

Verkennde studie naar het belang van golfopzet voor WBI2023

Definitief rapport

1917/U17324/C/BE

29 januari 2018

SVAS

HYDRAULICS

COASTAL, HARBOUR AND RIVER CONSULTANTS

EK

LICS

CONSULTANTS

INHOUDSOPGAVE

	Pag.	
1	INLEIDING	1
1.1	Aanleiding	1
1.2	Onderzoeksvragen	1
1.3	Aanpak beantwoording onderzoeksvragen	1
1.3.1	Relevantie golfopzet in de literatuur	1
1.3.2	Eigenschappen en relevantie van golfopzet in maatgevende condities	2
1.3.3	In hoeverre is golfopzet al direct of indirect aanwezig in de gebruikte modellen	2
1.3.4	Metingen waaruit relevantie golfopzet blijkt	3
1.4	Leeswijzer	3
2	BESCHRIJVING GOLFOPZET	4
2.1	Golfspanning en het ontstaan van het fenomeen golfopzet	4
2.2	Formuleringen voor de berekening van golfopzet	6
2.3	Wat zegt literatuur over relevantie golfopzet	10
2.3.1	A numerical study on the effect of beach nourishment on wave overtopping in shallow foreshores	10
2.3.2	Depth-induced wave breaking in a non-hydrostatic, near-shore wave model	13
2.3.3	Empirical parameterization of setup, swash, and runup	15
2.3.4	Observations of Wave-induced Set-up on a Natural Beach	17
2.3.5	Simulating wave setup and runup during storm conditions on a complex barred beach	18
2.3.6	Wave setup and setdown generated by obliquely incident waves	19
2.3.7	GLOBEX: Wave dynamics on a gently sloping laboratory beach.	20
2.4	Informatie uit interviews	21
3	RELEVANTIE GOLFOPZET NEDERLANDSE WATERSYSTEMEN	25
3.1	Inleiding	25
3.2	Opzet numerieke berekeningen	25
3.2.1	Numerieke modellen SWAN en SWASH	26
3.2.2	Afregelen van de modelrandvoorwaarden	26
3.2.3	SWAN modelinstellingen	26
3.2.4	SWASH modelinstellingen	27
3.2.5	Uitvoer golfopzet	27
3.2.6	Gevoeligheid golfopzet	28
3.3	Profiel 1: Hollandse kust – duin zonder brekerbank, Delfland	28
3.3.1	Kustprofiel en randvoorwaarden	28
3.3.2	Afregelen van de modelrandvoorwaarden	29
3.3.3	Golfopzet uitkomsten	29
3.3.4	Vergelijking tussen numeriek en theoretisch bepaalde golfopzet	31
3.4	Profiel 2: Hollandse kust – duin met brekerbank, Rijnland	31
3.4.1	Kustprofiel en randvoorwaarden	31
3.4.2	Afregelen van de modelrandvoorwaarden	32
3.4.3	Golfopzet uitkomsten	33
3.4.4	Vergelijking tussen numeriek en theoretische bepaalde golfopzet	35
3.5	Profiel 3: Hollandse kust – dijk met steil voorland, Noord-Holland	35

3.5.1	Kustprofiel en randvoorwaarden	35
3.5.2	Afregelen van de modelrandvoorwaarden	36
3.5.3	Golfopzet uitkomsten	37
3.5.4	Vergelijking tussen numeriek en theoretische bepaalde golfopzet	39
3.6	Profiel 4: Hollandse kust – dijk met flauwe en ondiepe vooroever, Goeree	39
3.6.1	Kustprofiel en randvoorwaarden	39
3.6.2	Afregelen van de modelrandvoorwaarden	40
3.6.3	Golfopzet uitkomsten	41
3.6.4	Vergelijking tussen numeriek en theoretische bepaalde golfopzet	43
3.7	Profiel 5: Estuaria, Waddenzee – steile vooroever, Borssele	43
3.7.1	Kustprofiel en randvoorwaarden	43
3.7.2	Afregelen van de modelrandvoorwaarden	44
3.7.3	Golfopzet uitkomsten	45
3.7.4	Vergelijking tussen numeriek en theoretische bepaalde golfopzet	47
3.8	Profiel 6: Estuaria, Waddenzee – ondiep voorland, Harlingen	47
3.8.1	Kustprofiel en randvoorwaarden	47
3.8.2	Afregelen van de modelrandvoorwaarden	48
3.8.3	Golfopzet uitkomsten	49
3.8.4	Vergelijking tussen numeriek en theoretische bepaalde golfopzet	51
3.9	Profiel 7: IJsselmeer – Steile vooroever, Noordoostpolder	51
3.9.1	Kustprofiel en randvoorwaarden	51
3.9.2	Afregelen van de modelrandvoorwaarden	52
3.9.3	Golfopzet uitkomsten	53
3.9.4	Vergelijking tussen numeriek en theoretische bepaalde golfopzet	55
3.10	Profiel 8: IJsselmeer – breed ondiep voorland, Zuidwest Friesland	56
3.10.1	Kustprofiel en randvoorwaarden	56
3.10.2	Afregelen van de modelrandvoorwaarden	57
3.10.3	Golfopzet uitkomsten	57
3.10.4	Vergelijking tussen numeriek en theoretische bepaalde golfopzet	59
3.11	Conclusies	60
3.11.1	Vergelijking tussen numeriek en theoretisch bepaalde golfopzet	60
3.11.2	Relevantie van golfopzet bij het WBI-uitvoerpunt	61
3.12	Discussie	62
3.12.1	Relevantie van golfopzet bij het WBI-uitvoerpunt Profiel 3	62
3.12.2	Afregelen SWAN en SWASH modellen	63
4	METINGEN IN NEDERLAND	64
4.1	Algemeen	64
4.2	Petten	64
4.3	Egmond aan Zee	65
4.4	Terschelling	65
4.5	Amelander Zeegat	65
4.6	Begroeid voorland kust Groningen	66
4.7	Duck, North Carolina, USA	67
5	GOLFOPZET IN MODELLEN EN MODULES WBI	68
5.1	Inleiding	68
5.2	Hydraulische randvoorwaarden	68
5.2.1	SWAN	68
5.2.2	Duinen	68
5.2.3	Dijken	70

5.3	Voorlandmodule DaF	71
5.4	Duinafslag	72
5.5	Golfoverslag	73
6	DISCUSSIE OVER BELANG GOLFOPZET VOOR NEDERLANDSE WATERSYSTEMEN	74
6.1	Algemeen	74
6.2	Nederlandse duinenkust	74
6.2.1	Hollandse duinenkust	74
6.2.2	Zeeuwse duinenkust	74
6.2.3	Waddenzee duinenkust	74
6.3	Dijk Helderse zeewering	75
6.4	Dijk langs Zeeuwse Noordzeekust	76
6.5	Westerschelde	77
6.6	Waddenzee dijken	78
6.7	IJsselmeer dijken	79
6.7.1	Steile vooroever	79
6.7.2	Breed voorland	79
7	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	81
7.1	Conclusies	81
7.1.1	Hoofdpunten	81
7.1.2	Berekening golfopzet	82
7.1.3	Metingen golfopzet	82
7.1.4	Modellen en modules binnen WBI die van belang zijn voor golfopzet	83
7.1.5	Belang van golfopzet voor de Nederlandse watersystemen	83
7.1.6	Wanneer moet er rekening worden gehouden met golfopzet	85
7.2	Aanbevelingen	85
	LITERATUUR	87

1 INLEIDING

1.1 Aanleiding

Binnenkort moet Rijkswaterstaat besluiten welke aspecten van de Hydraulische Belastingen voor WBI2023 nader onderzoek vragen. Een aspect waarvan de urgentie niet op voorhand duidelijk is betreft golfopzet bij golfbreking. De golfopzet kan er voor zorgen dat bijvoorbeeld de golfoverslag toeneemt.

Het is niet geheel duidelijk of de invloed van golfopzet is verdisconteerd in bijvoorbeeld de overslagformules of in de golfmodellen van het Wettelijk Beoordelings Instrumentarium (WBI) en het Ontwerp Instrumentarium (OI). Ook de resultaten van een artikel over golfopzet en golfoverslag langs de Vlaamse kust (Suzuki et al., 2012) hebben bijgedragen aan de behoefte om één en ander beter te laten uitzoeken. Rijkswaterstaat heeft daarom aan Svašek Hydraulics gevraagd om een verkennende studie uit te voeren. Hierin is onderzocht óf en waar golfopzet langs de Nederlandse kust en grote binnenwateren een rol speelt.

1.2 Onderzoeksvragen

Rijkswaterstaat heeft aangegeven dat de verkennende studie moet bestaan uit een literatuurscan, interviews met enkele externe deskundigen en een beperkt aantal gevoeligheidsberekeningen. Hierbij zijn de volgende onderzoeksvragen gedefinieerd:

1. Wat zegt de literatuur over de relevantie van golfopzet en welke formules zijn er in omloop voor de berekening van golfopzet.
2. Hoe relevant is golfopzet in maatgevende condities voor de Nederlandse kust en grote binnenwateren en wat is de noodzaak om deze mee te nemen. Als golfopzet optreedt, gebeurt dit dan vrijwel alleen landwaarts van de WBI-uitvoerpunten of is golfopzet op deze locaties ook al relevant.
3. In hoeverre is golfopzet al direct of indirect geïmplementeerd in de waterbewegings- en golfmodellen voor het WBI en OI en indien dit zo is, is de golfopzet ook geactiveerd. Hierbij dient gekeken te worden naar de rekenmodellen die de hydraulische randvoorwaarden voor de WBI-uitvoerpunten leveren, maar ook naar de modules en programma's die vervolgens kunnen worden gebruikt voor de bepaling van de hydraulische belasting op de waterkering.
4. Zijn er in Nederland gegevens uit metingen te halen waaruit blijkt hoe relevant golfopzet is.
5. Advies over nadere acties of nader onderzoek op basis van de bevindingen.

1.3 Aanpak beantwoording onderzoeksvragen

In de navolgende paragrafen wordt in grote lijnen het plan van aanpak voor de beantwoording van de verschillende onderzoeksvragen beschreven.

1.3.1 Relevantie golfopzet in de literatuur

In de beantwoording van de eerste onderzoeksvraag is eerst een korte beschrijving gegeven van het proces golfopzet. Vervolgens is via een literatuurscan gekeken of er meer bekend is over de relevantie van golfopzet langs watersystemen die vergelijkbaar zijn met die in Nederland. Ook worden hier enkele formules gegeven die voor de berekening van golfopzet in omloop zijn.

1.3.2 Eigenschappen en relevantie van golfopzet in maatgevende condities

Om deze onderzoeksvraag te beantwoorden is eerst voor verschillende watersystemen gekeken of golfopzet optreedt onder maatgevende condities. Hiervoor zijn de volgende acht watersystemen geanalyseerd:

- Hollandse kust met duin: 1 situatie met en 1 situatie zonder brekerbank.
- Hollandse kust met dijk: 1 situatie met een steile vooroever en 1 situatie met een flauwe vooroever.
- Estuaria, Waddenzee: 1 situatie met een steile vooroever en 1 situatie met een breed voorland.
- IJsselmeer: 1 situatie met een steile vooroever en 1 situatie met een breed voorland.

Voor elk van deze situaties is met behulp van het numerieke model SWASH een 1D berekening gemaakt waarbij de mate van golfopzet is onderzocht. Hiervoor zijn de modelinstellingen van Suzuki et al. (2012) gebruikt. Als hydraulische randvoorwaarde is een extreme conditie opgelegd die overeenkomt met de conditie die voor het WBI gebruikt wordt. De acht profielen zijn ook met het numerieke model SWAN doorgerekend, dit om verschillen in berekende golfopzet tussen de twee modellen te kunnen kwantificeren.

Nadat het verloop van de golfopzet langs het profiel bekend is, is onderzocht waar het WBI-uitvoerpunt zich in dit profiel bevindt. Is dit wel of niet binnen de invloedssfeer van de golfopzet.

1.3.3 In hoeverre is golfopzet al direct of indirect aanwezig in de gebruikte modellen

Voor de bepaling van de hydraulische randvoorwaarden (waterstand, golfhoogte en -periode) in de WBI-uitvoerpunten wordt voor de Hollandse kust, de Westerschelde en de Waddenzee gebruik gemaakt van SWAN voor de golfcondities en van gemeten waterstanden voor de bepaling van het rekenpeil. De waterstanden in de meetstations worden daar via triangulaire interpolatie vertaald naar de diverse WBI-uitvoerpunten. Voor de randvoorwaarden voor o.a. het IJsselmeer wordt SWAN in combinatie met WAQUA (voor de waterstanden) gebruikt. Het WAQUA model is afgeregeld op waterstandmetingen.

Via interviews met externe deskundigen op het gebied van de waterbewegings- en golfmodellen voor het WBI en OI en de modules en programma's die worden gebruikt voor de bepaling van de hydraulische belasting op de waterkering is onderzocht of golfopzet wel of niet direct of indirect aanwezig is en zo ja geactiveerd is.

In het kader van deze studie zijn de volgende personen geïnterviewd:

- Gerbrant van Vledder (Van Vledder Consulting, TU Delft)
- Caroline Gautier (Deltares)
- Hans de Waal (Deltares)
- Quirijn Lodder (RWS)
- Vincent Vuik (HKV, TU Delft)

Daarnaast is contact geweest met:

- Maarten Kleinhans (Universiteit Utrecht)
- Gerben Ruessink (Universiteit Utrecht)
- Bart Spelt (RWS)
- Herman Peters (RWS)
- Dennis Hordijk (RPS)
- Pieter van Geer (RWS)
- Tomohiro Suzuki (Vlaams Waterbouwkundig Laboratorium)

1.3.4 Metingen waaruit relevantie golfopzet blijkt

Er is onderzocht of er metingen in Nederland beschikbaar zijn waaruit de relevantie van golfopzet blijkt.

1.4 Leeswijzer

Na de inleiding volgt in hoofdstuk 2 een beschrijving van de golfopzet. In hoofdstuk 3 is de relevantie voor verschillende watersystemen in Nederland onderzocht. Hoofdstuk 4 gaat over metingen naar golfopzet in Nederland en hoofdstuk 5 behandelt de golfopzet binnen de modellen en modules van het WBI. Een discussie over het belang van golfopzet voor de Nederlandse watersystemen is te vinden in hoofdstuk 6. Tot slot staan de conclusies en aanbevelingen in hoofdstuk 7.

2 BESCHRIJVING GOLFOFZET

2.1 Golfspanning en het ontstaan van het fenomeen golfopzet

In lopende vrije-oppervlaktegolven wordt in de looprichting niet alleen energie overgedragen, maar ook impuls. Die impulsoverdracht werkt in de praktijk als een inwendige spanning in het water, die golfspanning (*radiation stress*) wordt genoemd. In situaties met niet-uniforme golfbeweging kunnen gradiënten in de componenten van de golfspanning aanleiding geven tot een netto horizontale kracht, die invloed heeft op de waterstand (verhang, golfopzet) en op de waterbeweging (golfgedreven stroming). Deze effecten zijn vooral zichtbaar in gebieden waar de golfeigenschappen sterk variëren van plaats tot plaats; het bekendste en meest relevante voorbeeld daarvan is de brandingszone.

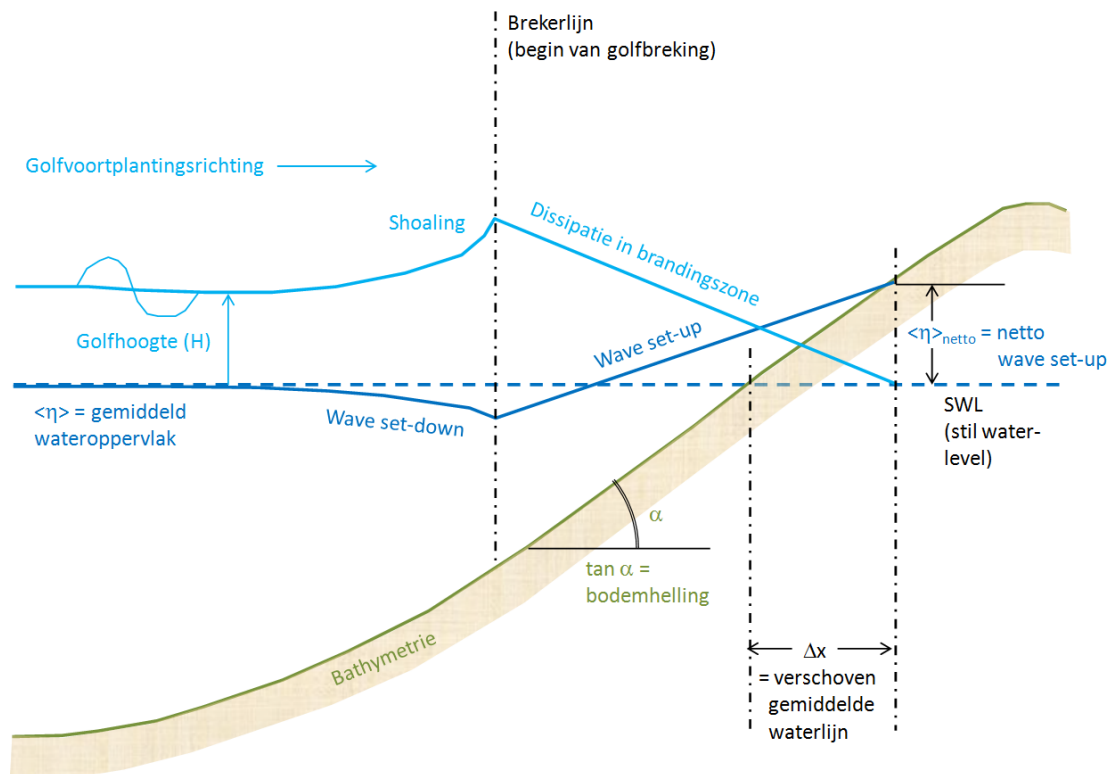
Sinds de introductie ervan door Longuet-Higgins en Stewart in 1960 is het begrip golfspanning intensief gebruikt voor de beschrijving van het netto effect van golven op de dieptegemiddelde waterbeweging nabij een kust. Een effectief overzicht van de basiskennis rondom golfspanning en golfopzet is te vinden bij o.a. Battjes (1997) en Holthuijsen (2007).

Golfspanning wordt in de literatuur altijd beschreven als verticaal geïntegreerd over de waterdiepte, van bodem tot vrij oppervlak, zodat golfspanning altijd beschreven kan worden met alleen de twee horizontale dimensies (x en y). Golfspanning wordt gedefinieerd als: *de golf-bijdrage aan de horizontale overdracht van horizontale impuls, per eenheid van breedte, geïntegreerd over de waterdiepte en gemiddeld over een geheel aantal golfperiodes.*

Zoals alle spanningsgrootheden in water (of andere continue media) is ook golfspanning een tweede-orde *tensor*: bij twee horizontale dimensies heeft deze tensor $2 \times 2 = 4$ componenten. (Deze componenten beschrijven de *overdracht* in x - en y -richting van de horizontale *impuls* in x - en y -richting, respectievelijk.) De gradiënt van de golfspanningstensor is een *vector* die 2 componenten heeft, x en y ; deze vector stelt de netto kracht voor die golfspanning uitoefent op een lokale watermassa. Deze aandrijvende kracht verschijnt als een extra term (bronterm) in de bekende horizontale bewegingsvergelijkingen voor ondiep water; zo kunnen golfspanningsgradiënten een stroming opwekken, maar ook aanleiding geven tot een verhang zoals bij golfopzet. In de volgende paragraaf komen kwantitatieve formuleringen voor de golfspanningscomponenten en golfopzet (*wave set-up*) aan de orde.

In Figuur 2.1 is het belang van golfspanning voor golfopzet nabij een kust schematisch weergegeven (in dwarsdoorsnede).

Als een golf (loodrecht of onder een hoek) de kust nadert en in ondieper water terechtkomt, maar nog niet breekt, neemt de golfhoogte toe door *shoaling*. Dit wordt veroorzaakt doordat de voortplantingssnelheid van golfenergie (groepsnelheid) afneemt bij afnemende diepte, terwijl tegelijk de energie-overdracht wel gelijk blijft (althans buiten de brandingszone); hierdoor moet ter compensatie de golfhoogte wel toenemen. Hetzelfde geldt voor de golfspanningscomponent in de richting van de kust; deze neemt toe met de golfhoogte, waardoor er ook een positieve *gradiënt* van de golfspanning in kustwaartse richting ontstaat. Dit wordt in de impulsbalans gecompenseerd door een negatief verhang: de gemiddelde waterstand neemt licht af richting de kust (de zgn. *wave set-down*). Door deze waterstandsverlaging wordt de waterdiepte kleiner, wordt de shoaling sterker en neemt dus ook de golfspanningsgradiënt richting de kust verder toe, hetgeen tot versterkte set-down leidt, enzovoort. Dit is een zichzelf versterkend proces, dat doorgaat totdat het punt van breken wordt bereikt.



Figuur 2.1: Schematische weergave shoaling, wave set-down en wave set-up.

In de brandingszone, waar de golven breken, neemt de golfhoogte richting de kust snel af tot nul (globaal evenredig met de waterdiepte). Daardoor neemt de golfspanning ook snel af tot nul. Deze negatieve kustwaartse gradiënt in de golfspanning wordt gecompenseerd door een aanzienlijk positief verhang richting de kust: de gemiddelde waterstand loopt kustwaarts op (de *golfopzet*). Deze golfopzet versterkt zich zelf over het algemeen niet; het kustwaartse verhang in de brandingszone is vrij uniform (zie Figuur 2.1). In het algemeen is de golfopzet een orde groter dan de golf set-down, terwijl deze tot stand komt over een veel kortere afstand (de brandingszone is i.h.a. smaller dan de zeewaartse zone met shoaling).

De hoofdaanleiding voor het optreden van golfopzet is dus het breken van golven. Of, en hoe, golven breken op een helling wordt voornamelijk bepaald door de hellingshoek van de bodem (α), de invallende golfhoogte (H) en de golfperiode (T). Voor een voldoende grote α (bijvoorbeeld een verticale golfbreker) breken de golven niet. Er is dan vrijwel volledige terugkaatsing, zodat voor de golfbreker een min of meer staande golf ontstaat. Als α afneemt tot beneden een bepaalde grenswaarde, die voornamelijk afhangt van het quotiënt van de golfhoogte H en de diep water golflengte L_0 (dus H/L_0), dan verliezen de golven hun stabiliteit op de gegeven helling. Wanneer golven de kust naderen - en het water ondieper wordt - zullen de golven vertragen, zal de golflengte korter worden en zal de amplitude stijgen. Wanneer de verhouding golfhoogte-waterdiepte 0,7 à 0,8 bereikt, wordt de golf instabiel en breekt zij.

N.B.: hoewel de bodemhelling van de beschouwde oever van belang is voor het al dan niet optreden van brekende golven, is de bodemhelling kwantitatief gezien minder van invloed op de golfopzet zodra de golfbreking er eenmaal is. Dit komt omdat het golfopzet-verhang recht evenredig is met de bodemhelling, en daardoor is de totale opzet over de hele brandingzone ook globaal evenredig met het totale verschil in waterdiepte tussen brekerlijn en oever, ongeacht het precieze verloop van de bathymetrie.

Door de golfopzet verschuift de land-waterlijn in landinwaartse richting: op een flauw kustprofiel, zoals een strand, kan deze verschuiving aanzienlijk zijn. Ook bij waterkeringen kan golfopzet van belang zijn: door de verhoogde waterstand is er een grotere kans op bijv. golfoverslag. Deze effecten

onderstrepen de relevantie van golfopzet voor het beoordelen van waterkeringen en het schatten van hydraulische belastingen. Het moet echter wel opgemerkt worden dat er ook andere oorzaken voor opzet kunnen zijn onder extreme omstandigheden, zoals opzet door luchtdruk en windopzet (beide vormen van opzet zijn uiteraard van belang gedurende stormvloed). Het zal per geval van de lokale omstandigheden afhangen welke vormen van opzet maatgevend zijn.

2.2 Formuleringen voor de berekening van golfopzet

Overdracht van impuls (ook bij korte golven) kan plaats vinden door middel van twee mechanismen: meevoering (advectie) en inwendige spanningen/drukken. Omdat impulsadvectie in de praktijk dezelfde werking heeft als een spanning, kunnen deze bij de formulering van de (golf)spanningscomponenten bij elkaar worden opgeteld. De totale golfspanningstensor \underline{S} bevat vier componenten:

$$\underline{S} = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} \\ S_{yx} & S_{yy} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 2.1}$$

Deze componenten van de golfspanning zijn gedefinieerd als:

$$S_{xx} = \int_{z_b}^{\bar{\eta}} (p + \rho u^2) dz - \int_{z_b}^{\bar{\eta}} p_0 dz \quad \text{Eq. 2.2}$$

(overdracht in x-richting van impuls in x-richting, p.e.v. breedte)

$$S_{xy} = \int_{z_b}^{\bar{\eta}} \rho u v dz \quad \text{Eq. 2.3}$$

(overdracht in y-richting van impuls in x-richting, p.e.v. breedte)

$$S_{yx} = \int_{z_b}^{\bar{\eta}} \rho v u dz \quad \text{Eq. 2.4}$$

(overdracht in x-richting van impuls in y-richting, p.e.v. breedte)

$$S_{yy} = \int_{z_b}^{\bar{\eta}} (p + \rho v^2) dz - \int_{z_b}^{\bar{\eta}} p_0 dz \quad \text{Eq. 2.5}$$

(overdracht in y-richting van impuls in y-richting, p.e.v. breedte)

Hierin duidt de overstreping een middeling over de golfperiode aan, en:

p	[Pa]	de hydrodynamische (totale) druk;
p_0	[Pa]	de hydrostatische druk;
ρ	[kg/m ³]	de dichtheid;
u, v	[m/s]	de x- en y- component van de horizontale snelheid;
z_b	[m]	de z-coördinaat van de bodemligging;
η	[m]	de lokale en momentane uitwijking van het wateroppervlak.

De componenten bevatten dus bijdragen van de druk en van de advectie (effect van de viscositeit kan worden verwaarloosd), terwijl de gemiddelde hydrostatische druk in afwezigheid van golven van het totaal wordt afgetrokken. In de praktijk worden de uitdrukkingen Eq. 2.2–Eq. 2.5 voor de golfspanningscomponenten vaak voldoende nauwkeurig bepaald in een Stokes-ontwikkeling tot de tweede orde nauwkeurig (d.w.z. evenredig met het kwadraat van de golfhoogte).

Het resultaat is:

$$\underline{S} = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} \\ S_{yx} & S_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(n - \frac{1}{2} + n \cos^2 \theta\right) E & (n \cos \theta \sin \theta) E \\ (n \cos \theta \sin \theta) E & \left(n - \frac{1}{2} + n \sin^2 \theta\right) E \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 2.6}$$

Hierin is:

E	[J/m ²]	totale golfenergie per eenheid van oppervlak, $E = \frac{1}{8} \rho g H^2$, met H de golfhoogte;
n	[-]	dimensieloze factor afhankelijk van de relatieve waterdiepte, $n = \frac{1}{2} + \frac{kd}{\sinh 2kd}$;
k	[m ⁻¹]	het golfgetal;
d	[m]	de lokale waterdiepte;
g	[m/s ²]	de gravitatieversnelling;
θ	[°]	de looprichting van de golven ten opzichte van het lokale assenstelsel.

Te zien is dat $S_{xy} = S_{yx}$, dus zoals elke spanningstensor is ook de golfspanningstensor symmetrisch. In het speciale geval dat $\theta = 0$, dus golfvoortplanting langs de x-as, vereenvoudigt Eq. 2.6 tot:

$$\underline{S} = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} \\ S_{yx} & S_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(2n - \frac{1}{2}\right) E & 0 \\ 0 & \left(n - \frac{1}{2}\right) E \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 2.7}$$

In dit geval zien we dat de golfspanning hoofdcomponenten heeft in twee hoofdrichtingen, namelijk langs de x-as en de y-as. Er is een bijdrage $\left(n - \frac{1}{2}\right)E$ van de golfspanning in beide dimensies, die door de hydrodynamische druk wordt veroorzaakt; dat komt omdat deze druk alzijdig is (!). Er is echter nog een extra bijdrage nE als gevolg van de meevoering van impuls, die hier alleen voorkomt in S_{xx} en niet in S_{yy} . Advectie heeft dus alleen invloed in de looprichting van de golf, niet haaks erop.

Met behulp van de gradiënt van \underline{S} vinden we een uitdrukking voor de netto aandrijvende kracht $\vec{F} = (F_x, F_y)$ op de lokale watermassa door de aanwezigheid van golven:

$$\vec{F} = -\nabla \cdot \underline{S} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \\ -\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} - \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 2.8}$$

In het algemeen kan deze aandrijvende kracht eenvoudig worden toegevoegd aan de welbekende bewegingsvergelijkingen voor ondiep water ("shallow water equations") teneinde effecten als golfgedreven stroming en golfopzet te simuleren voor een willekeurig kustgebied, waar de golfvoortplanting en de waterdiepte sterk variëren met de lokale topografie. Meestal zal dit iteratief moeten gebeuren, omdat de golfgedreven effecten op hun beurt invloed uitoefenen op de golfvoortplanting. Het numerieke model FINEL2D-expliciet, ontwikkeld door Svašek Hydraulics, is een mogelijk voorbeeld van een dieptegemiddeld stromingsmodel dat iteratief golfgedreven stroming en golfopzet kan simuleren via een on-line koppeling met het golfmodel SWAN.

