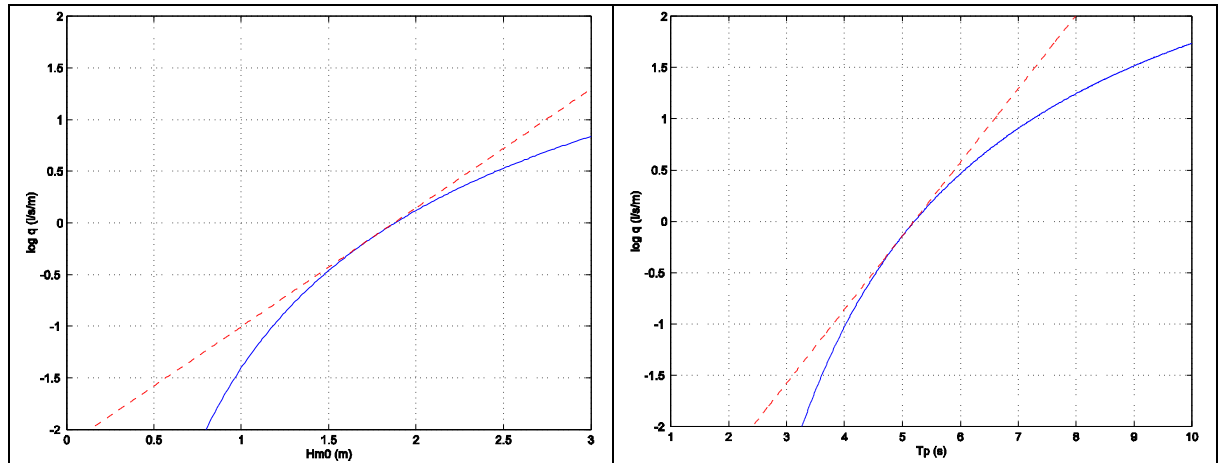
Een 10% variatie in  $H_{m0}$  en  $T_p$  heeft in dit voorbeeld een variatie in  $z_{2\%}$  van 5% en 10% respectievelijk tot gevolg. De golfploop is dus matig gevoelig voor veranderingen in de golfparameters. De verhouding is 1:1.

### 4.2.2 Golfoverslag

De formule voor golfoverslag (vgl. (2) in Appendix B) kan ook gedifferentieerd worden met het volgende resultaat, waarbij in de bovenste rij de golfoverslag en in de onderste rij het logaritme van de golfoverslag zijn uitgezet.







Figuur 4-2: blauwe lijn: vergelijking (2) uit Appendix B; rode lijn: raaklijnen in de toetspunten.

Uit deze figuren kan afgeleid worden dat een 10% variatie in  $H_{m0}$  en  $T_p$  in dit voorbeeld een variatie van  $q$  van 50% en 100% respectievelijk tot gevolg hebben. De overslag is dus zeer gevoelig voor variaties in de golfparameters. Dit blijkt ook uit de presentatie op log-schaal. Een redelijke variatie in  $H_{m0}$  en  $T_p$  kan leiden tot een orde (factor 10) verschil in de golfoverslag. De verhouding is 1:5 tot 1:10. Echter, de doorwerking van golfoverslag op de uiteindelijke kruinhoogte is logaritmisch zodat een variatie van 10% in de golfhoogte of periode een variatie van 5-10% in de kruinhoogte geeft.

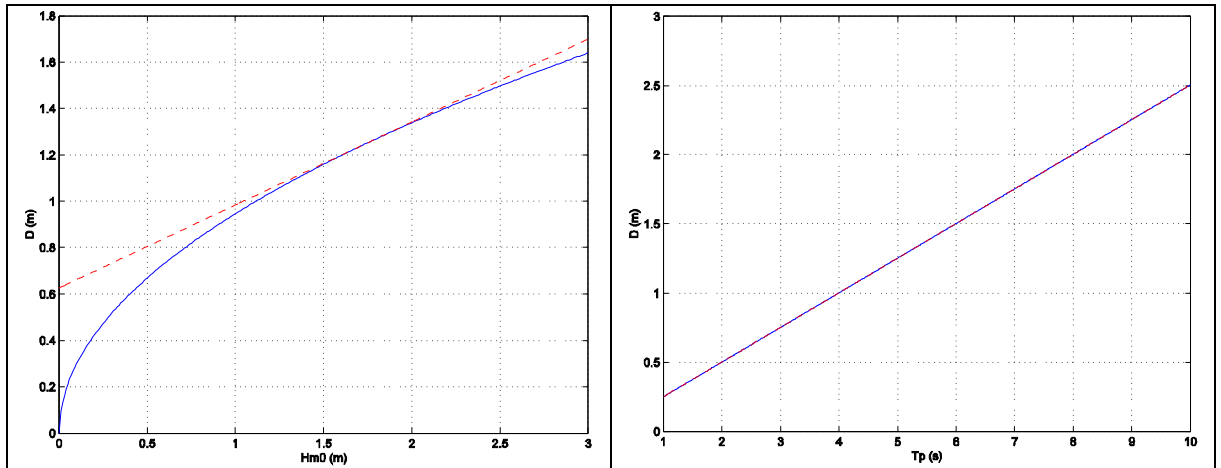
### 4.2.3 Zetsteenstabiliteit

Voor zetsteenstabiliteit worden de formules (3a) en (3b) gecombineerd tot

$$\frac{H_s}{\Delta D} = c_1 \left( \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_s}{g} T_p^2}} \right)^{-1}$$

waarbij de exponent in overeenstemming is met de gebruikte exponenten in de range van de lage waarden van  $\xi$  ( $0.6 < \xi < 2$ ). Deze uitdrukking kan herschreven worden naar  $D$  en gedifferentieerd.

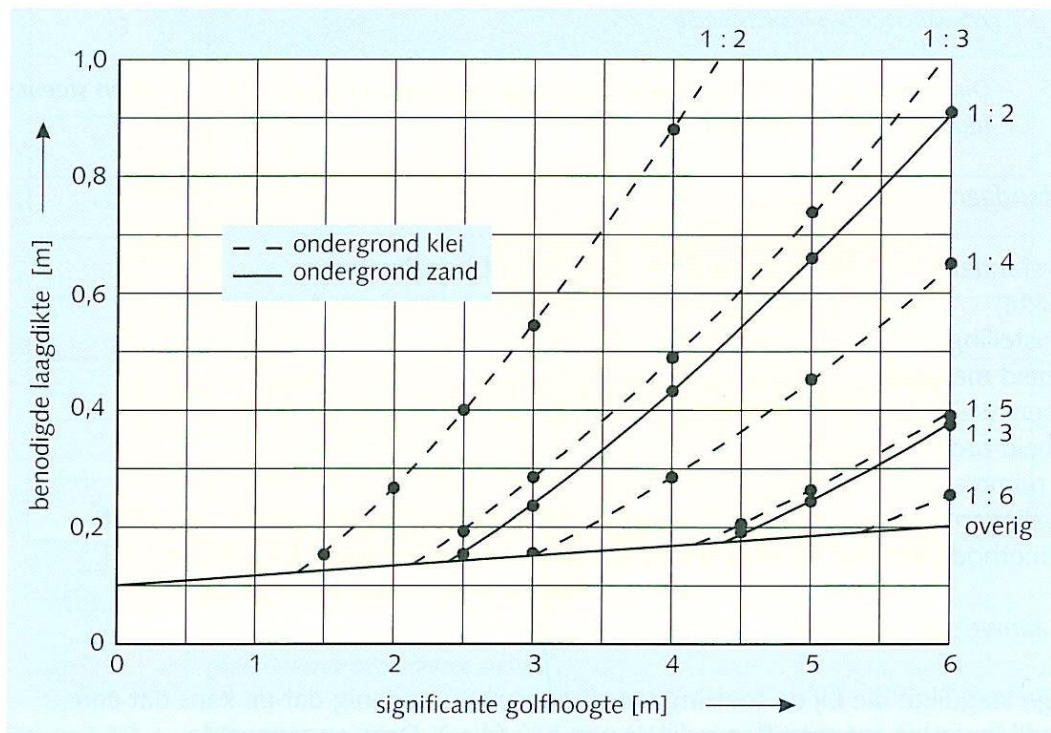
Dit levert een variatie van de steendiameter  $D$  in dit voorbeeld op van 5% resp. 10% als de golfhoogte en periode met 10% worden gevarieerd. De diameter is dus matig gevoelig voor variaties in de golfparameters. De verhouding is ongeveer 1:1.



Figuur 4-3: blauwe lijn: vergelijking (3a/b) uit Appendix B; rode lijn: raaklijnen in de toetspunten.

### 4.2.4 Asfaltbekleding

Voor asfaltbekleding is gekozen voor de formules van waterbouwasfaltbeton op zand (de meest voorkomende combinatie rond de Waddenzee). De volgende figuur (uit TAW, 1999) geeft aan dat voor milde taluds (1:3 en lager) op de ondergrond zand (getrokken lijnen) de variatie van de benodigde laagdikte weinig varieert met een verandering in de golfhoogte. Een verandering van 10% in de golfhoogte heeft slechts een variatie van 2% in de laagdikte tot gevolg. De asfaltbekleding in dit voorbeeld is dus ongevoelig voor variaties in de golfhoogteparameter.



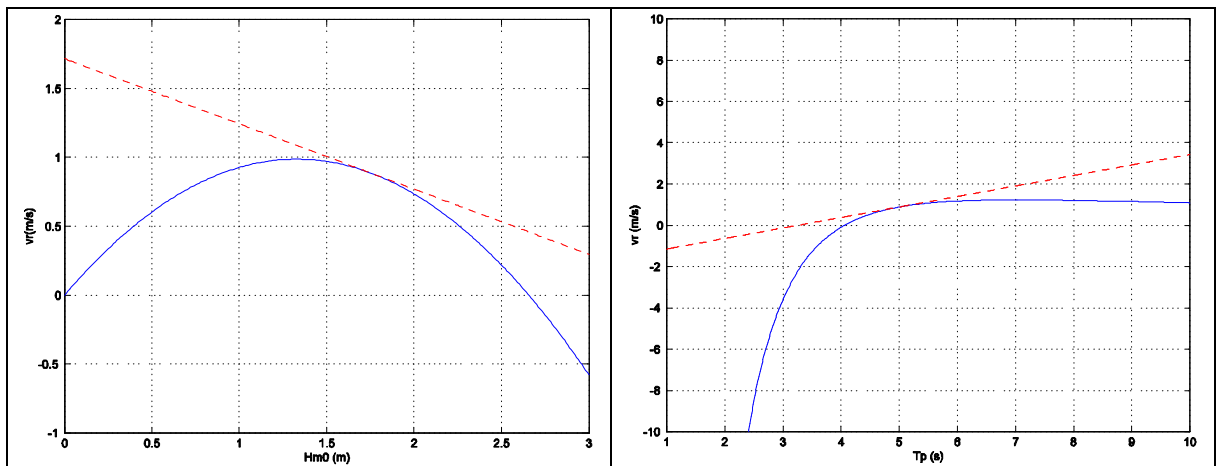
Figuur 3.2.2.6 Grafiek voor het toetsen van een waterbouwasfaltbetonbekleding op golfklappen  
Figuur 4-4: uit TAW (1999)

### 4.2.5 Grasbekleding

Voor grasbekleding is uitgegaan van de vergelijking (4) van Appendix B

$$v_r = 700 \frac{H_s}{T_p} \left( 0.085 - \frac{H_s}{\frac{g}{2\pi} T_p^2} \right) \sqrt{1 - \frac{z}{z_q} \tan \alpha}$$

waarbij de laatste term (onder het wortel teken) constant is gehouden voor de eenvoud. Dit levert de volgende figuren op, waarbij meteen opvalt dat de snelheid negatief wordt (door de term tussen de haken, die het geldigheidsgebied van de formule afbakent). Evenzogoed valt op te maken dat de snelheden 100% variëren als de golfhoogte en de periode 10% variëren binnen het geldigheidsgebied. De snelheid is in dit voorbeeld dus zeer gevoelig voor de variatie in de golfparameters. De verhouding is 1:10.



Figuur 4-5: blauwe lijn: vergelijking (4) uit Appendix B; rode lijn: raaklijnen in de toetspunten

### 4.3 Onzekerheden

Tijdens de expert meeting bleek er een grote aarzeling te bestaan om toelaatbare (vereiste) afwijkingen te definiëren. De onzekerheden in SWAN zijn min of meer een gegeven. Het omgaan met onzekerheden bij toetsen en ontwerpen is een zeer lastige en helaas niet al te best uitgekristalliseerde materie, waarbij beleidsmatige keuzes een belangrijke rol spelen. Binnen SBW-kader is het vooral van belang uit te gaan van wat vigerend is.

In de HR 2001 (par. 2.2.6) staat expliciet dat voor de belastingkant de model- en statistische onzekerheden in de hydraulische randvoorwaarden niet meegenomen worden maar dat deze in de toetsing verdisconteerd worden middels conservatieve sterktecriteria (in de vorm van veiligheidstoelagen o.i.d.). Hiervoor kunnen de bovengesprenteerde figuren als informatie dienen, nl. een gegeven onzekerheid in SWAN resulteert in een gegeven onzekerheid in de belastingparameters.

Hoewel het zeker niet de bedoeling is om veiligheid op veiligheid te stapelen, zeker niet bij het “scherp” toetsen, moet er bij het ontwerp wel iets gedaan worden met de onzekerheden (robuust ontwerpen). Voor het ontwerp dienen derhalve, naast de gemiddelde waarden, ook

standaard deviatie en/of de bias aangegeven te worden. Bij het toetsen wordt uitgegaan van de *best guess*, dus gemiddelde waarden (scherp toetsen). Hier speelt de onzekerheid dus geen rol.

## 4.4 Tolerantiegrenzen

### 4.4.1 Nauwkeurigheid van de parameters in de sterkteformules

Zoals aangegeven in de vorige sectie verdient het de voorkeur om, voor de optimalisatie van SWAN, niet te vertrekken vanuit vooraf gestelde nauwkeurigheidseisen. Om toch een uitspraak te kunnen doen wordt onderscheid gemaakt tussen het ambitieniveau (het “willen”) en een realistisch inschatting van wat mogelijk is (het “kunnen”). Eerstgenoemde is om binnen de nauwkeurigheid te blijven van de beschrijving van de sterkekant. Realistischer lijkt echter om in 2011 een vergelijkbare nauwkeurigheid te behalen voor de Waddenzee als op dit moment wordt gehaald voor de Hollandse Kust (10%) en zelfs dat zal in een complexe situatie als de Waddenzee een uitdaging zijn.

Wat het “willen” betreft zijn de tijdens de interviews die zijn uitgevoerd voor het Plan van Aanpak (WL, 2006a) de volgende tolerantiegrenzen genoemd voor de verschillende parameters die in de sterkteformules voorkomen:

- 30% in de golfoverslag
- 7% in de steendiameter
- 15° in de hoofdrichting
- 20% (of meer van de stroomsnelheid over gras)

Als dit vertaald wordt in de toegestane onzekerheden in de golfparameters met gebruikmaking van de verhoudingen die gegeven zijn in de vorige sectie, dan volgt hieruit dat de samengestelde golfparameters (afgerond) een onzekerheid mogen hebben van

- 5% m.b.t. golfoverslag
- 5% m.b.t. de steendiameter
- 2% m.b.t. de stroomsnelheid

Het ambitieniveau zou dus moeten zijn om de onzekerheid in de golfparameters tot deze orde te reduceren. Het zij benadrukt dat aan het niet behalen van het kwantitatieve ambitieniveau andere consequenties verbonden zijn dan aan het niet behalen van eventuele kwantitatieve acceptatiecriteria. Waar bij het niet voldoen aan de acceptatiecriteria teruggevallen zal moet worden op een fall-back optie, kan er bij het niet behalen van het ambitieniveau toch voor gekozen worden om SWAN ongewijzigd te gebruiken.

De vraag is natuurlijk of bovengenoemd ambitieniveau realistisch is. Zowel voor numerieke model (SWAN) als voor de metingen lijkt het genoemde ambitieniveau op dit moment nog nauwelijks haalbaar.

#### 4.4.2 Nauwkeurigheid bij veldmetingen

De nauwkeurigheid van de veldmetingen is ongeveer 5% op diep water (ELD, SON) en 10 – 15% op ondiep water. Met name bij sterk brekende golven zijn er echter twijfels over de nauwkeurigheid in de meting van de golfhoogte. Bij meren is een nauwkeurigheid van 5% te optimistisch geschat. Hier moet eerder gedacht worden aan nauwkeurigheden van ca. 10% (voor vaste en drijvende instrumenten) tot 20% (voor remote sensing) (Bottema, 2006). Dit betreft een *zeer ruwe* indicatie op basis van vergelijkende onderzoeken. De werkelijke nauwkeurigheid is bij niet-brekende golven wellicht een stuk beter en bij brekende golven wellicht een stuk slechter.