Voor het geval van golfvoortplanting nabij een kust met rechte kustlijnen, waarbij de golfcondities niet variëren langs de kust, bestaat er een eenvoudige en elegante analytische formulering voor zowel de golf set-down als de golfopzet. In dit geval hoeven we alleen de golfvoortplanting in de dimensie loodrecht op de kust te beschouwen; we nemen hiervoor de x-richting. (Parallel aan de kust, langs de y-richting, variëren de golf- en stromingscondities niet en alle y-componenten van gradiënten zijn daar nul.) In het stationaire geval reduceert de bewegingsvergelijking (impulsbalans) loodrecht op de kust tot:

$$\rho g d \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} = F_x = -\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \quad \text{Eq. 2.9}$$

Hierin is $\bar{\eta}$ [m] de gemiddelde oppervlakte-uitwijking over een groot aantal golfperiodes; ver van de kust, op diep water, is deze gelijk aan nul ($\bar{\eta} = 0$). Dichterbij de kust zal $\bar{\eta}$ aanvankelijk negatief

worden als gevolg van shoaling en de bijbehorende set-down, en vervolgens aanzienlijk oplopen in de brandingszone (golfopzet).

Voor loodrechte golfinval ($\theta = 0^\circ$) wordt $\bar{\eta}$ in het set-down-gebied gegeven door:

$$\bar{\eta} = -\frac{1}{8} \frac{kH^2}{\sinh 2kd} \quad \text{Eq. 2.10}$$

Opmerkelijk is dat de gemiddelde waterstand hier dus niet afhangt van de plaatscoördinaat x of de bodemhelling, maar wel van de lokale waterdiepte en golfhoogte (!). In zeer ondiep water reduceert Eq. 2.10 voor de set-down tot:

$$\bar{\eta} = -\frac{1}{16} \frac{H^2}{d} \quad \text{voor } kd \ll 1 \quad \text{Eq. 2.11}$$

Goed te zien is dat voor steeds ondieper wordend water de set-down op zeker moment steeds steiler afloopt en “door de bodem schiet”. Maar voordat zoiets gebeurt, hebben de golven in werkelijkheid al het punt bereikt waarop ze beginnen te breken. Dit gebeurt normaliter zodra de individuele golfhoogte gelijk wordt aan de waterdiepte maal een brekingsparameter γ : $H(x) = \gamma d(x)$, waarin γ meestal een waarde 0,7 à 0,8 heeft. Volgens Eq. 2.11 is de maximale waarde van de set-down juist zeewaarts van het breekpunt dus bij benadering gelijk aan $\bar{\eta} = -0,0625\gamma H_{br} \approx -0,05H_{br} \approx -0,04d_{br}$.

Landwaarts van het breekpunt wordt dissipatie van golfenergie dominant en zal de golfhoogte tot aan de waterlijn snel afnemen. In combinatie met de lineaire golftheorie voor ondiep water leidt dit tot de volgende formulering voor de golfopzet:

$$\frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} = \frac{\frac{3}{8}\gamma^2}{1 + \frac{3}{8}\gamma^2} \frac{\partial z_b}{\partial x} \quad \text{Eq. 2.12}$$

of, equivalent geformuleerd in termen van de waterdiepte i.p.v. de bodemligging:

$$\frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} = -\frac{3}{8}\gamma^2 \frac{\partial d}{\partial x} \quad \text{Eq. 2.13}$$

Het is goed te zien aan Eq. 2.12 en Eq. 2.13 dat de waterstand in de brandingszone min of meer lineair oploopt. Volgens Eq. 2.13 is de maximale waarde van de golfopzet van het punt van breken tot aan de kustlijn bij benadering gelijk aan $\Delta \bar{\eta} = \frac{3}{8}\gamma^2 d_{br} = \frac{3}{8}\gamma H_{br} \approx 0,30H_{br} \approx 0,24d_{br}$. Dit is een veel grotere waarde dan de maximaal gevonden waarde voor de set-down, terwijl de golfopzet plaatsvindt over een veel kortere afstand. De “netto golfopzet” na aftrek van de maximale set-down gegeven door Eq. 2.11 is bij benadering gelijk aan:

$$\Delta \bar{\eta}_{netto} = \frac{3}{8}\gamma^2 d_{br} - \frac{1}{16} \frac{H_{br}^2}{d_{br}} = \frac{5}{16}\gamma H_{br} \approx 0,25H_{br} \approx 0,20d_{br} \quad \text{Eq. 2.14}$$

Deze netto golfopzet zal tevens tot gevolg hebben dat de gemiddelde waterlijn in landinwaartse richting verschuift. Bij een strand met constante bodemhelling α zal deze landinwaartse verschuiving de volgende orde van grootte hebben (bij flauwe hellingen kan deze verschuiving aanzienlijk zijn):

$$\Delta x_{waterlijn} = \frac{\frac{5}{16}\gamma H_{br}}{\tan \alpha} \approx \frac{0,25H_{br}}{\tan \alpha} \approx \frac{0,20d_{br}}{\tan \alpha} \quad \text{Eq. 2.15}$$

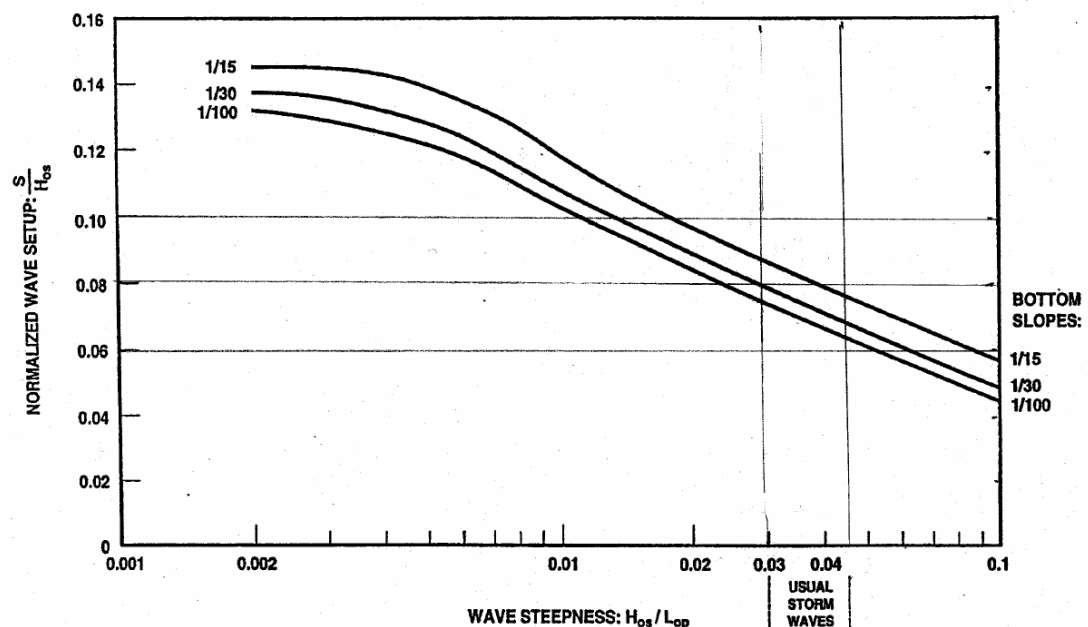
Ondanks de vrij ruwe benaderingen van de fysica van de golfbeweging in de brandingszone blijkt het bovenstaande eenvoudige model voor de golfopzet in de praktijk zeer realistisch te zijn voor monochromatische golven; zie bijv. Battjes (1997) en Holthuijsen (2007).

Over de afhankelijkheid van de golfopzet van diverse invoerparameters (voor monochromatische golven) kan het volgende worden gezegd. Het model voor de golf set-down en golfopzet dat is afgeleid in Eq. 2.10 – Eq. 2.14 bevat vooral lokale parameters en geen gradiënten daarvan. Het gaat dan om de lokale golfhoogte H en de waarde daarvan op de brekerlijn (H_{br}), de lokale waterdiepte d

en de waarde daarvan op de brekerlijn (d_{br}), het lokale golfgetal k (dat feitelijk afhangt van de golfperiode T en de lokale waterdiepte) en de brekerparameter γ . Het verband tussen de golfopzet en de golfhoogte resp. waterdiepte bij beginnende golfbreking is ruwweg lineair. De netto golfopzet $\Delta\bar{\eta}$ ter plaatse van de waterlijn hangt dus *niet* zozeer af van gradiënten zoals een bodemhelling α , maar vooral van *lokale* waarden van de waterdiepte en golfparameters. Dit suggereert dat het precieze verloop van de bathymetrie in de brandingszone er niet zoveel toe doet. Het is echter wél zo dat de verhouding tussen de bodemhelling α en de golfsteilheid H_0/L_0 van belang is voor de vraag of er überhaupt brekende golven optreden. Op dat punt is de onderwater-bodemhelling wel degelijk van belang, hoewel de kwantitatieve resultaten voor $\Delta\bar{\eta}$ in dit eenvoudige model niet afhankelijk zijn van α . Bovendien laat Eq. 2.15 zien dat de bodemhelling α (uiteraard) ook van grote invloed is op de horizontale *locatie* van de verschoven waterlijn onder invloed van golfopzet: dus niet van invloed op $\Delta\bar{\eta}_{netto}$, maar wel op $\Delta x_{waterlijn}$.

Bovenstaande beschrijving geldt voor monochromatische golven. In de praktijk zal de golfoploop tegen een strand of andere oever niet stationair en monochromatisch zijn, maar is er sprake van golfgroepen en een bepaalde spectrale verdeling van golfhoogtes. Dit heeft tot gevolg dat de golfopzet zal gaan fluctueren met een periode die min of meer gelijk is aan de periode van de golfgroepen. Dit effect wordt *surf beat* genoemd en leidt tot de vorming van zwakke en laagfrequente (lange) golven die zich terug-voortplanten richting zee.

In de Shore Protection Manual (US Army Corps of Engineers, 1984) wordt golfopzet voor richtingsgespreide random golven beschreven. De golven komen in groepen aan op de kust, waarbij groepen grote golven worden afgewisseld door groepen met relatief kalmere golfcondities. Hierdoor kan een deel van de golfopzet terugstromen richting zee. Als gevolg hiervan is de golfopzet bij random golven een factor 2 à 3 lager dan bij monochromatische golven. Voor golven in stormcondities, met waarden voor de golfsteilheid van rond de 0,03 à 0,04, geldt dat de golfopzet gelijk is aan 7% tot 8% van de significante golfhoogte op diep water. Voor golven met een kleinere steilheid worden waarden van circa 10% genoemd. Dit wordt geïllustreerd aan de hand van de afbeelding in Figuur 2.2.



Figuur 2.2: Golfopzet voor random golven gebaseerd op de Shore Protection Manual.

Indien brekende golven de kust onder een hoek naderen ($\theta \neq 0^\circ$), dan kunnen deze in de brandingszone een stroming evenwijdig aan de kust (longshore current) aandrijven. De aandrijvende kracht voor deze langsstroom wordt met name geleverd door de kustwaartse gradiënt van de kruis-

golfspanningcomponent S_{yx} (oftewel $\partial S_{yx}/\partial x$) en maakt evenwicht met de lokale bodemwrijving, die sterk afhankelijk is van de bathymetrie en de lokale ruwheid. De longshore current is onder meer van belang voor ontwikkeling van de kustmorfologie en het ontstaan van o.a. muistromen, en heeft ook een verlaging van de golfopzet tot gevolg.

2.3 Wat zegt literatuur over relevantie golfopzet

In het kader van deze studie is onderzocht wat de literatuur zegt over de relevantie van golfopzet (wave set-up). In de offerte aanvraag zelf werd door Rijkswaterstaat al verwezen naar het artikel van Suzuki over golfopzet langs de Vlaamse kust (Suzuki et al., 2012). Een scan naar interessante literatuur heeft onder andere de volgende publicaties opgeleverd:

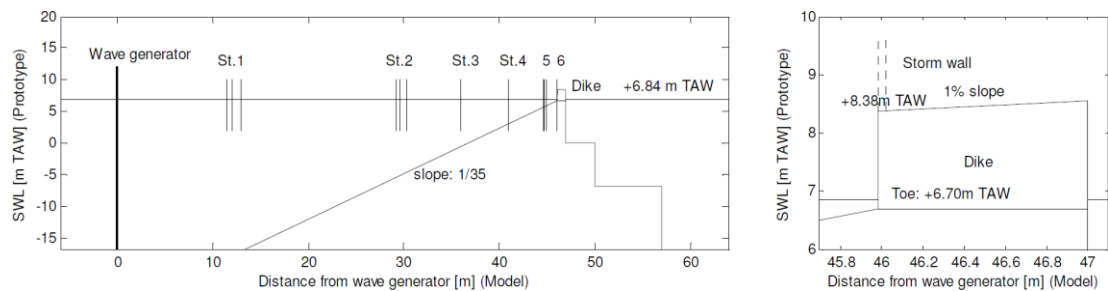
- A numerical study on the effect of beach nourishment on wave overtopping in shallow foreshores (Suzuki et al., 2012);
- Depth-induced wave breaking in a non-hydrostatic, near-shore wave model (Smit et al., 2013);
- Empirical parameterization of setup, swash, and runup (Stockdon et al., 2006);
- Observations of Wave-induced Set-up on a Natural Beach (King et al., 1990);
- Simulating wave setup and runup during storm conditions on a complex barred beach (Lerma et al., 2017);
- Wave setup and setdown generated by obliquely incident waves (Hsu et al., 2006);
- GLOBEX: Wave dynamics on a gently sloping laboratory beach (Ruessink et al., 2013).

In de volgende paragrafen wordt een samenvatting gegeven van deze publicaties.

In de diverse artikelen is de golfopzet steeds in een bepaalde situatie bekeken, zoals bijvoorbeeld tijdens een gootproef of een veldmeting dan wel voor monochromatische of onregelmatige golven. Hierbij is de grootte van de golfopzet afhankelijk van diverse factoren. Zo geven monochromatische unidirectionele golven in een 1D gootproef de grootste golfopzet en neemt de golfopzet af door het toepassen van bijvoorbeeld richtingspreiding, onregelmatige golven, een bepaalde hoek van inval of een 2D benadering.

2.3.1 A numerical study on the effect of beach nourishment on wave overtopping in shallow foreshores

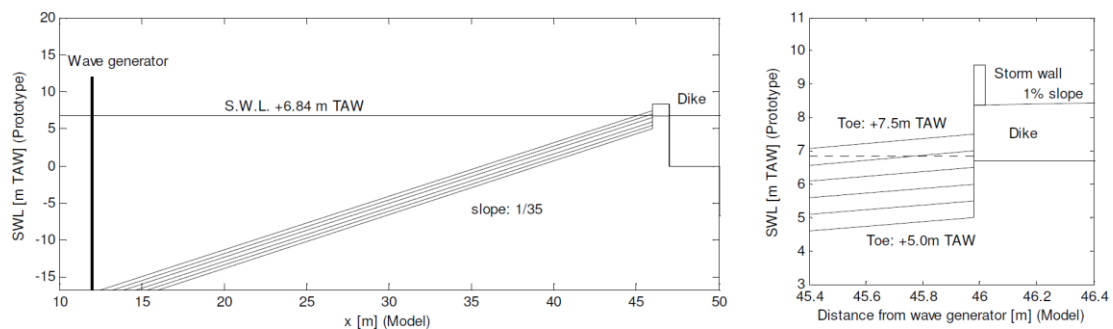
In dit artikel (Suzuki et al., 2012) is het effect van een strandsuppletie op de golfoverslag voor een dwarsprofiel langs de Vlaamse kust onderzocht. Test resultaten van het profiel in een golfgoot zijn gebruikt om een 1D SWASH model van het profiel te valideren. Vervolgens zijn er gevoeligheidsonderzoeken uitgevoerd voor verschillende soorten strandsuppleties. Behalve het overslagdebiet is ook de golfopzet gemeten in het fysische model (schaal 1:25) en berekend in het numerieke model. Het dwarsprofiel is geschematiseerd als een helling 1:35, met bovenop een zeedijk, zie Figuur 2.3. De onregelmatige golven die op de rand zijn opgelegd worden gekenmerkt (prototype schaal) door een significante golfhoogte van 4,75m en een piekperiode van 11,75s met een JONSWAP γ van 3,3. De gehanteerde waterstand is +6,84m TAW. De dijk en de stormmuur zijn weergegeven als verticale constructies in de bodemligging, maar in SWASH is dit niet mogelijk en zal er dus minimaal 1 grid afstand (dit is 1 meter op prototype schaal) tussen onderkant en bovenkant van de dijk en/of stormmuur aanwezig moeten zijn. De verticale muur heeft dan in het numerieke model een helling van ongeveer 1:0,6. Hierdoor is de uitkomst van locatie 6 waarschijnlijk niet geheel representatief voor deze schematisatie.



Figuur 2.3: Dwarsdoorsnede modelopstelling dwarsprofiel Vlaamse kust (Suzuki et al., 2012).

Gevoeligheid 1: bodemniveau

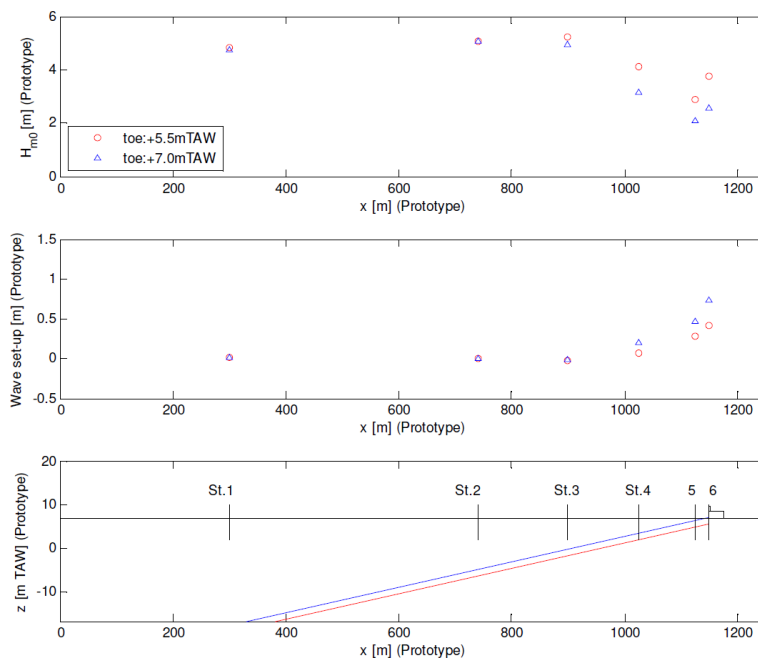
Met het gevalideerde model is eerst het effect onderzocht van het bodemniveau. Hiervoor is de bodem met behoud van helling integraal verhoogd waarbij het niveau aan de teen van de dijk varieerde (met een stapgrootte van 0,5m) tussen +5,00m TAW en +7,50m TAW. Dit is weergegeven in Figuur 2.4.



Figuur 2.4: Dwarsdoorsneden voor onderzoek naar invloed bodemniveau (Suzuki et al., 2012).

Voor een teenniveau van +5,5m TAW en +7,0m TAW zijn de golfhoogte en de golfopzet voor de meetlocaties gegeven, zie Figuur 2.5. Bij het lage teenniveau breekt de golf minder sterk dan bij het hoge teenniveau. Hierdoor is de resulterende golfopzet bij het hoge teenniveau sterker dan bij het lage teenniveau. Er wordt een golfopzet gemeten van ongeveer 0,3 à 0,5 meter. Dus hoe ondieper het is voor de teen van de dijk, des te sterker is de golfopzet.

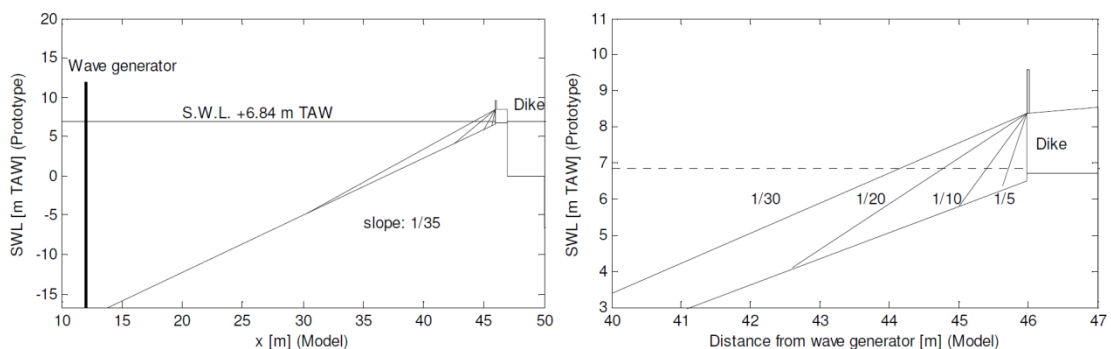
Als voor het teenniveau van +7,0m TAW de verhouding tussen golfopzet en de golfhoogte op moment van breken wordt bepaald dan wordt een verhouding gevonden van $\frac{\eta}{H_{br}} = \frac{0,7}{5} = 0,14$. Het betreft hier een opgelegd golfspectrum, dus dient de verhouding minder te zijn dan de 25% die wordt beschreven in de theorie voor monochromatische golven. Maar het is ook meer dan de circa 8% voor random golven uit de Shore Protection Manual. Omdat het brekingsproces wordt verstoord door de stormmuur komt er voor deze geometrie een niet geheel eenduidige verhouding uit tussen golfopzet en golfhoogte.



Figuur 2.5: Resultaten invloed bodemniveau voor twee situaties (Suzuki et al., 2012).

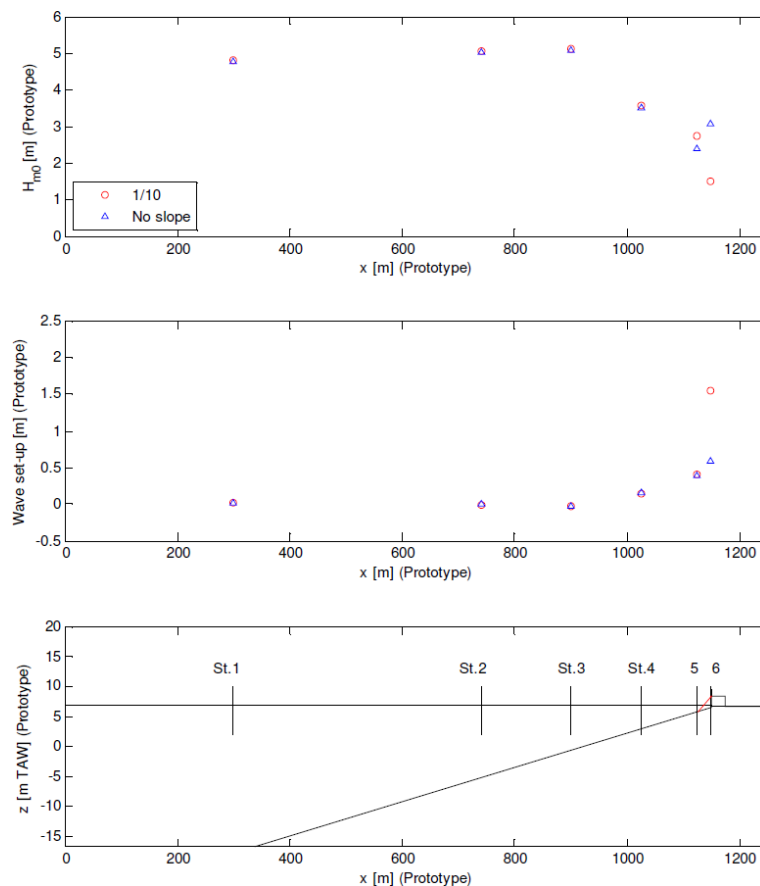
Gevoeligheid 2: bodemhelling

Hierbij is onderzocht wat de bodemhelling voor invloed heeft op o.a. de golfopzet. Hiervoor is in het numerieke model een fictieve strandsuppletie aangebracht met hellingen van 1:5, 1:10, 1:20m en 1:30. Deze variaties zijn weergegeven in Figuur 2.6. De basis voor deze dwarsprofielen vormt de 1:35 helling met een teenniveau van +6,50m TAW.



Figuur 2.6: Dwarsdoorsneden voor onderzoek naar invloed bodemhelling (Suzuki et al., 2012).

Alleen voor de situatie zonder extra helling en een 1:10 helling zijn de resultaten van de golfopzet gegeven, zie Figuur 2.7. Op meetlocatie 5 is de golfopzet orde grootte 0,4 meter voor beide gevallen, dit komt omdat op deze locatie het bodemprofiel nog net gelijk is. In het laatste meetpunt loopt de golfopzet op tot 0,5 meter voor het geval zonder extra helling en tot wel 1,5 meter voor de situatie met een 1:10 helling.



Figuur 2.7: Resultaten invloed bodemhelling voor twee situaties (Suzuki et al., 2012).

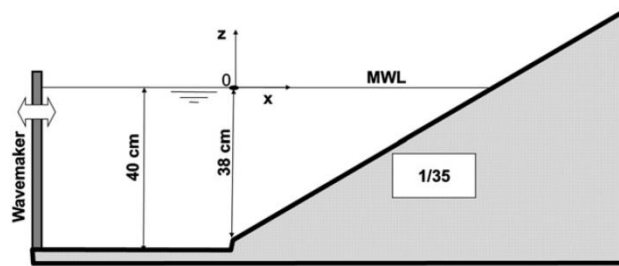
Als voor de situatie met helling 1:10 de verhouding tussen golfopzet en de golfhoogte op moment van breken wordt bepaald dan wordt een verhouding gevonden van $\frac{\eta}{H_{br}} = \frac{1,5}{5} = 0,30$. Zoals ook onder Gevoeligheid 1 gemeld, wordt dit vermoedelijk veroorzaakt door de aanwezigheid en de manier van schematiseren van de stormmuur.

Conclusie

Uit het numerieke model onderzoek van Suzuki et al. (2012) is bij de Vlaamse kust onder extreme golfcondities en voor schillende vormen van het dwarsprofiel een golfopzet gevonden tot een halve meter (en hoger). De gevonden verhouding tussen golfopzet en de maximale golfhoogte op moment van breken ligt tussen de 0,14 en 0,30.

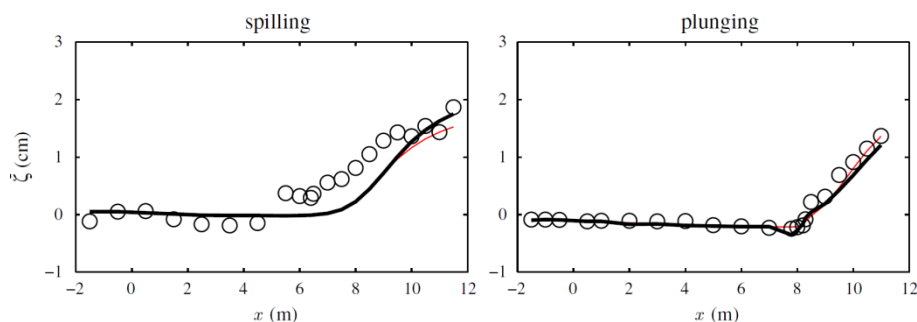
2.3.2 Depth-induced wave breaking in a non-hydrostatic, near-shore wave model

In het artikel van Smit et al. (2013) worden SWASH simulaties vergeleken met metingen van gootproeven van o.a. Ting en Kirby uit 1994. In deze 40 meter lange golfgoot worden monochromatische golven met een golfhoogte van 0,125m en met een golfperiode van 2 en van 5s gegenereerd die over een helling van 1:35 lopen. De golven met een periode van 2s zijn *spilling* en golven met een periode van 5s zijn *plunging*. De proefopstelling is weergegeven in Figuur 2.8.



Figuur 2.8: Opstelling gootproef van Ting en Kirby uit 1994 (Smit et al., 2013).

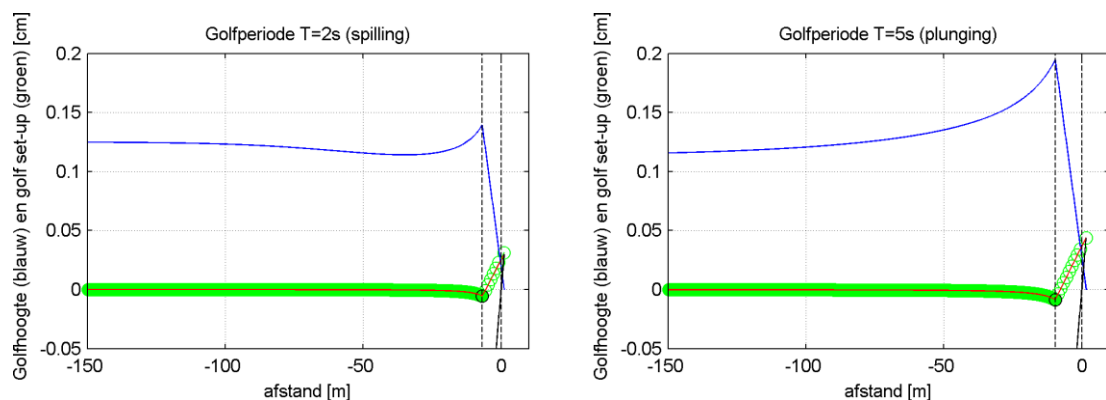
De gemeten en de met SWASH berekende golfopzet is weergegeven in Figuur 2.9. Links zijn de resultaten voor een golfperiode van 2s te zien en rechts die behorend bij een golfperiode van 5s.