Het zij benadrukt dat de ruwe data wel goed gebruikt moeten worden. Bij het gebruik van 10 minuut gemiddelde waarden van het spectrum en de spectrale parameters moet een middeling worden toegepast. Er is immers sprake van een random trekking uit een ensemble en dit verhoogt de onzekerheid. De spreiding binnen het ensemble treedt op zowel binnen cases (op te heffen door langere middelingsperiode te kiezen) als tussen de cases (op te heffen door data van verschillende stormen te middelen).

Naast de genoemde onzekerheid in de veldmetingen, is er ook sprake van "onzekerheid door natuurlijke spreiding". Doordat golfcondities van case tot case verschillen bij overigens nagenoeg identieke meteo- en getijcondities, treedt er in de metingen een spreiding rond de verwachtingswaarde van elke variabele op die *niet* met een langere middelingsduur valt te verkleinen.

#### 4.5 Optimaliseren van SWAN

Voor het verbeteren van SWAN kunnen er ruwweg twee methoden onderscheiden worden voor de keuze van de te optimaliseren (deel)processen:

1. optimalisatie van SWAN op basis van specifieke geografische gebieden waar SWAN onvoldoende presteert (opportunistische aanpak);
2. optimalisatie op basis van grootste onzekerheden.

Bij de eerste methode wordt er gekeken waar SWAN goed behoort te presteren en wordt op basis daarvan het model verbeterd. Dit betekent dat er een onderscheid wordt gemaakt tussen relevante gebieden (bijvoorbeeld nabij de keringen) en gebieden waar het er niet toe doet wat SWAN als uitvoer geeft. Tevens zou er onderscheid gemaakt kunnen worden tussen gebieden waar een dijkvak al ruim voldoet aan de toetscriteria en waar dit niet het geval is om zodoende de 'zwakke' plekken het eerst aan te kunnen pakken. Dit spoor werd tijdens de eerste expert meeting unaniem afgekeurd. Het feit dat een dijkvak ruim voldoet aan de toetsing mag geen reden zijn om daar een slechtere performance van SWAN te accepteren. Er werd een voorkeur uitgesproken voor de tweede methode, waarbij gekeken wordt waar de grootste onzekerheden zitten en welke onzekerheden de grootste invloed hebben op de onzekerheid in de einduitkomst (c.q. de uiteindelijke afmetingen van de waterkering en de benodigde steendiameter etc.). Hiervoor moet de volledige hydraulische keten beschouwd worden. Op deze manier kan gekeken worden van welke golfparameter de nauwkeurigheid verbeterd moet worden om de grootste reductie van de totale onzekerheid te krijgen. Deze mening werd zowel in de eerste als de tweede vergadering onderschreven.

Voor het bepalen van de bijdragen van de verschillende schakels in de keten zou het prioriteringsinstrumentarium van DWW een nuttig hulpmiddel zijn. Het is niet helemaal duidelijk waarom de ontwikkeling hiervan is stopgezet. Wellicht lag het ambitieniveau destijds te hoog. Er blijft echter behoefte aan een (eenvoudige versie van) het prioriteringsinstrumentarium. Dit dient teruggekoppeld te worden naar Ulrich Förster van DWW die verantwoordelijk is voor het instrument.

## 4.6 Conclusies

- Uit het bovenstaande blijkt dat binnen de scope van dit project het onmogelijk is om de vereiste nauwkeurigheid van SWAN vast te stellen.
- Het is wel mogelijk om een ambitieniveau vast te stellen waarbij de onzekerheid in de golfparameters zo klein is dat binnen de tolerantiegrenzen van de belastingformules wordt gebleven.
- De inspanning moet zodanig zijn om zo goed mogelijk deze ambities te halen, door prioritair aan de grootste onzekerheden in de golfmodellering te werken (d.w.z. de grootste onzekerheden die er voor het eindantwoord (golfperiode en golfhoogte aan de teen van de kering) toe doen). Middels een prioriteringsinstrument kan dan gekeken worden (de verbetering van) welke golfparameter de grootste reductie van de totale onzekerheid geeft.
- Daarnaast moet aan de nauwkeurigheid in de beschrijving van de faalmechanismen gewerkt worden en moeten de onzekerheden in de formules en de invoer in kaart worden gebracht.

## 5 Vaststellen kwalitatieve acceptatiecriteria

### 5.1 Inleiding

De kwalitatieve component van de acceptatiecriteria is dat er voldoende technisch vertrouwen moet zijn in de uitkomsten van SWAN: alle relevante fysica is goed (genoeg) gemodelleerd en de trends in de uitkomsten komen overeen met wat op basis van fysieke kennis verwacht kan worden. Naast technisch vertrouwen moet er ook bestuurlijk en operationeel vertrouwen zijn: de uitkomsten moeten uitgelegd kunnen worden en moeten voldoende onderbouwd zijn om mogelijk majeure infrastructurele ingrepen te rechtvaardigen. De kwalitatieve component is vooral van belang voor de opschaling van de acceptatie van het golfmodel SWAN voor stormen naar de acceptatie onder extreme omstandigheden, zoals gepresenteerd in de HR-keten diagram (Figuur 5-1; overgenomen uit [WL, 2006a]), waarin het voor stormen gevalideerd model moet worden opgeschaald naar extreme situaties (1/1000 jaar en meer).

#### 5.1.1 HR-keten

De HR keten moet als volgt gelezen worden: De keten begint linksboven met metingen van golven op relatief diep water, van waterstand in kuststations en van wind op landpunten. Deze metingen worden vertaald (geëxtrapoleerd) naar extreme waarden van dezelfde grootheden. De diep-water statistiek van golven moet vertaald worden naar golfrandvoorwaarden bij de teen van de kering door de toepassing van een transformatiematrix voor verschillende combinaties van wind, waterstand, golfhoogten per windrichting. Deze transformatiematrix, de database KustDB20XX (waarbij 20XX op dit moment 2006 is), maar in de toekomst bijvoorbeeld 2011) is gevuld met berekeningen uitgevoerd met het golftransformatiemodel SWAN (Booij et al., 1999; Zijlema en Van der Westhuijsen, 2005). De extreme waarden zijn dus niet direct invoer voor SWAN maar de extreme waarden worden wel gebruikt om het bereik van de door te rekenen combinaties te bepalen (vandaar de gestreepte pijl). Het schema geeft ook aan dat de transformatie wordt uitgevoerd met een golfmodel SWAN voor extreme condities, terwijl het gevalideerd en geaccepteerd is voor stormsituaties Deze laatste stap vereist een acceptatieslag, en dit is de stap waar het in het huidige hoofdstuk om gaat. De golfrandvoorwaarden bij de teen van de constructie, samen met de waterstands-randvoorwaarden, de faalmechanismen en de eigenschappen van de constructie zijn opgenomen in de rekenmodule HYDRA-K (in het dikomrande kader). De statistiek en de transformatiematrix zijn invoer voor HYDRA-K. Deze module rekent op basis van al deze gegevens de maatgevende (meest kritische) combinatie uit: de Hydraulische Randvoorwaarde van golfhoogte, golfperiode, golfrichting en waterstand. Deze combinatie van waarden wordt in de huidige praktijk door de beheerders gebruikt om een deterministische toets van de kering uit te voeren door toepassing van de sterkte- en belastingmodules. De laatste twee stappen van toetsing en acceptatie zijn feitelijk geen onderdeel van de HR-keten maar worden voor de volledigheid wel genoemd in Figuur 5-1.





## 5.2 Technisch vertrouwen

‘Vertrouwen’ dat het model ook in extreme omstandigheden toegepast kan worden, kan opgebouwd worden als het model in staat is zo extreem mogelijke stormen goed te hindcasten.

Hiervoor is nodig dat de verschillende fysische processen (bijvoorbeeld, het breker-model, niet-lineaire wisselwerkingen, whitecapping) afzonderlijk zo goed mogelijk, dat wil zeggen: state-of-the-art, gemodelleerd zijn. Deze gemodelleerde processen moeten ook verifieerbaar zijn aan de hand van veldmetingen, waar zo’n proces dominant is. Voor de verificatie van golfgroei kan bijvoorbeeld gekeken worden naar data van orkanen (Lake Tai Hu, China), Lake George en IJsselmeer/Slotermeer en voor ondiepwaterbreken naar gegevens langs de gesloten kust. Daarnaast weten we nu dat bijvoorbeeld lokale windgroei bij korte fetches en situaties met ebstroming niet goed gemodelleerd worden. Deze aspecten worden uitgewerkt in de plannen voor SBW-Waddenzee 2007.

Het is op voorhand nooit zeker welke processen dominant zijn in de Waddenzee en of er niet een proces ontbreekt. Hiervoor blijven goed gekozen hindcasts onmisbaar (bijv. een geval van hoge windsnelheid en lage waterstand, en een geval van deiningsoordringing). In WL/Alkyon (2003) is een prioriteitenlijst opgesteld die in Schoorl door het Hydraulic Review Team is beoordeeld, waarna het enigszins gewijzigd is. Hierin staat aangegeven welk processen waar een rol spelen met de prioritering erbij. Deze expertise zou gebruikt kunnen worden om te kijken welke processen belangrijk zijn om zodoende (na verbetering) technisch vertrouwen te krijgen in het model. Deze activiteit is opgenomen in de plannen voor 2007.

Daarnaast is het mogelijk om velddata waarin een combinatie van twee processen dominant is te gebruiken om te verifiëren dat het model nog steeds goed functioneert. Voor de combinatie windzee en deining geldt de case van Lunenburg Bay (Nova Scotia), en voor de combinatie van deining en stroming Port Phillip Bay (Melbourne, Australia).

Het zal moeilijk zijn om velddata voor de combinatie van alle processen voor een extreme situatie te vinden. Echter, een hindcast van een complexe situatie blijft de best mogelijke test (‘ultieme waarheid’) om vertrouwen in een model te krijgen (of te verliezen). Dat extrapolatie naar extremen gerechtvaardigd is kan niet aangetoond worden. Dit is inherent aan het modelleren van extremen in deze situatie (pers. comm. Hans Janssen).

Naast hindcasts kan het ook zinvol zijn om te kijken hoe SWAN het doet in vergelijking met eenvoudige methodes, zoals bijvoorbeeld de formule van Bretschneider. Op deze manier kan gekeken worden of SWAN in staat is bepaalde trends te reproduceren. Het betreft dan niet zozeer academische testen maar bijvoorbeeld het toepassen van Bretschneider op een aantal locaties in de Waddenzee. Dit is ook gedaan in de Oosterschelde en ook voor het merengebied bestaat er hiervoor een eenvoudige rekentool. Een vergelijking kan bijdragen aan inzicht in de lokale golfdynamiek, alsmede aan het vertrouwen in het SWAN.

## 5.2.1 Meetdata

Op dit moment zijn er drie belangrijke kennisleemtes die een verdere verbetering van golfmodellen belemmeren (Bottema, 2006):

1. Golfcondities bij tenminste windkracht 9 (storm):
  - Bij strijklengtes korter dan 3 kilometer zijn de onzekerheden in de golfhoogte, mede bij gebrek aan eenduidige metingen voor die situaties, al gauw een factor 2.
  - Bij niet al te diepe meren groeien de golven bij storm zó ver dat ze last krijgen van de bodem en uiteindelijk een soort golfgroeilimiet bereiken. Deze golfgroeilimietcondities zijn nog nauwelijks bemeten, maar wel zeer relevant voor het ontwerp en de toetsing van de dijken in het IJsselmeergebied.
  - Er is vooral in situaties met brekende golven en/of relatief ondiep water weinig bekend over de energieoverdracht van de wind op de golven, en het is niet bij voorbaat zeker of de gangbare formules dan geldig zijn.
2. Interactie tussen golven en stroming, zowel wind- en getijgedreven stroming als afvoer:
  - Bij gebrek aan metingen zijn er vrijwel geen mogelijkheden om modelschattingen van windgedreven stroming te verifiëren en mede daardoor is nog erg weinig bekend over (het praktisch belang van) golf-stroom-interactie.
3. Geldigheidsbereik van eenvoudige voorspellingsformules (golfgroeikrommes)
  - Met name vlak onder de kust is de strijklengte niet eenduidig gedefinieerd, en wordt de richting van de golven soms meer bepaald door de kustlijn dan door de wind.

Hoewel bovenstaande kennisleemtes zijn geïnventariseerd met het oog op golfmodellering in de zoete rijkswateren, zijn de genoemde kennisleemtes ook van toepassing op golfmodellering in de Waddenzee. Tijdens de expert meeting deelden alle aanwezigen dan ook de mening dat er meer meetdata nodig zijn om bovenstaande kennisleemtes te vullen. Dit betreft zowel laboratorium- als veldmetingen.

### 5.2.1.1 Laboratoriummetingen

De voordelen van laboratoriummetingen zijn dat onder beheersbare omstandigheden fysische processen, die in het veld niet geïsoleerd voorkomen, en dat extreme omstandigheden van het samenspel van diverse processen onderzocht kunnen worden. De nadelen van laboratoriummetingen zijn modeffecten en schaafeffecten.

In het verleden zijn laboratoriummetingen gebruikt om 1D metingen te doen van extreme situaties. De procedure daarbij was om :

1. Veldmetingen (= stormcondities) uitvoeren en deze hindcasten met numeriek model. Als de numerieke resultaten dicht bij de metingen liggen is het model voor deze stormcondities te vertrouwen.
2. Veldmetingen op schaal nabootsen in het laboratorium om lab- en schaafeffecten te onderzoeken. Deze metingen ook hindcasten.
3. Als er voldoende vertrouwen is in de laboratoriummetingen voor stormcondities, extreme condities nabootsen en deze hindcasten met een numeriek model. Als de resultaten dicht bij de laboratoriummetingen liggen is het model te vertrouwen voor deze extreme situaties.

Deze procedure kan in principe ook gebruikt worden voor 2DH metingen. Echter, daarbij spelen meer dan in het geval van gootmetingen de model- en schaaffecten. Een modeffect is de gebrekkige opwekking van windgolven in het laboratorium. Een schaaffect is dat de afmetingen van de golven zeer klein wordt als een geheel getij-inlaatsysteem wordt gemodelleerd. Het zal dus moeilijk zijn om veldmetingen in de Waddenzee te reproduceren in het laboratorium. Echter, een niet-windgedreven proces als het doordringen van deining zou wel mogelijk zijn. Het is zinvol om een bureaustudie uit te voeren naar de voors en tegens van 2DH-laboratoriummetingen.

### **5.2.1.2 Veldmetingen**

Het voordeel van veldmetingen is dat alle processen inherent aanwezig zijn en dat er geen model of schaaffecten optreden. Echter, processen kunnen niet geïsoleerd worden en extreme omstandigheden zullen (bijna) niet voorkomen. Een belangrijk proces als windgedreven golfgroei kan in het laboratorium in 2D omstandigheden niet goed worden nagebootst en het is dus niet voldoende om het vertrouwen in SWAN alleen op laboratoriummetingen te baseren. Om dat vertrouwen te krijgen moeten er dus ook veldmetingen van de Waddenzee en andere locaties gebruikt worden, zoals, naast de genoemde metingen in Lunenburg Bay (Nova Scotia) en Port Phillip Bay (Melbourne, Australia), bijvoorbeeld metingen in Tai Ho (China), Lake George, IJsselmeer/Slotermeer of metingen van orkanen.

## **5.3 Bestuurlijk vertrouwen**

De rolverdeling tussen Rijkswaterstaat en DG Water is nu scherper dan voorheen gedefinieerd. Als de producten van SBW technisch voldoen, dat wil zeggen dat de inhoudelijke experts er achter staan en een externe commissie als het HRT of de ENW het heeft goedgekeurd, dan kan DG Water het niet meer op technisch-inhoudelijke gronden afwijzen. Wel kan het zo zijn dat het product tijdelijk niet wordt gebruikt omdat het op dat moment bestuurlijk niet opportuun is om iets te doen met het product. Dit valt dan echter niet meer binnen de verantwoordelijkheid van SBW of RWS. Wel is het belangrijk vantevoren te melden aan DG Water dat en hoe het proces van communicatie met het operationele veld wordt ingezet.

Hoewel voor bestuurlijk vertrouwen in de inhoud een toetsing door een extern team van deskundigen nu voldoende is, blijft het belangrijk dat DG Water vertrouwen heeft in het proces. DG Water moet dus meegenomen worden in de processturing om een tevreden klant te houden.

## **5.4 Operationeel vertrouwen**

Het is belangrijk dat beheerders bij het proces betrokken worden. Dit kan bijvoorbeeld middels de Watersysteem Groep Kust die nu twee maal per jaar bijeenkomt in het kader van de HR. De deelnemende waterschappers hebben veel gebiedskennis, wat ook noodzakelijk is voor het technisch vertrouwen. Belangrijk is wel dat de beheerders in voor hen 'relevante' taal worden aangesproken. Zo zijn zij bijvoorbeeld niet zozeer geïnteresseerd in de individuele golfhoogte en golfperiode maar in de vereiste kruinhoogte (via golfloop/overslag). Hier moet op worden aangesloten.

Om operationeel vertrouwen te krijgen moet er sprake zijn van consistentie met de omgeving en met wat er in het verleden gebeurd is (consistentie in ruimte en tijd). Eventuele verschillen moeten in begrijpelijke taal uitgelegd kunnen worden. Trendbreuken moeten derhalve niet uit de weg worden gegaan, zolang ze maar uitgelegd kunnen worden. Daarnaast moeten uitkomsten stroken met de waarnemingen van de beheerders. Zo is het een goed idee om de storm van 1/2 november 2006 te hindcasten, ook nu er geen data is ingewonnen, om toch een voorbeeld te geven wat SWAN voorspelt aan de teen van de dijk en wat de golfloop is die daaruit volgt. Dat kan geschraagd worden met veekranden die waargenomen zijn. Het is wel belangrijk dat concrete resultaten altijd eerst naar DG Water moeten alvorens ze gepresenteerd kunnen worden in het veld van beheerders. Tevens moet er met DG Water worden afgesproken dat dit proces wordt ingezet met de beheerders.

De toets van de bruikbaarheid van de SBW-producten ligt bij de beheerders, niet bij DG Water. Als de beheerders worden meegenomen in het proces zal het geen probleem zijn om operationeel vertrouwen te krijgen. Er dient wel vanaf het begin een tweezijdigheid te zitten in het proces: niet alleen ‘wat willen de beheerders van SBW weten’ maar ook andersom.

Er is een communicatieplan nodig voor het betrekken van de beheerders bij SBW en HR. Er ligt nu al een communicatieplan voor HR en hier moet op worden aangesloten voor SBW. Er moet niet een nieuw gremium uitgevonden worden. Ook moet er geen onderscheid worden aangebracht tussen de sterkte- en de belastingkant. Uiteindelijk gaat het de beheerder om de kering en de S- en B-kant moeten dus geaggregeerd worden gebracht.

De frequentie van de bijeenkomst van de WSG van twee maal per jaar lijkt voldoende. Eventueel kan de communicatie uitgebreid worden met een nieuwsbrief die bijvoorbeeld ieder kwartaal verschijnt.

## 5.5 Conclusies

- Om het vertrouwen in het model te vergroten is het belangrijk om de individuele processen zo goed mogelijk te modelleren.
- Deze processen moeten aan de hand van velddata van uiteenlopende condities (inclusief zware stormen) en laboratoriummetingen gevalideerd worden. De data moet situaties beslaan waarin één proces of twee processen dominant zijn zodat de performance alleen of in combinatie getest kan worden.
- De ultieme testen zijn op basis van velddata van zware stormen.
- Voor de Waddenzee zijn laboratoriumsimulaties van extreme condities met wind lastig uitvoerbaar in verband met schaal- en modeffecten.
- Door de kwaliteitsborging van de eindproducten door de HRT zal het verkrijgen van bestuurlijk vertrouwen op technisch-inhoudelijk vlak geen probleem hoeven op te leveren. DG Water is primair betrokken bij de processturing en zij laat de technisch-inhoudelijke toetsing over aan derden.
- Wat het verkrijgen van operationeel vertrouwen betreft, dient bij voorkeur aangehaakt te worden op bestaande gremia, zoals de Watersysteem Groep Kust. Belangrijk is dat de beheerders actief betrokken worden bij het SBW-proces. Gezien de aanwezige gebiedskennis kunnen de beheerders een belangrijke rol spelen bij het verkrijgen van technisch vertrouwen.

## 6 Samenvatting en conclusies

### 6.1 Samenvatting

In het kader van de opdracht “SBW-Randvoorwaarden Waddenzee” is een deelproject gedefinieerd waarin de te optimaliseren golfparameters en de acceptatiecriteria moeten worden afgestemd. Deze afstemming heeft plaatsgevonden tussen het deelproject SBW-Faalmechanismen, waarin de faalmechanismen onderzocht worden en het deelproject SBW-Randvoorwaarden waarin de kwaliteit van golfparameters nabij de keringen wordt onderzocht. Voor SBW-Natuurrandvoorwaarden is het van belang te weten welke golfparameters (bijvoorbeeld welke periodemaat) gebruikt worden in faalmechanismen zodat de verbetering van het golfmodel SWAN zich mede hierop kan richten. Deze golfparameters zijn gegeven in Hoofdstuk 3.

Daarnaast moet bepaald worden of de modelresultaten al dan niet voldoen aan acceptatiecriteria. Deze acceptatiecriteria waren tot op heden nog niet vastgesteld. De op te stellen acceptatiecriteria hebben zowel een kwantitatief (objectief) als kwalitatief (subjectief) aspect. De kwantitatieve component is dat het golfmodel SWAN voldoende nauwkeurige golfparameters moet kunnen afgeven waarmee binnen nog te bepalen tolerantiegrenzen de belasting op de waterkeringen (bijvoorbeeld in termen van steenstabiliteit en golfoverslag) kan worden bepaald. De criteria, of liever gezegd het ambitieniveau, is gegeven in Hoofdstuk 4.

De kwalitatieve component zoals beschreven in Hoofdstuk 5 is dat er voldoende technisch vertrouwen moet zijn in de uitkomsten van SWAN: alle relevante fysica is goed (genoeg) gemodelleerd en de trends in de uitkomsten komen overeen met wat op basis van fysieke kennis verwacht kan worden. Naast technisch vertrouwen moet er ook bestuurlijk en operationeel vertrouwen zijn: de uitkomsten moeten uitgelegd kunnen worden en moeten voldoende onderbouwd zijn om mogelijk majeure infrastructurele ingrepen te rechtvaardigen. De kwalitatieve component is vooral van belang voor de opschaling van de acceptatie van het golfmodel SWAN voor gemeten stormen naar de acceptatie onder extreme toetsomstandigheden waarvoor geen metingen beschikbaar zijn.

### 6.2 Conclusies

Met betrekking tot de vraag wat de benodigde golfparameters zijn, kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- De golfparameters die worden gebruikt in de formules voor de, in de Waddenzee relevante, faalmechanismen zijn:  $H_s$ ,  $H_{m0}$ ,  $T_m/T_{m02}$ ,  $T_{m-1,0}$ ,  $T_p$ ,  $\theta$ . Het betreft zowel tijddomein en frequentiedomein grootheden.
- De golfparameters worden uitgerekend met een frequentie-domein model (SWAN) zodat het wenselijk is om voor de in de formules gebruikte tijddomeingrootheden spectrale alternatieven te gebruiken, als dat mogelijk is.

- Aan de sterktekant wordt er op dit moment en in de naaste toekomst weinig gedaan met het tijddomein karakter. Aangezien de vraagkant van “Sterkte” leidend is is spectrale modellering vooralsnog voldoende.
- De berekende spectrale golfparameters zijn sterk afhankelijk van de gehanteerde afkapgrenzen. Dit punt heeft een afstemming tussen degenen die betrokken zijn bij de veldmetingen en het fysisch modelonderzoek, met name op het punt van het verdisconteren van de afgekapte energie in toetsmethoden. Voor SWAN is het vooral in het gebruik dat het belang van de afkapfrequenties in acht moeten worden genomen. Voor de ontwikkeling van SWAN is dit punt van minder belang.
- Alhoewel de formules van de faalmechanismen uitgaan van integrale grootheden is het voor het bereiken van technisch vertrouwen in het model noodzakelijk om ook de spectrale vorm op te leveren.

Naast de golfparameters moeten met behulp van data of andere modellen ook andere grootheden worden bepaald, met name waterstand en stormduur.

Wat het technisch vertrouwen in de toepassing van SWAN in de Waddenzee betreft zijn de volgende punten van belang:

- Het blijkt binnen de scope van dit project het onmogelijk te zijn om de vereiste nauwkeurigheid van SWAN vast te stellen.
- Het is wel mogelijk om een ambitieniveau vast te stellen waarbij de onzekerheid in de golfparameters zo klein is dat binnen de tolerantiegrenzen van de belastingformules wordt gebleven.
- De inspanning moet zodanig zijn om zo goed mogelijk deze ambities te halen, door prioritair aan de grootste onzekerheden in de golfmodellering te werken (d.w.z. de grootste onzekerheden die er voor het eindantwoord (golfperiode en golfhoogte aan de teen van de kering) toe doen). Middels een prioriteringsinstrument kan dan gekeken worden (de verbetering van) welke golfparameter de grootste reductie van de totale onzekerheid geeft.
- Daarnaast moet aan de nauwkeurigheid in de beschrijving van de faalmechanismen gewerkt worden en moeten de onzekerheden in de formules en de invoer in kaart worden gebracht.

Met betrekking tot de vraag hoe bestuurlijk en operationeel vertrouwen verkregen kan worden voor de toepassing van het golfmodel SWAN in de Waddenzee, kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- Om het vertrouwen in het model te vergroten is het belangrijk om de individuele processen zo goed mogelijk te modelleren.
- Deze processen moeten aan de hand van velddata van uiteenlopende condities (inclusief zware stormen) en laboratoriummetingen gevalideerd worden. De data moet situaties beslaan waarin één proces of twee processen dominant zijn zodat de performance alleen of in combinatie getest kan worden.
- De ultieme testen zijn op basis van velddata van zware stormen.
- Voor de Waddenzee zijn laboratoriumsimulaties van extreme condities met wind lastig uitvoerbaar in verband met schaal- en modeffecten.
- Door de kwaliteitsborging van de eindproducten door de HRT zal het verkrijgen van bestuurlijk vertrouwen op technisch-inhoudelijk vlak geen probleem hoeven op te leveren. DG Water is primair betrokken bij de processturing en zij laat de technisch-inhoudelijke toetsing over aan derden.

- Wat het verkrijgen van operationeel vertrouwen betreft, dient bij voorkeur aangehaakt te worden op bestaande gremia, zoals de Watersysteem Groep Kust. Belangrijk is dat de beheerders actief betrokken worden bij het SBW-proces. Gezien de aanwezige gebiedskennis kunnen de beheerders een belangrijke rol spelen bij het verkrijgen van technisch vertrouwen.

## **A Overzicht type keringen in Waddenzee**



Boek: De veiligheid van de primaire waterkering in Nederland (1996-2001)

Er zijn 8 dijkkringgebieden langs de Waddenzee en 1 verbindende waterkering:

Dijkkringgebied	1 <i>Schiernomnikoog</i> 2 <i>Ameland</i> 3 <i>Terschelling</i> 4 <i>Vlieland</i> 5 <i>Texel</i> 6 <i>Friesland en Groningen</i> 12 <i>Wieringen</i> 13 <i>Noord-Holland</i>
verbidende waterkering	1 <i>Afsluitdijk</i>

Type kering/dijkring	<i>Schiernomnikoog</i>	<i>Ameland</i>	<i>Terschelling</i>	<i>Vlieland</i>	<i>Texel</i>	<i>Friesland en Groningen</i>	<i>Wieringen</i>	<i>Noord-Holland</i>	<i>Afsluitdijk</i>
duin (km)	*	*	*	*	1*	0	0	0	
zeedijk (km)	4	16,3	13,8	1	26,2	270	20	10	31,4
kunstwerk (aantal)	1	3	2	2	9	35	6	6	4
aansluitingconstructies (aantal)	2	2	2	2	4	0	0		
overschrijdingskans (per jaar)	1/2000	1/2000	1/2000	1/2000	1/4000	1/4000	1/4000	1/10000	1/1430

\*Noordzee duinen niet meegenomen

Toetscriteria

Dijken en dammen

HT Hoogte	x	x	x	x	x	x	x	x	x
ST Stabiliteit	x	x	x	x	x	x	x	x	x
STP piping	x			x		x	x	x	
STV macrostab bu. afschuiving	x			x		x	x	x	
zettingvloeiing							?		
laag buitenwater	x			x					
STM macrostab bi.	x			x		x	x	x	
STU microstabiteit	x			x		x	x	x	
<i>BK bedeking</i>									
asfalt	x					x		x	
gras	x			x		x	x	x	
betonplaten									
Duinen	x				x				
Kustwerken									
HT Hoogte	x	x	x	x	x	x	x	x	x
ST Stabiliteit	x	x	x	x	x	x	x	x	x
STP piping	x			x				x	
STC constructie	x			x				x	
AM Afsluitmiddelen	x	x	x	x	x	x	x	x	x
AMC constructie	x			x				x	
AMb Bediening	x			x				x	
Hoge gronden						* duitse grens			
Aansluitingsconstructies	x	x	x	x	x				

## B Faalmechanismen in HYDRA-K (uit HKV, 2005)

### Golfoploop

De beschrijving van het faalmechanisme golfoploop is overgenomen uit [TAW, 2000]. Falen treedt op als meer dan 2% van de golven over de dijk oploopt, dus die gebeurtenis waarbij de lokale waterstand bij de teen van de dijk, vergroot met de 2%-oploop, de kruinhoogte van de dijk overschrijdt. De grenstoestandsfunctie van het faalmechanisme golfoploop is te schrijven als:

$$Z_{\text{oploop}} = h_c - (h + z_{2\%})$$

waarbij:

- $h_c$  = kritieke kruinhoogte (sterkte)
- $h$  = hoogwaterstand (belasting)
- $Z_{2\%}$  = golfoploophoogte van de bovenste 2% van de hoogste golven (belasting)

De golfoploophoogte hangt af van de hoogwaterstand, de significante golfhoogte en de piekperiode, die op hun beurt weer afhangen van windsnelheid en windrichting. De grenstoestandsfunctie luidt dus:

$$Z_{\text{oploop}}(h, v, \varphi) = h_c - h - z_{2\%}(h, v, \varphi)$$

waarbij:

- $v$  = windsnelheid
- $\varphi$  = windrichting

De golfoploophoogte wordt hieronder verder uitgewerkt. De definitie van deze term is:

$$z_{2\%} = \gamma_\beta \cdot \gamma_f \cdot \tilde{H}_s \cdot \min \left( 1.75 \cdot \gamma_b \cdot \xi_{op}, \frac{3.4 - 1.6}{\sqrt{\xi_{op}}} \right) \quad (1)$$

waarbij:

- $\gamma_\beta$  = reductiefactor voor de golfrichting
- $\gamma_f$  = reductiefactor voor de ruwheid van het talud
- $\tilde{H}_s$  = gereduceerde significante golfhoogte
- $\xi_{op}$  = brekingsindex, afhankelijk van de golfsteilheid

De verschillende termen worden hieronder toegelicht.

### **Golfsteilheid**

De golfsteilheid  $S_{op}$  wordt omschreven door:

$$S_{op} = \frac{2\pi \tilde{H}_s}{g \tilde{T}_p^2}$$

waarbij:

$\tilde{H}_s$  = gereduceerde significante golfhoogte

$\tilde{T}_p$  = gereduceerde piekperiode

$g$  = versnelling ten gevolge van de zwaartekracht ( $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ).

### Brekingsindex

De brekingsindex  $\xi_{op}$  is gedefinieerd door:

$$\xi_{op} = \frac{\tan(\alpha_{repr})}{\sqrt{S_{op}}}$$

waarbij:

$\alpha_{repr}$  = representatieve helling van het buitentalud

$S_{op}$  = golfsteilheid

### Representatieve helling

Als het berekende oploopniveau hoger is dan het hoogste punt van het ondertalud (hoogte berm) dan wordt de representatieve helling als volgt berekend:

$$\alpha_{repr} = \begin{cases} \alpha_{laag} & \text{als } h + 1.5\tilde{H}_s < h_{berm} \\ \frac{-\max(h_{teen}, h - 1.5\tilde{H}_s) + \min(h_{kruin}, h + 1.5\tilde{H}_s)}{h_{berm} - \max(h_{teen}, h - 1.5\tilde{H}_s) + \min(h_{kruin}, h + 1.5\tilde{H}_s) - h_{berm}} & \text{als } h - 1.5\tilde{H}_s < h_{berm} < h + 1.5\tilde{H}_s \\ \alpha_{hoog} & \text{als } h - 1.5\tilde{H}_s > h_{berm} \end{cases}$$

Met:

$\alpha_{repr}$  de representatieve helling [-],

$\alpha_{laag}$  de helling van het ondertalud [-],

$\alpha_{hoog}$  de helling van het boventalud [-],

$h_{teen}$  de teenhoogte [m+NAP],

$h_{berm}$  de hoogte van de berm (hoogste punt ondertalud) [m+NAP],

$h_{kruin}$  de kruinhoogte [m+NAP],

$h$  de waterstand [m+NAP],

$\tilde{H}_s$  de gereduceerde golfhoogte [m].