Figuur 2.9: Gemeten en berekende golfopzet (Smit et al., 2013).

De metingen en de SWASH berekeningen volgen elkaar goed. Bij de *plunging* golven zijn de resultaten iets beter dan bij de *spilling* golven. In deze gootproef is de maximale golfopzet bij de *spilling* golven groter dan bij de *plunging* golven. In de uitgevoerde gootproef worden golfopzetten gemeten circa 10% van de golfhoogte op moment van breken.

Bij dit resultaat wordt door Svašek Hydraulics de kanttekening geplaatst dat de gootlengte van 40 meter te kort is om het proces van shoaling goed te reproduceren. Zo heeft de golf met een periode 5s golf een diep water golflengte van 39 meter, dit is dus bijna de gootlengte. Als met de theorie van paragraaf 2.2 een veel langere lengte van de golfgoot wordt beschouwd, waarbij een bodemhelling van 1:35 is aangehouden, wordt een tegengesteld resultaat bereikt waarbij de *plunging* golven een grotere golfopzet genereren. Deze golven hebben een grotere golfperiode en voelen de bodem dus eerder. Hierdoor zal de golfhoogte door shoaling ook groter worden dan bij golven met een periode van 2s. Een grotere golfhoogte resulteert in een grotere golfopzet. De golfopzet voor een golfperiode van 2s is ongeveer 3cm en voor een golfperiode van 5s ongeveer 4,5cm. Dit is circa 25% van de golfhoogte op moment van breken. In Figuur 2.10 is dit resultaat weergegeven, waarbij de golfhoogte en de golfopzet over de laatste 150m zijn afgebeeld.



Figuur 2.10: Theoretische golfopzet en golfhoogte bij een veel langere golfgoot (berekend door Svašek Hydraulics).

2.3.3 Empirical parameterization of setup, swash, and runup

In dit artikel (Stockdon et al., 2006) is aan de hand van 10 verschillende veldmetingen een empirische parametrisatie uitgevoerd van onder andere de golfopzet. Het bleek dat de golfopzet aan de waterlijn in sommige gevallen het best kan worden beschreven met een op het Irribaren getal gebaseerde uitdrukking waarin de gemiddelde helling van de vooroever, de significante diep water golfhoogte en de diep water golfhoogte zijn verwerkt. Van de 10 veldmetingen bevinden zich er twee op een locatie op Terschelling, de overige bevinden zich in de Verenigde Staten (Duck, Scripps Beach, San Onofre, Gleneden en Agate Beach). Een overzicht van de verschillende veldmetingen met de gemiddelde condities is gegeven in Figuur 2.11. Hierin is de helling β de gemiddelde helling van de vooroever en is gelijk aan $\tan\alpha$ in de hierna volgende formules. De helling van de onderzochte locaties varieert tussen de 1:9 en 1:100.

Site	Date	$\overline{H_s}(m)$	$\overline{T_0}(s)$	$\overline{\beta}_r$	$\overline{\xi_0} \pm \sigma$	$N (N_{\text{single}})$
Duck, NC (Duck82)	5–25 Oct 1982	1.7	12.0	0.11	1.4±0.5	149 (36)
Scripps Beach, CA	26–29 Jun 1989	0.7	10.0	0.04	0.6±0.1	42 (41)
Duck, NC (Delilah)	6–19 Oct 1990	1.5	8.9	0.10	0.9±0.4	1829 (138)
San Onofre, CA	16–20 Oct 1993	0.8	14.9	0.10	2.2±0.3	59 (59)
Gleneden, OR	26–28 Feb 1994	2.1	12.4	0.08	0.9±0.2	52 (42)
Terschelling, NL	2–22 Apr 1994	2.4	8.0	0.02	0.1±0.04	41 (6)
Terschelling, NL	1–21 Oct 1994	1.4	8.1	0.01	0.1±0.05	27 (8)
Duck, NC (Duck94)	3–21 Oct 1994	1.5	12.1	0.08	1.1±0.3	975 (52)
Agate Beach, OR	11–17 Feb 1996	2.5	13.2	0.02	0.2±0.05	126 (14)
Duck, NC (SandyDuck)	3–30 Oct 1997	1.3	9.5	0.10	1.2±0.7	491 (95)

Figuur 2.11: Gemiddelde condities voor elke meetlocatie (Stockdon et al., 2006).

Vanuit de lineaire dispersie relatie kan de diep water golfhoogte worden beschreven als:

$$L_0 = \frac{gT_p^2}{2\pi} \quad \text{Eq. 2.16}$$

Het Irribaren getal (ook wel brekerparameter) is dan:

$$\xi_0 = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H_{s,0}/L_0}} \quad \text{Eq. 2.17}$$

Aan de hand van de brekerparameter kan worden bepaald of er sprake is van *spilling*, *plunging*, *surgung* of *collapsing* golven. In Tabel 2.1 zijn aan de hand van de brekerparameter de verschillende breker golven gedefinieerd.

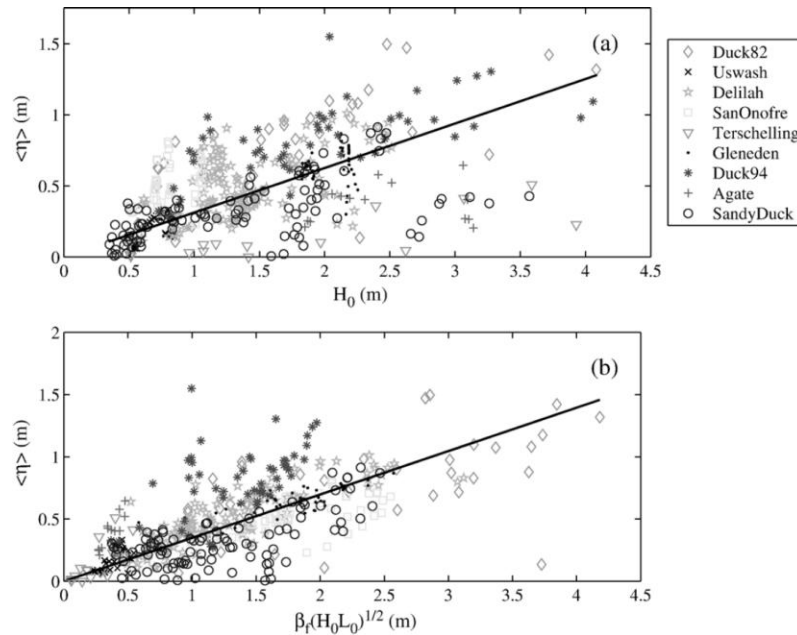
Tabel 2.1: Breker type aan de hand van brekerparameter.

Breker type	ξ_0 bereik
Surgung en collapsing	$\xi_0 > 3,3$
Plunging	$0,5 \xi_0 < 3,3$
Spilling	$\xi_0 < 0,5$

Op basis van 491 metingen is geen constante relatie gevonden tussen de golfopzet η en de significante golfhoogte op diep water $H_{s,0}$, zie afbeelding (a) in Figuur 2.12. De parametrisatie van de golfopzet verbeterde door het toevoegen van de diep water golfhoogte en golfhoogte en de helling van de vooroever, wat resulteerde in:

$$\eta = 0,35 \tan \alpha \sqrt{H_{s,0} L_0} \quad \text{Eq. 2.18}$$

Het resultaat hiervan is weergegeven in afbeelding (b) in Figuur 2.12.

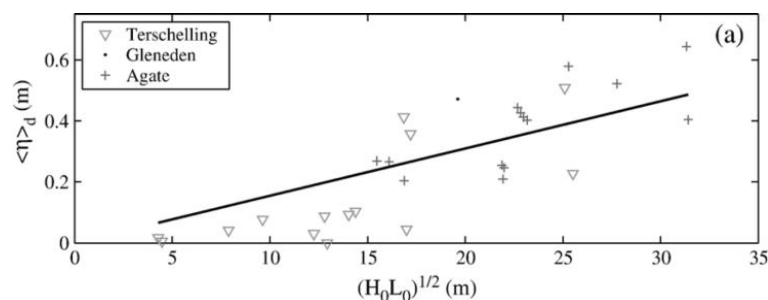


Figuur 2.12: (a) Golfopzet versus golfhoogte en (b) golfopzet versus $\tan \alpha (H_0 L_0)^{1/2}$ (Stockdon et al., 2006).

Indien alleen de sterk dissiperende condities ($\xi_0 < 0,3$) worden bekeken dan volgt daaruit dat de bodemhelling geen toegevoegde waarde heeft in de parametrisatie van de golfopzet. De strandprofielen voor de Nederlandse duinen vallen bij maatgevende golven onder deze sterk dissiperende condities. De vergelijking voor de golfopzet wordt dan:

$$\eta_d = 0,016 \sqrt{H_{s,0} L_0} \quad \text{Eq. 2.19}$$

Het resultaat van deze relatie is weergegeven in Figuur 2.13.



Figuur 2.13: Voor dissiperende condities golfopzet versus $(H_0 L_0)^{1/2}$ (Stockdon et al., 2006).

Het artikel meldt dat voor een gegeven H_0 (en T_0) de waarden voor de golfopzet voor een dissiperend strand lager zijn dan voor een reflecterend strand (bijvoorbeeld San Onofre met $\xi_0 = 2,2$) of stranden die hier tussenin liggen. Dit is te zien in Figuur 2.12 (a) waar de waarden voor η van Terschelling en Agate Beach zich aan de onderkant van de puntenwolk bevinden.

Tot slot wordt gemeld dat de golfopzet afneemt voor lagere waarden van γ ($=H/h$) en dat waarden van γ lager zijn op dissiperende stranden.

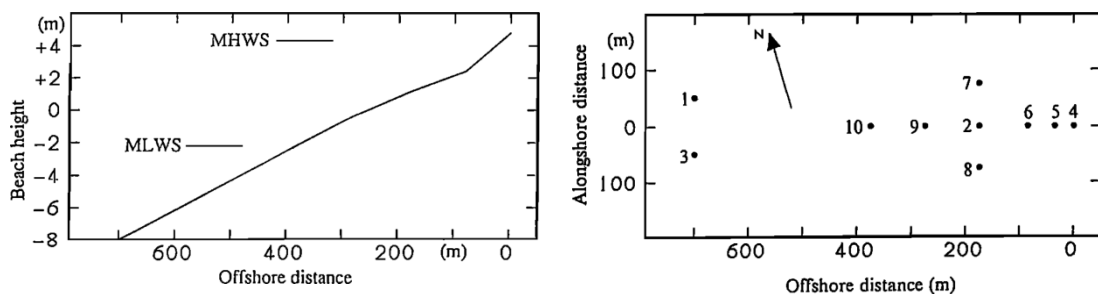
In het kader van deze verkennende studie is de gemeten golfopzet op Terschelling van april 1994 vergeleken met de benadering uit de SPM, zie Figuur 2.2. Voor de gemiddelde golfcondities ($H_s=2,4\text{m}$ en $T_0=8,0\text{s}$) en gemiddelde bodemhelling ($\beta=0,02$) is de data uit Figuur 2.11 gebruikt, waarmee een golfsteilheid wordt berekend van ongeveer 0,02. Uit Figuur 2.2 kan dan worden afgelezen dat de golfopzet ongeveer 9% van de significante diep water golfhoogte is, uitkomend op 0,22m. Indien voor deze gemiddelde golfcondities de formule van Stockdon et al. (Eq. 2.19) wordt gebruikt dan wordt de golfopzet:

$$\eta_d = 0,016 \sqrt{H_{s,0} L_0} = 0,016 \cdot \sqrt{2,4 \cdot 100} = 0,25\text{m}$$

Hiermee liggen voor de onderzochte condities op Terschelling beide benaderingen dicht bij elkaar.

2.3.4 Observations of Wave-induced Set-up on a Natural Beach

In dit artikel (King et al., 2013) worden metingen op een natuurlijk strand in Devon, Engeland, geanalyseerd. In Figuur 2.14 zijn het strandprofiel en de meetlocaties gegeven.



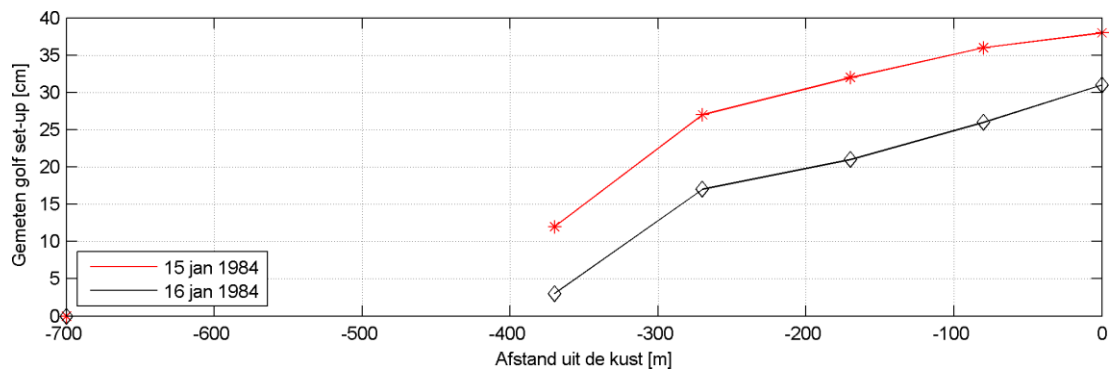
Figuur 2.14: Dwarsdoorsnede strandprofiel (links) en locatie meetstations (rechts), (King et al., 2013).

In het artikel worden de metingen van twee stormen gepresenteerd. Deze zijn gegeven in Tabel 2.2.

Tabel 2.2: Metingen golfopzet Devon, Engeland (King et al., 2013).

Station	15 januari 1984 – $H_{rms, station 1}=308\text{cm}$			16 januari 1984 – $H_{rms, station 1}=264\text{cm}$		
	waterstand [cm]	Water diepte [cm]	Golfopzet [cm]	waterstand [cm]	Water diepte [cm]	Golfopzet [cm]
1	249	1057	0	322	1130	0
10	261	496	12	325	560	3
9	276	304	27	339	367	17
7	281	209	32	343	271	21
6	285	61	36	348	124	26
Kustlijn	287	0	38	353	0	31

Met behulp van deze metingen en een schatting van de afstand van de locatie vanuit de kust is de golfopzet langs het profiel weergegeven in Figuur 2.15. De laatste 300 meter vertoont de golfopzet een min of meer lineair verloop.



Figuur 2.15: Weergave van de gemeten golfopzet in het dwarsprofiel gedurende 2 stormmomenten.

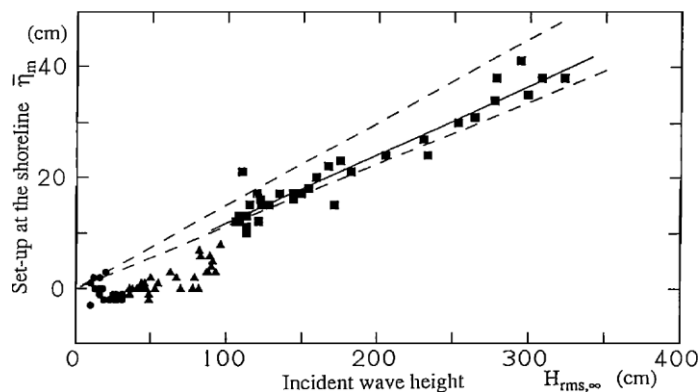
De golfhoogte op moment van breken is niet bekend, maar als de golfopzet wordt gecorreleerd aan de diep water golfhoogte op station 1, waarbij de H_{rms} wordt omgerekend naar H_{m0} door te vermenigvuldigen met een factor $\sqrt{2}$, dan wordt een verhouding η/H_{m0} gevonden van rond de 0,08. Dit komt overeen met de 8% zoals genoemd in paragraaf 2.2 voor random golven.

Als er wordt uitgegaan van Eq. 2.14 voor monochromatische golven (zie paragraaf 2.2) dan wordt in het artikel voorgesteld om voor random golven de γ te vervangen door een γ_{rms} en de golfhoogte door de H_{rms} op diep water. Voor de γ_{rms} wordt een waarde geadviseerd van 0,3 à 0,4. Hiermee kan de volgende vergelijking voor de verhouding tussen de diep water golfhoogte en de golfopzet worden verkregen:

$$\Delta\bar{\eta}_{netto} = \frac{5}{16}\gamma_{rms}H_{rms} = \frac{5}{16}\gamma_{rms} \frac{H_{m0}}{\sqrt{2}} \approx 0,08H_{m0} \quad \text{Eq. 2.20}$$

Dit resultaat is vergelijkbaar met de benadering uit de Shore Protection Manual.

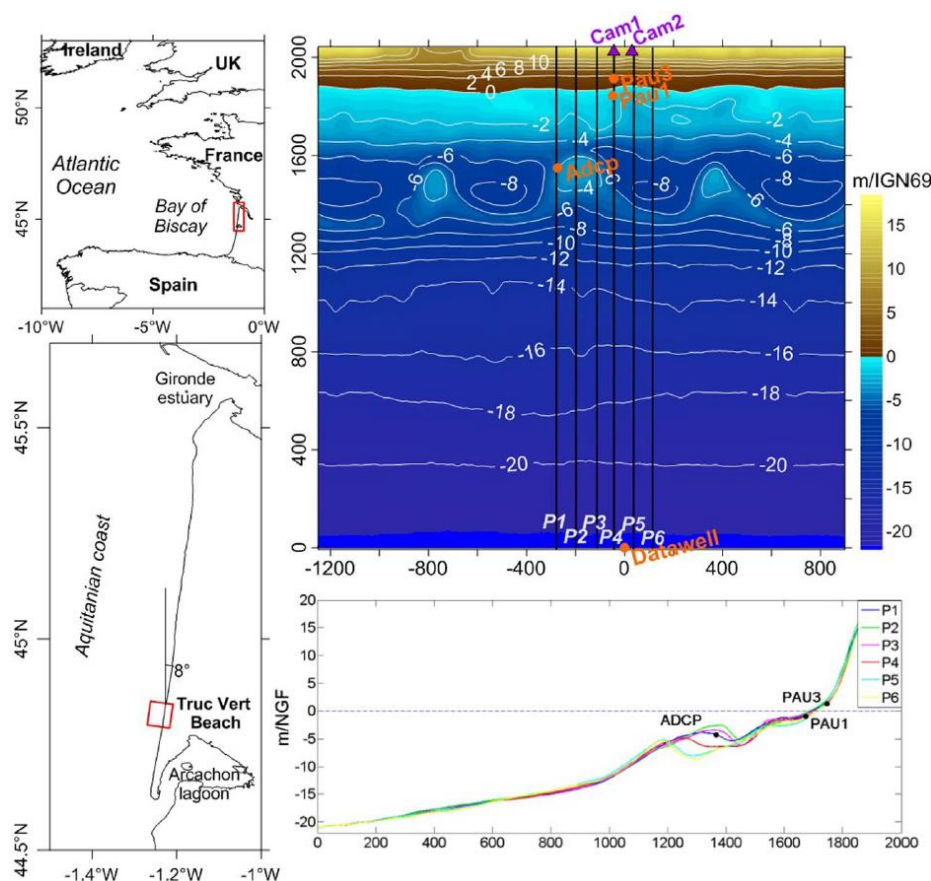
Verder laat het artikel zien dat er een lineaire relatie bestaat tussen de inkomende golfhoogte en de gemeten golfopzet, zie Figuur 2.16. Dit komt uiteraard overeen met de formule uit Eq. 2.20.



Figuur 2.16: relatie tussen inkomende golfhoogte en golfopzet (King et al., 2013).

2.3.5 Simulating wave setup and runup during storm conditions on a complex barred beach

In het artikel van Lerma et al. (2017) zijn tijdens een storm metingen uitgevoerd op een locatie langs de Franse Atlantische kust. Met het numerieke model SWASH zijn de metingen gereproduceerd, waarbij goede resultaten zijn behaald. Figuur 2.16 laat de meetlocatie en de lokale bodemligging zien.



Figuur 2.17: Meetlocatie langs de Franse Atlantische kust en lokale bodemligging (Lerma et al., 2017).

Tijdens de golfopzet metingen was de golfconditie op circa 1,5 kilometer uit de kust, $H_s=8,2\text{m}$ en $T_p=18,3\text{s}$. Er is een maximale golfopzet gemeten van ongeveer 0,7 meter. Op basis hiervan wordt dan een verhouding η/H_s gevonden van circa 0,08 à 0,09. Dit komt goed overeen met de gevonden relatie voor random golven uit de Shore Protection Manual en uit de metingen bij Devon (King et al., 2013).

Als voor deze metingen de parametrisatie van Stockdon et al. (2006) wordt toegepast dan dient eerst de brekerparameter te worden beschouwd. Deze varieert op de vooroever tussen de 0,06 en 0,30 waardoor de formulering voor sterk dissiperende stranden (Eq. 2.19) moet worden gebruikt:

$$\eta_d = 0,016 \sqrt{H_{s,0} L_0} = 0,016 \sqrt{8,2 \cdot 522} = 1,05\text{m}$$

Hiermee komt Stockdon et al. hoger uit dan de gemeten golfopzet. Indien toch de formulering voor niet sterk dissiperende stranden wordt gebruikt (Eq. 2.18), waarbij een gemiddelde helling tussen NGF-12,5m en NGF+0m van 1:55 wordt aangehouden, dan komt de golfopzet uit op:

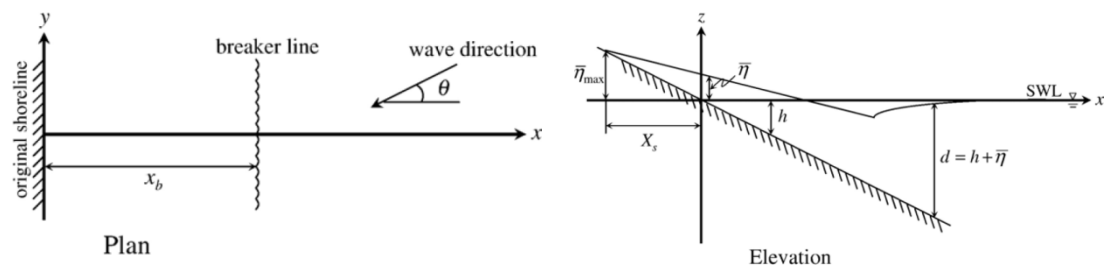
$$\eta = 0,35 \tan \alpha \sqrt{H_{s,0} L_0} = 0,35 \cdot \frac{1}{55} \cdot \sqrt{8,2 \cdot 522} = 0,42\text{m}$$

Beide benaderingen met Stockdon et al. (2006) leveren niet de gemeten golfopzet van circa 0,7m. De simpele relatie van $\eta \approx 0,08 H_0$ lijkt het dan een stuk beter te doen voor deze situatie.

2.3.6 Wave setup and setdown generated by obliquely incident waves

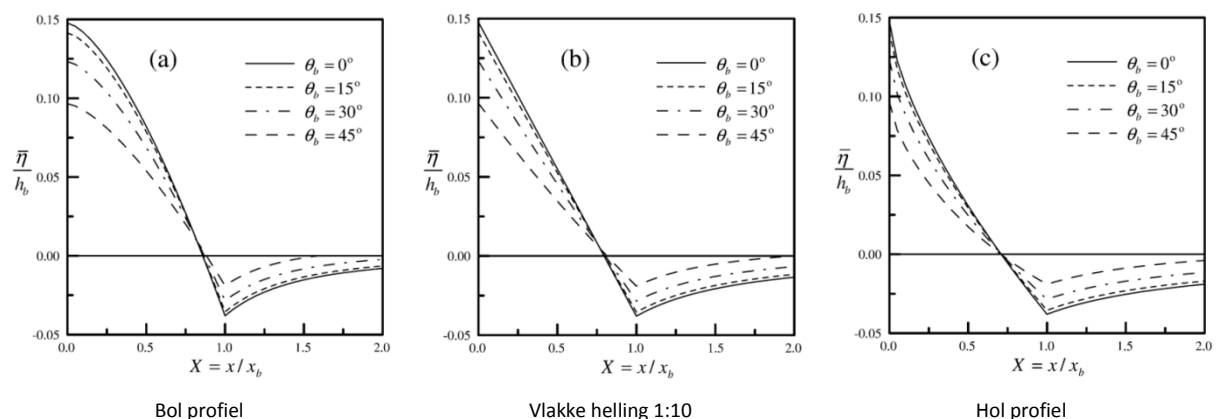
In dit artikel (Hsu et al., 2006) is een analytische theorie ontwikkeld voor de golf setdown en golfopzet bij schuin invallende golven. Belangrijke aannames zijn getest gedurende fysische modelproeven in een golf bassin, hierbij was er een goede vergelijking tussen theorie en praktijk. Naast verschillende hoeken van inval zijn ook drie verschillende bodemprofielen onderzocht; met

een vlakke helling, een bolle vorm en een holle vorm. Een schematische weergave van het bovenaanzicht en het zijaanzicht in geval van een vlakke helling is gegeven in Figuur 2.18.



Figuur 2.18: Schematische weergaven van boven- en zijaanzicht (Hsu et al., 2006).

Voor invallende monochromatische golven met een hoek van inval 0° , 15° , 30° en 45° is de golf setdown en golfopzet berekend. Het resultaat is in Figuur 2.19 gepresenteerd als functie van de dimensieloze golfopzet η/h_b . In de theorie zoals gepresenteerd in paragraaf 2.2 wordt in vergelijking 2.14 vermeld dat voor monochromatische golven geldt dat de golfopzet gelijk is aan ongeveer $0,20d_{br}$ (waarbij h_b en d_{br} dezelfde waterdiepte bij breken betreft). In de resultaten van het onderzoek uit dit artikel wordt een verhouding van ongeveer 0,15 gevonden voor loodrecht invallende golven. Bij schuin invallende golven wordt voor de golfopzet lagere waarden gevonden. Voor een hoek van inval van 15° is de afname nog klein ($\pm 7\%$), bij 30° is de afname ongeveer 15% en voor 45° is dit circa 35%. De vorm van het strandprofiel maakt niet uit voor de uiteindelijk bereikte golfopzet. De golfopzet lijkt min of meer evenredig met de cosinus van de hoek van inval.



Figuur 2.19: Resultaat analytische oplossing voor random golven onder verschillende hoeken van inval voor verschillende vormen van het strandprofiel (Hsu et al., 2006).

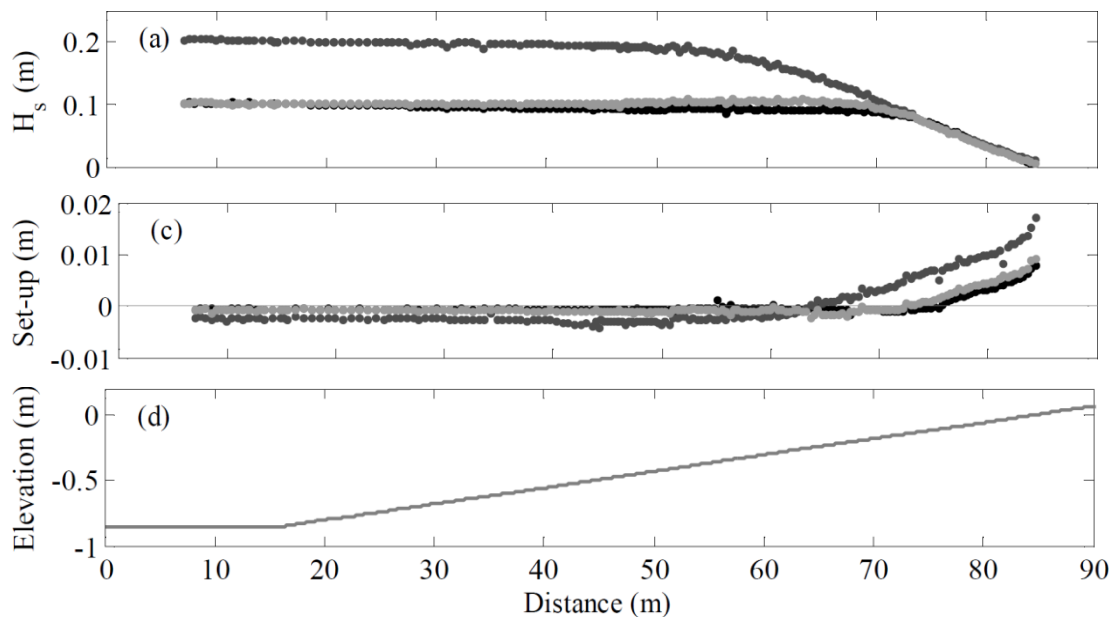
2.3.7

GLOBEX: Wave dynamics on a gently sloping laboratory beach.

In het artikel van Ruessink et al. (2013) is, in het kader van het GLOBEX project, laboratorium onderzoek gedaan naar golven op een flauw talud van 1:80. In de 110m lange Scheldegoot van Deltares zijn diverse metingen verricht waaronder ook naar golfopzet. Voor een drietal golfcondities, zie Tabel 2.3, is het verloop van de golfhoogte en de golfopzet in de goot weergegeven in Figuur 2.20. Voor de experimenten met een golfhoogte van 0,10m is de gemeten golfopzet 8 à 9mm en voor een golfhoogte van 0,20m is een golfopzet gemeten van 18mm.

Tabel 2.3: Opgelegde golfcondities golfgootproef Ruessink et al. (2013).

Run	H_s [m]	T_p [s]	Opmerkingen
A1	0,10	1,58	JONSWAP, $\gamma=3,3$; prototype: $H_s=2m$; $T_p=7s$
A2	0,20	2,25	JONSWAP, $\gamma=3,3$; prototype: $H_s=4m$; $T_p=10s$
A3	0,10	2,25	JONSWAP, $\gamma=20$; prototype: $H_s=2m$; $T_p=10s$



Figuur 2.20: Verloop golfhoogte en golfopzet in de Scheldegoet (Ruessink et al., 2013).

In Tabel 2.4 zijn voor de 3 golfcondities de verhouding H_0/L_0 en de brekerparameter ξ gegeven. Op basis van de Shore Protection Manual met behulp van Figuur 2.2 en op basis van formule (Eq. 2.19) van Stockdon et al. (2006) is de golfopzet nagerekend. Het resultaat is gegeven in Tabel 2.4. In absolute zin lijken de berekende golfopzetten dicht bij elkaar te liggen, relatief gezien geeft de formule van Stockdon et al. (2006) een ongeveer 25% tot 40% hogere golfopzet. Algemeen bekeken geeft de benadering uit de SPM net iets betere resultaten.

Tabel 2.4: Berekende golfopzet volgens SPM (1984) en Stockdon et al. (2006).

Run	H_s [m]	T_p [s]	H_s/L_0 [-]	ξ [-]	η [m] (SPM)	η [m] (Stockdon)
A1	0,10	1,58	0,026	0,078	0,008	0,010
A2	0,20	2,25	0,025	0,079	0,016	0,020
A3	0,10	2,25	0,013	0,111	0,010	0,014

2.4 Informatie uit interviews

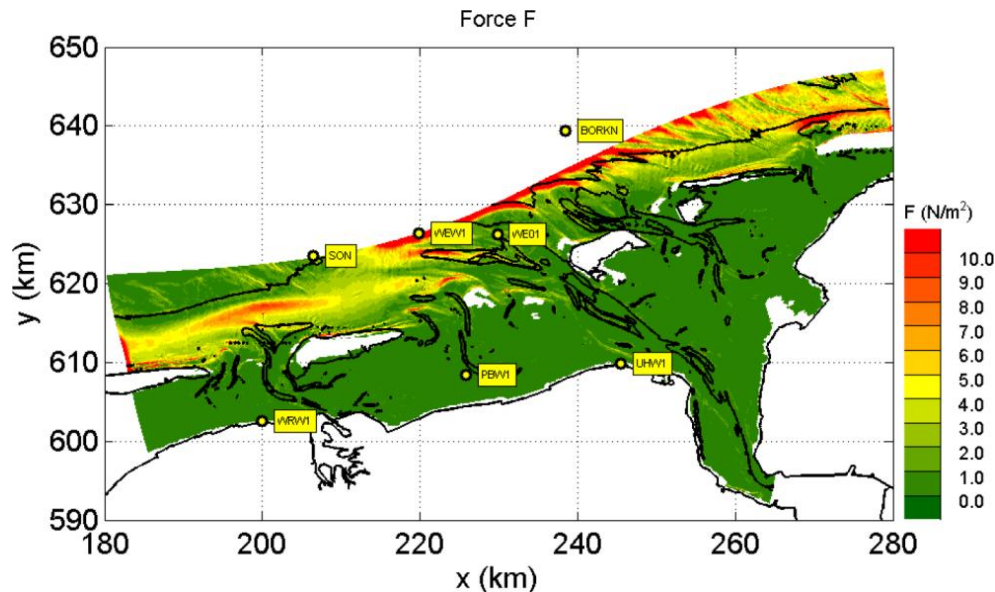
In het kader van deze studie zijn diverse mensen geïnterviewd. De informatie uit gesprekken met Hans de Waal, Quirijn Lodder, Caroline Gautier en Vincent Vuik worden verderop in dit rapport behandeld. Met Gerbrant van Vledder is in algemene zin gesproken over de relevantie van golfopzet. De informatie uit dit interview is hier samengevat.

Voor de golfopzet langs de Nederlandse kust zijn er twee schalen van belang:

- De grootschalige situatie zoals de buitendelta bij de Waddenzee of de voordelta bij de Zeeuwse kust. Hier wordt de eerste golfopzet gegenereerd. Afhankelijk van geometrie van het kuststelsel zal deze golfopzet wel of niet van invloed zijn ter plaatse van de waterkering.
- De kleinschalige situatie, dit is de lokale golfopzet die optreedt nabij de waterkering.

Voor het optreden van golfopzet in de Waddenzee is het SBW rapport van Alkyon (2009) een goede referentie. Hierin staat dat voor de Waddenzee circa 10% van de totale opzet kan worden toegeschreven aan golfopzet, de rest is hoofdzakelijk windopzet. De golfopzet wordt veroorzaakt door het breken van de golven op de buitendelta en wordt vervolgens via de zeegaten de Waddenzee opgestuwd.

In de Alkyon studie is met behulp van SWAN onderzoek gedaan naar onder andere de golfkrachten op de Waddenzee tijdens de storm van 9 november 2007, zie Figuur 2.21.



Figuur 2.21: Berekende golfkrachten met SWAN op buitendelta en in de Waddenzee (Alkyon, 2006).

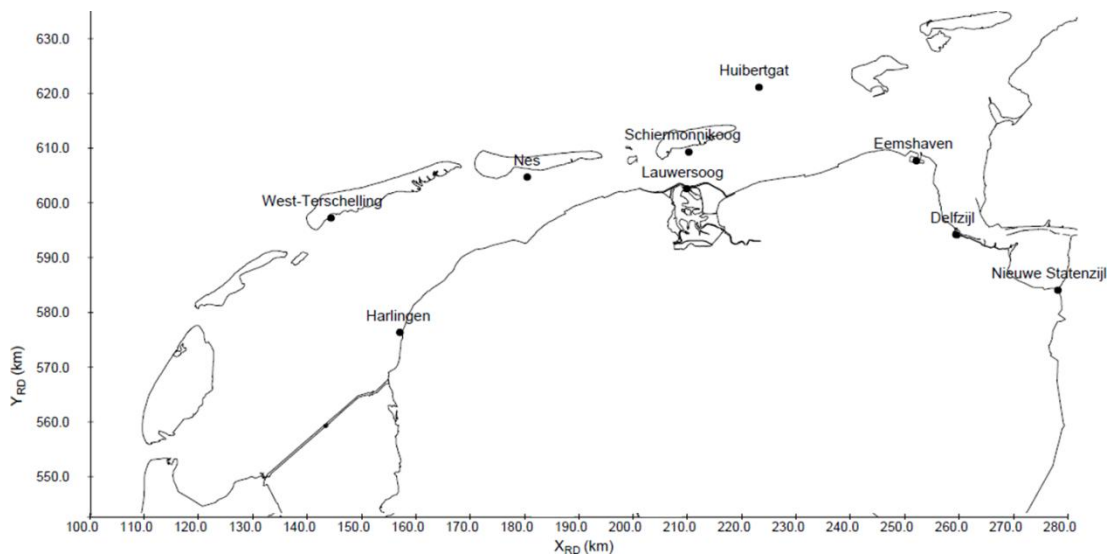
In deze figuur is te zien dat er op de buitendelta, aan de rand van de zeegaten, veel golfkrachten worden opgewekt en dat er in de Waddenzee zelf nauwelijks krachten zichtbaar zijn. De golfkracht is verantwoordelijk voor de golfspanning en dit is het enige mechanisme waardoor golfenergie wordt overgedragen aan de waterkolom. In de Waddenzee trad tijdens deze storm een waterstand op van 3 à 4 meter boven NAP.

Vanaf de Noordzee gezien is de Waddenzee een soort fort, met de eilanden als een soort kantelen. De bodem komt omhoog en houdt heel veel water tegen. Op de grens van de muren van het fort, de Waddenzee, treden grote golfkrachten op. Daar breken de golven waardoor er in de Waddenzee een evenwichtssituatie zal ontstaan. De golfopzet die op de buitendelta wordt gegenereerd heeft dus direct invloed op de waterstand in de Waddenzee die hierdoor in zijn geheel wordt verhoogd.

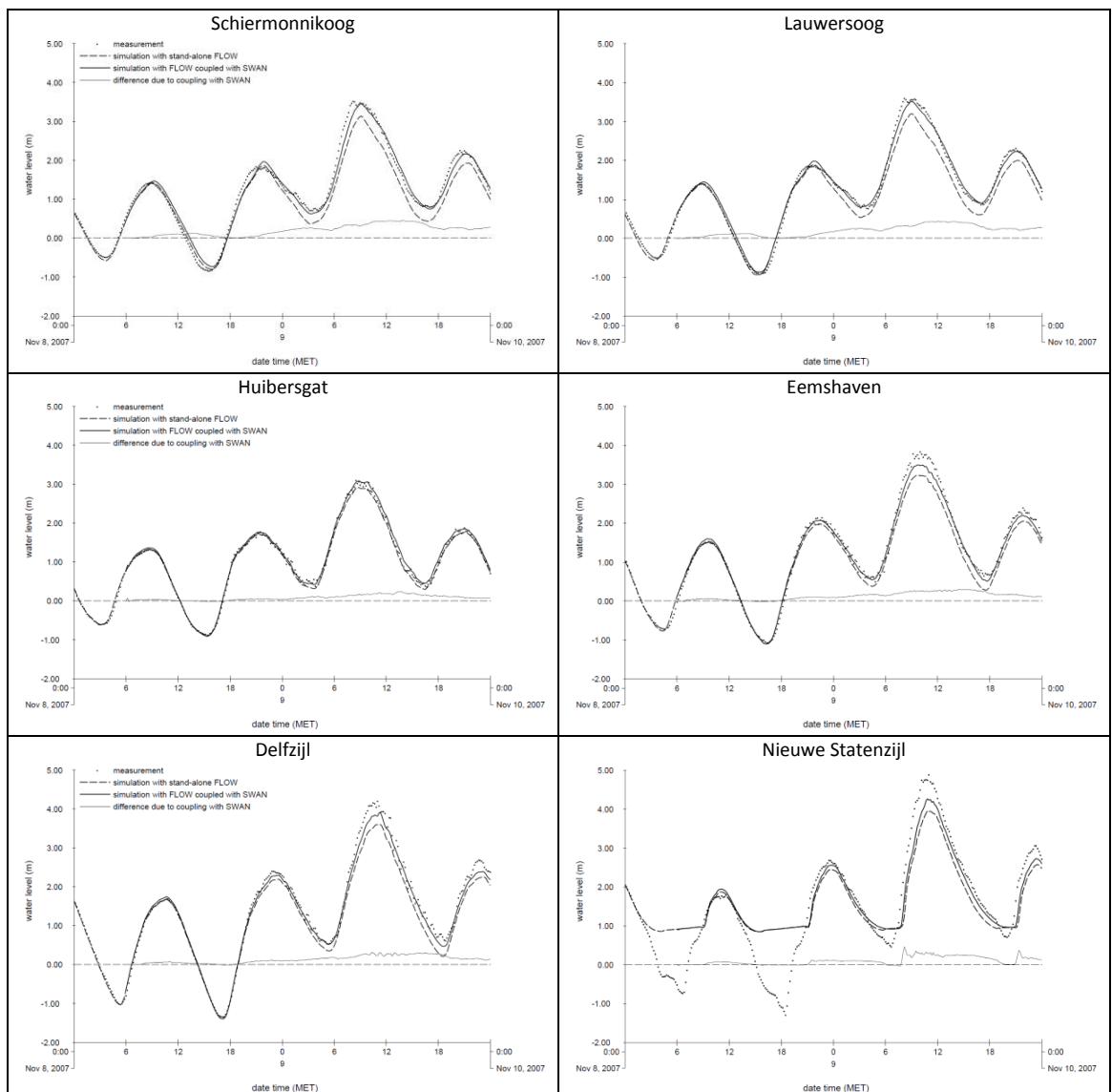
De windrichting tijdens een storm is ook van belang. Bij zuidwesten wind komt er veel water bij Texel de Waddenzee op en stroomt een deel er bij Terschelling weer uit, terug de Noordzee op. Maar bij windrichting noordwest zit het water als het ware opgesloten in de Waddenzee en is de verhoging van de waterstand in de Waddenzee door golfopzet op de buitendelta het grootst.

Behalve SWAN berekeningen zijn er ook berekeningen gemaakt waarbij SWAN gekoppeld is met een stromingsmodel zodat de golfspanning uit SWAN kan worden uitgewisseld met het stromingsmodel. Door die berekeningen te doen met en zonder koppeling kan het golf geïnduceerde deel eruit gehaald worden. Het is dus wezenlijk om een gekoppeld model te gebruiken om de golfopzet mee te kunnen nemen.

Als metingen van de waterstand op stations in de Waddenzee worden vergeleken met de resultaten van alleen een stromingsmodel en een gekoppeld golf- en stromingsmodel dan geeft deze laatste veel betere resultaten. In Figuur 2.22 zijn de uitvoerlocaties van de modelresultaten en de waterstandmeetstations in de oostelijke Waddenzee gegeven. In Figuur 2.23 zijn voor zes stations de gemeten en de berekende waterstanden gegeven. Het verschil tussen de stand-alone stromingsberekening en de gekoppelde stromingsberekening met SWAN is een maat voor de golfopzet. Op de Waddenzee varieert de golfopzet dan ongeveer tussen de 0,3m en 0,5m. Ook op het station Huibertgat, dat zich op de buitendelta bevindt, is al iets van 0,2m à 0,3m aan golfopzet te zien.



Figuur 2.22: Uitvoerlocaties gekoppeld golf- stromingsmodel en tevens waterstandmeetstations (Alkyon, 2006).



Figuur 2.23: Gemeten en berekende waterstanden voor 6 stations in de oostelijke Waddenzee (Alkyon, 2006).

Voor het 1D modelleren van golfopzet zijn SWAN en SWASH toepasbaar. Voor 2D modelleren moet je een koppeling maken tussen een golfmodel en een stromingsmodel. Bedenk dat veel golfsystemen in werkelijkheid 2D zijn, waardoor de 1D modellen de golfopzet waarschijnlijk zullen overschatten. De 2D geometrie is erg belangrijk, is er een open of een gesloten kust. Bijvoorbeeld in de monding van de Westerschelde, daar zou bij een plaat in het midden golfopzet kunnen optreden, maar als er dan een diepe geul aan de zijkant ligt, dan zal het water weer terugstromen richting de Noordzee, waardoor het ontstaan van golfopzet wordt genivelleerd. Bij de Waddenzee is, zoals hierboven beschreven, 2D ook erg belangrijk. Dus een 2D beschouwing is voor de Nederlandse kust van belang. Overwogen kan worden om met SWAN de golfkrachten inzichtelijk te maken voor de hele Nederlandse kust om zo een inschatting te maken van de locatie van de brekerzones. Daarmee zijn dan de primaire gebieden voor de opwekking van golfopzet in kaart gebracht.

Voor Egmond aan Zee heeft Gerbrant van Vledder in het verleden 2D SWASH berekeningen gemaakt (Van Vledder et al., 2013). Hierin is ook gekeken naar het effect van richtingspreiding op de individuele golfhoogte verdeling, wat weer verband houdt met het breken en dus de golfopzet. Er is in deze studie niet expliciet gekeken naar de golfopzet, maar de data van deze berekeningen is nog beschikbaar voor eventuele verdere analyse.

Aan het 2D rekenen met SWAN en een stromingsmodel zit nog wel een aandachtspunt dat nader moeten worden uitgezocht. Dit is de mate van golf breken dat in het model wordt gestopt. Het is namelijk de vraag of de brekerformulering van Battjes-Janssen (vaste γ in het rekendomein) nog bruikbaar is of dat de nieuwe β -kd formulering (gebiedsafhankelijke brekerparameter) gebruikt moet gaan worden. Voor SWAN is het één en nader onderzocht in Salmon et al. (2015) en in Salmon en Holthuijsen (2015). Maar de link naar een gekoppeld model is nog niet eerder onderzocht en daar zit volgens Gerbrant van Vledder nog een cruciale onzekerheidsfactor in.

Samengevat: [a] in de Waddenzee treedt een verhoging van de waterstand op als gevolg van golfopzet in de buitendelta, [b] koppeling met een stroommodel is vereist om golfopzet in complexe geometrieën te bepalen, [c] voor een aantal aspecten, zoals richtingspreiding en brekercriteria, kan nader onderzoek betere inzichten opleveren, en [d] de lokale condities (waterdiepte, golfkentalen) zijn de primaire indicator voor de plaatsen waar energie wordt overgedragen van golven naar stroom en waar golfopzet relevant kan zijn.

3 RELEVANTIE GOLFOFZET NEDERLANDSE WATERSYSTEMEN

3.1 Inleiding

De vraag luidt: “Hoe relevant is golfopzet in maatgevende condities voor de Nederlandse kust en grote binnenwateren en wat is de noodzaak om deze mee te nemen?” Om deze vraag te beantwoorden zijn 8 dwarsprofielen uit vier verschillende watersystemen bekeken. Voor elk van deze dwarsprofielen zijn met behulp van de numerieke modellen SWAN en SWASH 1D berekeningen uitgevoerd om de golfopzet te bepalen. De opzet van deze numerieke berekeningen zal nader worden toegelicht in Paragraaf 3.2.

Voor de vier verschillende watersystemen zijn steeds 2 verschillende situaties bekeken, waarvoor vervolgens een representatieve locatie in Nederland is gezocht. Voor ieder van deze 8 dwarsprofielen zullen de uitkomsten van de numerieke golfopzet berekeningen apart worden besproken. Uit de resultaten van de berekeningen volgt of er golfopzet nabij de kust/oever optreedt en zo ja, gebeurt dit dan vrijwel alleen landwaarts van de WBI-uitvoerpunten of is golfopzet op deze locaties ook al relevant. Tevens zullen de modeluitkomsten worden vergeleken met de theoretisch verwachte golfopzet volgens Stockdon et al. (2006). en de Shore Protection Manual. De geselecteerde dwarsprofielen waarvoor numerieke berekeningen zullen worden uitgevoerd zijn de volgende:

- Hollandse kust met duin
 - Profiel 1, met brekerbank: Delfland (Paragraaf 3.3)
 - Profiel 2, zonder brekerbank: Rijnland (Paragraaf 3.4)
- Hollandse kust met dijk
 - Profiel 3, steil voorland: Huisduinen, Noord-Holland (Paragraaf 3.5)
 - Profiel 4, flauwe en ondiepe vooroever: Goeree (Paragraaf 3.6)
- Estuaria, Waddenzee
 - Profiel 5, steile vooroever: Borssele (Paragraaf 3.7)
 - Profiel 6, breed voorland: Harlingen (Paragraaf 3.8)
- IJsselmeer
 - Profiel 7, steile vooroever: Noordoostpolder (Paragraaf 3.9)
 - Profiel 8, breed voorland: Zuidwest Friesland (Paragraaf 0)

Tot slot volgen in Paragraaf 0 en 3.12 de conclusie en de discussie.

3.2 Opzet numerieke berekeningen

Het doel van de numerieke berekeningen is om een beter inzicht te krijgen in het belang van de golfopzet in maatgevende condities voor de Nederlandse kust en grote binnenwateren. Hiertoe zijn numerieke 1D berekeningen uitgevoerd met de modellen SWAN en SWASH voor elk van de geselecteerde dwarsprofielen. De waterstanden en golfrandvoorwaarden voor deze numerieke simulaties zijn bepaald met behulp van RisKeer en/of Hydra-NL. Hiermee zijn de maatgevende condities zo goed mogelijk benaderd. Uit de resultaten van deze simulaties volgt een ruimtelijk beeld van de golfopzet, waarbij ook antwoord kan worden gegeven op de vraag of golfopzet al relevant is op de locatie van de WBI-uitvoerpunten.

3.2.1 Numerieke modellen SWAN en SWASH

SWAN (Simulating Waves Nearshore, versie 41.10) is een derde generatie golfmodel voor het berekenen golfparameters in kustgebieden, meren en estuaria. Het SWAN model is ontwikkeld door de Technische Universiteit Delft. In deze studie zal SWAN worden gebruikt voor het bepalen van golfopzet. Dit is echter alleen mogelijk indien SWAN wordt toegepast in 1D modus. Voor het bepalen van golfopzet in 2D modus is een koppeling noodzakelijk tussen SWAN en een stromingsmodel zoals bijvoorbeeld WAQUA of FINEL, zonder koppeling worden 2D golfopzet simulaties met SWAN afgeraden omdat de benadering in SWAN zijn beperkingen kent. De golfopzet die door SWAN wordt bepaald in 1D is een analytische oplossing. Zie voor meer detail <http://www.swan.tudelft.nl/> en de SWAN user manual (Delft University of Technology, 2016).

SWASH (Simulating Waves till Shore, versie 3.14) is een universeel numeriek hulpmiddel voor het simuleren van, onder andere, golftransformaties van diep water naar een strand. Ook het SWASH model is ontwikkeld door de Technische Universiteit Delft. In deze studie zal ook SWASH worden toegepast in 1D modus om de golfopzet te bepalen langs het dwarsprofiel. Zie voor meer detail <http://swash.sourceforge.net/> en de SWASH user manual (Delft University of Technology, 2015).

3.2.2 Afregelen van de modelrandvoorwaarden

De waterstanden en golftrandvoorwaarden voor de numerieke simulaties zijn, zoals eerder gezegd, afkomstig uit Riskeer en/of HR2006/Hydra-NL. De locatie in het profiel waarvoor deze randvoorwaarde is bepaald, verschilt per dwarsprofiel. Indien het WBI punt binnen het profiel valt, zoals bij de profielen 3 tot en met 8, is het doel om de opgelegde golftrandvoorwaarden zo te kiezen dat deze op het WBI-uitvoerpunt overeenkomt (+/- 5%) met de golftrandvoorwaarde uit Riskeer en/of of HR2006/Hydra-NL. Dit zal via iteratie worden bereikt voor zowel de SWAN en SWASH simulaties.

De golftrandvoorwaarden zullen worden opgelegd als JONSWAP spectrum met een piekverhogingsfactor γ van 3,3 in zowel SWAN als SWASH. Deze gamma waarde is gekozen conform de SWASH simulaties uitgevoerd door Suzuki et al. (2012) voor storm condities langs de Vlaamse kust.

3.2.3 SWAN modelinstellingen

De modelinstellingen die gebruikt worden voor de SWAN simulaties zijn overgenomen uit de SWAN benchmark simulaties voor het golfopzet experiment van Boers (1996). Een overzicht van de modelinstellingen is gepresenteerd in Tabel 3.1.

Tabel 3.1. SWAN modelinstellingen.

Model instellingen	Aan/Uit	Parameters
Wind	Aan	37 m/s, 1/10.000 jaar wind
Whitecapping	Aan	[Standaard instelling]
Quadruplets	Aan	[Standaard instelling]
Triads	Aan	[Standaard instelling]
Bottom friction	Aan	JONSWAP, 0.038 [Standaard instelling]
Breaking, gamma	Aan	0.73 [Standaard instelling]
Setup	Aan	[Standaard instelling]
Convergentie criterium	Aan	[Standaard instelling]

De SWAN simulaties zijn uitgevoerd met een grid grootte van 1 meter. Uitgevoerde gevoeligheids simulaties met een grid cel grootte van 0,25 meter lieten geen significante

veranderingen zien in de modeluitkomsten. Verder is in de SWAN simulaties een representatieve windsnelheid opgelegd.

De uitvoer van de SWAN simulaties in de vorm van berekende golfopzet en golfhoogte wordt door SWAN zelf bepaald en uitgevoerd op het moment dat de simulatie voldoende convergentie heeft bereikt.

3.2.4 SWASH modelinstellingen

De gebruikte SWASH modelinstellingen zijn gebaseerd op Suzuki et al. (2012) en op de SWASH benchmark simulaties voor het golfopzet experiment van Boers (1996). Tabel 3.2 geeft een overzicht van de gebruikte modelinstellingen in de SWASH golfopzet simulaties.

Tabel 3.2. SWASH modelinstellingen.

Model instellingen	Parameters
Wind	Geen wind opgelegd
Vertical Layers	1 (conform Suzuki et al., 2012)
Bottom friction	Manning, 0.002 [Standaard instelling]
Breaking, alpha	0.6 [Standaard instelling]
Nonhydrostatic	Keller-box Scheme
Discretization	Upwind Momentum
Time integration	Explicit 0.1 0.5

De gebruikte grid cel grootte in de SWASH simulaties is 0,25 meter, gevoeligheids simulaties met een kleinere grid cel grootte gaven vergelijkbare resultaten. Verder is er in SWASH geen wind toegepast aangezien dit alleen een windschuifspanning op het wateroppervlak uitoefent en niet bijdraagt aan golf opwekking. Opleggen van wind in SWASH leidt dus niet tot andere resultaten qua golfhoogte of golfopzet.

De uitvoer van de SWASH simulaties in de vorm van berekende golfopzet en golfhoogte wordt door SWASH bepaald over de laatste 30 minuten van de in totaal 1 uur durende simulatie. Deze 30 minuten komen overeen met de duur van de golftijdserie die wordt gesynthetiseerd op basis van het opgelegde spectrum.

3.2.5 Uitvoer golfopzet

De berekende golfopzet in SWAN en SWASH is uitgevoerd op vijf verschillende locaties: het WBI-uitvoerpunt, locaties waar de waterdiepte ten opzichte van stil water niveau respectievelijk 0, 1, 2 meter is (Stil water lijn, SWL, is rekenpeil), en de locatie waar de golfopzet maximaal is. De locatie van de maximale golfopzet is in SWAN en SWASH gekozen op de zelfde locatie in het dwarsprofiel, waarbij de locatie van de maximale golfopzet in SWAN leidend is. Hiervoor is gekozen omdat in SWASH de maximale golfopzet lastig te bepalen is, aangezien het door SWASH bepaalde absolute maximum in golfopzet meer toe te schrijven is aan het fenomeen golfoploop, zie bijvoorbeeld het middelste paneel in Figuur 3.3.

Uiteindelijk zal de maximale golfopzet berekend met SWAN en SWASH worden vergeleken met de theoretische golfopzet volgens de Shore Protection Manual en Stockdon et al. (2006). Voor een beschrijving van deze theoretische golfopzet methode zie paragraaf 2.2 en 2.3.3. Het doel van deze vergelijking is om te kijken hoe de theoretische en numeriek bepaalde golfopzet zich tot elkaar verhouden. Daarnaast kan het ook worden gebruikt om een bandbreedte af te geven over de te verwachten golfopzet.

3.2.6 Gevoeligheid golfopzet

Tot slot is ook gekeken naar de gevoeligheid van de berekende golfopzet in SWAN door het breker criterium, in dit geval de gamma waarde, te veranderen. Voor de profielen 7 en 8 in het IJsselmeer zijn extra simulaties uitgevoerd met een gamma waarde van 0,9 (vlakke bodem). Voor de andere profielen zijn extra simulaties uitgevoerd met een gamma waarde van 0,6 (steile bodem). Deze gamma waarden zijn mede gekozen op basis van het interview met Gerbrant van Vledder. Meer informatie hierover is o.a. te vinden in Salmon et al. (2015).

3.3 Profiel 1: Hollandse kust – duin zonder brekerbank, Delfland

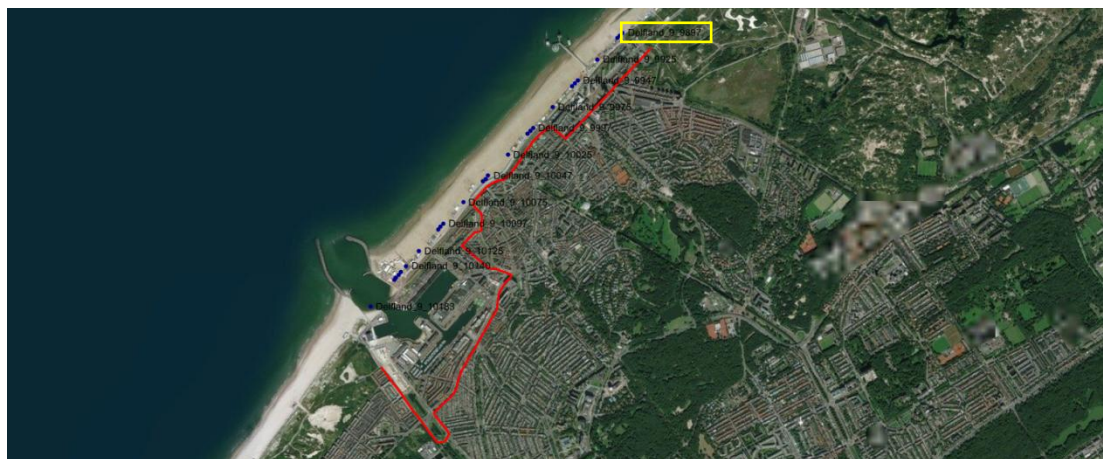
3.3.1 Kustprofiel en randvoorwaarden

Voor het kustprofiel met duin en zonder brekerbank is een dwarsprofiel gekozen net ten noorden van Scheveningen. De basis hiervoor is JARKUS raai 98.75 uit het jaar 2012. Voor de hydraulische randvoorwaarde is gebruik gemaakt van WBI-uitvoerpunt 98.97. De locatie van dit punt langs de Nederlandse kust is te zien in Figuur 3.1 en het gebruikte JARKUS profiel is weergegeven in Figuur 3.2. De rode lijn op de 20m-NAP dieptelijn geeft de locatie van het WBI-uitvoerpunt weer. De kleine bank die tussen NAP en 5m-NAP ligt, is voor deze berekening gladgestreken. Verder is het zeewaartse talud na 12m-NAP met dezelfde helling doorgetrokken tot de 20m-NAP, daar waar de golf randvoorwaarde geldt.