Als het berekende oploopniveau lager is dan het hoogste punt van het ondertalud (hoogte berm) dan wordt de representatieve helling als volgt berekend:

$$\alpha_{repr} = \begin{cases} \alpha_{laag} & \text{als } h + 1.5\tilde{H}_s < h_{berm} \\ \frac{-\max(h_{leen}, h - 1.5\tilde{H}_s) + \min(h_{berm}, h + 1.5\tilde{H}_s)}{\frac{h_{berm} - \max(h_{leen}, h - 1.5\tilde{H}_s)}{\alpha_{laag}} + \frac{\min(h_{berm}, h + 1.5\tilde{H}_s) - h_{berm}}{\alpha_{hoog}}} & \text{als } h - 1.5\tilde{H}_s < h_{berm} < h + 1.5\tilde{H}_s \\ \alpha_{hoog} & \text{als } h - 1.5\tilde{H}_s > h_{berm} \end{cases}$$

### Reductiefactor voor de hoek van golfaanval

Voor het verschil tussen windrichting en richting van de uitwendige dijknormaal geldt:

$$\phi = |\psi - \varphi|$$

waarbij:

- $\varphi$  = de windrichting
- $\psi$  = de richting van de uitwendige dijknormaal
- $\phi$  = de invalshoek met  $0 \leq \phi \leq 180$ .

Er worden twee verschilhoeken gedefinieerd:  $\phi_a = 80$  en  $\phi_b = 110$ . De reductiefactor voor de windrichting  $\gamma_\beta$  kan dan als volgt bepaald worden:

$$\gamma_\beta = \begin{cases} 1 - 0.0022\phi & \text{als } \phi < \phi_a \\ 1 - 0.0022\phi_a & \text{als } \phi \geq \phi_a \end{cases}$$

Verder wordt een reductiefactor  $\gamma_s$  voor de golfparameters berekend:

$$\gamma_s = \begin{cases} 1 & \text{als } \phi < \phi_a \\ 1 - \frac{\phi - \phi_a}{\phi_b - \phi_a} & \text{als } \phi_a \leq \phi < \phi_b \\ 0 & \text{als } \phi \geq \phi_b \end{cases}$$

Hiermee volgt:

$$\begin{aligned} \tilde{H}_s &= \gamma_s H_s \\ \tilde{T}_p &= \sqrt{\gamma_s} T_p \end{aligned}$$

### Reductiefactor voor invloed van ruwheid

De invloed van de ruwheid op golfloop wordt gegeven door reductiefactor  $\gamma_f$ , gedefinieerd door:

$$\gamma_f = \text{ruwheid}$$

### Reductiefactor voor invloed berm

De invloed van berm op golfloop wordt gegeven door reductiefactor  $\gamma_b$ :

$$\gamma_b = 1$$

## **Golfoverslag**

Het overslagdebiet tijdens storm mag niet zo groot worden dat erosie optreedt aan kruin en binnentalud. Daarom wordt gesteld dat de constructie faalt wanneer een kritiek overslagdebiet  $q_c$  overschreden wordt. Voor het mechanisme 'golfoverslag' kan de volgende grenstoestandsfunctie worden geformuleerd:

$$Z_{\text{overslag}} = q_c - q$$

waarbij:

- $q_c$  = kritiek overslagdebiet [l/s/strekkende meter]  
 $q$  = overslaand debiet [l/s/strekkende meter]

De definitie van het overslagdebiet is conform [TAW, 2000]. Het kan in twee formules worden beschreven: één voor brekende golven, waarbij de golfoverslag toeneemt bij toenemende brekerparameter, en één voor het maximum dat wordt bereikt bij niet-brekende golven. De in de formules gebruikte variabelen  $H_s$  en  $T_p$  worden gelezen uit de database. Het overslaand debiet wordt bepaald uit het minimum van het dimensieloos overslagdebiet voor brekende en niet-brekende golven.

## **Brekende golven**

Bij brekende golven geldt:

$$q = 1000 \cdot Q_b \gamma_b \sqrt{\frac{g H_s^3 \tan \alpha}{s_{op}}} \quad \text{voor } \gamma_b \xi_{op} < \approx 2 \quad (2)$$

waarbij:

- $Q_b$  = dimensieloos overslagdebiet voor brekende golven  
 $\gamma_b$  = reductiefactor voor invloed van een berm  
 $g$  = zwaartekrachtversnelling [m/s<sup>2</sup>]  
 $H_s$  = significante golfhoogte [m]  
 $\alpha$  = helling van talud [graden]  
 $s_{op}$  = golfsteilheid  
 $\xi_{op}$  = brekerparameter

De factor 1000 is een omrekeningsfactor. De golfsteilheid wordt als volgt gedefinieerd:

$$s_{op} = \frac{2\pi H_s}{g T_p^2}$$

waarbij:

- $T_p$  = piekperiode [s]

De brekerparameter is

$$\xi_{op} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{s_{op}}}$$

De dimensieloze kruinhoogte bij brekende golven is

$$R_b = \frac{h_k}{H_s} \frac{\sqrt{s_{op}}}{\tan \alpha} \frac{1}{\gamma_b \gamma_f \gamma_\beta \gamma_s \gamma_v} \text{ voor } \gamma_b \xi_{op} < \approx 2$$

waarbij:

$R_b$  = dimensieloze kruinhoogte bij brekende golven

$h_k$  = vrije kruinhoogte boven stilwaterlijn

$\gamma_f$  = reductiefactor voor invloed van ruwheid

$\gamma_\beta, \gamma_s$  = reductiefactoren voor invloed van hoek van golfaanval

$\gamma_v$  = reductiefactor voor invloed van het voorland

Het toepassingsgebied van deze formule is  $0,3 < R_b < 2$ . De minimumreductie is  $\gamma_b \gamma_f \gamma_\beta \gamma_s \gamma_v \geq 0,4$ . Een gemiddelde van waarnemingen van golfoverslag kan worden beschreven door

$$Q_b = 0,06 \cdot \exp(-5,2 \cdot R_b) \text{ voor } \gamma_b \xi_{op} < \approx 2$$

Voor gebruik in Hydra-K moet een meer conservatieve formule gebruikt worden:

$$Q_b = 0,067 \cdot \exp(-4,3 \cdot R_b) \text{ voor } \gamma_b \xi_{op} < \approx 2$$

### Niet-brekende golven

Bij niet-brekende golven geldt:

$$q = 1000 Q_n \sqrt{g H_s^3} \text{ voor } \gamma_b \xi_{op} > \approx 2$$

waarbij:

$Q_n$  = maximum dimensieloos overslagdebiet bij niet-brekende golven

De dimensieloze kruinhoogte bij niet-brekende golven is

$$R_n = \frac{h_k}{H_s} \frac{1}{\gamma_f \gamma_\beta \gamma_s} \text{ voor } \gamma_b \xi_{op} > \approx 2$$

waarbij:

$R_n$  = dimensieloze kruinhoogte bij niet-brekende golven

Een gemiddelde van waarnemingen van golfoverslag kan worden beschreven door

$$Q_n = 0,2 \cdot \exp(-2,6 \cdot R_n) \text{ voor } \gamma_b \xi_{op} > \approx 2$$

Voor gebruik in Hydra-K moet een meer conservatieve formule gebruikt worden:

$$Q_n = 0,2 \cdot \exp(-2,3 \cdot R_n) \text{ voor } \gamma_b \xi_{op} > \approx 2$$

### Reductiefactoren

Om de waarden van de reductiefactoren te bepalen, wordt een verschilhoek gedefinieerd als de hoek tussen de hoek van golfaanval en de dijknormaal:

$$\theta_{\text{verschil}} = \theta_{\text{golfaanval}} - \theta_{\text{dijknormaal}}$$

zodat deze hoek altijd positief is en ligt tussen 0 en  $\pi$ . De reductiefactoren zijn dan als volgt gedefinieerd:

$$\gamma_{\beta} = \begin{cases} 1 - 0,0033 \cdot \theta_{\text{verschil}} & \text{als } \theta_{\text{verschil}} < 80 \\ 0,736 & \theta_{\text{verschil}} > 80 \end{cases}$$

en

$$\gamma_s = \begin{cases} 1 & \theta_{\text{verschil}} < 80 \\ 1 - \frac{\theta_{\text{verschil}} - 80}{30} & \text{als } 80 < \theta_{\text{verschil}} < 110 \\ 0 & \theta_{\text{verschil}} > 110 \end{cases}$$

### **Golfoverslag bij een verticale wand**

Voor het mechanisme 'golfoverslag bij verticale wand' wordt dezelfde grenstoestandsfunctie toegepast als eerder beschreven bij het mechanisme 'golfoverslag'. Er wordt gesteld dat de constructie faalt wanneer een kritiek overslagdebiet  $q_c$  overschreden wordt. De formule voor golfoverslag bij een verticale wand is gebaseerd op de formule uit de Leidraad Kerende Kunstwerken:

$$q = 0.13 \sqrt{gH_s^3} \exp\left(-3.0 \frac{h_{kr} - h}{H_s} \frac{1}{\gamma_{\beta} \gamma_n}\right)$$

$q$  kritiek overslagdebiet ( $m^3 / s / m$ )

$g$  gravitatieconstante ( $m^2 / s$ )

$H_s$  significante golfhoogte ( $m$ )

$h_{kr}$  hoogte van de kruin ( $m + \text{NAP}$ )

$h$  stilwaterlijn ( $m + \text{NAP}$ )

$\gamma_{\beta}$  reductiefactor voor scheefinvalende golven

$\gamma_n$  reductiefactor voor een neus op de wand

### **Steenzetting**

De methode voor het vaststellen van de betrouwbaarheid van steenzettingen is gebaseerd op figuur 2.2.4.5 en 2.2.2.3 van de leidraad Toetsen op Veiligheid [TAW, 1999]. Het faalmechanisme kan het beste omschreven worden als "*instabiliteit van de toplaag van de steenzetting of lokale afschuiving, als gevolg van golven*". Het faalmechanisme "*materiaaltransport*" wordt niet meegenomen omdat deze niet afhankelijk is van de golfhoogte, periode of waterstand. Bovendien is dit faalmechanisme meestal niet maatgevend.

Er worden 2 typen steenzettingen onderscheiden nl.:

- ongunstige steenzetting;
- normale steenzetting.

De basis voor de toetsing vormt de eenvoudige toetsmethode type c uit de leidraad, nl. "*ingeklemde stenen op een granular filter*". Van dit type zullen alleen de ongunstige constructies en de normale constructies beschouwd worden.

Andere type steenzettingen hebben een grenstoestandsfunctie die sterk lijkt op die van de twee typen die hier gemodelleerd worden. Die bekledingtypen komen veel minder vaak voor in Nederland.

Voor de toetsing van steenzettingen zijn de volgende invoergrootheden nodig:

$H_s$	significante golfhoogte op de teen van de constructie (m)
$h$	waterstand (m + NAP)
$z_o$	niveau ondergrens van de te toetsen bekleding (m + NAP)
$z_b$	niveau bovengrens van de te toetsen bekleding (m + NAP)
$T_p$	golfperiode behorende bij de piek van het spectrum (s)
$\tan \alpha$	gemiddelde taludhelling bepaald tussen SWL +/- $1.5H_s$ . Hierbij telt een eventuele berm niet mee bij het bepalen van de gemiddelde helling (-)
$D$	dikte van de toplaag (m)
$b$	dikte van de filterlaag en kleilaag tezamen (m)
$D_{15}$	karakteristieke korrelgrootte van het zand (m)
$\Delta$	relatieve dichtheid $\Delta = (\rho_s - \rho_w) / \rho_w$ (-)
$\rho_w$	soortelijke massa van water ( $\text{kg/m}^3$ )
$\rho_s$	soortelijke massa van toplaag ( $\text{kg/m}^3$ )
$z_q$	oplooppniveau behorende bij overslag debiet van $q = 0.1$ l/s/m op een oneindig lang talud (m + NAP)
<i>type bekleding</i>	normaal, ongunstig

De toetsingsmethode verloopt aan de hand van de volgende stappen:

#### Stap 0: afschuiving

Er treedt geen falen als gevolg van afschuiving op als voldaan wordt aan (fig. 2.2.2.3 [TAW, 1999]):

$$\Delta D + b > \min \left\{ 0, 16 H_s^{0.2} T_p^{1.6} (\tan \alpha)^{0.8} ; 1, 5 H_s \right\} - 1334 \cdot (1 - 1, 19 \cdot \tan \alpha) D_{15} \sqrt{T_p}$$

Het toetsresultaat is dan goed en de toetsing dient te vervolgen met een toets op toplaagstabiliteit. Indien niet aan de voorwaarde wordt voldaan is het toetsresultaat twijfelachtig of onvoldoende; bij deze implementatie wordt de bekleding dan geacht te falen en hoeft de toets op toplaagstabiliteit niet meer uitgevoerd te worden.

#### Stap 1 t.a.v. toplaagstabiliteit (zie [STEENTOETS, 2000])

$$\text{Definieer: } z_t = h - \min \left\{ 0, 11 H_s \left( \frac{g T_p^2 \tan \alpha}{2 \pi H_s} \right)^{0.8} ; 1, 5 H_s \right\}$$

Als

$z_t > z_b$	$\Rightarrow$ bekleding wordt niet belast.
$h + \frac{1}{2} z_q < z_o$	$\Rightarrow$ bekleding faalt niet ( $Z > 0$ )
$h < z_o$ en $h + \frac{1}{2} z_q > z_o$	$\Rightarrow D = D/0.8 \Rightarrow$ toetsing uitvoeren (Stap 2)
geen van de voorgaande gevallen	$\Rightarrow$ toetsing uitvoeren (Stap 2)

Hierbij wordt het oplooppniveau  $z_q$  bepaald overeenkomstig de formuleringen geïmplementeerd voor het faalmechanisme golfoverslag waarbij de exponentiële relatie tussen het overslagdebiet  $q$  en de kruinhoogte (cq. oplooppniveau  $z_q$ ) is omgekeerd.



### Stap 2

Bepaal het stabiliteitsgetal,  $n_s$ , en de golfbrekerparameter,  $\xi_{op}$ , als volgt:

$$n_s = \frac{H_s}{\Delta D} \quad (3a)$$

$$\xi_{op} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_s}{\frac{g}{2\pi} T_p^2}}} \quad (3b)$$

### Stap 3

Bepaal de toetscriteria m.b.t. de grens tussen goed en twijfelachtig (fig. 2.2.4.5 [TAW, 1999]):

Voor een *normale constructie* geldt m.b.t. de grens tussen goed en twijfelachtig:

$$\begin{aligned} \text{voor } 0.6 < \xi_{op} \leq 2.0 & \Rightarrow n_{s, \text{onder}} = 4.08 \xi_{op}^{-1.014} \\ \text{voor } 2.0 < \xi_{op} < 5.0 & \Rightarrow n_{s, \text{onder}} = 11.0 \xi_{op}^{-4} + 0.03 \xi_{op} + 1.25 \end{aligned}$$

Voor een *ongunstige constructie* geldt m.b.t. de grens tussen goed en twijfelachtig:

$$\begin{aligned} \text{voor } 0.6 < \xi_{op} \leq 2.0 & \Rightarrow n_{s, \text{onder}} = 3.07 \xi_{op}^{-1.014} \\ \text{voor } 2.0 < \xi_{op} < 5.0 & \Rightarrow n_{s, \text{onder}} = 6.5 \xi_{op}^{-4} + 0.02 \xi_{op} + 1.09 \end{aligned}$$

De grenstoestandsfunctie tussen goed en twijfelachtig is als volgt (merk op dat  $n_{s, \text{onder}}$  een bovengrens is voor het gebied van  $n_s$  waar de bekleding goed is):

$$Z = n_{s, \text{onder}} - n_s$$

Eventueel kan ook een toetsing uitgevoerd worden m.b.t. de grens tussen twijfelachtig en onvoldoende. Bij de opzet van Hydra-K is er echter voor gekozen om te toetsen op de grens tussen goed en twijfelachtig, waardoor onderstaande formules niet nodig zijn. Voor testdoeleinden kan wel gebruik gemaakt worden van deze grens omdat deze een iets afwijkend verloop heeft dan de grens tussen goed en twijfelachtig:

Voor een *normale constructie* geldt m.b.t. de grens tussen twijfelachtig en onvoldoende:

$$\begin{aligned} \text{voor } 0.6 < \xi_{op} \leq 2.1 & \Rightarrow n_{s, \text{boven}} = 6.68 \xi_{op}^{-0.723} \\ \text{voor } 2.1 < \xi_{op} < 5.0 & \Rightarrow n_{s, \text{boven}} = 12.0 \xi_{op}^{-1.5} + 1.5 \xi_{op} - 3.12 \end{aligned}$$

Voor een *ongunstige constructie* geldt m.b.t. de grens tussen twijfelachtig en onvoldoende:

$$\begin{aligned} \text{voor } 0.6 < \xi_{op} \leq 2.3 & \Rightarrow n_{s, \text{boven}} = 3.07 \xi_{op}^{-1.014} \\ \text{voor } 2.3 < \xi_{op} < 5.0 & \Rightarrow n_{s, \text{boven}} = 13.8 \xi_{op}^{-4} + 0.26 \xi_{op} + 1.53 \end{aligned}$$

De grenstoestandsfunctie tussen goed en twijfelachtig is als volgt:

$$Z = n_{s, \text{onder}} - n_s$$

### Asfalt

De methode voor het vaststellen van de betrouwbaarheid van asfaltbekledingen is gebaseerd op de leidraad Toetsen op Veiligheid [TAW, 1999]. De stabiliteitsformules voor asfalt zijn

alleen gegeven voor het belastingtype golfklappen. Het faalmechanisme kan het beste omschreven worden als “*schade aan de bekleding als gevolg van golfklappen*”.