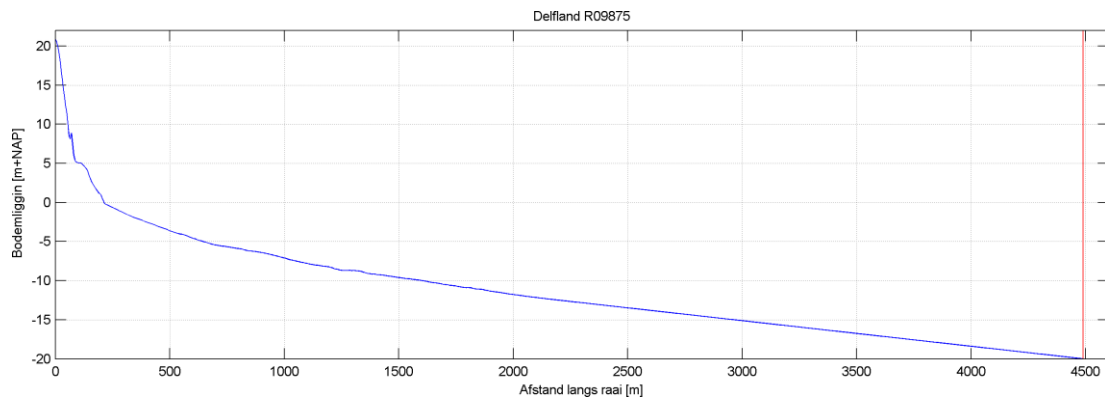
Voor de diep water randvoorwaarde is gebruik gemaakt van het rekenpeil en de golfhoogte uit RisKeer. Voor de golfperiode is voor deze locatie gebruik gemaakt van de HR2006. De hydraulische randvoorwaarden voor het WBI-uitvoerpunt zijn te zien in Tabel 3.3.

Tabel 3.3. Hydraulische randvoorwaarden uit Riskeer/HR2006 voor WBI-uitvoerpunt 98.97.

Parameter	Waarde
Rekenpeil	5,74 [m+NAP]
H _s , Significante Golfhoogte	9,03 [m]
T _p , Golfpiekperiode	13,9 [s]



Figuur 3.1: Locatie WBI-uitvoerpunt 98.97 (bron: RisKeer).



Figuur 3.2: Duinprofiel zonder brekerbank (JARKUS profiel 98.75).

3.3.2 Afregelen van de modelrandvoorwaarden

Het afregelen van het numerieke SWAN en SWASH model (zie ook paragraaf 3.2.2) voor profiel 1 (Hollandse kust – duin zonder brekerbank, Delfland) heeft in de modellen geleid tot de juiste significante golfhoogte op het WBI-uitvoerpunt (WBI-uitvoerpunt op 20m-NAP), zie Tabel 3.4. In het SWAN model komt de significante golfhoogte precies overeen met de beoogde significante golfhoogte uit RisKeer/HR2006, terwijl SWASH iets hogere golven berekent. Naast de SWAN simulaties met standaard instellingen waarbij voor golfbreken is gerekend met een gamma van 0,73 is er ook een gevoeligheidsberekening uitgevoerd met een gamma van 0,6. Dit heeft echter weinig invloed op de golfhoogte nabij het WBI-uitvoerpunt.

Tabel 3.4. Resultaat van afregelen modellen voor profiel 1, Delfland. Verificatie van de berekende significante golfhoogte in SWAN en SWASH t.o.v. de beoogde significante golfhoogte uit RisKeer op het WBI-uitvoerpunt, diepte -20 m+NAP.

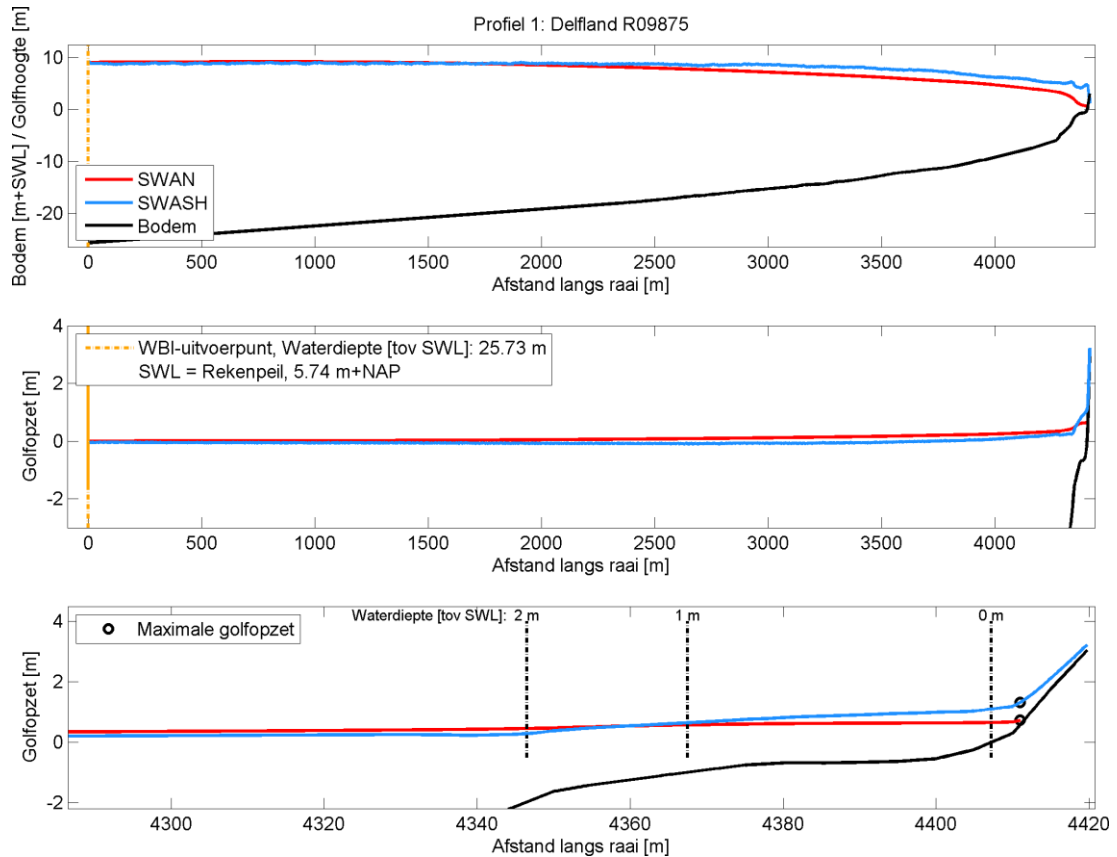
Simulatie	Beoogde golfhoogte	Berekende golfhoogte	Afwijking
SWAN, standaard instellingen [Gamma 0,73]	9,03 [m]	9,03 [m]	0 [%]
SWAN, aangepaste instellingen [Gamma 0,60]	9,03 [m]	9,03 [m]	0 [%]
SWASH, standaard instellingen	9,03 [m]	9,40 [m]	4 [%]

3.3.3 Golfopzet uitkomsten

De uitkomsten van de golfopzet berekeningen zijn visueel gepresenteerd in Figuur 3.3. In het bovenste paneel zijn de significante golfhoogtes zoals berekend met SWAN en SWASH gepresenteerd. Het middelste paneel laat de golfopzet zien over het hele domein, en in het onderste paneel is ingezoomd op het laatste deel van het talud waar de golfopzet relevant is. In dit onderste paneel is de door SWASH berekende maximale golfopzet getoond tot dezelfde locatie als waar SWAN nog golfopzet uitvoert, na dit punt vertoont de berekende golfopzet in SWASH meer golfoploop kenmerken. Daarnaast zijn de golfopzet uitkomsten ook numeriek gepresenteerd in Tabel 3.5 voor SWAN en in Tabel 3.6 voor SWASH. In deze tabellen zijn de uitkomsten gepresenteerd voor vijf uitvoerpunten; het WBI-uitvoerpunt, voor de locaties waar de waterdiepte ten opzichte van stil water niveau respectievelijk 0, 1, 2 meter zijn, en waar de golfopzet maximaal is.

De golfopzet resultaten laten zien dat SWAN aanvankelijk een hogere golfopzet berekent, wat te verklaren is door de eerder afnemende significante golfhoogte in SWAN. SWASH berekent echter dichterbij de kust een hogere golfopzet, wat geleidelijk meer overgaat in golfoploop, zie middelste paneel in Figuur 3.3. Verder wordt in de gevoeligheids simulatie met een gamma van 0,6 voor SWAN een iets lagere golfopzet berekend.

Tot slot laten de SWAN en SWASH berekeningen zien de golfopzet nabij het WBI-uitvoerpunt verwaarloosbaar is.



Figuur 3.3. Resultaten van golfopzet berekening met SWAN en SWASH voor profiel 1, Delfland.

Tabel 3.5. Resultaten van golfopzet berekeningen met SWAN op verschillende uitvoerlocaties voor profiel 1, Delfland (Waterdiepte inclusief golfopzet, Diepte t.o.v. SWL).

Simulatie	Parameter	WBI uitvoerpunt	Diepte 2 [m]	Diepte 1 [m]	Diepte 0 [m]	Maximale golfopzet
Standaard instellingen [Gamma 0,73]	Golfopzet [m]	0,00	0,45	0,57	0,65	0,72
	Significante golfhoogte [m]	9,03	2,13	1,22	0,57	0,22
	Golfhoogte/Waterdiepte [-]	0,35	0,86	0,78	0,83	1,58
Aangepaste instellingen [Gamma 0,60]	Golfopzet [m]	0,00	0,38	0,47	0,53	0,55
	Significante golfhoogte [m]	9,03	1,75	1,02	0,44	0,32
	Golfhoogte/Waterdiepte [-]	0,35	0,72	0,69	0,78	1,23

Tabel 3.6. Resultaten van golfopzet berekeningen met SWASH op verschillende uitvoerlocaties voor profiel 1, Delfland. (Waterdiepte inclusief golfopzet, Diepte t.o.v. SWL).

Simulatie	Parameter	WBI uitvoerpunt	Diepte 2 [m]	Diepte 1 [m]	Diepte 0 [m]	Maximale golfopzet
Standaard instellingen	Golfopzet [m]	-0,01	0,28	0,64	1,10	1,18
	Significante golfhoogte [m]	9,43	5,12	4,30	4,84	4,52
	Golfhoogte/Waterdiepte [-]	0,37	2,25	2,62	4,38	5,08

3.3.4 Vergelijking tussen numeriek en theoretisch bepaalde golfopzet

De theoretische golfopzet voor profiel 1 wordt bepaald met zowel de figuur uit de Shore Protection Manual als met de formules van Stockdon et al. (2006). Hiervoor is het noodzakelijk om de golfparameters en profiel eigenschappen te bepalen behorende bij het dwarsprofiel in Delfland, welke zijn gepresenteerd in Tabel 3.7. In deze tabel is de bodemhelling van het dwarsprofiel bepaald vanaf de locatie waar de verhouding tussen significante diep water golfhoogte en waterdiepte (t.o.v. stil water niveau) groter wordt dan het breker criterium van 0,73. De theoretische golfopzet bepaald aan de hand van deze parameters is uiteindelijk gepresenteerd in Tabel 3.8.

Tabel 3.7. Golf en bodemprofiel parameters voor berekening theoretische golfopzet voor profiel 1, Delfland.

Parameter	Waarde
$H_{s,0}$, Golfhoogte diep water	9,13 [m]
L_0 , Golf lengte diep water	302 [m]
S, Golfsteilheid	0,03 [-]
Bodemhelling, 1:X	57 [-]
Irribaren	0,1 [-]

Als de theoretisch en numeriek bepaalde golfopzet waarden worden vergeleken valt op dat SWAN redelijk goed overeenkomt met de theoretisch bepaalde golfopzet, terwijl de golfopzet berekend met SWASH hoger uitvalt.

Tabel 3.8. Vergelijking tussen numeriek en theoretisch bepaalde golfopzet voor profiel 1, Delfland.

Methode berekening golfopzet	Golfopzet
SWAN	0,72 [m]
SWASH	1,18 [m]
Stockdon et al., 2006	0,84 [m]
Shore Protection Manual	0,68 [m]

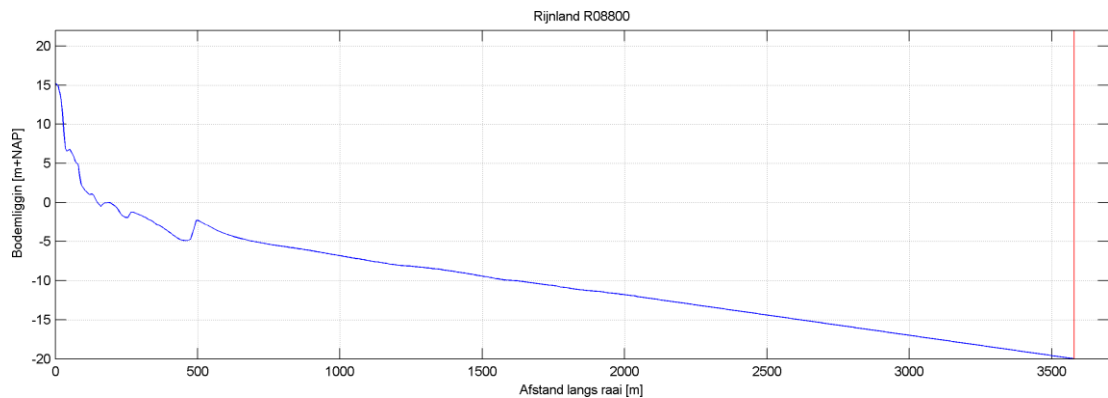
3.4 Profiel 2: Hollandse kust – duin met brekerbank, Rijnland

3.4.1 Kustprofiel en randvoorwaarden

Voor het duinprofiel aan de Hollandse kust met brekerbank is een dwarsprofiel gekozen net ten zuiden van Katwijk. De basis hiervoor is JARKUS raai 88.00 uit het jaar 2012. De locatie van dit profiel langs de Nederlandse kust is weergegeven in Figuur 3.4 en een dwarsdoorsnede van het JARKUS profiel is te zien in Figuur 3.5. De rode lijn op de 20m-NAP dieptelijn geeft de locatie van het WBI-uitvoerpunt weer. Het zeewaartse talud na 12m-NAP is met dezelfde helling doorgetrokken tot de 20m-NAP, daar waar de golfrandvoorwaarde geldt.



Figuur 3.4: Locatie JARKUS-raai 88.00 (bron: RisKeer).



Figuur 3.5: Duinprofiel met brekerbank (JARKUS profiel 88.00).

Voor de diep water randvoorwaarde is weer gebruik gemaakt van het rekenpeil en de golfhoogte uit RisKeer. De golfperiode voor deze locatie is uit de HR2006 gehaald. De hydraulische randvoorwaarden voor het WBI-uitvoerpunt zijn dan gegeven in Tabel 3.9.

Tabel 3.9. Hydraulische randvoorwaarden uit Riskeer/HR2006 voor WBI-uitvoerpunt 88.00

Parameter	Waarde
Rekenpeil	5,76 [m+NAP]
H_s , Significante Golfhoogte	9,22 [m]
T_p , Golfpiekperiode	14,3 [s]

3.4.2 Afregelen van de modelrandvoorwaarden

Het afregelen van het numerieke SWAN en SWASH model voor profiel 2 heeft in de modellen geleid tot de juiste significante golfhoogte op het WBI-uitvoerpunt (WBI-uitvoerpunt op 20m-NAP), zie Tabel 3.10. In het SWAN model komt de significante golfhoogte precies overeen met de beoogde significante golfhoogte uit RisKeer/HR2006, terwijl SWASH iets hogere golven berekent. De gevoeligheidsberekening uitgevoerd met SWAN met een gamma van 0,6 laat een vergelijkbare golfhoogte zien nabij het WBI-uitvoerpunt.

Tabel 3.10. Resultaat van afregelen modellen voor profiel 2. Verificatie van de berekende significante golfhoogte in SWAN en SWASH t.o.v. de beoogde significante golfhoogte uit Riskeer op het WBI-uitvoerpunt, diepte -20 m+NAP.

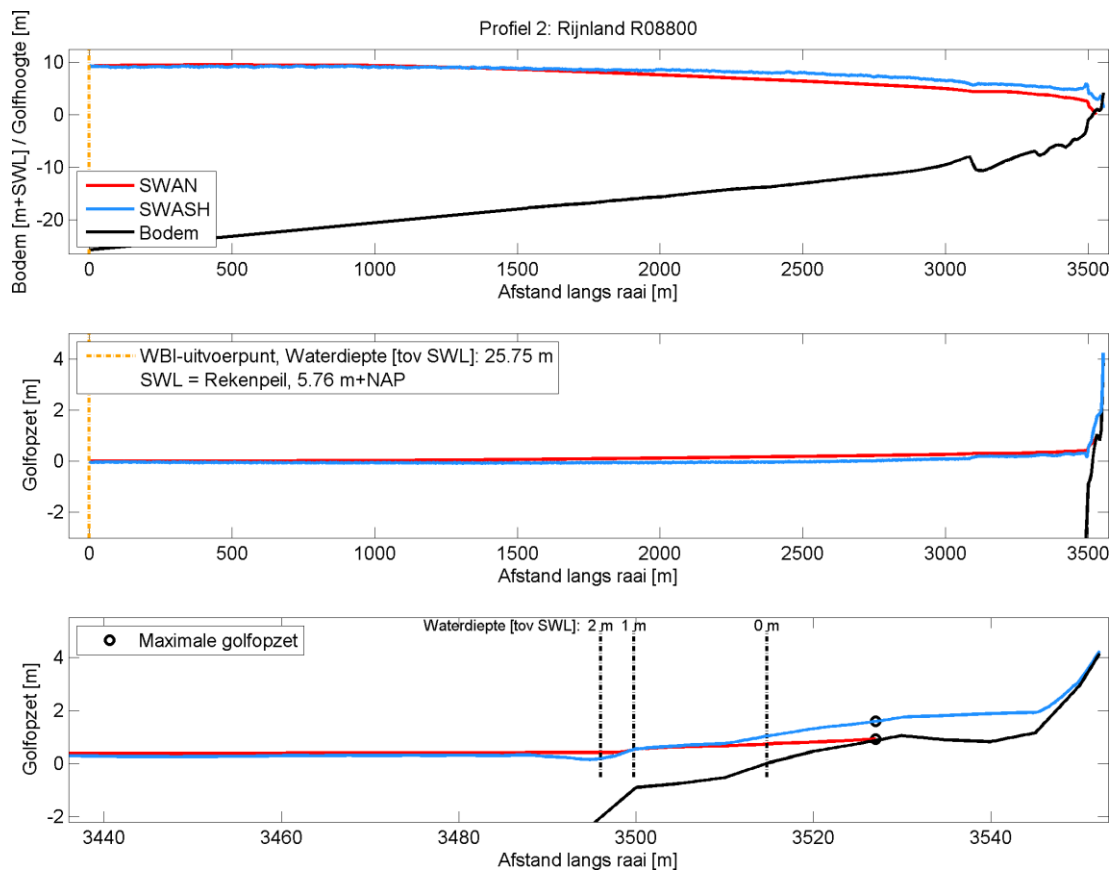
Simulatie	Beoogde golfhoogte	Berekende golfhoogte	Afwijking
SWAN, standaard instellingen [Gamma 0,73]	9,22 [m]	9,25 [m]	0 [%]
SWAN, aangepaste instellingen [Gamma 0,60]	9,22 [m]	9,25 [m]	0 [%]
SWASH, standaard instellingen	9,22 [m]	9,60 [m]	4 [%]

3.4.3 Golfopzet uitkomsten

De uitkomsten van de golfopzet berekeningen zijn gepresenteerd in Figuur 3.6. In het bovenste paneel zijn de significante golfhoogtes zoals berekend met SWAN en SWASH gepresenteerd. Het middelste paneel laat de golfopzet zien over het hele domein, en in het onderste paneel is ingezoomd op het laatste deel van het profiel waar de golfopzet relevant is. Door de hoge waterstand lijkt de aanwezige brekerbank de uitkomsten nauwelijks te beïnvloeden. Daarnaast zijn de golfopzet uitkomsten ook numeriek uitgevoerd in Tabel 3.11 voor SWAN en in Tabel 3.12 voor SWASH voor vijf uitvoerlocaties in het dwarsprofiel. Dit zijn volgende locaties: het WBI-uitvoerpunt, de locaties waar de waterdiepte ten opzichte van stil water niveau respectievelijk 0, 1, 2 meter zijn, en de locatie waar de golfopzet maximaal is.

De golfopzet resultaten laten ook hier zien dat SWAN aanvankelijk hogere golfopzet berekent, wat te verklaren is door de eerder afnemende significante golfhoogte in SWAN. SWASH berekent echter dichterbij de kust hogere golfopzet, wat geleidelijk meer overgaat in golfoploop, zie middelste paneel in Figuur 3.6. Verder wordt er in de gevoeligheids simulatie met een gamma van 0,6 voor SWAN een iets lagere golfopzet berekend.

Tot slot laten de SWAN en SWASH berekeningen zien dat de golfopzet nabij het WBI-uitvoerpunt verwaarloosbaar is.



Figuur 3.6. Resultaten van golfopzet berekening met SWAN en SWASH voor profiel 2, Rijnland.

Tabel 3.11. Resultaten van golfopzet berekeningen met SWAN op verschillende uitvoerlocaties voor profiel 2, Rijnland (Waterdiepte inclusief golfopzet, Diepte t.o.v. SWL).

Simulatie	Parameter	WBI uitvoerpunt	Diepte 2 [m]	Diepte 1 [m]	Diepte 0 [m]	Maximale golfopzet
Standaard instellingen [Gamma 0,73]	Golfopzet [m]	0,00	0,42	0,53	0,74	0,92
	Significante golfhoogte [m]	9,25	2,51	1,93	0,82	0,10
	Golfhoogte/Waterdiepte [-]	0,36	1,03	1,35	1,16	1,78
Aangepaste instellingen [Gamma 0,60]	Golfopzet [m]	0,00	0,37	0,44	0,61	0,77
	Significante golfhoogte [m]	9,25	2,06	1,63	0,71	0,04
	Golfhoogte/Waterdiepte [-]	0,36	0,86	1,21	1,22	1,64

Tabel 3.12. Resultaten van golfopzet berekeningen met SWASH op verschillende uitvoerlocaties voor profiel 2, Rijnland. (Waterdiepte inclusief golfopzet, Diepte t.o.v. SWL)

Simulatie	Parameter	WBI uitvoerpunt	Diepte 2 [m]	Diepte 1 [m]	Diepte 0 [m]	Maximale golfopzet
Standaard instellingen	Golfopzet [m]	-0,01	0,19	0,53	1,03	1,50
	Significante golfhoogte [m]	9,60	5,62	4,30	3,60	3,10
	Golfhoogte/Waterdiepte [-]	0,37	2,54	2,86	3,50	4,06

3.4.4 Vergelijking tussen numeriek en theoretische bepaalde golfopzet

De theoretische golfopzet voor profiel 2 wordt bepaald volgens de methode van zowel de Shore Protection Manual als Stockdon et al. (2006). De golfparameters en profiel eigenschappen die hiervoor benodigd zijn, zijn gepresenteerd in Tabel 3.13. In deze tabel is de bodemhelling van het dwarsprofiel bepaald vanaf de locatie waar de verhouding tussen significante diep water golfhoogte en waterdiepte (t.o.v. stil water niveau) groter wordt dan het breker criterium van 0,73. De theoretische golfopzet bepaald aan de hand van deze parameters is gepresenteerd in Tabel 3.14.

Tabel 3.13. Golf en bodemprofiel parameters voor berekening theoretische golfopzet voor profiel 2, Rijnland.

Parameter	Waarde
$H_{s,0}$, Golfhoogte diep water	9,43 [m]
L_0 , Golf lengte diep water	319 [m]
S, Golfsteilheid	0,030 [-]
Bodemhelling, 1:X	60 [-]
Irribaren	0,10 [-]

Als de theoretisch en numeriek bepaalde golfopzet waarden worden vergeleken valt op dat SWAN ook hier redelijk goed overeenkomt met de theoretisch bepaalde golfopzet. Terwijl de golfopzet berekend met SWASH weer iets hoger uitvalt.

Tabel 3.14. Vergelijking tussen numeriek en theoretisch bepaalde golfopzet voor profiel 2, Rijnland.

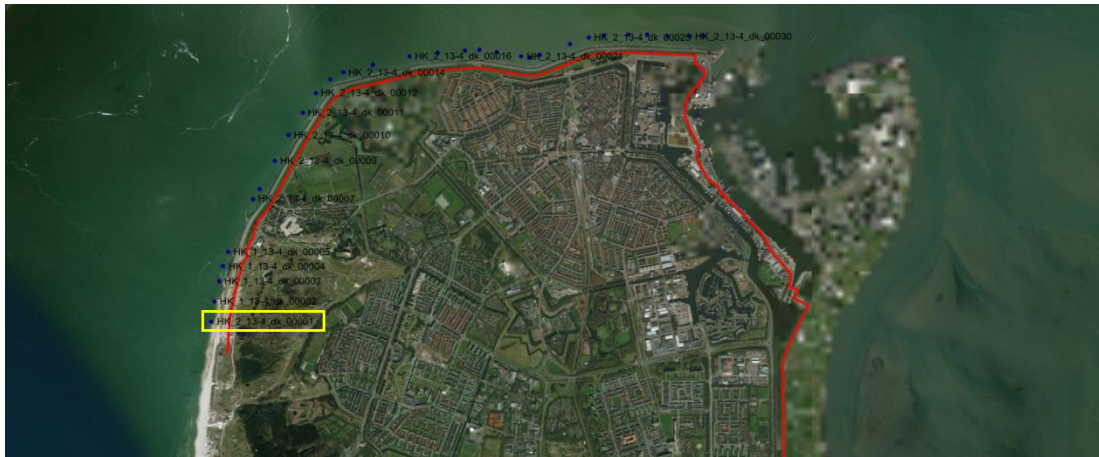
Methode berekening golfopzet	Golfopzet
SWAN	0,92 [m]
SWASH	1,50 [m]
Stockdon et al., 2006	0,88 [m]
Shore Protection Manual	0,71 [m]

3.5 Profiel 3: Hollandse kust – dijk met steil voorland, Noord-Holland

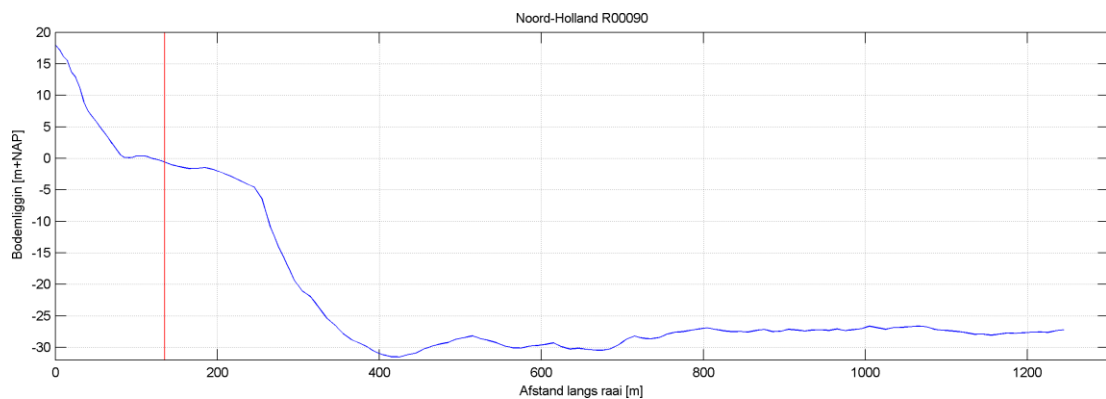
3.5.1 Kustprofiel en randvoorwaarden

Voor een kustprofiel aan de Hollandse kust met dijk en een steil voorland is een dwarsprofiel gekozen in Noord-Holland bij Huisduinen nabij de Helderse zeewering. Voor de kust neemt de waterdiepte hier snel toe tot 30 meter of meer. Verder ten westen liggen weer ondieptes (Noorderhaaks, Razende Bol) waarop de golven van de Noordzee mogelijk een deel van hun energie zullen verliezen.

De basis voor deze situatie is JARKUS profiel 00.90 uit het jaar 2012. Het bijbehorende WBI-uitvoerpunt is HK_2_13-4_dk_00001. Dit WBI-uitvoerpunt ligt op ca. 50 meter uit de teen van de dijk en kan binnen de invloedssfeer van eventuele golfopzet liggen. Golfcondities voor deze locatie zijn afkomstig van het numerieke golfmodel SWAN en het rekenpeil is afkomstig vanuit de waterstandstatistiek van de meetstations langs de kust. De locatie van zowel de raai als het WBI-punt is weergegeven in Figuur 3.7. Een dwarsdoorsnede van de JARKUS raai is te zien in Figuur 3.8. De rode lijn in deze figuur geeft de locatie van het WBI-uitvoerpunt weer.