De volgende subtypen asfaltbekledingen zijn beschouwd:

- waterbouwasfalt beton (Type 1);
- open steenasfalt (Type 5).

Daarnaast wordt onderscheid gemaakt in twee typen ondergrond:

- zand;
- klei.

Voor de toetsing van asfaltbekledingen zijn de volgende invoergrootheden nodig:

$H_s$	significante golfhoogte op de teen van de constructie (m)
$D$	dikte van de asfaltbekleding (m)
$h$	waterstand (m + NAP)
$z_o$	niveau ondergrens van de te toetsen bekleding (m + NAP)
$z_b$	niveau bovengrens van de te toetsen bekleding (m + NAP)
$\tan \alpha$	taludhelling (-)
Type ondergrond	zand of klei
Type asfalt	waterbouwasfalt beton, Open steenasfalt
Type filter	geotextiel, zandasfalt (bij open steenasfalt)

De toetsing start met een beoordeling of het stuk bekleding wel belast wordt:

Bovengrens: als  $h < z_o - \frac{1}{4} H_s$  => bekleding faalt niet ( $Z > 0$ ) (fig. 3.2.2.1 [TAW, 1999])

Ondergrens: als  $h > z_b + 2H_s$  => bekleding faalt niet ( $Z > 0$ )

Als de waterstand tussen deze bovengrens en ondergrens ligt wordt verder getoetst, nl. de laagdikte. De eisen ten aanzien van de laagdikte zijn afhankelijk van het type asfalt.

### **Waterbouwasfaltbeton**

De algemene formule voor het bepalen van de minimaal benodigde laagdikte wordt weergegeven met:

$$D_{\min} = \max \{ D_a; C_3 + C_4 H_s \}$$

De waarde van  $D_a$  is een functie van golfhoogte  $H_s$  en taludhelling  $\tan \alpha$ . De functiebeschrijving is afhankelijk van het type onderliggende laag (zand of klei) en gebaseerd op de leidraad toetsen (zie fig. 3.2.2.6 [TAW, 1999]):

[1] waterbouwasfaltbeton met ondergrond zand:

$$D_a = (-0.18401 + 0.125056 H_s + 0.0014 H_s^2) (-1.69947 + 5.174361 \tan \alpha + 0.098738 H_s)$$

[2] waterbouwasfaltbeton met ondergrond klei:

$$D_a = (-0.06927 + 0.084858 H_s + 0.013069 H_s^2) (-0.93087 + 5.108631 \tan \alpha + 0.060252 H_s)$$

De waarden voor  $C_3$  en  $C_4$  zijn:

$$\begin{aligned} C_3 &= 0,1 \\ C_4 &= 0,0167 \end{aligned}$$

Deze toetsingsmethode is alleen geldig wanneer de golfhoogte  $H_s$  kleiner is dan 6,0 m (zie fig. 3.2.2.6 uit de leidraad toetsen). Dit betekent dat alleen een score “goed” behaald kan worden als  $H_s \leq 6,0$  m. Voor  $H_s > 6,0$  m wordt de kering verondersteld te falen ( $Z < 0$ ).

Wanneer de golfhoogte,  $H_s$ , kleiner is dan 6,0 m en de aanwezige laagdikte,  $D$ , groter is dan de hier berekende waarde  $D_{min}$ , dan geldt dat de kering tegen de golfbelasting bestand is. De grenstoestandsfunctie is als volgt gedefinieerd:

$$Z = D - D_{min}$$

### **Open steenasfalt**

De algemene formule voor het bepalen van de minimaal benodigde laagdikte voor open steenasfalt is gelijk aan de formule voor het bepalen van de minimaal benodigde laagdikte voor waterbouwasfaltbeton. Evenals voor waterbouwasfaltbeton is de waarde van  $D_a$  een functie van golfhoogte  $H_s$  en taludhelling  $\tan\alpha$  en is de functiebeschrijving afhankelijk is van het type onderliggende laag (zand of klei). De functiebeschrijving is gebaseerd op fig. 3.2.2.7 uit [TAW, 1999]:

[3] open steenasfalt met ondergrond zand:

$$D_a = (-0.05785 + 0.025545 H_s + 0.026866 H_s^2)(-0.93087 + 5.108631 \tan \alpha + 0.060252 H_s)$$

[4] open steenasfalt met ondergrond klei:

$$D_a = (-0.1229 + 0.1782100 H_s + 0.03541978 H_s^2)(-1.36632 + 5.138124 \tan \alpha + 0.128026 H_s)$$

Afhankelijk van het filtertype moet voor de constanten  $C_3$  en  $C_4$  de waarden uit onderstaande tabel aangehouden worden.

	alle taluds	
	$C_3$	$C_4$
Geotextiel	0,2	0,025
Zandasfalt	0,1	0,025

*Parameters  $C_3$  en  $C_4$  voor open steenasfalt en twee verschillende type filters*

Deze toetsingsmethode is alleen geldig wanneer de golfhoogte  $H_s$  kleiner dan 4,0 m is (fig. 3.2.2.7 [TAW, 1999]). Dit betekent dat alleen een score goed behaald kan worden als  $H_s \leq 4,0$  m. Voor  $H_s > 4,0$  m wordt de kering verondersteld te falen ( $Z < 0$ ).

Wanneer de aanwezige laagdikte groter is dan de hier berekende waarde, dan geldt dat de kering voldoende sterk is. De grenstoestandsfunctie is hetzelfde voor waterbouwasfaltbeton. Bovenstaande formules zijn gebaseerd op figuur 3.2.2.6 en figuur 3.2.2.7 [TAW, 1999]. Bijbehorende constanten zijn afgeleid voor een beddingsconstante  $c_{zand} = 100$  MPa/m en een  $c_{klei} = 30$  MPa/m. Dit is in de meeste gevallen een veilige aanname.

### **Gras**

De methode voor het vaststellen van de betrouwbaarheid van grasbekledingen is gebaseerd op [WL, 2003]. De stabiliteitsformules voor gras worden beschouwd voor de volgende belastingtypen:

- golfklappen op het buitentalud;
- stroming op het buitentalud.

De stabiliteit van de kruin en het binnentalud is hierbij niet meegenomen, maar deze toetsing verloopt alsof het de buitenkruinlijn betreft en wijkt dus qua methode niet af. Er is onderscheid gemaakt tussen drie verschillende type grasmatten:

- goede grasmatt;
- matige grasmatt;
- slechte grasmatt.

Voor de toetsing van grasbekledingen zijn de volgende invoergrootheden nodig:

$H_s$	: significante golfhoogte op de teen van de constructie (m)
$T_p$	: golfperiode behorende bij de piek van het spectrum (s)
$h$	: waterstand (m + NAP)
$z_o$	: niveau ondergrens van de te toetsen bekleding (m + NAP)
$z_q$	: oplooppniveau behorende bij overslag debiet van $q = 0.1$ l/s/m op een oneindig lang talud t.o.v. SWL (m)
$t_s$	: tijdstap van de berekening (uur)
$\tan \alpha$	: gemiddelde taludhelling bepaald tussen SWL +/- $1.5H_s$ . Hierbij telt een eventuele berm niet mee bij het bepalen van de gemiddelde helling (-)
<i>Type grasmatt</i>	: goed, matig, slecht

De toetsing start met een beoordeling of het stuk bekleding wel belast wordt en of er sprake is van golfklappen of alleen stroming door golfoploop en golfneerloop (fig. 4.7.2.1 [TAW, 1999]). Hierbij wordt het oplooppniveau  $z_q$  bepaald overeenkomstig de formuleringen geïmplementeerd voor het faalmechanisme golfoverslag waarbij de exponentiële relatie tussen het overslagdebiet  $q$  en de kruinhoogte (cq. oplooppniveau  $z_q$ ) is omgekeerd.

Als $z_o > h + z_q$	⇒ geen bijdrage aan beschadiging
Als $z_o < h$	⇒ toetsing op golfklappen
Als $h \leq z_o \leq h + z_q$	⇒ toetsing op stroming

Voor beide belastingen geldt dat de maximale belasting afhankelijk is van de belastingduur. Ten behoeve van de toetsing wordt deze relatie omgekeerd: uitgaande van de momentane belasting wordt de maximale belastingduur  $t_{s \max}$  bepaald. Vervolgens wordt de relatieve belastingduur  $t_s / t_{s \max}$  van de tijdstap  $t_s$  bepaald en gesommeerd over alle tijdstappen binnen de storm. Wanneer de gesommeerde relatieve belastingduur groter is dan 1 wordt de bekleding geacht te falen.

### Golfklappen

De toetsmethode voor golfklappen is gebaseerd op Figuur 4.7.2.2 [TAW, 1999]. Deze figuur definieert een relatie tussen de maximaal toelaatbare golfhoogte en de maximale belastingduur ( $t_{sr} = t_s =$  stapgrootte in Hydra-K). Deze relatie is afhankelijk van het type grasmatt (goed, matig of slecht). Voor een belastingduur korter dan 5 uur geldt dat de maximale toelaatbare golfhoogte onafhankelijk is van de belasting duur  $t_s$ . Dit vertaalt zich in de conditie dat als de golfhoogte groter is dan de betreffende maximale golfhoogte, de bekleding bezwijkt:

$$\text{Als } H_s \geq \left[ C_1 \frac{1}{2} T_p^{-0.5} \tan \alpha^{-1} \right]^{0.75} \text{ dan } t_{s \max} = 0.$$

Waarbij  $C_1$  afhangt van het type grasmatt volgens onderstaande tabel. In de berekening wordt  $t_s / t_{s \max}$  in deze situatie gelijk aan 2 gesteld.

	$C_1$
Goede grasmat	1
Matige grasmat	0,7
Slechte grasmat	0,2

Parameter  $C_1$  voor golfklappen op grasbekledingen

Voor golfhoogtes kleiner dan een zekere waarde geeft Figuur 4.7.2.2 [TAW, 1999] geen maximale belastingduur. De maximale belastingduur is in dat geval oneindig ( $t_{s \max} = \infty$ ) en de relatieve belastingduur  $t_s / t_{s \max}$  is dan dus gelijk 0:

$$\text{Als } H_s < \left[ 0.2 \frac{1}{2} T_p^{-0.5} \tan \alpha^{-1} \right]^{0.75} \text{ dan } t_s / t_{s \max} = 0.$$

Voor tussenliggende golfhoogtes geldt:

$$t_{s \max} = \left[ 2 H_s^{0.75} T_p^{0.5} \tan \alpha / C_2 \right]^{1/C_3}$$

In deze formule is de waarde van  $t_{s \max}$  in uur uitgedrukt. Afhankelijk van het type grasmat kunnen de waarden voor  $C_2$  en  $C_3$  de volgende waarden worden aangehouden:

	$C_2$	$C_3$
Goede grasmat	2.3	-0.52
Matige grasmat	1.6	-0.52
Slechte grasmat	0.2	0

Parameters  $C_2$  en  $C_3$  voor golfklappen op grasbekledingen

### Stroming

De toetsing wordt uitgevoerd op een niveau  $z$  relatief t.o.v. de stilwaterlijn. Het meest kritieke niveau ligt zo laag mogelijk waar het oplooptebiet nog zo groot mogelijk is. Het niveau dat hier dan ook gebruikt wordt, is de ondergrens van het stuk van het talud dat met gras bekleed is:  $z = z_o - h$ . De berekening van de relatieve belastingduur bestaat uit een drietal stappen (zie fig. 4.7.2.3 [TAW, 1999]):

#### Stap 1:

Bereken de rekensnelheid van de oplooptong

$$v_r = 700 \frac{H_s}{T_p} \left( 0.085 - \frac{H_s}{\frac{g}{2\pi} T_p^2} \right) \sqrt{1 - \frac{z}{z_q} \tan \alpha} \quad (4)$$

hierin is  $g$  de zwaartekrachtsversnelling ( $\approx 9.81 \text{ m/s}^2$ ).

#### Stap 2:

Bepaal met deze rekensnelheid de maximaal toelaatbare belastingduur (in uren):

$$t_{s \max} = C_1 v_r^{C_2}$$

In onderstaande tabel staan de waarden voor de constanten  $C_1$  en  $C_2$  voor elk type grasmat.

Grasmat	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>
Goed	1560	-4,8
Matig	276	-4,2
Slecht	50	-3,6

Constanten C<sub>1</sub> en C<sub>2</sub> voor stroming op grasbekledingen

### Stap 3

Bepaal de rekenwaarde van de belastingduur van de tijdstap  $t_s$ , waarvoor de berekening gemaakt wordt:

$$t_{sr} = \left( 1 - \frac{z_o}{z_q} \right) t_s$$

Hierbij zijn de tijdstap  $t_s$  en de rekenwaarde  $t_{sr}$  voor de tijdstap beiden in uren.

### Cumulatieve graserosie

Uit zowel de toets op golfklappen als de toets op stromingcondities volgt een maximale belastingduur  $t_{s \max}$  welke gecombineerd met de tijdstap  $t_s$  resp. de rekenwaarde  $t_{sr}$  voor de tijdstap de relatieve belasting(duur) voor een enkele tijdstap geeft door het quotiënt te bepalen:

$$belasting = \frac{t_{sr}}{t_{s \max}}$$

Deze stappen moeten voor alle tijdstappen in de storm herhaald worden. De totale cumulatieve relatieve belasting wordt dan (zie Voorschrift Toetsen op Veiligheid [V&W, 2004]):

$$belasting = \sum \frac{t_{sr}}{t_{s \max}}$$

De grenstoestandsfunctie is gelijk aan:

$$Z = 1 - \sum \frac{t_{sr}}{t_{s \max}}$$

Dat wil zeggen: als de totale relatieve belastingduur groter is dan 1 treedt bezwijken van de grasmat op.

N.B. Het toetsniveau voor grasbekleding moet hoger liggen dan het niveau met een belastingkans van 1/10 per jaar (punten die onder dit niveau liggen vallen onder het dagelijks beheer). De kruin en het binnentalud worden getoetst alsof het de buitenkruinlijn is.

### Referenties

[STEENTOETS, 2000]

*Steentoets 3.20*, documentatie bij steentoets 3.20 , WL, maart 2000.

[TAW, 1999]

*Leidraad Toetsen op Veiligheid*, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), augustus 1999

[TAW, 2000]

*Technisch Rapport Golfoploop en Golfoverslag*, Technisch Rapport A-99.32,  
Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), januari 2000.

[V&W, 2004]

*De veiligheid van de primaire waterkeringen in Nederland. Voorschrift Toetsen op  
Veiligheid voor de tweede toetsronde 2001-2006 (VTV)*, Ministerie van Verkeer en  
Waterstaat, januari 2004.

[WL,

2003]

*Geavanceerde toetsing (a,b) bij de Houtribsluizen*, project H4169, juni 2003.