Figuur 3.7: Locatie JARKUS raai 00.90 en bijbehorende WBI-uitvoerpunt (bron: RisKeer).



Figuur 3.8: Kustprofiel met dijk en een steile vooroever (JARKUS profiel 00.90).

Voor de randvoorwaarde nabij de teen van de dijk is gebruik gemaakt van het rekenpeil en de golfhoogte uit RisKeer. De golfperiode voor deze locatie is uit Hydra-NL gehaald (norm frequentie 1/10.000). De hydraulische randvoorwaarden voor het WBI-uitvoerpunt zijn gegeven in Tabel 3.15.

Tabel 3.15. Hydraulische randvoorwaarden uit Riskeer/Hydra-NL voor WBI-uitvoerpunt HK_2_13-4_dk_00001.

Parameter	Waarde
Rekenpeil	4,28 [m+NAP]
H_s , Significante Golfhoogte	3,53 [m]
$T_{m-1,0}$, Golfperiode	9,46 [s]

3.5.2 Afregelen van de modelrandvoorwaarden

Het afregelen van het numerieke SWAN en SWASH model voor profiel 3 heeft in de modellen geleid tot de juiste significante golfhoogte op het WBI uitvoerpunt (WBI uitvoerpunt op 0,5m-NAP), zie Tabel 3.16. Voor het afregelen van de modellen was het echter noodzakelijk om de golfhoogte op de modelrand te verhogen om zodoende de juiste golfhoogte te krijgen op het WBI-uitvoerpunt. De oorzaak hiervan is dat het WBI-uitvoerpunt op een relatief ondiep punt in het profiel ligt. Het afregelen van de modelrandvoorwaarden heeft uiteindelijk geleid tot een significante golfhoogte in het SWAN en SWASH model die nagenoeg gelijk is aan de beoogde significante golfhoogte uit RisKeer/Hydra-NL. Dit vereiste echter een beduidend hogere golf op de rand van zowel het SWAN als het SWASH model, namelijk golven van 8 meter.

Eenzijds is het logisch dat de afgeregelde significante golfhoogte op de modelrand in diep water hoger is, zeker gezien het feit dat de significante golfhoogte op de 20m-NAP lijn voor de nabij gelegen Noord-Hollandse duinen (500 meter zuidelijker, WBI-uitvoerpunt 7-150) 10,16 meter is. Anderzijds ligt het WBI-uitvoerpunt bij Huisduinen mogelijk meer beschermt achter de Noorderhaaks. Er valt dus te discussiëren over de diep water golfrandvoorwaarde voor deze 1D modellen. Het blijft echter zo dat de gekozen randvoorwaarden in SWAN en SWASH noodzakelijk zijn om de significante golfhoogtes in het WBI-uitvoerpunt te kunnen reproduceren.

De gevoeligheidsberekening uitgevoerd met SWAN met een gamma van 0,6 laat een beduidend andere significante golfhoogte zien nabij het WBI-uitvoerpunt. De significante golfhoogte neemt namelijk bijna met 20% af. Dit heeft te maken met het feit dat de golven eerder breken door de lagere gamma waarde. De randvoorwaarden zijn hier niet opnieuw voor aangepast.

Tabel 3.16. Resultaat van afregelen modellen voor profiel 3. Verificatie van de berekende significante golfhoogte in SWAN en SWASH t.o.v. de beoogde significante golfhoogte uit RisKeer op het WBI-uitvoerpunt, diepte -0,51 m+NAP.

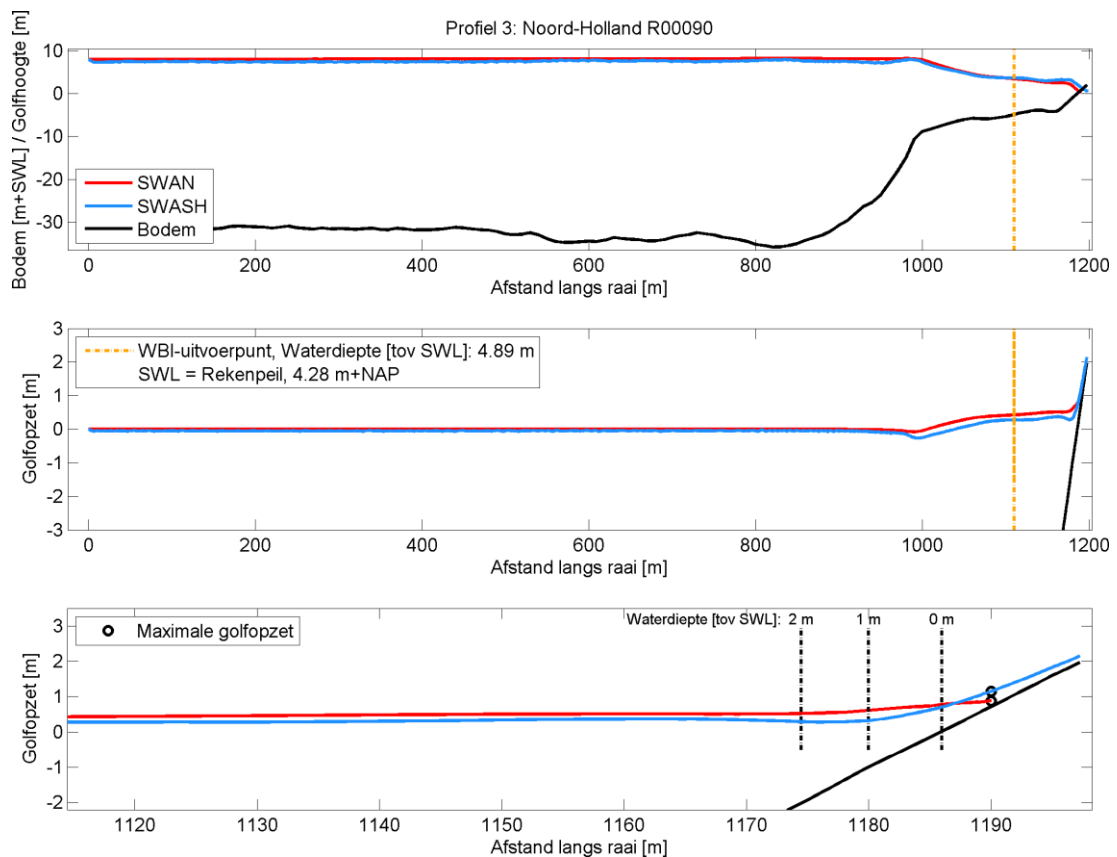
Simulatie	Beoogde golfhoogte	Berekende golfhoogte	Afwijking
SWAN, standaard instellingen [Gamma 0,73]	3,53 [m]	3,47 [m]	-2 [%]
SWAN, aangepaste instellingen [Gamma 0,60]	3,53 [m]	2,84 [m]	-20 [%]
SWASH, standaard instellingen	3,53 [m]	3.64 [m]	3 [%]

3.5.3 Golfopzet uitkomsten

De uitkomsten van de golfopzet berekeningen zijn gepresenteerd in Figuur 3.9. In het bovenste paneel zijn de significante golfhoogtes zoals berekend met SWAN en SWASH gepresenteerd. Het middelste paneel laat de golfopzet zien over het hele domein, en in het onderste paneel is ingezoomd op het laatste deel van het profiel waar de golfopzet relevant is. Daarnaast zijn de golfopzet uitkomsten ook numeriek uitgevoerd in Tabel 3.17 voor SWAN en in Tabel 3.18 voor SWASH voor vijf uitvoerlocaties in het dwarsprofiel. Dit zijn volgende locaties: het WBI-uitvoerpunt, de locaties waar de waterdiepte ten opzichte van stil water niveau respectievelijk 0, 1, 2 meter zijn, en de locatie waar de golfopzet maximaal is.

De resultaten laten hier zien dat SWAN bijna over de hele raai hogere golfopzet berekent, wat te verklaren is door de iets eerder afnemende significante golfhoogte in SWAN. SWASH berekent dichtbij de kust de hoogste golfopzet, dat geleidelijk meer overgaat in golfoploop, zie middelste paneel in Figuur 3.9. Verder wordt er in de gevoeligheidssimulatie met een gamma van 0,6 voor SWAN een iets lagere golfopzet berekend.

Tot slot laten de SWAN en SWASH berekeningen zien dat de golfopzet nabij het WBI-uitvoerpunt niet verwaarloosbaar is, zo berekent SWAN 0,42 meter en SWASH 0,27 meter golfopzet. Dit laat dus zien dat bij dit profiel de golfopzet relevant is in het WBI-uitvoerpunt.



Figuur 3.9. Resultaten van golfopzet berekening met SWAN en SWASH voor profiel 3, Noord-Holland.

Tabel 3.17. Resultaten van golfopzet berekeningen met SWAN op verschillende uitvoerlocaties voor profiel 3, Noord-Holland (Waterdiepte inclusief golfopzet, Diepte t.o.v. SWL).

Simulatie	Parameter	WBI uitvoerpunt	Diepte 2 [m]	Diepte 1 [m]	Diepte 0 [m]	Maximale golfopzet
Standaard instellingen [Gamma 0,73]	Golfopzet [m]	0,42	0,53	0,61	0,78	0,88
	Significante golfhoogte [m]	3,47	2,31	1,76	0,74	0,25
	Golfhoogte/Waterdiepte [-]	0,65	0,94	1,10	0,96	1,45
Aangepaste instellingen [Gamma 0,60]	Golfopzet [m]	0,41	0,48	0,53	0,67	0,80
	Significante golfhoogte [m]	2,84	1,91	1,52	0,74	0,12
	Golfhoogte/Waterdiepte [-]	0,54	0,79	1,00	1,13	1,31

Tabel 3.18. Resultaten van golfopzet berekeningen met SWASH op verschillende uitvoerlocaties voor profiel 3, Noord-Holland. (Waterdiepte inclusief golfopzet, Diepte t.o.v. SWL)

Simulatie	Parameter	WBI uitvoerpunt	Diepte 2 [m]	Diepte 1 [m]	Diepte 0 [m]	Maximale golfopzet
Standaard instellingen	Golfopzet [m]	0,27	0,29	0,32	0,71	1,15
	Significante golfhoogte [m]	3,64	3,25	2,92	2,05	1,51
	Golfhoogte/Waterdiepte [-]	0,71	1,41	2,23	2,97	3,45

3.5.4 Vergelijking tussen numeriek en theoretische bepaalde golfopzet

De theoretische golfopzet voor profiel 3 wordt bepaald aan de hand van de methode uit de Shore Protection Manual en de formules van Stockdon et al. (2006). De golfparameters en profiel eigenschappen die hiervoor benodigd zijn, zijn gepresenteerd in Tabel 3.19. In deze tabel is de bodemhelling van het dwarsprofiel bepaald vanaf de locatie waar de verhouding tussen significante diep water golfhoogte en waterdiepte (t.o.v. stil water niveau) groter wordt dan het breker criterium van 0,73. De theoretische golfopzet bepaald aan de hand van deze parameters is uiteindelijk gepresenteerd in Tabel 3.20.

Tabel 3.19. Golf en bodemprofiel parameters voor berekening theoretische golfopzet voor profiel 3, Noord-Holland.

Parameter	Waarde
$H_{s,0}$, Golfhoogte diep water	8,02 [m]
L_0 , Golf lengte diep water	169 [m]
S, Golfsteilheid	0,047 [-]
Bodemhelling, 1:X	16 [-]
Irribaren	0,29 [-]

Als de theoretisch en numeriek bepaalde golfopzet waarden worden vergeleken valt op dat SWAN ook hier het beste overeenkomt met de theoretisch bepaalde golfopzet, hoewel SWAN toch wel een significant hogere golfopzet berekent.

Aan de andere kant moet bedacht worden dat het Irribaren getal bijna gelijk is aan 0,3. Bij een waarde groter dan 0,3 zou Stockdon et al. (2006) een golfopzet berekend hebben van 0,81 meter omdat de bodemhelling dan meegenomen wordt in de formule.

Tabel 3.20. Vergelijking tussen numeriek en theoretisch bepaalde golfopzet voor profiel 3, Noord-Holland.

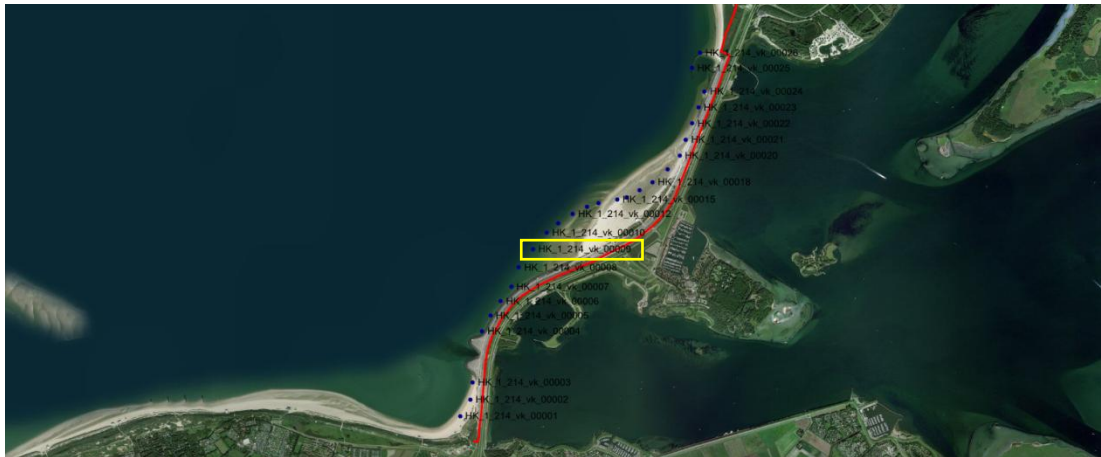
Methode berekening golfopzet	Golfopzet
SWAN	0,88 [m]
SWASH	1,15 [m]
Stockdon et al., 2006	0,59 [m]
Shore Protection Manual	0,59 [m]

3.6 Profiel 4: Hollandse kust – dijk met flauwe en ondiepe vooroever, Goeree

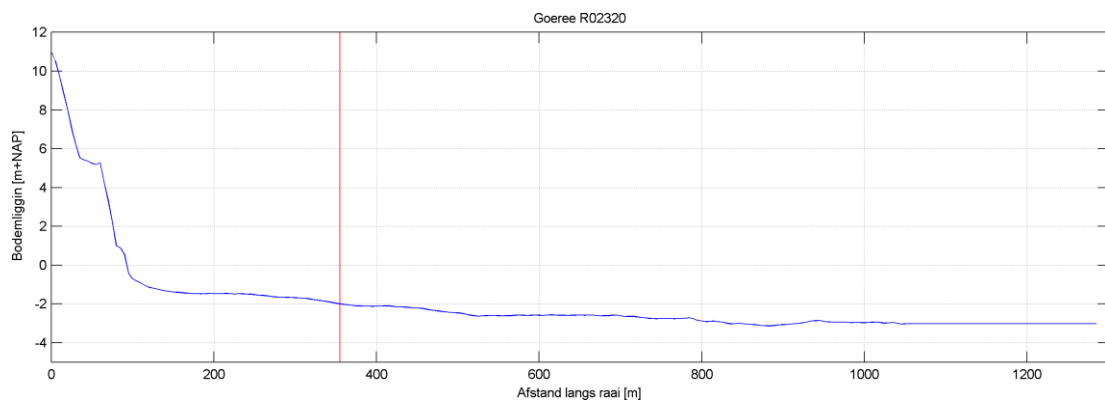
3.6.1 Kustprofiel en randvoorwaarden

Voor het kustprofiel aan de Hollandse kust met dijk en een flauwe en ondiepe vooroever is gekeken naar de Brouwersdam. Dit is een profiel met een dijk en een hele lange en flauwe vooroever. Vele kilometers voor de Brouwersdam vindt al de eerste golfbreking plaats. De golfopzet die daar plaatsvindt is vanwege de ruimtelijke geometrie van het gebied niet meer van invloed op de waterstand nabij de Brouwersdam.

Er is gekozen voor JARKUS profiel 23.20. Het bijbehorende WBI-uitvoerpunt is HK_1_214_vk_00009. Dit WBI-uitvoerpunt ligt op 250 meter uit de teen van de dijk. Dit kan dan binnen de invloedssfeer van eventuele golfopzet liggen. De locatie van deze raai en het WBI-punt is gegeven Figuur 3.10. Een dwarsdoorsnede van de JARKUS raai is te zien in Figuur 3.11.



Figuur 3.10: Locatie JARKUS raai 23.20 en bijbehorende WBI-uitvoerpunt (bron: RisKeer).



Figuur 3.11: Kustprofiel met dijk en ondiepe vooroever (JARKUS profiel 23.20).

Voor de randvoorwaarde nabij de teen van de dijk is gebruik gemaakt van het rekenpeil en de golfhoogte uit RisKeer. De golfperiode voor deze locatie is uit Hydra-NL gehaald (norm frequentie 1/10.000). De hydraulische randvoorwaarden voor het WBI-uitvoerpunt zijn gegeven in Tabel 3.21.

Tabel 3.21. Hydraulische randvoorwaarden uit RisKeer/Hydra-NL voor WBI-uitvoerpunt HK_1_214_vk_00009.

Parameter	Waarde
Rekenpeil	4,96 [m+NAP]
H_s , Significante Golfhoogte	2,94 [m]
$T_{m-1,0}$, Golfperiode	9,91 [s]

3.6.2 Afregelen van de modelrandvoorwaarden

Het afregelen van het numerieke SWAN en SWASH model voor profiel 4 heeft in de modellen geleid tot de juiste significante golfhoogte op het WBI-uitvoerpunt (WBI-uitvoerpunt op 2 m-NAP), zie Tabel 3.22. In het SWAN en SWASH model komt de significante golfhoogte nagenoeg overeen met de beoogde significante golfhoogte uit RisKeer/HR2006. De gevoeligheidsberekening uitgevoerd met een gamma van 0,6 laat een significant andere golfhoogte zien nabij het WBI-uitvoerpunt voor de SWAN simulatie, namelijk zo'n 15% lager.

Tabel 3.22. Resultaat van afregelen modellen voor profiel 4. Verificatie van de berekende significante golfhoogte in SWAN en SWASH t.o.v. de beoogde significante golfhoogte uit Riskeer op het WBI-uitvoerpunt, diepte -2 m+NAP.

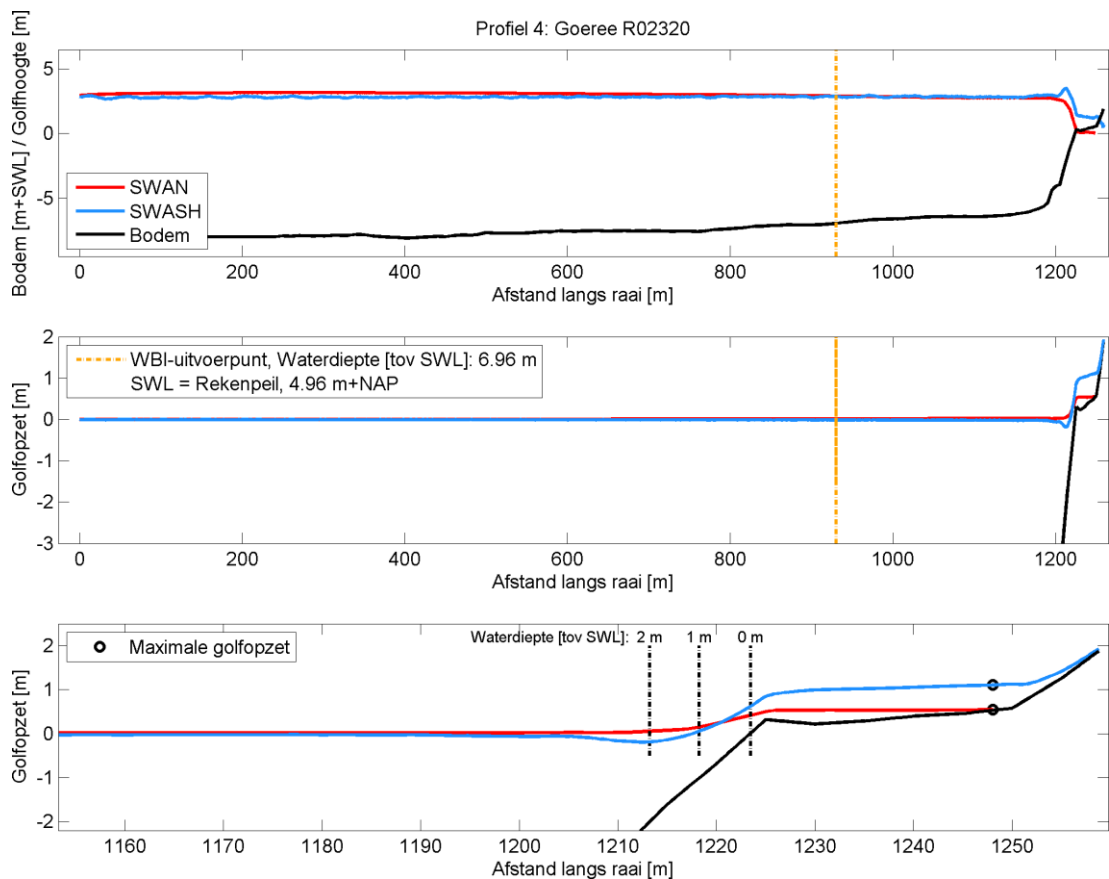
Simulatie	Beoogde golfhoogte	Berekende golfhoogte	Afwijking
SWAN, standaard instellingen [Gamma 0,73]	2,94 [m]	2,90 [m]	-1 [%]
SWAN, aangepaste instellingen [Gamma 0,60]	2,94 [m]	2,45 [m]	-17 [%]
SWASH, standaard instellingen	2,94 [m]	2,89 [m]	-2 [%]

3.6.3 Golfopzet uitkomsten

De uitkomsten van de golfopzet berekeningen zijn gepresenteerd in Figuur 3.12. In het bovenste paneel zijn de significante golfhoogtes zoals berekend met SWAN en SWASH gepresenteerd. Het middelste paneel laat de golfopzet zien over het hele domein, en in het onderste paneel is ingezoomd op het laatste deel van het profiel waar de golfopzet relevant is. Daarnaast zijn de golfopzet uitkomsten ook numeriek uitgevoerd in Tabel 3.23 voor SWAN en in Tabel 3.24 voor SWASH voor vijf uitvoerlocaties in het dwarsprofiel. Dit zijn volgende locaties: het WBI-uitvoerpunt, de locaties waar de waterdiepte ten opzichte van stil water niveau respectievelijk 0, 1, 2 meter zijn, en de locatie waar de golfopzet maximaal is.

De golfopzet resultaten laten zien dat SWAN aanvankelijk hogere golfopzet berekent, wat te verklaren is door de golf set-down in SWASH door shoaling van de golven. SWASH berekent echter dichtbij de kust hogere golfopzet, wat geleidelijk meer overgaat in golfoploop, zie middelste paneel in Figuur 3.12. Verder wordt er in de gevoeligheids simulatie met een gamma van 0,6 voor SWAN een iets lagere golfopzet berekend.

Tot slot laten de SWAN en SWASH berekeningen zien dat de golfopzet nabij het WBI-uitvoerpunt verwaarloosbaar is.



Figuur 3.12. Resultaten van golfopzet berekening met SWAN en SWASH voor profiel 4, Goeree.

Tabel 3.23. Resultaten van golfopzet berekeningen met SWAN op verschillende uitvoerlocaties voor profiel 4, Goeree. (Waterdiepte inclusief golfopzet, Diepte t.o.v. SWL)

Simulatie	Parameter	WBI uitvoerpunt	Diepte 2 [m]	Diepte 1 [m]	Diepte 0 [m]	Maximale golfopzet
Standaard instellingen [Gamma 0,73]	Golfopzet [m]	0,01	0,05	0,14	0,39	0,55
	Significante golfhoogte [m]	2,90	2,27	1,75	0,70	0,02
	Golfhoogte/Waterdiepte [-]	0,42	1,08	1,47	1,49	1,62
Aangepaste instellingen [Gamma 0,60]	Golfopzet [m]	0,01	0,03	0,12	0,31	0,42
	Significante golfhoogte [m]	2,45	1,92	1,42	0,49	0,01
	Golfhoogte/Waterdiepte [-]	0,35	0,92	1,21	1,25	2,20

Tabel 3.24. Resultaten van golfopzet berekeningen met SWASH op verschillende uitvoerlocaties voor profiel 4, Goeree. (Waterdiepte inclusief golfopzet, Diepte t.o.v. SWL)

Simulatie	Parameter	WBI uitvoerpunt	Diepte 2 [m]	Diepte 1 [m]	Diepte 0 [m]	Maximale golfopzet
Standaard instellingen	Golfopzet [m]	-0,01	-0,19	0,06	0,63	1,06
	Significante golfhoogte [m]	2,89	3,46	2,88	1,97	1,25
	Golfhoogte/Waterdiepte [-]	0,42	1,91	2,72	3,24	1,91

3.6.4 Vergelijking tussen numeriek en theoretische bepaalde golfopzet

De theoretische golfopzet voor profiel 4 wordt bepaald aan de hand van de methode uit de Shore Protection Manual en de formules van Stockdon et al. (2006). De golfparameters en profiel eigenschappen die hiervoor benodigd zijn, zijn gepresenteerd in Tabel 3.25. In deze tabel is de bodemhelling van het dwarsprofiel bepaald vanaf de locatie waar de verhouding tussen significante diep water golfhoogte en waterdiepte (t.o.v. stil water niveau) groter wordt dan het breker criterium van 0,73. De theoretische golfopzet bepaald aan de hand van deze parameters is uiteindelijk gepresenteerd in Tabel 3.26.

Tabel 3.25. Golf en bodemprofiel parameters voor berekening theoretische golfopzet voor profiel 4, Goeree.

Parameter	Waarde
$H_{s,0}$, Golfhoogte diep water	3,15 [m]
L_0 , Golflengte diep water	186 [m]
S, Golfsteilheid	0,017 [-]
Bodemhelling, 1:X	10 [-]
Irribaren	0,76 [-]

Als de theoretisch en numeriek bepaalde golfopzet waarden worden vergeleken valt op dat SWAN dichter in de buurt ligt van de golfopzet volgens de Shore Protection Manual, terwijl de golfopzet volgens Stockdon et al. (2006) weer tussen de waarden van SWAN en SWASH in ligt. Hierbij moet worden opgemerkt dat de golfopzet berekend met Stockdon et al. (2006) nu gebruik maakt van de formules waarbij ook de bodemhelling wordt meegenomen. Dit omdat het Irribaren getal groter is dan 0,3. Tabel 3.26 geeft uiteindelijk een grote bandbreedte in te verwachten golfopzet voor profiel 4.

Tabel 3.26. Vergelijking tussen numeriek en theoretisch bepaalde golfopzet voor profiel 4, Goeree.

Methode berekening golfopzet	Golfopzet
SWAN	0,55 [m]
SWASH	1,06 [m]
Stockdon et al., 2006	0,84 [m]
Shore Protection Manual	0,32 [m]

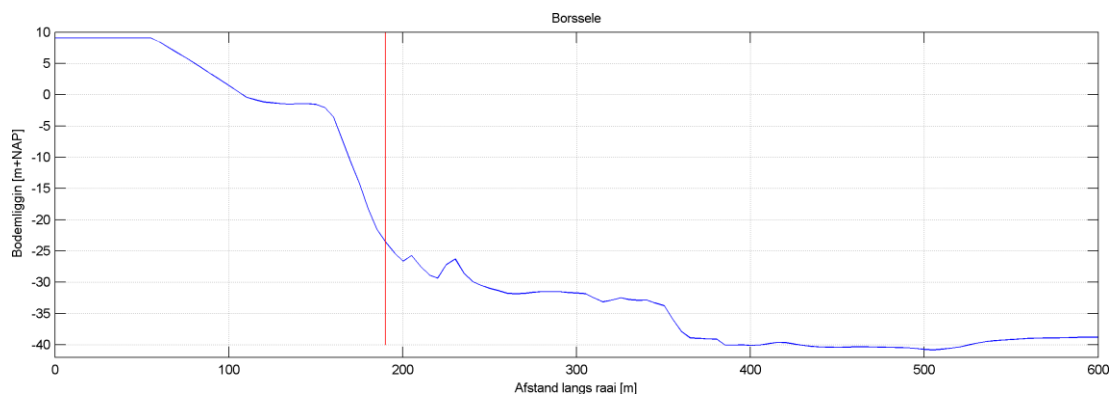
3.7 Profiel 5: Estuaria, Waddenzee – steile vooroever, Borssele

3.7.1 Kustprofiel en randvoorwaarden

Voor het representatieve profiel met een steile vooroever in een estuarium of de Waddenzee is gekeken naar een profiel op de Westerschelde bij Borssele. Vlak voor de dijk ligt hier een geul met dieptes van 40 meter of meer. Hier is een profiel gekozen nabij de locatie van WBI-uitvoerpunt WS_1_30_3_dk_00113, zie Figuur 3.13. Dit WBI-uitvoerpunt ligt op zo'n 50 à 100 meter uit de teen van de dijk. Dit kan dan binnen de invloedssfeer van eventuele golfopzet liggen. Golfcondities voor deze locatie zijn afkomstig van het numerieke golfmodel SWAN en het rekenpeil is afkomstig vanuit de waterstandstatistiek van de meetstations in de omgeving. Het gebruikte profiel is aangeleverd door het Waterschap Scheldestromen en weergegeven in Figuur 3.14. De rode lijn in deze figuur geeft weer de locatie aan van het WBI-punt.