## C Bespreekverslag expert meeting d.d. 2 oktober 2006

Aanwezigen:

Robert 't Hart (DWW): steenzettingen en asfalt, dijkbekledingen  
Gijs Hoffmans (DWW): PL-SBW faalmechanismen  
Herman Peters (RWS): golfmetingen  
Mark Klein Breteler (WL): steenzettingen, dijkbekledingen  
Ferdinand Diermanse (WL): probabilistiek, Hydra-K  
Andries Roelfzema (RIKZ): PL-SBW Randvoorwaarden  
Annette Kieftenburg (RIKZ): golfmodellering  
Hans de Waal (RIZA): windgolven, statistiek, faalmechanismen  
Neelke Doorn (WL): golfmodellering, faalmechanismen  
Ap van Dongeren (WL): PL WL-SBW project, golfmodellering

### 1. Opening

AR heet iedereen welkom. Hij benadrukt dat het onderwerp van bespreking een afstemming is tussen Sterkte en Belasting. Het gaat nadrukkelijk om de interactie en niet om een van beide aspecten afzonderlijk.

### 2. Inleiding

AvD geeft een korte inleiding op de dag. Hij schetst de context waarbinnen de bespreking plaatsvindt. Op dit moment wordt SWAN (nog) niet gebruikt in de Waddenzee. Reden hiervoor is dat beheerders en deskundigen nog niet voldoende vertrouwen hebben om SWAN toe te passen in een complexe situatie als de Waddenzee. Dit probleem is de directe aanleiding voor de vraag van het deelproject “Sterkte en Belasting Waterkeringen (SBW) – Natuurrandvoorwaarden” aan WL|Delft Hydraulics om een Plan van Aanpak op te stellen waarin de strategie wordt bepaald voor het beantwoorden van de primaire vraagstelling: “Hoe te komen tot betrouwbare Hydraulische Randvoorwaarden voor het jaar 2011 voor het Waddengebied?”. In het Plan van Aanpak is een strategie aangegeven om te komen tot betere HR waarbij verscheidene activiteiten voor het tijdvak 2006-2009 zijn aangegeven. Dit heeft geleid tot de opdracht “SBW-Randvoorwaarden Waddenzee”.

In het kader van de opdracht “SBW-Randvoorwaarden Waddenzee” wordt een deelproject uitgevoerd waarin de te optimaliseren golfparameters en de acceptatiecriteria worden afgestemd. Deze afstemming vindt plaats tussen het deelproject SBW-Faalmechanismen, waarin de faalmechanismen onderzocht worden en het deelproject SBW-Randvoorwaarden waarin de kwaliteit van golfparameters nabij de keringen wordt onderzocht. Voor SBW-Natuurrandvoorwaarden is het van belang te weten welke golfparameters (bijvoorbeeld welke periodemaat) gebruikt worden in faalmechanismen zodat de verbetering van het golfmodel zich mede hierop kan richten.

Daarnaast moet bepaald worden of de model resultaten al dan niet voldoen aan acceptatiecriteria. Deze acceptatiecriteria zijn tot op heden nog niet vastgesteld. De op te stellen acceptatiecriteria hebben zowel een kwantitatief (objectief) als kwalitatief (subjectief) aspect. De kwantitatieve component is dat het golfmodel voldoende nauwkeurige golfparameters moet kunnen afgeven waarmee binnen nog te bepalen tolerantiegrenzen de belasting op de waterkeringen (bijvoorbeeld in termen van



steenstabiliteit en golfoverslag) kan worden bepaald. Men rekent dus als het ware terug vanuit de belastingkant naar het golfmodel. Voor deze component is het voldoende om stormcondities te beschouwen.

De kwalitatieve component is dat er voldoende technisch vertrouwen moet zijn in de uitkomsten van SWAN: alle relevante fysica is goed (genoeg) gemodelleerd en de trends in de uitkomsten komen overeen met wat op basis van fysische kennis verwacht kan worden. Naast technisch vertrouwen moet er ook bestuurlijk en operationeel vertrouwen zijn: de uitkomsten moeten uitgelegd kunnen worden en moeten voldoende onderbouwd zijn om mogelijk majeure infrastructurele ingrepen te rechtvaardigen. De kwalitatieve component is vooral van belang voor de opschaling van de acceptatie van het golfmodel voor stormen naar de acceptatie onder extreme omstandigheden. De vraag naar bestuurlijk en operationeel vertrouwen wordt in deze bespreking buiten beschouwing gelaten.

Doelstelling van de dag is om een drietal vragen te beantwoorden:

1. Welke golfparameters zijn van belang voor de Waddenzee?
2. Wat zijn de kwantitatieve acceptatiecriteria waaraan het golfmodel moet voldoen?
3. Wat zijn de kwalitatieve acceptatiecriteria waaraan het golfmodel moet voldoen?
3. Inhoudelijke bespreking memo en beantwoording van de subvragen

### 1. Welke golfparameters zijn van belang voor de Waddenzee?

Uitgangspunt bij de beantwoording van de 1<sup>e</sup> vraag is de tabel uit startnotitie. Deze is gevuld op basis van de informatie behorend bij Hydra-K.

FAALMECHANISME	BENODIGDE GOLFPARAMETERS	RELEVANT VOOR WADDENZEE
Golfoploop;	$H_s, T_p, \theta$	x
Golfoverslag;	$H_s, T_p, \theta$	x
Golfoverslag bij een verticale wand;	$H_s, \theta$	x
Steenzetting;	$H_s, T_p, \theta$	x
Asfaltbekleding;	$H_s$	x
Grasbekleding;	$H_s, T_p$	x
Bekleding breuksteen;	$H_s, T_m$ of $T_{m-1,0}$ (= gelijk verondersteld op diep water)	x
Bekleding betonblokken in 2 lagen;	$H_s, T_m$ of $T_{m-1,0}$ (= gelijk verondersteld op diep water)	
Bekleding betonelementen in 1 laag;	$H_s$	
Havendammen – teenconstructie;	$H_s$	x
Havendammen – stabiliteit toplaag bodembescherming	$H_s, T_m, \theta$	x
Havendammen – grensvlakstabiliteit	$H_s, T_m$ of $T_{m02}$ (= gelijk verondersteld op diep water)	x

Van belang is onderscheid te maken tussen drie niveaus van toetsing:

- eenvoudige toetsing;
- gedetailleerde toetsing;
- geavanceerde toetsing.

De eenvoudige toetsing en gedetailleerde toetsing worden uitgevoerd door de dijkbeheerder. De geavanceerde toetsing wordt uitgevoerd door een gespecialiseerd instituut, zoals WL en GD.

De toetsing met Hydra-K behoort formeel noch tot de eenvoudige, noch tot de gedetailleerde toetsing, maar zit eigenlijk tussen beide niveaus van toetsing in.

Voor de eenvoudige toetsing zijn de in tabel genoemde parameters voldoende. Indien bepaalde dijkvakken niet voldoen of indien er geen oordeel kan worden geveld op basis van de Hydra-K toetsing worden de dijkvakken onderworpen aan de gedetailleerde toetsing. Hiervoor zijn meer gegevens nodig. Eigenlijk zou er een kolom aan de tabel toegevoegd moeten worden met de benodigde gegevens voor deze gedetailleerde toetsing.

Opmerkingen:

#### Stormduur

Er moet informatie worden toegevoegd over het verloop van de storm als functie van tijd (zowel waterstandsverloop als verloop van de golfhoogte). Een lange storm met een lagere golfhoogte kan soms belangrijker zijn dan een korte stormduur met een hogere golfhoogte. Los daarvan is de stormduur van belang omdat deze indirect als parameter voorkomt in de formules. Zowel voor het toetsen van steenzettingen en grasbekledingen volgens Hydra-K als voor de geavanceerde toetsing van asfaltbekledingen is het aantal golven van belang. Deze informatie wordt verkregen door de stormduur te delen door de gemiddelde periode.

Op dit moment wordt in Hydra-K een soort matrix met alle combinaties van waterstand en golfhoogte gegenereerd. Door de storm op te knippen in verschillende stukken met een “stationair” verloop wordt het instationaire karakter benaderd. Dit opknippen in stationaire sommen leidt niet tot een “explosie” van het aantal te maken runs. Hier zit echter wel een aantal aannames achter waar FD zijn vraagtekens bij zet. Op termijn zullen instationaire sommen moeten worden gedraaid.

#### Gewenste periodemaat

In overslagformule zit nu al  $T_{m-1,0}$  ipv  $T_p$ . In de asfalt-formules wordt gebruik gemaakt van  $T_m$  of  $T_{m02}$ . Bij steenzettingen havendammen moet de  $T_p$  toegevoegd worden. Belangrijk is ook de duur van de belasting. Uiteindelijk gaat het om het aantal golfklappen en daarvoor zijn zowel gemiddelde golfperiode als duur benodigd. Voor steenzettingen levert  $T_{m-1,0}$  niet veel meer op dan  $T_p$ . Belangrijk is om eenduidigheid te hebben over de afkapfrequenties.

#### Afkapfrequentie $T_{m-1,0}$

AK heeft ervaren dat het wel of niet meenemen van de laagste frequenties voor Petten meer dan 100% kan schelen in de golfperiode  $T_{m-1,0}$ . HP heeft deze ervaring niet, waarschijnlijk omdat hij op dieper water meette, dan het geval Petten. Battjes is ooit door RIKZ om advies gevraagd en adviseerde als afkapfrequentie de helft van de piekfrequentie te nemen. In de veldmetingen wordt  $f = 0.03$  Hz als afkapfrequentie gehanteerd maar naar aanleiding van opmerkingen van het Hydraulic Review Team wordt er gewerkt aan een lagere afkapfrequentie om ook surfbeat mee te kunnen nemen. MKB merkt op dat “surfbeat” golven van enkele minuten eerder een waterstandsfenomeen zijn dan een golf. Het belang van het meten van surfbeat wordt onderschreven maar er wordt wel op gewezen dat deze golven niet bij het korte-golven signaal meegenomen moeten worden. Resumerend zijn er dus drie processen:

1. de korte golven ( $f = 0.03$  Hz – 500/800/1000 mHz). De standaard afkapfrequentie van  $f=0.03$  Hz in de metingen lijkt een goede keuze te zijn. De energie aan de bovenkant is echt de gemeten energie. Er wordt geen analytische staart toegevoegd. Bij het IJsselmeer gelden overigens andere grenzen;
2. surfbeat, met perioden van enkele minuten;
3. waterstandsvariaties (10 minuten gemiddeld).

Belangrijk is dat de afkapfrequentie niet zomaar veranderd kan worden. Het moet ook aansluiten op wat er gebruikt is in modelonderzoek. Bij verandering van de afkapfrequentie moeten alle onderzoeken opnieuw geanalyseerd worden, hetgeen een aanzienlijke inspanning is.

De focus tijdens de discussie was op de laagfrequente afkapgrenzen. Toch moet ook de hogere afkapfrequentie in de beschouwing meegenomen worden omdat deze, met name voor de  $T_{m02}$ , een grote invloed heeft op de nauwkeurigheid en de  $T_{m02}$  is nu juist bepalend voor het aantal golven/golfklappen (bron: email-wisseling met Marcel Bottema).

#### Golfsteilheid versus golfperiode

Bij voorkeur ook golfsteilheid uitvoeren. MKB beschouwt de golfsteilheid als de onafhankelijke variabale – dus  $T=f(s,H)$ . HdW meent dat de golfperiode de onafhankelijke parameter is, dus  $s=f(T,H)$ . Het gaat in beide gevallen om de diep-water steilheid. In feite is dit (slechts) een overdrachtsprobleem tussen belasting en sterkte. De deskundigen uit de ‘golvenhoek’ kijken liever naar hoogte en periode. Voor de deskundigen die betrokken zijn bij de modellering van de dijkbelasting zijn golfhoogte en golfsteilheid interessanter omdat deze laatste een onderdeel is van de brekerparameter, die weer veel zegt over het type golfbelasting. Het ligt dus aan de invalshoek welke parameters je preferereert. Daar rekening mee houden is afdoende.

#### Snelheid

GH mist de snelheid langs/tegen/in de waterkering. Voor met name grasbekledingen maar ook voor de stabiliteit van bijvoorbeeld (breuk)steen is deze snelheid zeer belangrijk. Op dit moment wordt de snelheid nog uitgedrukt in termen van H en T. Is het mogelijk om de drag- en liftkrachten uit te drukken in termen van H en T, vraagt GH. Deze krachten zijn immers primair bepalend voor falen. AvD/MKB merken op dat het onmogelijk is naar individuele stenen te kijken. Het gaat om de bulkparameters en deze kunnen goed afgeleid worden van de H en T. In het kader van Delft Cluster worden er overgangsformules afgeleid om op basis van H en T een overslagdebiet te bepalen.

#### Golfrichting en richtings spreiding

Bij steenzettingen is de golfrichting, ook voor de eenvoudige toetsing, van belang in tegenstelling tot wat in de startnotitie was vermeld. Het gaat om de hoofdrichting bij de  $T_p$ . Voor de stabiliteit van steenzettingen speelt de richtings spreiding geen rol. Voor golfploop wel, zij het alleen in een vorm die onderscheid maakt tussen langkammige en kortkammige golven. Langkammige golven zijn doorgaans alleen in lab-omstandigheden mogelijk c.q. aan de orde.

#### Golfspectrum

HP vraagt of de aannames die ten grondslag liggen aan het spectrum nog wel kloppen bij sterk brekende golven. Is er nog wel sprake van een superpositie van sinussen? AvD meent dat er wel alternatieve formuleringen bestaan die rekening houden met gebonden golven maar dat het binnen het kader van SBW niet mogelijk is hier dieper op in te gaan. Een andere vraag met betrekking tot het golfspectrum betreft de spectrale vorm. Hier wordt nu nog weinig mee gedaan. Hoogstens wordt er onderscheid gemaakt tussen een smal, breed en dubbelpiekig spectrum. AvD vraagt of het zinvol is dit te splitsen in twee of drie spectra of golfsystemen die superponeerbaar zijn. Voor de geavanceerde toetsing wordt dit als nuttig ervaren.

W.J. Seiffert heeft hier ook aan gewerkt, Jacco Groeneweg en Marcel van Gent (WL) weten hiervan.

#### Gewenste golfhoogtemaat

Er bestaan alternatieve golfhoogtematen voor de significante golfhoogte  $H_{sig}$  of  $H_{m0}$ . De  $H_{max}$  wordt als onbetrouwbaar beschouwd, maar  $H_{2\%}$  of  $H_{10\%}$  vertonen wel stabiel gedrag (bij voldoende lange meting). Via Battjes/Groenendijk is deze parameter ook te berekenen.  $H_{x\%}$  kan relevant zijn, omdat de verhouding tot  $H_s$  iets zegt over de afwijking van de Rayleighverdeling, en dus over de vraag in hoeverre sprake is van reeds vóór de kering brekende golven.  $H_{x\%}$  is echter een parameter uit het tijdsdomein, terwijl SWAN alleen

fysische processen in het frequentiedomein beschouwt. Hier ligt een fundamenteel probleem met de brug van belasting (met SWAN) naar sterkte. Het is namelijk niet voor niets dat een tijddomein model (SKYLLA, ODIFLOCS, e.d.) nodig is om echt iets te leren over de wijze waarop inkomende golven de constructie belasten en geen frequentiedomein-model.

### Breken of niet-breken

De 'constructie-deskundigen' zijn geïnteresseerd in het type golfbreking tegen het talud. Hierop voortbouwend ligt het voor de hand dat het relevant is om te weten in hoeverre - bij gegeven golfhoogtemaat en golfperiode-maat - er sprake is van reeds vóór de constructie brekende golven of niet. Het aandeel gebroken golven kan meegenomen worden via de  $Q_b$ . Er bestaan inmiddels aanzienlijk geavanceerdere benaderingen hiervoor dan de klassieke Battjes/Janssen formulering. Het is niet helemaal duidelijk of er nu wat mee wordt gedaan, mogelijk wel in de toekomst. SWAN kan dit als uitvoer genereren.

### Waterstand

In de notitie ontbreekt informatie over de waterstand terwijl deze wel zeer belangrijk is voor vrijwel alle faalmechanismen. De waterstand is echter geen uitvoergrootheid in SWAN. Het wordt als positief ervaren dat in Hydra-K nu met stappen van 1 m ipv 2 m wordt gerekend voor de waterstand.

## **2. Wat zijn de kwantitatieve acceptatiecriteria waaraan het golfmodel moet voldoen?**

Alle aanwezigen zijn het erover eens dat het weinig belangrijk is waar SWAN het goed of niet goed doet. De focus op de Waddenzee is te beperkend. De primaire processen dienen gewoon goed te zijn en indien dit niet het geval is, moet dit verbeterd worden. Het feit dat een dijkvak ruim voldoet aan de toetsing mag geen reden zijn om daar een slechtere performance van SWAN te accepteren. Een opportunistische aanpak wordt dus afgeraden. Het optimaliseren van het golfmodel moet ontkoppeld worden van de vraag op welke lokaties de waterkering voldoet aan de toetsing. Wel is het van belang dat SBW-ers zich continu blijven afvragen wat wel en niet in SBW moeten worden gedaan ter verbetering van SWAN.

De aanwezigen aarzelen om een toelaatbare afwijking te definiëren. De onzekerheden in SWAN zijn min of meer een gegeven. Ze moeten zeker wel meegenomen worden, ofwel via correctiefactoren ofwel via het gebruik van een soort ontwerp waarde die gelijk is aan de verwachtingswaarde plus een verhoging die afhangt van de standaard deviatie ( $H_{\text{ontwerp}} = E\{H\} + f\{\sigma\}$ ). Op dit moment worden er correctiefactoren toegepast op de SWAN-resultaten en deze gecorrigeerde waarden gaan in Hydra-K. Belangrijk is niet alleen de systematische fout mee te nemen maar ook de onzekerheden. Bij alles moet je aan de veilige kant blijven zitten, aldus MKB.

HdW merkt op dat omgaan met onzekerheden bij toetsen en ontwerpen een zeer lastige en helaas

niet al te best uitgekristalliseerde materie is, waarbij beleidsmatige keuzes een belangrijke rol spelen. Binnen SBW-kader is het vooral van belang uit te gaan van wat vigerend is. In de HR 2001 staat expliciet dat voor de belastingkant de model- en statistische onzekerheden in de hydraulische randvoorwaarden niet meegenomen worden maar dat deze in de toetsing verdisconteerd worden middels conservatieve sterktecriteria (in de vorm van veiligheidstoelagen o.i.d.). HdW benadrukt dat het niet de bedoeling is veiligheid op veiligheid te stapelen, en al helemaal niet bij het 'scherp toetsen'. In die zin is hij een tegenstander van de boven gemelde aanpak van 'we weten het gemiddelde en de standaardafwijking en gaan nu x maal de standaard-afwijking aan de veilige kant van het gemiddelde zitten'.

Het is wel nuttig om te kijken waar de grootste onzekerheden zitten en welke onzekerheden de grootste invloed hebben (opstapeling en doorwerking). Hiervoor zou bijvoorbeeld het

prioriteringsinstrumentarium van DWW gebruikt kunnen worden. Het is niet helemaal duidelijk waarom de ontwikkeling van het prioriteringsinstrument is stopgezet. HdW meent dat het instrument er niet omdat het ambitieniveau destijds te hoog lag: alles zou in een geautomatiseerd systeem moeten worden gestopt. Er blijft echter een behoefte aan de eerste benodigde stap bij dat instrument: inzicht in de keten inclusief onzekerheden.

AR stelt voor Hanneke van de Klis contact te laten opnemen met Ullrich Förster van DWW. FD meent dat primair gekeken moet worden naar de invloed van een parameter op de hoogte van de kruin. Met Hydra-K is met een kleine inspanning een dergelijke exercitie te maken.

GH benadrukt de grote onzekerheid in de sterkte-kant. Bij de niet-golfgerelateerde faalmechanismen (piping, micro- en macrostabiliteit en zettingsvloeiing) is de onzekerheid veel groter.

Er zijn wat opmerkingen over de figuren met afgeleiden in de startnotitie:

- er is uitgegaan van een erg steile golf. Beter is om een aantal golfsteilheden te middelen in plaats van een aantal golfperiodes;
- bij de golfoverslag moet gekeken worden naar de log van de golfoverslag;

Als er dan toch een uitspraak moet worden gedaan over tolerantiegrenzen, dan lijken de genoemde onzekerheidsmarges voor de overslag en golfrichting realistisch (met dien verstande dat voor de overslag 30% wordt geïnterpreteerd als  $\log(3)$ ). Een onzekerheid van 10% in golfsnelheid over gras lijkt niet realistisch. AR denkt hiervoor eerder aan percentages van 20% of meer.

De nauwkeurigheid van de golfmetingen is ongeveer 5% op diep water (ELD, SON) en 10 – 15% op ondiep water. Met name bij sterk brekende golven heeft HP twijfels over de nauwkeurigheid in de voorspelling van de golfhoogte. Bij meren is een nauwkeurigheid van 5% te optimistisch geschat. HP benadrukt dat bij het gebruik van 10 minuut gemiddelde waarden van het spectrum en de spectrale parameters een middeling moet worden toegepast. Er is immers sprake van een random trekking uit een ensemble en dit verhoogt de onzekerheid.

Concluderend wordt gesteld dat het onmogelijk is een uitspraak te doen over de vereiste nauwkeurigheid van SWAN. Het is wel mogelijk de betrouwbaarheid te geven. Vervolgens moet zowel aan de nauwkeurigheid van SWAN, als aan de nauwkeurigheid in de beschrijving van de faalmechanismen gewerkt worden en moeten de onzekerheden in de formules en de inputs in kaart worden gebracht.

### **3. Wat zijn de kwalitatieve acceptatiecriteria waaraan het golfmodel moet voldoen?**

Alle aanwezigen delen de mening dat er meer meetdata nodig zijn. Dit betreft laboratoriummetingen maar ook veldmetingen. In de goot is het mogelijk om 1D metingen te doen van extreme situaties. AK stelt de volgende procedure voor:

- veldmetingen (=stormcondities) uitvoeren en deze hindcasten met numeriek model. Als de numerieke resultaten dicht bij de metingen liggen is het model voor deze stormcondities te vertrouwen.
- veldmetingen op schaal nabootsen in lab om lab- en schaaffecten te onderzoeken. Deze metingen ook hindcasten

Als er voldoende vertrouwen is in de labmetingen voor stormcondities, dan extreme condities nabootsen en deze hindcasten met een numeriek model. Als de resultaten dichtbij de labmetingen liggen is het model te vertrouwen voor deze extreme situaties.

Met inachtneming van de “lab- en schaaleffecten” is het mogelijk om op deze manier een dataset te genereren met extreme condities. Het probleem blijft dan de vertaling van de ‘ideale’ gootcondities naar de complexe geometrie van de Waddenzee.

HdW stelt voor om, na een aantal academische test cases om op deze manier zo veel mogelijk programmeerfouten eruit te halen, te kijken naar de trends. Probeer vertrouwen in de fysica te krijgen. Dit kan alleen indirect. Het is onvermijdelijk af te gaan op expert judgements. Behalve laboratoriummetingen blijven veldmetingen van belang. In een lab kan met allerlei parameters gespeeld worden die van belang zijn tijdens de extreme condities in de Waddenzee: hogere waterstanden dan ooit gemeten, hogere inkomende golven, etc. Maar juist dat ene fysische aspect dat in de relevante situaties écht extreem is, is de wind. Die kan niet betrouwbaar in een laboratorium nagebootst worden, aldus HdW, en het is dus niet voldoende om het vertrouwen in SWAN alleen hierop te baseren. Om dat vertrouwen te krijgen moeten er dus ook metingen van andere locaties gebruikt worden, zoals bijvoorbeeld metingen in Tai Ho (China) of orkanen. Rechtstreeks meten onder laboratoriumomstandigheden of in de Waddenzee blijft onmogelijk.

De numerieke aspecten, zoals bijvoorbeeld het aantal iteraties, wordt nader beschouwd in een ander deelproject van SBW dus dat hoeft hier niet aan bod te komen.

AR besluit de zitting met de opmerking dat SWAN op dit moment het beste model is en dat er geen goed alternatief is. Het moet dus nu ook niet (meer) open gelaten worden of er misschien een ander model gebruikt gaat worden. Het is SWAN of geen numerieke modellering. Ook STWAVE of Tomawac vormen geen goed alternatief. Ter nuancering van het veel gehoorde commentaar dat SWAN niet betrouwbaar is in de Waddenzee voegt AK nog toe dat SWAN niet onbetrouwbaar is maar dat er onvoldoende validatiemateriaal is om iets te zeggen over de betrouwbaarheid.

## **D Bespreekverslag expert meeting d.d. 12 december 2006**

### **Aanwezigen:**

Frank den Heijer (RIKZ): PL HR2006  
Gijs Hoffmans (DWW): PL-SBW faalmechanismen  
Hans Janssen (Bouwdienst): Kwaliteitsborging SBW  
Andries Roelfzema (RIKZ): PL-SBW Randvoorwaarden  
Pieter Koen Tonnon (RIKZ): assistent van PL-SBW  
Hans de Waal (RIZA): windgolven, statistiek, faalmechanismen  
Neelke Doorn (WL): golfmodellering, faalmechanismen  
Ap van Dongeren (WL): PL WL-SBW project, golfmodellering

### **Afgemeld:**

Houcine Chbab (RIZA): deel PL-SBW wind  
Govertine de Raat (DWW): PL-SBW overall.

### 1. Opening

AvD heet iedereen welkom. Omdat AR later zal komen neemt AvD de rol van dagvoorzitter op zich.

### 2. Inleiding

AvD geeft een korte inleiding op de dag. Hij schetst de context waarbinnen de bespreking plaatsvindt. Op dit moment wordt SWAN (nog) niet gebruikt in de Waddenzee. Reden hiervoor is dat beheerders en deskundigen nog niet voldoende vertrouwen hebben om SWAN toe te passen in een complexe situatie als de Waddenzee. Dit probleem is de directe aanleiding voor de vraag van het deelproject “Sterkte en Belasting Waterkeringen (SBW) – Natuurrandvoorwaarden” aan WL|Delft Hydraulics om een Plan van Aanpak op te stellen waarin de strategie wordt bepaald voor het beantwoorden van de primaire vraagstelling: “Hoe te komen tot betrouwbare Hydraulische Randvoorwaarden (HBC) voor het jaar 2011 voor het Waddengebied?”. In het Plan van Aanpak is een strategie aangegeven om te komen tot betere HR waarbij verscheidene activiteiten voor het tijdvak 2006-2009 zijn aangegeven. Dit heeft geleid tot de opdracht “SBW-Randvoorwaarden Waddenzee”.

In het kader van de opdracht “SBW-Randvoorwaarden Waddenzee” wordt een deelproject uitgevoerd waarin de te optimaliseren golfparameters en de acceptatiecriteria worden afgestemd. Deze afstemming vindt plaats tussen het deelproject SBW-Faalmechanismen, waarin de faalmechanismen onderzocht worden en het deelproject SBW-Randvoorwaarden waarin de kwaliteit van golfparameters nabij de keringen wordt onderzocht.

AvD geeft een korte uitleg van de HBC-procedure. Het probleem is dat er geen extreme situaties (kunnen) worden gemeten. Hoe kan dan toch de stap van ‘normale’ stormcondities, waarvoor het model SWAN is afgeregeld, naar de extreme situaties gemaakt worden? Wat is er nodig om technisch vertrouwen te krijgen in het model zodat het ook in extreme situaties toegepast kan worden? Welke rol kunnen veld- en laboratoriummetingen hierbij spelen?

Tot op heden zijn er geen acceptatiecriteria vastgesteld aan de hand waarvan getoetst kan worden of het model (voldoende) betrouwbaar is. De op te stellen acceptatiecriteria hebben zowel een kwantitatief (objectief) als kwalitatief (subjectief) aspect. De kwantitatieve

component is dat het golfmodel voldoende nauwkeurige golfparameters moet kunnen afgeven waarmee binnen nog te bepalen tolerantiegrenzen de belasting op de waterkeringen (bijvoorbeeld in termen van steenstabiliteit en golfoverslag) kan worden bepaald. Men rekent dus als het ware terug vanuit de belastingkant naar het golfmodel. Voor deze component is het voldoende om stormcondities te beschouwen.

De kwalitatieve component is dat er voldoende technisch vertrouwen moet zijn in de uitkomsten van SWAN: alle relevante fysica is goed (genoeg) gemodelleerd en de trends in de uitkomsten komen overeen met wat op basis van fysische kennis verwacht kan worden. Naast technisch vertrouwen moet er ook bestuurlijk en operationeel vertrouwen zijn: de uitkomsten moeten uitgelegd kunnen worden en moeten voldoende onderbouwd zijn om mogelijk majeure infrastructurele ingrepen te rechtvaardigen. De kwalitatieve component is vooral van belang voor de opschaling van de acceptatie van het golfmodel voor stormen naar de acceptatie onder extreme omstandigheden. De vraag naar bestuurlijk en operationeel vertrouwen wordt in deze bespreking buiten beschouwing gelaten.

Doelstelling van dit deelproject is om een drietal vragen te beantwoorden:

1. Welke golfparameters zijn van belang voor de Waddenzee?
2. Wat zijn de kwantitatieve acceptatiecriteria waaraan het golfmodel moet voldoen?
3. Wat zijn de kwalitatieve acceptatiecriteria waaraan het golfmodel moet voldoen?

De eerste twee vragen zijn tijdens een eerdere vergadering aan bod gekomen. Het resultaat van discussie is beschreven in een startnotitie, welke de deelnemers de bespreking d.d. 12/12/2006 ter voorbereiding hebben ontvangen. De focus tijdens deze bijeenkomst zal liggen op de derde vraag met daarna terugkoppeling op vragen 1 en 2.

### 3. Inhoudelijke bespreking van de 3<sup>e</sup> vraag (kwalitatieve acceptatiecriteria)

#### **1. Wat is nodig om technisch vertrouwen te krijgen in SWAN**

HJ beschouwt ‘vertrouwen’ als de mate waarin het model in staat is goed te hindcasten. De verschillende fysische componenten/modellen (bijvoorbeeld, het breker-model, de modellering van de niet-lineaire wisselwerkingen, whitecapping) moeten afzonderlijk goed, dat wil zeggen: state-of-the-art, zijn (zij het dat state-of-the-art ook beter moet zijn dan andere formuleringen). ‘Goed’ betekent ook dat veel facetten beschouwd kunnen worden. Hiervoor is gebiedskennis nodig: welke processen spelen waar een rol? Sommige processen zijn afzonderlijk te toetsen. Voor de vertaling naar extremen zou je bijvoorbeeld kunnen kijken naar orkanen. Het zal moeilijk/onmogelijk zijn om de combinatie van alle processen voor een extreme situatie te hindcasten, maar er kan in ieder geval voor gezorgd worden dat de afzonderlijke processen goed gemodelleerd worden. Zo zal er in het drag-onderzoek gewerkt worden aan een verbeterd wind-model. Het is overigens nog niet duidelijk of dit binnen SBW zal gebeuren.

AvD meldt dat voor de doordringing van deining kunnen veldmetingen van elders gebruikt worden (Lunenburg Bay (Nova Scotia), Port Phillip Bay, (Melbourne, Australia)), waarbij in die cases je een combinatie van twee processen hebt (deining/windzee en deining/stroming). Je kunt dus processen in combinatie beschouwen om zo vertrouwen te krijgen dat naast de modellering van de afzonderlijke processen ook de combinatie van twee goed gaat, en dat kan je extrapoleren naar een complexe situatie.

AvD: Daarnaast weten we nu dat bijvoorbeeld lokale windgroei bij korte fetches en situaties met ebstroming niet goed gemodelleerd worden. Hier zal aan gewerkt moeten worden.

HJ: Een ander probleem is dat je nooit zeker weet welke processen allemaal een rol spelen en of je niet een proces mist. Hiervoor blijven goed gekozen hindcasts onmisbaar (bijv. een



geval van hoge windsnelheid en lage waterstand, en deiningsdoordringing (FdH)). Een hindcast van een complexe situatie blijft de best mogelijke test ('ultieme waarheid') om vertrouwen in een model te krijgen (of te verliezen). Dat extrapolatie gerechtvaardigd is kan niet aangetoond worden. Dit is inherent aan het modelleren van extremen in deze situatie. Vertrouwen blijft dan ook een zaak van relatief vertrouwen: zitten de dingen die relevant zijn er goed in?

GH: Is hier een overzicht van gemaakt? AvD: In WL/Alkyon (2003) [Requirements for field measurements for improved wave modelling : Task 1. Report WL | Delft Hydraulics / Alkyon H4301/A1183. November 2003.] is een prioriteitenlijst opgesteld die in Schoorl door het Hydraulic Review Team is beoordeeld, waarna het enigszins gewijzigd is. Hierin staat aangegeven welk processen waar een rol spelen met de prioritering erbij. Deze expertise zou gebruikt kunnen worden om te kijken welke processen belangrijk zijn om zodoende (na verbetering) technisch vertrouwen te krijgen in het model. Deze activiteit is voor 2007 geoffreerd.