Figuur 3.13: Locatie WBI-uitvoerpunt WS_1_30_3_dk_00113 nabij Borssele (bron: RisKeer).



Figuur 3.14: Profiel bij Borssele met dijk en diepe steile vooroever.

Voor de randvoorwaarde nabij de teen van de dijk is gebruik gemaakt van het rekenpeil en de golfhoogte uit RisKeer. De golfperiode voor deze locatie is uit Hydra-NL gehaald (norm frequentie 1/10.000). De hydraulische randvoorwaarden voor het WBI-uitvoerpunt zijn gegeven in Tabel 3.27.

Tabel 3.27. Hydraulische randvoorwaarden uit RisKeer/Hydra-NL voor WBI-uitvoerpunt WS_1_30_3_dk_00113.

Parameter	Waarde
Rekenpeil	5,57 [m+NAP]
H_s , Significante Golfhoogte	4,06 [m]
$T_{m-1,0}$, Golfperiode	6,73 [s]

3.7.2 Afregelen van de modelrandvoorwaarden

Het afregelen van het numerieke SWAN en SWASH model voor profiel 5 heeft in de modellen geleid tot de juiste significante golfhoogte op het WBI-uitvoerpunt (WBI-uitvoerpunt op 23,5m-NAP), zie Tabel 3.28. In het SWAN en SWASH model komt de significante golfhoogte nagenoeg overeen met de beoogde significante golfhoogte uit RisKeer/HR2006. De gevoeligheidsberekening uitgevoerd met een gamma van 0,6 laat een vergelijkbare golfhoogte zien nabij het WBI-uitvoerpunt voor de SWAN simulatie.

Tabel 3.28: Resultaat van afregelen modellen voor profiel 5. Verificatie van de berekende significante golfhoogte in SWAN en SWASH t.o.v. de beoogde significante golfhoogte uit RisKeer op het WBI-uitvoerpunt, diepte -23,51 m+NAP.

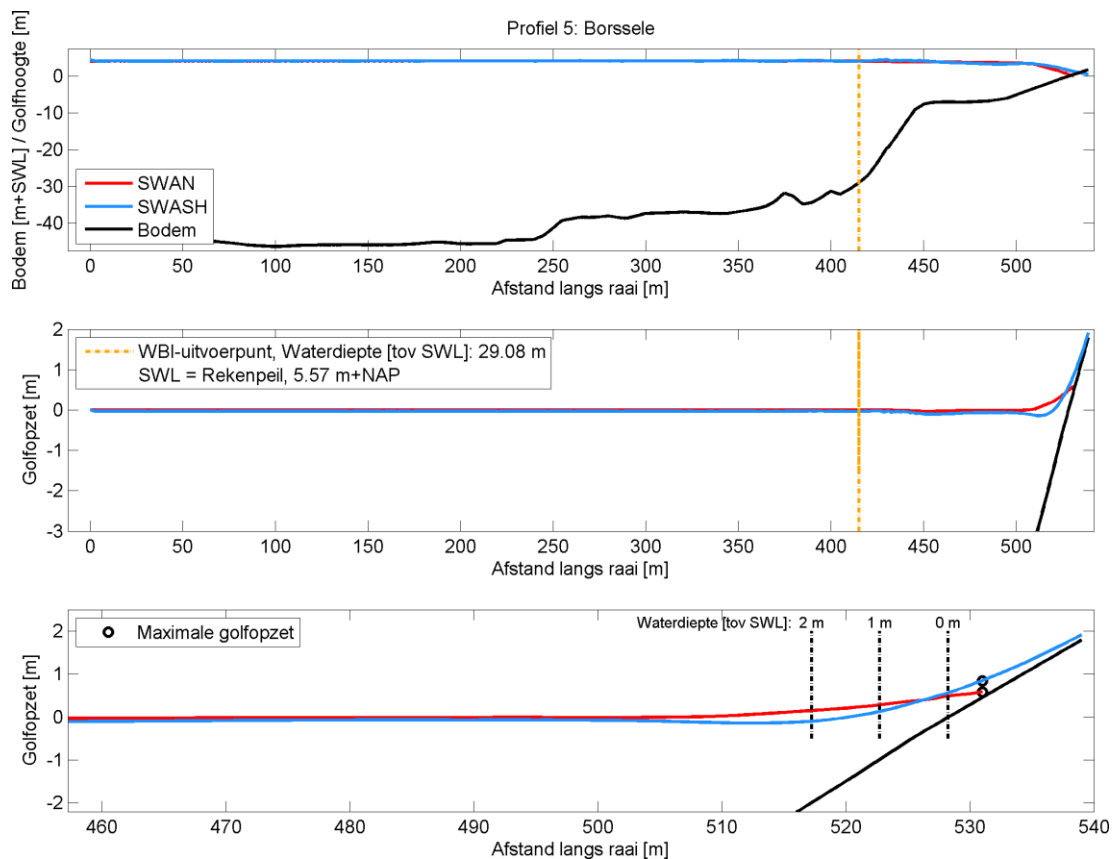
Simulatie	Beoogde golfhoogte	Berekende golfhoogte	Afwijking
SWAN, standaard instellingen [Gamma 0,73]	4,06 [m]	4,12 [m]	2 [%]
SWAN, aangepaste instellingen [Gamma 0,60]	4,06 [m]	4,14 [m]	2 [%]
SWASH, standaard instellingen	4,06 [m]	4,04 [m]	0 [%]

3.7.3 Golfopzet uitkomsten

De uitkomsten van de golfopzet berekeningen zijn gepresenteerd in Figuur 3.15. In het bovenste paneel zijn de significante golfhoogtes zoals berekend met SWAN en SWASH gepresenteerd. Het middelste paneel laat de golfopzet zien over het hele domein, en in het onderste paneel is ingezoomd op het laatste deel van het profiel waar de golfopzet relevant is. Daarnaast zijn de golfopzet uitkomsten ook numeriek uitgevoerd in Tabel 3.29 voor SWAN en in Tabel 3.30 voor SWASH voor vijf uitvoerlocaties in het dwarsprofiel. Dit zijn volgende locaties: het WBI-uitvoerpunt, de locaties waar de waterdiepte ten opzichte van stil water niveau respectievelijk 0, 1, 2 meter zijn, en de locatie waar de golfopzet maximaal is.

De golfopzet resultaten laten ook hier zien dat SWAN aanvankelijk hogere golfopzet berekent, wat te verklaren is door de eerder afnemende significante golfhoogte in SWAN. SWASH berekent ook hier dicht bij de kust hogere golfopzet, wat geleidelijk meer overgaat in golfoploop, zie middelste paneel in Figuur 3.15. Verder wordt er in de gevoeligheids simulatie met een gamma van 0,6 voor SWAN een iets lagere golfopzet berekend.

Tot slot laten de SWAN en SWASH berekeningen zien dat de golfopzet nabij het WBI-uitvoerpunt verwaarloosbaar is.



Figuur 3.15. Resultaten van golfopzet berekening met SWAN en SWASH voor profiel 5, Borssele.

Tabel 3.29. Resultaten van golfopzet berekeningen met SWAN op verschillende uitvoerlocaties voor profiel 5, Borssele. (Waterdiepte inclusief golfopzet, Diepte t.o.v. SWL).

Simulatie	Parameter	WBI uitvoerpunt	Diepte 2 [m]	Diepte 1 [m]	Diepte 0 [m]	Maximale golfopzet
Standaard instellingen [Gamma 0,73]	Golfopzet [m]	0,00	0,15	0,26	0,48	0,59
	Significante golfhoogte [m]	4,12	2,31	1,61	0,55	0,08
	Golfhoogte/Waterdiepte [-]	0,14	1,10	1,24	1,24	1,65
Aangepaste instellingen [Gamma 0,60]	Golfopzet [m]	0,00	0,13	0,23	0,42	0,47
	Significante golfhoogte [m]	4,14	2,02	1,42	0,38	0,12
	Golfhoogte/Waterdiepte [-]	0,14	0,97	1,13	0,98	1,23

Tabel 3.30. Resultaten van golfopzet berekeningen met SWASH op verschillende uitvoerlocaties voor profiel 5, Borssele. (Waterdiepte inclusief golfopzet, Diepte t.o.v. SWL).

Simulatie	Parameter	WBI uitvoerpunt	Diepte 2 [m]	Diepte 1 [m]	Diepte 0 [m]	Maximale golfopzet
Standaard instellingen	Golfopzet [m]	-0,04	-0,1	0,13	0,57	0,74
	Significante golfhoogte [m]	4,04	2,82	2,33	1,64	1,43
	Golfhoogte/Waterdiepte [-]	0,21	1,49	2,09	2,85	3,15

3.7.4 Vergelijking tussen numeriek en theoretische bepaalde golfopzet

De theoretische golfopzet voor profiel 5 wordt bepaald aan de hand van de methode uit de Shore Protection Manual en de formules van Stockdon et al. (2006). De golfparameters en profiel eigenschappen die hiervoor benodigd zijn, zijn gepresenteerd in Tabel 3.31. In deze tabel is de bodemhelling van het dwarsprofiel bepaald vanaf de locatie waar de verhouding tussen significante diep water golfhoogte en waterdiepte (t.o.v. stil water niveau) groter wordt dan het breker criterium van 0,73. De theoretische golfopzet bepaald aan de hand van deze parameters is uiteindelijk gepresenteerd in Tabel 3.32.

Tabel 3.31. Golf en bodemprofiel parameters voor berekening theoretische golfopzet voor profiel 5, Borssele.

Parameter	Waarde
$H_{s,0}$, Golfhoogte diep water	4,15 [m]
L_0 , Golf lengte diep water	86 [m]
S, Golfsteilheid	0,048 [-]
Bodemhelling, 1:X	6 [-]
Irribaren	0,80 [-]

Als de theoretisch en numeriek bepaalde golfopzet waarden worden vergeleken valt op de SWAN dichter in de buurt ligt van de golfopzet volgens de Shore Protection Manual, terwijl de golfopzet volgens Stockdon et al. (2006) zelfs groter is dan de waarde berekend door SWASH. Hierbij moet weer worden opgemerkt dat de golfopzet berekend met Stockdon et al. (2006) nu gebruik maakt van de formules waarbij de bodemhelling wordt meegenomen. Dit omdat het Irribaren getal groter is dan 0,3. Daarnaast onderschat de Shore Protection Manual de golfopzet als de bodemhelling steiler is dan 1/15, want dit is de maximale bodemhelling waarvoor de golfopzet nog kan worden bepaald. Dit geeft uiteindelijk een grote bandbreedte in de te verwachten golfopzet waarden volgens de verschillende methoden, zie Tabel 3.32.

Tabel 3.32. Vergelijking tussen numeriek en theoretisch bepaalde golfopzet voor profiel 5, Borssele.

Methode berekening golfopzet	Golfopzet
SWAN	0,59 [m]
SWASH	0,74 [m]
Stockdon et al., 2006	1,17 [m]
Shore Protection Manual	0,31 [m]

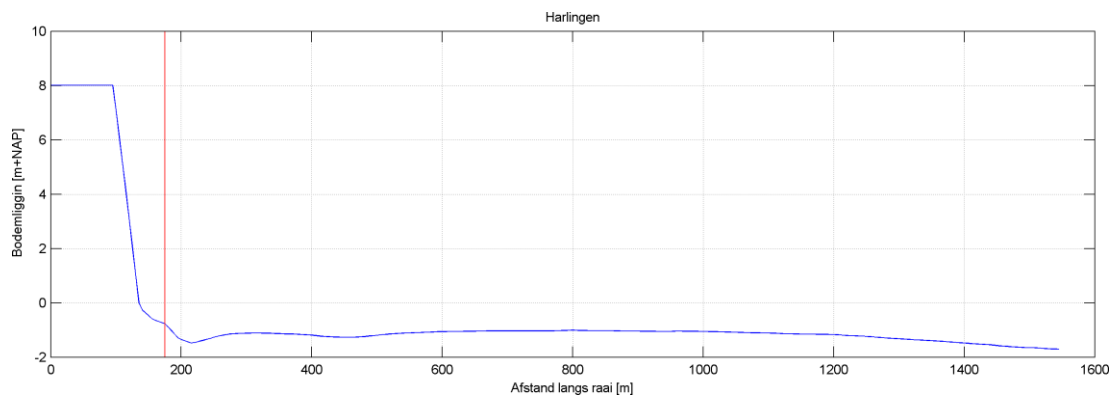
3.8 Profiel 6: Estuaria, Waddenzee – ondiep voorland, Harlingen

3.8.1 Kustprofiel en randvoorwaarden

Hier is een profiel in de Waddenzee ten zuiden van Harlingen gekozen in de buurt van WBI-uitvoerpunt WZ_1_6-3_dk_00038, zie Figuur 3.16. Dit WBI-uitvoerpunt ligt hier ook zo'n 35 meter uit de teen van de dijk. Dit kan dan binnen de invloedssfeer van eventuele golfopzet liggen. Het profiel is via interpolatie verkregen uit een recente vakloding uit vak KB126-1918 en weergegeven in Figuur 3.17. De rode lijn representeert de locatie van het WBI-punt in het dwarsprofiel.



Figuur 3.16: Locatie WBI-uitvoerpunt WZ_1_6-3_dk_00038 nabij Harlingen (bron: RisKeer).



Figuur 3.17: Profiel bij Harlingen met dijk en ondiep voorland.

Voor de randvoorwaarde nabij de teen van de dijk is gebruik gemaakt van het rekenpeil en de golfhoogte uit RisKeer. De golfperiode voor deze locatie is uit Hydra-NL gehaald (norm frequentie 1/10.000). De hydraulische randvoorwaarden voor het WBI-uitvoerpunt zijn gegeven in Tabel 3.33.

Tabel 3.33. Hydraulische randvoorwaarden uit RisKeer/Hydra-NL voor WBI-uitvoerpunt WZ_1_6-3_dk_00038.

Parameter	Waarde
Rekenpeil	5,00 [m+NAP]
H_s , Significante Golfhoogte	3,24 [m]
$T_{m-1,0}$, Golfperiode	6,08 [s]

3.8.2 Afregelen van de modelrandvoorwaarden

Het afregelen van het numerieke SWAN en SWASH model voor profiel 6 heeft niet geleid tot de juiste significante golfhoogte op het WBI-uitvoerpunt (WBI-uitvoerpunt op 0,77m-NAP), zie Tabel 3.34. In de modellen was het niet mogelijk om de beoogde significante golfhoogte op het WBI-uitvoerpunt te bereiken door de significante golfhoogte op de modelrand verder te vergroten. Hiervoor zijn wellicht andere modelinstellingen nodig. De gevoeligheidsberekening uitgevoerd SWAN met een gamma van 0,6 laat een nog grotere afwijking zien nabij het WBI-uitvoerpunt.

Tabel 3.34. Resultaat van afregelen modellen voor profiel 6. Verificatie van de berekende significante golfhoogte in SWAN en SWASH t.o.v. de beoogde significante golfhoogte uit Riskeer op het WBI-uitvoerpunt, diepte -0,77 m+NAP.

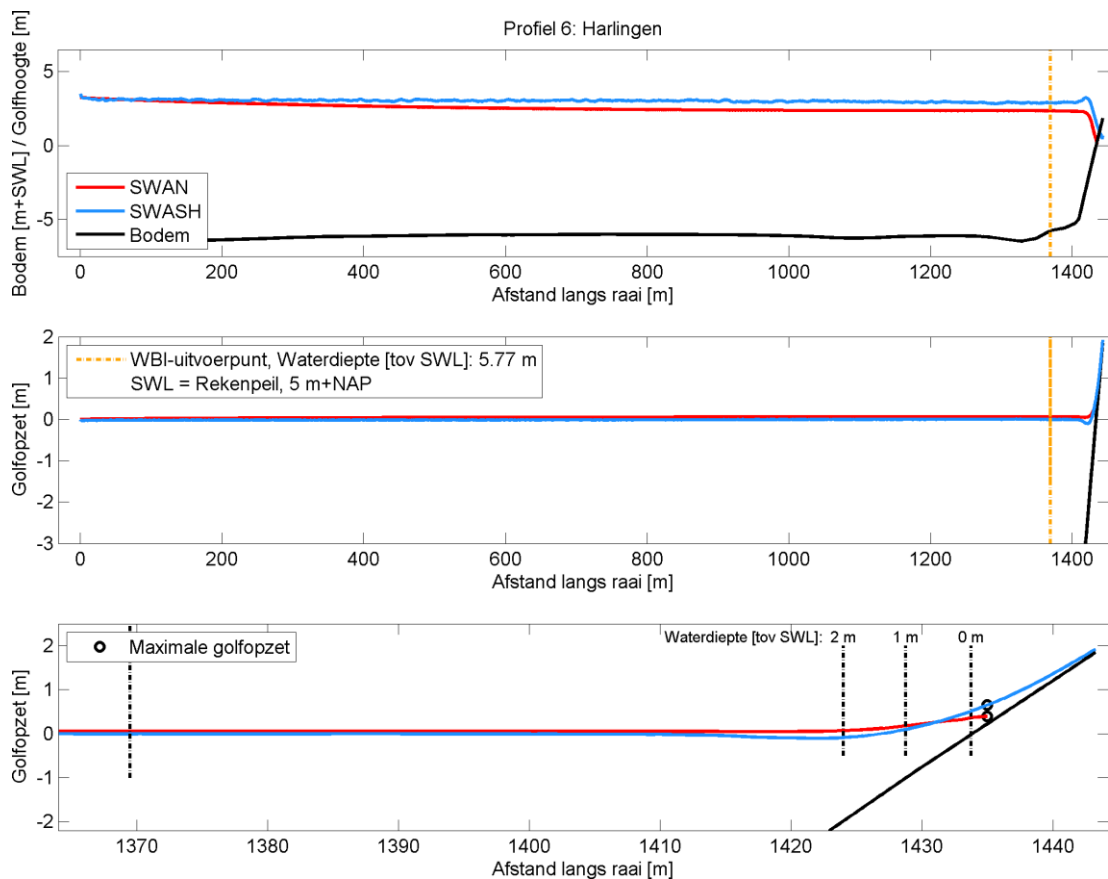
Simulatie	Beoogde golfhoogte	Berekende golfhoogte	Afwijking
SWAN, standaard instellingen [Gamma 0,73]	3,24 [m]	2,35 [m]	-27 [%]
SWAN, aangepaste instellingen [Gamma 0,60]	3,24 [m]	1,99 [m]	-39 [%]
SWASH, standaard instellingen	3,24 [m]	2,90 [m]	-10 [%]

3.8.3 Golfopzet uitkomsten

De uitkomsten van de golfopzet berekeningen zijn gepresenteerd in Figuur 3.18. In het bovenste paneel zijn de significante golfhoogtes zoals berekend met SWAN en SWASH gepresenteerd. Het middelste paneel laat de golfopzet zien over het hele domein, en in het onderste paneel is ingezoomd op het laatste deel van het profiel waar de golfopzet relevant is. Daarnaast zijn de golfopzet uitkomsten ook numeriek uitgevoerd in Tabel 3.35 voor SWAN en in Tabel 3.36 voor SWASH voor vijf uitvoerlocaties in het dwarsprofiel. Dit zijn volgende locaties: het WBI-uitvoerpunt, de locaties waar de waterdiepte ten opzichte van stil water niveau respectievelijk 0, 1, 2 meter zijn, en de locatie waar de golfopzet maximaal is.

De golfopzet resultaten laten ook hier zien dat SWAN aanvankelijk hogere golfopzet berekent, wat te verklaren is door de eerder afnemende significante golfhoogte in SWAN en de golf set-down in SWASH door shoaling. SWASH berekent ook hier dichtbij de kust hogere golfopzet, wat geleidelijk meer overgaat in golfoploop, zie middelste paneel in Figuur 3.15. Verder wordt er in de gevoeligheidssimulatie met een gamma van 0,6 voor SWAN een lagere golfopzet berekend.

Tot slot laten de SWAN en SWASH berekeningen zien dat de golfopzet nabij het WBI-uitvoerpunt gering is, zo berekent SWAN 0,06 meter en SWASH 0,00 meter golfopzet. Dat SWAN op het WBI-uitvoerpunt golfopzet berekent, heeft waarschijnlijk te maken met het feit dat de significante golfhoogte aan het begin van het profiel gelijk afneemt en zorgt voor enige golfopzet. Dit suggereert dat de golfopzet enigszins relevant begint te worden op het WBI-uitvoerpunt, maar nog wel verwaarloosbaar is.



Figuur 3.18. Resultaten van golfopzet berekening met SWAN en SWASH voor profiel 6, Harlingen.

Tabel 3.35. Resultaten van golfopzet berekeningen met SWAN op verschillende uitvoerlocaties voor profiel 6, Harlingen. (Waterdiepte inclusief golfopzet, Diepte t.o.v. SWL)

Simulatie	Parameter	WBI uitvoerpunt	Diepte 2 [m]	Diepte 1 [m]	Diepte 0 [m]	Maximale golfopzet
Standaard instellingen [Gamma 0,73]	Golfopzet [m]	0,06	0,06	0,15	0,32	0,39
	Significante golfhoogte [m]	2,35	2,06	1,43	0,51	0,11
	Golfhoogte/Waterdiepte [-]	0,40	0,96	1,18	1,33	1,54
Aangepaste instellingen [Gamma 0,60]	Golfopzet [m]	0,07	0,07	0,13	0,26	0,31
	Significante golfhoogte [m]	1,99	1,70	1,23	0,41	0,18
	Golfhoogte/Waterdiepte [-]	0,34	0,79	1,03	1,22	0,98

Tabel 3.36. Resultaten van golfopzet berekeningen met SWASH op verschillende uitvoerlocaties voor profiel 6, Harlingen. (Waterdiepte inclusief golfopzet, Diepte t.o.v. SWL)

Simulatie	Parameter	WBI uitvoerpunt	Diepte 2 [m]	Diepte 1 [m]	Diepte 0 [m]	Maximale golfopzet
Standaard instellingen	Golfopzet [m]	0	-0.09	0.1	0.51	0.54
	Significante golfhoogte [m]	2.9	3.06	2.44	1.61	1.57
	Golfhoogte/Waterdiepte [-]	0.5	1.62	2.21	3.04	3.09

3.8.4 Vergelijking tussen numeriek en theoretische bepaalde golfopzet

De theoretische golfopzet voor profiel 6 wordt bepaald aan de hand van de methode uit de Shore Protection Manual en de formules van Stockdon et al. (2006). De golfparameters en profiel eigenschappen die hiervoor benodigd zijn, zijn gepresenteerd in Tabel 3.37. In deze tabel is de bodemhelling van het dwarsprofiel bepaald vanaf de locatie waar de verhouding tussen significante diep water golfhoogte en waterdiepte (t.o.v. stil water niveau) groter wordt dan het breker criterium van 0,73. De theoretische golfopzet bepaald aan de hand van deze parameters is uiteindelijk gepresenteerd in Tabel 3.38.

Tabel 3.37. Golf en bodemprofiel parameters voor berekening theoretische golfopzet voor profiel 6, Harlingen.

Parameter	Waarde
H _{s,0} , Golfhoogte diep water	3,24 [m]
L ₀ , Golf lengte diep water	70 [m]
S, Golfsteilheid	0,046 [-]
Bodemhelling, 1:X	5 [-]
Irribaren	0,94 [-]

Als de theoretisch en numeriek bepaalde golfopzet waarden worden vergeleken valt op dat SWAN dichter in de buurt ligt van de golfopzet volgens de Shore Protection Manual, terwijl de golfopzet volgens Stockdon et al. (2006) in dit geval groter is dan de waarde berekend door SWASH. Hierbij moet weer worden opgemerkt dat de golfopzet berekend met Stockdon et al. (2006) nu gebruik maakt van de formules waarbij de bodemhelling (in dit geval het onderwatertalud van de dijk) wordt meegenomen. Dit omdat het Irribaren getal groter is dan 0,3. Daarnaast onderschat de Shore Protection Manual de golfopzet als de bodemhelling steiler is dan 1/15, want dit is de maximale bodemhelling waarvoor de golfopzet nog kan worden bepaald. Dit geeft uiteindelijk een grote bandbreedte in de te verwachten golfopzet waarden volgens de verschillende methoden, zie Tabel 3.38.

Tabel 3.38. Vergelijking tussen numeriek en theoretisch bepaalde golfopzet voor profiel 6, Harlingen.

Methode berekening golfopzet	Golfopzet
SWAN	0,39 [m]
SWASH	0,54 [m]
Stockdon et al., 2006	1,06 [m]
Shore Protection Manual	0,24 [m]

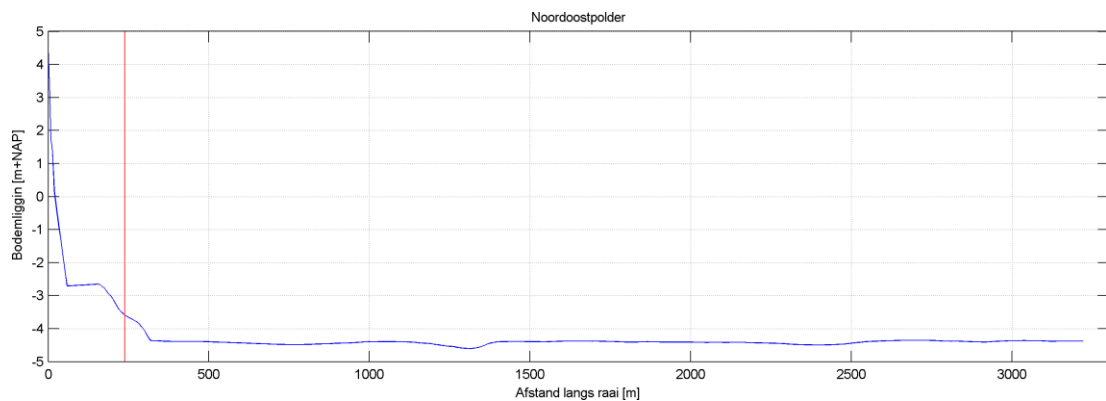
3.9 Profiel 7: IJsselmeer – Steile vooroever, Noordoostpolder

3.9.1 Kustprofiel en randvoorwaarden

Voor het profiel met een steile vooroever in het IJsselmeer is een profiel gekozen langs de Noordoostpolder nabij WBI-uitvoerpunt YM_1_7-2_dk_00669, zie Figuur 3.19. Hier gaat de dijk meteen naar relatief diep water, waarbij het WBI uitvoerpunt op zo'n 180 meter uit de teen van de dijk ligt. Dit kan dan binnen de invloedssfeer van eventuele golfopzet liggen. Golfcondities voor deze locatie zijn afkomstig van het numerieke golfmodel SWAN en waterstanden uit waterbewegingsmodel WAQUA. Het dwarsprofiel is samengesteld uit data van profielenset WDIJ 18 april 2011 voor de directe omgeving van de dijk en uit data van vaklodingen van het IJsselmeer voor de vooroever. Het resulterende profiel is weergegeven in Figuur 3.20.



Figuur 3.19: Locatie WBI-uitvoerpunt YM_1_7-2_dk_00669 langs de Noordoost Polder (bron: RisKeer).



Figuur 3.20: Profiel langs de Noordoost-Polder met dijk steile vooroever.

Voor de randvoorwaarde nabij de teen van de dijk is gebruik gemaakt van het rekenpeil en de golfhoogte uit RisKeer. De golfperiode voor deze locatie is uit Hydra-NL gehaald (norm frequentie 1/10.000). De hydraulische randvoorwaarden voor het WBI-uitvoerpunt zijn gegeven in Tabel 3.39.

Tabel 3.39. Hydraulische randvoorwaarden uit Riskeer/Hydra-NL voor WBI-uitvoerpunt YM_1_7-2_dk_00669

Parameter	Waarde
Rekenpeil	1,54 [m+NAP]
H_s , Significante Golfhoogte	3,19[m]
$T_{m-1,0}$, Golfperiode	6,43 [s]
T_p , Golfpiekperiode	7,59 [s]

3.9.2 Afregelen van de modelrandvoorwaarden

Het afregelen van het numerieke SWAN en SWASH model voor profiel 7 heeft niet geleid tot de juiste significante golfhoogte op het WBI-uitvoerpunt (WBI-uitvoerpunt op 3,59m-NAP), zie Tabel 3.40. In de modellen was het niet mogelijk om de beoogde significante golfhoogte op het WBI-uitvoerpunt te bereiken door de significante golfhoogte op de modelrand verder te vergroten. De gevoeligheidsberekening uitgevoerd met SWAN met een gamma van 0,9 laat zien dat de afwijking ten opzichte van de beoogde significante golfhoogte beduidend kleiner wordt. Dit suggereert dat een grotere waarde voor gamma wellicht een betere modelinstelling is voor het SWAN model.

Tabel 3.40. Resultaat van afregelen modellen voor profiel 7. Verificatie van de berekende golfhoogte in SWAN en SWASH t.o.v. de beoogde golfhoogte uit RisKeeper op het WBI-uitvoerpunt, diepte -3,59 m+NAP.