## **2. Welke rol kunnen laboratoriummetingen spelen?**

FdH: In Petten is een gemeten storm nagebootst in een laboratorium en vervolgens zijn er laboratoriummetingen gedaan voor extremen. Kan een vergelijkbaar iets worden gedaan voor de complexe 2D-situatie van de Waddenzee? FdH meent dat het hier minder zal kunnen opleveren dan bij Petten omdat de situatie niet goed nagebootst kan worden: de lokale golfgroei door wind zal niet goed nagebootst kunnen worden en dus zullen er ook geen veldmetingen zijn waaraan de laboratoriummetingen gevalideerd kunnen worden. FdH meent dat het zinvol is om een bureaustudie uit te voeren naar de mogelijkheden van 2DH-laboratoriummetingen alvorens dit spoor volledig af te sluiten. De meeste aanwezigen zijn intuïtief wel geneigd om laboratoriummetingen in de Waddenzee slechts een kleine of helemaal geen rol toe te bedelen, maar dit moet wel onderbouwd worden middels een bureaustudie waarin de pijnpunten ook benoemd worden.

## **3. Hoe operationeel vertrouwen te krijgen?**

HdW: Om operationeel vertrouwen te krijgen moet er sprake zijn van consistentie met de omgeving en met wat er in het verleden gebeurd is (consistentie in ruimte en tijd) en consistentie met wat er is waargenomen door lokale beheerders. Eventuele verschillen moeten in begrijpelijke taal uitgelegd kunnen worden.

FdH: Trendbreuken moeten niet uit de weg worden gegaan maar wel uitgelegd kunnen worden.

Daarnaast moeten uitkomsten stroken met de waarnemingen van de beheerders. Zo is het een goed idee om 1/2 november te hindcasten, ook nu er geen data is ingewonnen, maar om toch een voorbeeld te geven wat SWAN voorspelt aan de teen van de dijk en wat de golfoploop is die daaruit volgt. Dat kan geschraagd worden met veekranden die waargenomen zijn.

FdH: Het is belangrijk dat beheerders bij het proces betrokken worden. Dit kan bijvoorbeeld middels de Watersysteem Groep Kust die nu twee maal per jaar bijeenkomt in het kader van de HR. De deelnemende waterschappers hebben veel gebiedskennis, wat ook noodzakelijk is voor het technisch vertrouwen. Belangrijk is wel dat de beheerders in voor hen 'relevante' taal worden aangesproken. Zo zijn zij bijvoorbeeld niet zozeer geïnteresseerd in de individuele golfhoogte en golfperiode maar in golfoploop. Probeer hieop aan te sluiten. De toets van de bruikbaarheid van de SBW-producten ligt bij de beheerders, niet bij DG Water. Als de beheerders worden meegenomen in het proces en hun input serieus wordt genomen zal het geen probleem zijn om operationeel vertrouwen te krijgen. Zorg er wel voor dat er vanaf het begin een tweezijdigheid zit in het proces: niet alleen 'wat willen de beheerders van SBW weten' maar ook andersom.

AR merkt op dat er een soort communicatieplan nodig is voor het betrekken van de beheerders bij SBW en HR. Er ligt nu al een communicatieplan voor HR en hier moet op worden aangesloten voor SBW. Er moet niet een nieuw gremium uitgevonden worden. Ook moet er geen onderscheid worden aangebracht tussen de sterkte- en de belastingkant. Uiteindelijk gaat het de beheerder om de kering en de S- en B-kant moeten dus geaggregeerd worden gebracht. Als terzijde zij opgemerkt dat er voor de sterktekant nu nog faalmechanismen ontbreken in de startnotitie. Dit betreft de geotechnische faalmechanismen. Ook zijn sommige geotechnische faalmechanismen nu te streng geformuleerd. Binnen SBW-sterkte dient hier aandacht aan te worden besteed. Binnen het kader van het huidige SBW-deelproject is dit echter minder relevant omdat het hier expliciet gaat om de golfparameters.

HdW: Hoewel het ‘communicatierapport’ van Haskoning niet de communicatie beschrijft die nodig is om de SBW-producten goed te laten ‘landen’ bij de beheerders – en dus voor het verkrijgen van operationeel vertrouwen minder relevant is – dient de communicatie tussen SBW en de watersysteemgroepen wel afgestemd te zijn op de communicatieparagraaf in het Haskoning plan.

FdH: Het is wel belangrijk dat concrete resultaten altijd eerst naar DG Water moeten alvorens ze gepresenteerd kunnen worden in het veld van beheerders. Tevens moet er met DG Water worden afgesproken dat dit proces wordt ingezet met de beheerders.

De frequentie van de bijeenkomst van de WSG van twee maal per jaar lijkt voldoende. Eventueel kan de communicatie uitgebreid worden met een nieuwbrief die bijvoorbeeld ieder kwartaal verschijnt (PKT)

#### **4. Hoe bestuurlijk vertrouwen te krijgen?**

FdH: In tegenstelling tot voorgaande jaren zijn de rollen nu scherper gedefinieerd. Als de producten van SBW technisch goed in elkaar zitten, dat wil zeggen: ze zijn door een externe commissie als het HRT of de ENW goedgekeurd, dan heeft de bestuurlijk er ook vertrouwen in. De inhoudelijke toets ligt niet bij DG Water zelf. Wel kan het zo zijn dat het product tijdelijk ‘in de kast wordt gelegd’ omdat het op dat moment bestuurlijk niet opportuun is om iets te doen met het product. Dit valt dan echter niet meer binnen de verantwoordelijkheid van SBW of RWS. Wel is het, zoals gezegd, belangrijk vantevoren wordt gemeld aan DG Water dat en hoe het proces van communicatie met het operationele veld wordt ingezet.

FdH: Hoewel voor bestuurlijk vertrouwen in de inhoud een toetsing door een extern team van deskundigen nu voldoende is, blijft het belangrijk dat DG Water vertrouwen heeft in het proces. DG Water moet dus meegenomen worden in de processturing om zodoende financiering voor het project te waarborgen.

#### **5. Welke andere middelen zijn er om resultaten te verifiëren, te corrigeren of te overrulen (fall back optie)?**

FdH meent dat het vrijwel uitgesloten is om in 2011 niet de SWAN resultaten te gebruiken. Het zou echt zeer goed aangetoond moeten worden waarom SWAN eventueel niet te gebruiken is. In die zin is de bewijslast dus omgekeerd. Het is dus zaak om de grootste onzekerheden aan te pakken. (Toegevoeging achteraf van ND/AvD: de grootste onzekerheid die er toe doet in het eindantwoord, bijvoorbeeld met gebruikmaking van het prioriteringsinstrument).

FdH: In plaats van een *fall back* optie is er dus eerder sprake van alternatieve methoden die losse elementen van SWAN kunnen toetsen gedurende het proces op eenvoudige wijze. Te denken valt aan het toepassen van de formules van Bretschneider voor een aantal lokaties

(alleen fetch en depth-limited golfgroei door wind). Op deze manier kan gekeken worden of SWAN de trends goed reproduceert (opmerking achteraf: maar dan heb je twee uitkomsten: welke is dan waar?). Dit sluit dan weer aan op hetgeen gezegd is over het verkrijgen van technisch vertrouwen. HJ: zo'n eenvoudig programma is indertijd ook voor de Oosterschelde gebruikt.

HdW: Zo'n soort programma bestaat voor de meren.

#### 4. Inhoudelijke bespreking resterende subvragen aan de hand van startnotitie

##### **1. Welke golfparameters zijn van belang voor de Waddenzee?**

FdH: Hoewel de rol van HYDRA-K nu nog niet helemaal scherp is, zal dat verbeterd worden in de nieuwe VTV. Hierin wordt HYDRA-K ook expliciet genoemd. Op dit moment wordt HYDRA-K ingezet voor de eenvoudige toetsing van bekledingen en voor de gedetailleerde toetsing van de hoogte.

FdH: In tegenstelling tot hetgeen in de startnotitie staat vermeld zit in de overloop- en overslagformules nu ook de  $T_{m-1,0}$  en niet de  $T_p$ . Het zal nog wel enige tijd duren voordat de  $T_p$  er helemaal uit gaat dus voorlopig moet deze parameter ook nog meegenomen worden.

ND na voorstel FdH: De kolom "Hydra-K" in Tabel 3-1 wordt vervangen door "eenvoudige toetsmethode" en in kleur of arcering wordt aangegeven waar Hydra-K wordt toegepast.

FdH: Voor de eenvoudige toetsing van de hoogte zijn dan geen golfparameters nodig maar alleen de geometrie van de kering.

GH: er missen faalmechanismen in Hydra-K. FdH: er is een selectie gemaakt, maar als er essentiële missen dan moet dat uitgezocht worden. SBW is daarvoor een kader waarin uitgezocht kan worden wat de fysica van bepaalde faalmechanismen is.

GH: De criteria zijn te krap genomen (m.n. overslag).

HJ: De havendammen zitten niet in de toetsing dus die kunnen uit de tabel verwijderd worden.

In de startnotitie wordt ook een aantal parameters vermeld die nu (nog) niet worden gebruikt maar die wel kunnen worden uitgerekend door SWAN, zoals de  $Q_b$  en de spectrale vorm. FdH: Uitgangspunt is dat het randvoorwaardenboek alles moet opleveren dat nodig is voor de VTV. De sterkte-kant moet leidend zijn in wat door de belastingkant moet worden opgeleverd.

GH meent dat er voorlopig nog weinig zal gebeuren met de  $Q_b$ , het modelleren in tijdsdomein en de spectrale vorm. Strict genomen hoeven deze dus niet opgeleverd te worden.

FdH (met bijval HJ): De spectrale vorm kan echter wel bijdragen aan het verkrijgen van technisch vertrouwen.

HJ: De  $Q_b$  kan een handig bijproduct zijn om te kijken wat er gebeurt, al zit de hoeveelheid breken nu ook al in de  $\xi$ .

##### **2. Wat zijn de kwantitatieve criteria?**

FdH vond het teleurstellend dat er geen harde getallen zijn genoemd in de bijeenkomst van 2/10/2006. Als experts moet er minstens een bepaald ambitieniveau uitgesproken worden.

AR meent dat het hiervoor nog te vroeg is en dat het pas over ongeveer 2 jaar opportuun is om dit te doen. Belangrijk is dat er een verhaal zit achter de nauwkeurigheid; het gaat niet alleen om de kwantitatieve criteria (getallen).

AvD: Om toch een uitspraak te kunnen doen wordt onderscheid gemaakt tussen het ambitieniveau (het “willen”) en een realistisch inschatting van wat mogelijk is (“het kunnen”). Eerstgenoemde is om binnen de nauwkeurigheid te blijven van de beschrijving van de sterkekant. Realistischer lijkt echter om in 2011 een vergelijkbare nauwkeurigheid te behalen voor de Waddenzee als op dit moment wordt gehaald voor de Hollandse Kust (10%) en zelfs dat zal in een complexe situatie als de Waddenzee een uitdaging zijn. N.B.: het zij benadrukt dat bij het niet behalen van het kwantitatieve ambitieniveau niet direct volgt dat het model niet geaccepteerd wordt. In die zin is het ambitieniveau niet bindend: er is sprake van een inspanningsverplichting maar niet van een resultaatverplichting.

### **3. Hoe om te gaan met onzekerheden?**

FdH: Toetsen gebeurt ‘op scherp’: hier is de gemiddelde waarde (*best guess*) het uitgangspunt. Pas bij het ontwerp komen onzekerheden aan bod. Hier moeten dus de onzekerheden (standaard deviatie) aangegeven worden.

#### Overige tekstuele wijzigingen

De opmerking dat de golfsteilheid een onafhankelijke parameter is, zoals vermeld in de startnotitie, moet aangepast worden.

- Blz 3-7: opmerking over instationair rekenen moet genuanceerd worden (‘Op termijn zullen instationaire sommen gedraaid worden *in onderzoekskader*’).
- Pagina 5-3: windgedreven stroming wordt uitgebreid met afvoer en getijstroming  
Pagina 3-5: de opmerking over de nauwkeurigheid van RIKZ instrumenten (van Bottema) wordt gecheckt met H. Peters voor wat betreft de Waddenzee. Evt. nuanceringen worden aangebracht.

## E Definitie van golfparameters

De golfparameters, zoals vermeld in Tabel 3-2, zijn als volgt gedefinieerd.

### E.1 Golfhoogtematen

#### E.1.1 Significante golfhoogte $H_s$ (tijddomein)

De tijddomein significante golfhoogte is gedefinieerd als de gemiddelde golfhoogte van het hoogste 1/3 deel van de golven.

#### E.1.2 Significante golfhoogte $H_{m0}$ (frequentiedomein)

De spectrale significante golfhoogte is gedefinieerd als:

$$H_{m0} = 4 \sqrt{\iint f^i E(f, \theta) df d\theta}$$

met  $E(f, \theta)$  het twee-dimensionale variantiedichtheidsspectrum.

### E.2 Golfperiodematen

#### E.2.1 Gemiddelde golfperiode $T_m$ (tijddomein)

De gemiddelde golfperiode  $T_m$  is gedefinieerd als de gemiddelde tijdsduur tussen twee opeenvolgende neergaande passages van de middenstand van een golf.

#### E.2.2 Golfperiode $T_{m02}$ en $T_{m-1,0}$ (frequentiedomein)

De golfperiodematen  $T_{m02}$  en  $T_{m-1,0}$  zijn gebaseerd op de het  $0^\circ$  en  $2^\circ$ , respectievelijk het  $0^\circ$  en  $1^\circ$ -orde moment  $m_i$  van het golfspectrum:

$$m_i = \iint f^i E(f, \theta) df d\theta \quad (\text{E.1})$$

met  $E(f, \theta)$  het twee-dimensionale variantiedichtheidsspectrum.

De periodematen kunnen als volgt afgeleid worden van het moment  $m_i$ :

$$T_{m0,2} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (\text{E.2})$$

$$T_{m-1,0} = \frac{m_{-1}}{m_0} \quad (\text{E.3})$$

### **E.2.3 Piekperiode $T_p$ (frequentiedomein)**

De piekperiode  $T_p$  is gedefinieerd als de periode die behoort bij de frequentie waar het variantiespectrum de hoogste waarde heeft.

### **E.3 Golfrichting**

De gemiddelde golfrichting is gedefinieerd als:

$$\theta = \arctan \left[ \frac{\int \sin(\theta) E(f, \theta) df d\theta}{\int \cos(\theta) E(f, \theta) df d\theta} \right]$$

met  $E(f, \theta)$  het twee-dimensionale variantiedichtheidsspectrum.

## Literatuur

- Battjes, J.A. en H. W. Groenendijk (2000). Wave height distribution on shallow foreshores, *Coastal Engineering* 40, pp. 161 – 182.
- Battjes, J.A. en J.P.F.M. Janssen (1978). Energy loss and set-up due to breaking of random waves, *Proc. 16th Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE*, pp. 569 – 587.
- Booij, N., R.C. Ris and L.H. Holthuijsen (1999). A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation. *J. Geophys. Res.* 104, C4, 7649-7666.
- Bottema, M. (2006). *Leidraad monitoring – golfcondities zoete rijkswateren*, juni 2006 ([www.rijkswaterstaat.nl/rws/riza/leidraad/themas\\_discipline/golven.htm](http://www.rijkswaterstaat.nl/rws/riza/leidraad/themas_discipline/golven.htm)).
- DWW (2002). *De veiligheid van de primaire waterkeringen in Nederland. Achtergrond Rapport*, Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, september 2002.
- Gent, M.R.A. van (2002). *Low-exceedence wave overtopping events. Measurements of velocities and the thickness of water-layers on the crest and inner slope of dikes*. DC report, June 2002.
- HKV (2005). *Hydra-K. Functionele documentatie versie 3.0*, juli 2005.
- Seiffert, J.W.W. (1991). *Golfploop bij tweetoppig spectrum*, december 1991.
- V&W (2004). *De veiligheid van de primaire waterkeringen in Nederland. Voorschrift Toetsen op Veiligheid voor de tweede toetsronde 2001-2006 (VTV)*, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, januari 2004.
- WL (2006a). Plan van Aanpak SBW. Natuurrandvoorwaarden Waddenzee. Rapport WL | Delft Hydraulics H4750, Maart 2006.
- WL (2006b). Storm Hindcasts Norderneyer Seegat and Amelande Zeegat. Rapport WL | Delft Hydraulics H4803.11, Augustus 2006.
- WL/Alkyon (2003). Requirements for field measurements for improved wave modelling : Task 1. Report WL | Delft Hydraulics / Alkyon H4301/A1183, November 2003.
- Zijlema, M. and A.J. van der Westhuijsen (2005). On convergence behaviour and numerical accuracy in stationary SWAN simulations of nearshore wind wave spectra. *Coastal Engineering* 52, pp. 237 – 256