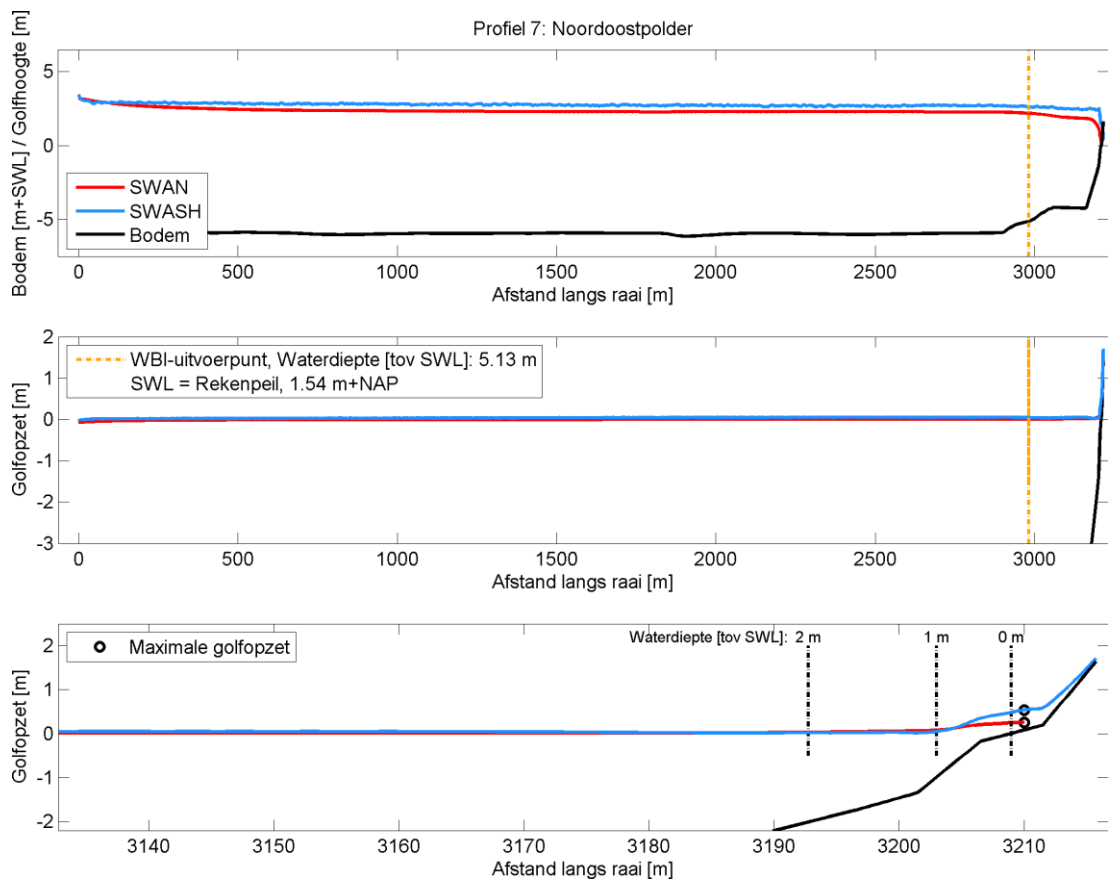
Simulatie	Beoogde golfhoogte	Berekende golfhoogte	Afwijking
SWAN, standaard instellingen [Gamma 0,73]	3,19 [m]	2,19 [m]	-31 [%]
SWAN, aangepaste instellingen [Gamma 0,90]	3,19 [m]	2,62 [m]	-18 [%]
SWASH, standaard instellingen	3,19 [m]	2.62 [m]	-18 [%]

3.9.3 Golfopzet uitkomsten

De uitkomsten van de golfopzet berekeningen zijn gepresenteerd in Figuur 3.21. In het bovenste paneel zijn de significante golfhoogtes zoals berekend met SWAN en SWASH gepresenteerd. Het middelste paneel laat de golfopzet zien over het hele domein, en in het onderste paneel is ingezoomd op het laatste deel van het profiel waar de golfopzet relevant is. Daarnaast zijn de golfopzet uitkomsten ook numeriek uitgevoerd in Tabel 3.41 voor SWAN en in Tabel 3.42 voor SWASH voor vijf uitvoerlocaties in het dwarsprofiel. Dit zijn volgende locaties: het WBI-uitvoerpunt, de locaties waar de waterdiepte ten opzichte van stil water niveau respectievelijk 0, 1, 2 meter zijn, en de locatie waar de golfopzet maximaal is.

De golfopzet resultaten laten zien dat SWAN en SWASH eigenlijk over een groot deel van het profiel een vergelijkbare golfopzet berekenen maar dat SWASH uiteindelijk dichtbij de kust een hogere golfopzet berekent. Dit gaat geleidelijk meer over in golfoploop, zie middelste paneel in Figuur 3.21. Verder wordt er in de gevoeligheidssimulatie met een gamma van 0,9 voor SWAN een iets hogere golfopzet berekend.

Tot slot laten de SWAN en SWASH berekeningen zien dat de golfopzet nabij het WBI-uitvoerpunt gering is, zo berekent SWAN 0,00 meter en SWASH 0,04 meter golfopzet. Dat SWAN op het WBI-uitvoerpunt geen golfopzet berekent, heeft waarschijnlijk te maken met het feit dat de beoogde significante golfhoogte daar niet wordt behaald. Dit laat dus zien dat de golfopzet enigszins relevant begint te worden op het WBI-uitvoerpunt, hoewel deze nog wel verwaarloosbaar lijkt.



Figuur 3.21. Resultaten van golfopzet berekening met SWAN en SWASH voor profiel 7, Noordoostpolder.

Tabel 3.41. Resultaten van golfopzet berekeningen met SWAN op verschillende uitvoerlocaties voor profiel 7, Noordoostpolder. (Waterdiepte inclusief golfopzet, Diepte t.o.v. SWL)

Simulatie	Parameter	WBI uitvoerpunt	Diepte 2 [m]	Diepte 1 [m]	Diepte 0 [m]	Maximale golfopzet
Standaard instellingen [Gamma 0,73]	Golfopzet [m]	0,00	0,03	0,07	0,23	0,26
	Significante golfhoogte [m]	2,19	1,49	1,10	0,28	0,10
	Golfhoogte/Waterdiepte [-]	0,43	0,73	0,99	1,19	0,81
Aangepaste instellingen [Gamma 0,90]	Golfopzet [m]	0,00	0,04	0,10	0,31	0,35
	Significante golfhoogte [m]	2,62	1,89	1,41	0,37	0,07
	Golfhoogte/Waterdiepte [-]	0,51	0,92	1,22	1,15	1,06

Tabel 3.42. Resultaten van golfopzet berekeningen met SWASH op verschillende uitvoerlocaties voor profiel 7, Noordoostpolder. (Waterdiepte inclusief golfopzet, Diepte t.o.v. SWL)

Simulatie	Parameter	WBI uitvoerpunt	Diepte 2 [m]	Diepte 1 [m]	Diepte 0 [m]	Maximale golfopzet
Standaard instellingen	Golfopzet [m]	0,04	0,02	0,05	0,49	0,54
	Significante golfhoogte [m]	2,62	2,4	2,42	1,44	1,52
	Golfhoogte/Waterdiepte [-]	0,51	1,18	2,34	3,02	3,32

3.9.4 Vergelijking tussen numeriek en theoretische bepaalde golfopzet

De theoretische golfopzet voor profiel 7 wordt bepaald aan de hand van de methode uit de Shore Protection Manual en de formules van Stockdon et al. (2006). De golfparameters en profiel eigenschappen die hiervoor benodigd zijn, zijn gepresenteerd in Tabel 3.43. In deze tabel is de bodemhelling van het dwarsprofiel bepaald vanaf twee verschillende locaties, namelijk waar de verhouding tussen significante diep water golfhoogte en waterdiepte (t.o.v. stil water niveau) groter wordt dan het breker criterium van 0,73 en waar die groter wordt dan 0,90. De theoretische golfopzet bepaald aan de hand van deze parameters is, voor gamma 0,73 en 0,90, uiteindelijk gepresenteerd in Tabel 3.44.

Tabel 3.43. Golf en bodemprofiel parameters voor berekening theoretische golfopzet voor profiel 7, Noordoostpolder.

Parameter	Breker criterium Gamma 0,73	Breker criterium Gamma 0,90
$H_{s,0}$, Golfhoogte diep water	3,19 [m]	3,19 [m]
L_0 , Golf lengte diep water	90 [m]	90 [m]
S, Golfsteilheid	0,035 [-]	0,035 [-]
Bodemhelling, 1:X	30 [-]	8 [-]
Irribaren	0,18 [-]	0,63 [-]

Als de theoretisch en numeriek bepaalde golfopzet waarden worden vergeleken voor de standaard instellingen (Breker criterium/Gamma 0,73) valt op dat SWAN ook hier redelijk goed overeenkomt met de theoretisch bepaalde golfopzet, terwijl de golfopzet berekend met SWASH hoger uitvalt. Wordt er echter gekeken naar golfopzet waarden met de aangepaste instellingen (Breker criterium/Gamma 0,9) dan valt op dat SWAN dichterbij de buurt ligt van de golfopzet volgens de Shore Protection Manual, terwijl de golfopzet volgens Stockdon et al. (2006) zelfs groter is dan de waarde berekend door SWASH met de standaard modelinstellingen. Hierbij moet weer worden opgemerkt dat de golfopzet berekend met Stockdon et al. (2006) nu gebruik maakt van de formules waarbij de bodemhelling wordt meegenomen. Dit omdat het Irribaren getal groter is dan 0,3.

De afregeling van het model laat echter zien dat het SWAN model beter presteert wanneer een gamma van 0,90 wordt gebruikt. Daarnaast is een bodemhelling van 1 op 8 ook een betere representatie van het gebied waar de golfopzet belangrijk is in het dwarsprofiel, namelijk pas op het dijktafval. Om deze reden worden de theoretisch en numeriek bepaalde golfopzet waarden behorende bij een breker criterium/gamma van 0,9 betrouwbaarder geacht dan de waarden bij een breker criterium/gamma van 0,73.

Tabel 3.44. Vergelijking tussen numeriek en theoretisch bepaalde golfopzet voor profiel 7, Noordoostpolder.

Methode berekening golfopzet	Standaard instellingen [SWAN, Gamma 0,73]	Aangepaste instellingen [SWAN, Gamma 0,90]
SWAN	0,26 [m]	0,35 [m]
SWASH	0,54 [m]	-
Stockdon et al., 2006	0,27 [m]	0,71 [m]
Shore Protection Manual	0,24 [m]	0,26 [m]

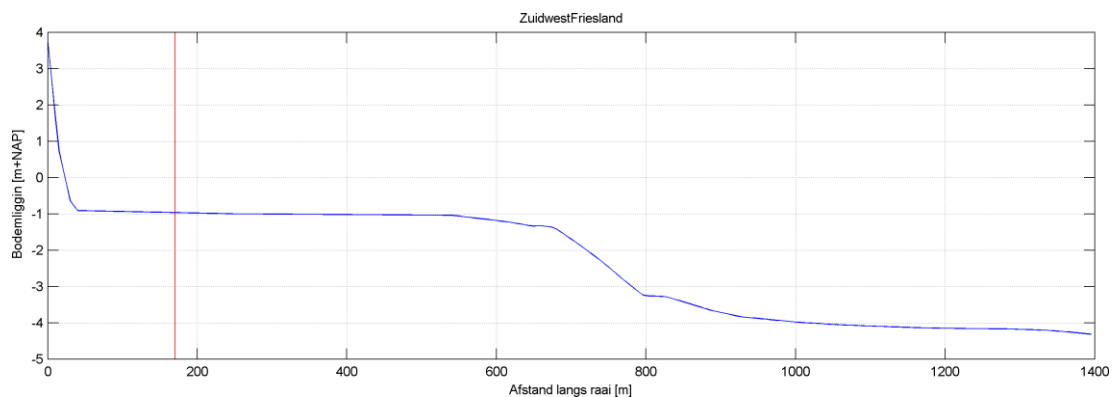
3.10 Profiel 8: IJsselmeer – breed ondiep voorland, Zuidwest Friesland

3.10.1 Kustprofiel en randvoorwaarden

Hier is gekozen voor een profiel langs de Friese kust van het IJsselmeer nabij WBI-uitvoerpunt YM_1_6-1_dk_00923. Dit WBI-uitvoerpunt ligt hier circa 130 meter uit de teen van de dijk. Dit kan dan binnen de invloedsfeer van eventuele golfopzet liggen. Deze locatie is weergegeven in Figuur 3.22. Het dwarsprofiel is samengesteld uit data van profielenset WDIJ 18 april 2011 voor de directe omgeving van de dijk en uit data van vaklodingen van het IJsselmeer voor de vooroever. Het resulterende profiel is weergegeven in Figuur 3.23.



Figuur 3.22: Locatie WBI-uitvoerpunt YM_1_6-1_dk_00923 in zuidwest Friesland (bron: RisKeer).



Figuur 3.23: Profiel langs oever zuidwest Friesland met ondiep voorland.

Voor de randvoorwaarde nabij de teen van de dijk is gebruik gemaakt van het rekenpeil en de golfhoogte uit RisKeer. De golfperiode voor deze locatie is uit Hydra-NL gehaald (norm frequentie 1/10.000). De hydraulische randvoorwaarden voor het WBI-uitvoerpunt zijn gegeven in Tabel 3.45.

Tabel 3.45. Hydraulische randvoorwaarden uit Riskeer/Hydra-NL voor WBI-uitvoerpunt YM_1_6-1_dk_00923.

Parameter	Waarde
Rekenpeil	1,47 [m+NAP]
H_s , Significante Golfhoogte	1,00 [m]
$T_{m-1,0}$, Golfpiekperiode	3,91[s]
T_p , Golfpiekperiode	6,21 [s]

3.10.2 Afregelen van de modelrandvoorwaarden

Het afregelen van het numerieke SWAN en SWASH model voor profiel 8 heeft in de modellen geleid tot de juiste significante golfhoogte op het WBI-uitvoerpunt (WBI-uitvoerpunt op 0,97m-NAP), zie Tabel 3.46. In het SWAN model is de significante golfhoogte iets lager dan de beoogde significante golfhoogte uit RisKeer, terwijl SWASH net iets hogere golven berekent. Naast de standaard SWAN simulatie waarbij voor golfbreken is gerekend met een gamma van 0,73 is er ook een gevoeligheidsberekening uitgevoerd met een gamma van 0,9. De gevoeligheidsberekening uitgevoerd met een gamma van 0,9 laat een beduidend andere significante golfhoogte zien nabij het WBI-uitvoerpunt voor de SWAN simulatie, namelijk zo'n 24% hoger.

Tabel 3.46. Resultaat van afregelen modellen voor profiel 8. Verificatie van de berekende significante golfhoogte in SWAN en SWASH t.o.v. de beoogde significante golfhoogte uit RisKeer op het WBI-uitvoerpunt, diepte -0,97 m+NAP.

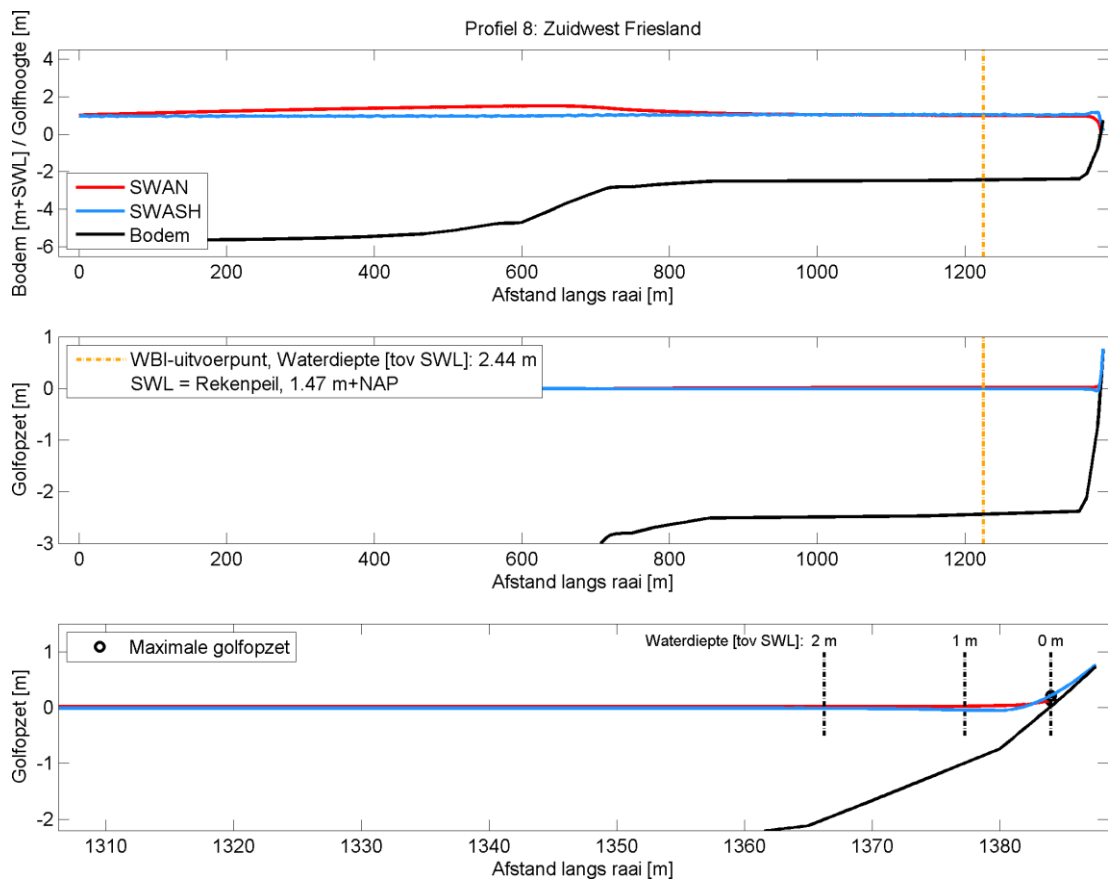
Simulatie	Beoogde golfhoogte	Berekende golfhoogte	Afwijking
SWAN, standaard instellingen [Gamma 0,73]	1 [m]	0,99 [m]	-1 [%]
SWAN, aangepaste instellingen [Gamma 0,90]	1 [m]	1,24 [m]	24 [%]
SWASH, standaard instellingen	1 [m]	1,02 [m]	2 [%]

3.10.3 Golfopzet uitkomsten

De uitkomsten van de golfopzet berekeningen zijn gepresenteerd in Figuur 3.24. In het bovenste paneel zijn de significante golfhoogtes zoals berekend met SWAN en SWASH gepresenteerd. Het middelste paneel laat de golfopzet zien over het hele domein, en in het onderste paneel is ingezoomd op het laatste deel van het profiel waar de golfopzet relevant is. Daarnaast zijn de golfopzet uitkomsten ook numeriek uitgevoerd in Tabel 3.47 voor SWAN en in Tabel 3.48 voor SWASH voor vijf uitvoerlocaties in het dwarsprofiel. Dit zijn volgende locaties: het WBI-uitvoerpunt, de locaties waar de waterdiepte ten opzichte van stil water niveau respectievelijk 0, 1, 2 meter zijn, en de locatie waar de golfopzet maximaal is.

De golfopzet resultaten laten ook hier zien dat SWAN aanvankelijk hogere golfopzet berekent, wat te verklaren is door de eerder afnemende significante golfhoogte in SWAN en de golf set-down in SWASH door shoaling. SWASH berekent echter dicht bij de kust hogere golfopzet, wat geleidelijk meer overgaat in golfoploop, zie middelste paneel in Figuur 3.24. Verder worden er in de gevoeligheid simulaties met een gamma van 0,9 voor SWAN iets hogere golfopzet waarden berekend.

Tot slot laten de SWAN en SWASH berekeningen zien dat de golfopzet nabij het WBI-uitvoerpunt verwaarloosbaar is.



Figuur 3.24. Resultaten van golfopzet berekening met SWAN en SWASH voor profiel 8, Zuidwest Friesland.

Tabel 3.47. Resultaten van golfopzet berekeningen met SWAN op verschillende uitvoerlocaties voor profiel 8, Zuidwest Friesland. (Waterdiepte inclusief golfopzet, Diepte t.o.v. SWL)

Simulatie	Parameter	WBI uitvoerpunt	Diepte 2 [m]	Diepte 1 [m]	Diepte 0 [m]	Maximale golfopzet
Standaard instellingen [Gamma 0,73]	Golfopzet [m]	0,02	0,02	0,02	0,12	0,12
	Significante golfhoogte [m]	0,99	0,95	0,79	0,15	0,15
	Golfhoogte/Waterdiepte [-]	0,40	0,46	0,76	1,50	1,50
Aangepaste instellingen [Gamma 0,90]	Golfopzet [m]	0,01	0,01	0,02	0,16	0,16
	Significante golfhoogte [m]	1,24	1,19	1,02	0,17	0,17
	Golfhoogte/Waterdiepte [-]	0,51	0,59	0,98	1,18	1,18

Tabel 3.48. Resultaten van golfopzet berekeningen met SWASH op verschillende uitvoerlocaties voor profiel 8, Zuidwest Friesland. (Waterdiepte inclusief golfopzet, Diepte t.o.v. SWL)

Simulatie	Parameter	WBI uitvoerpunt	Diepte 2 [m]	Diepte 1 [m]	Diepte 0 [m]	Maximale golfopzet
Standaard instellingen	Golfopzet [m]	-0,01	-0,01	-0,05	0,21	0,21
	Significante golfhoogte [m]	1,02	1,07	1,14	0,64	0,64
	Golfhoogte/Waterdiepte [-]	0,42	0,54	1,2	3,29	3,29

3.10.4 Vergelijking tussen numeriek en theoretische bepaalde golfopzet

De theoretische golfopzet voor profiel 8 wordt bepaald aan de hand van de methode uit de Shore Protection Manual en de formules van Stockdon et al. (2006). De golfparameters en profiel eigenschappen die hiervoor benodigd zijn, zijn gepresenteerd in Tabel 3.49. In deze tabel is de bodemhelling van het dwarsprofiel bepaald vanaf de locatie waar de verhouding tussen significante diep water golfhoogte en waterdiepte (t.o.v. stil water niveau) groter wordt dan het breker criterium van 0,73. De theoretische golfopzet bepaald aan de hand van deze parameters is uiteindelijk gepresenteerd in Tabel 3.50.

Tabel 3.49. Golf en bodemprofiel parameters voor berekening theoretische golfopzet voor profiel 8, Zuidwest Friesland.

Parameter	Waarde
$H_{s,0}$, Golfhoogte diep water	1,23 [m]
L_0 , Golf lengte diep water	60 [m]
S, Golfsteilheid	0,02 [-]
Bodemhelling, 1:X	7 [-]
Irribaren	0,96 [-]

Als de theoretisch en numeriek bepaalde golfopzet waarden worden vergeleken valt op dat SWAN dichter in de buurt ligt van de golfopzet volgens de Shore Protection Manual, terwijl de golfopzet volgens Stockdon et al. (2006) zelfs groter is dan de waarde berekend door SWASH. Hierbij moet weer worden opgemerkt dat de golfopzet berekend met Stockdon et al. (2006) nu gebruik maakt van de formules waarbij de bodemhelling (in dit geval het onderwatertalud van de dijk) wordt meegenomen. Dit omdat het Irribaren getal groter is dan 0,3. Daarnaast onderschat de Shore Protection Manual de golfopzet als de bodemhelling steiler is dan 1/15, want dit is de maximale bodemhelling waarvoor de golfopzet nog kan worden bepaald. Dit geeft uiteindelijk een grote bandbreedte in de te verwachten golfopzet waarden volgens de verschillende methoden, zie Tabel 3.50.

Tabel 3.50. Vergelijking tussen numeriek en theoretisch bepaalde golfopzet voor profiel 8, Zuidwest Friesland.

Methode berekening golfopzet	Golfopzet
SWAN	0,12 [m]
SWASH	0,21 [m]
Stockdon et al., 2006	0,41 [m]
Shore Protection Manual	0,12 [m]

3.11 Conclusies

3.11.1 Vergelijking tussen numeriek en theoretisch bepaalde golfopzet

In Tabel 3.51 is een overzicht gepresenteerd van de maximale golfopzet bepaald met SWAN en SWASH en de theoretisch bepaalde golfopzet volgens de Shore Protection Manual en Stockdon et al. (2006) voor alle 8 dwarsprofielen die zijn bekeken in dit hoofdstuk.

Tabel 3.51: Vergelijking tussen numeriek en theoretisch bepaalde golfopzet voor alle 8 dwarsprofielen.

#	Profiel	Type	Helling 1:X	Irribaren	Golfopzet SWAN	Golfopzet SWASH	Golfopzet SPM	Golfopzet Stockdon
1	Delfland	Duin	57 [-]	0,10 [-]	0,72 [m]	1.18 [m]	0,68 [m]	0,84 [m]
2	Rijnland	Duin	60 [-]	0,10 [-]	0,92 [m]	1.50 [m]	0,71 [m]	0,88 [m]
3	Noord-Holland	Dijk	16 [-]	0,29 [-]	0,88 [m]	1.15 [m]	0,59 [m]	0,59 [m]
4	Goeree	Dijk	10 [-]	0,76 [-]	0,55 [m]	1.06 [m]	0,32 [m]	0,84 [m]
5	Borssele	Dijk	6 [-]	0,80 [-]	0,59 [m]	0.74 [m]	0,31 [m]	1,17 [m]
6	Harlingen	Dijk	5 [-]	0,94 [-]	0,39 [m]	0.54 [m]	0,24 [m]	1,06 [m]
7	Noordoostpolder	Dijk	8 [-]	0,63 [-]	0,35 [m] ¹	0.54 [m]	0,26 [m] ¹	0,71 [m] ¹
8	Zuidwest Friesland	Dijk	7 [-]	0,96 [-]	0,12 [m]	0.21 [m]	0,12 [m]	0,41 [m]

Tabel 3.51 laat zien dat de theoretische golfopzet, volgens de Shore Protection Manual en Stockdon et al. (2006), redelijk vergelijkbaar zijn als het Irribaren golfgetal kleiner is dan 0,3. Dit is het geval voor de profielen 1, 2 en 3. Indien het Irribaren golfgetal 0,3 of hoger is, wat gepaard gaat met een steilere bodemhelling, dan nemen de verschillen tussen de theoretisch bepaalde golfopzet waarden toe. Zoals het geval is voor de profielen 4, 5, 6, 7 en 8. Deze verschillen in theoretische golfopzet zijn te verklaren doordat:

- De golfopzet volgens de Shore Protection Manual wordt onderschat als de bodemhelling steiler is dan 1/15, want dit is de maximale bodemhelling waarvoor de golfopzet nog kan worden bepaald.
- De golfopzet volgens Stockdon et al. (2006) anders wordt bepaald indien het Irribaren golfgetal groter is dan 0,3. Op dat moment wordt de bodemhelling meegenomen in de bepaling van de golfopzet. Dit leidt tot een aanzienlijk grotere golfopzet, die gevoelig is voor de bodemhelling. Daarnaast is er ook onzekerheid over de toepasbaarheid en geldigheid van de formules van Stockdon et al. (2006) voor bodemhellingen steiler dan 1/10.

Verder laat Tabel 3.51 ook zien dat SWASH in alle gevallen een hogere golfopzet berekent dan SWAN. Hierbij moet worden opgemerkt dat de golfopzet berekend door SWASH in het diepere deel van de brekerzone vaak lager is en pas in het laatste ondiepe deel van het profiel groter wordt dan de door SWAN berekende golfopzet. Verschillen tussen de modeluitkomsten zijn deels te verklaren door:

- Verschillen in modelinstellingen en door verschillen in de manier waarop het breken van de golven wordt gemodelleerd in SWAN en SWASH.
- De manier waarop de golfopzet wordt bepaald, dit is in SWAN eenduidig maar in SWASH een stuk lastiger doordat de golfopzet vaak verweven is met de golfoploop.

Als de theoretisch en numeriek bepaalde golfopzet waarden worden vergeleken dan valt op dat SWAN redelijk goed overeenkomt met de theoretisch bepaalde golfopzet indien het Irribaren golfgetal kleiner is dan 0,3, dus voor de profielen 1, 2 en 3, terwijl voor deze profielen de golfopzet

¹ Golfopzet is bepaald met een breker criterium (gamma) van 0,9, aangezien dit betere model resultaten opleverde en representatiever is voor de bepaling van de bodemhelling in het dwarsprofiel.

berekend met SWASH hoger uitvalt. Dit zou kunnen komen omdat in de berekening van de golfopzet in SWASH de golfopzet en de golfoploop verweven lijken, waardoor een deel van de golfopzet misschien toe te schrijven is aan golfoploop. De verschillen tussen SWAN en SWASH zijn kleiner als wordt gekeken naar de golfopzet op de 0 m+SWL locatie.

De maximale golfopzet volgens SWAN, de Shore Protection Manual en Stockdon et al. (2006) geeft een redelijk eenduidig beeld van de golfopzet voor de profielen 1, 2 en 3.

Het vergelijken van de theoretisch en numeriek bepaalde golfopzet waarden voor de profielen 4, 5, 6, 7 en 8 met een steile bodemhelling ter plaatse van de brekerzone (golven breken op dijktaald) en een Irribaren golfgetal groter dan 0,3 geeft een minder eenduidig beeld. De met SWAN berekende golfopzet ligt vaak in de buurt van de golfopzet volgens de Shore Protection Manual, terwijl de golfopzet uit SWASH meer in lijn is met de golfopzet volgens Stockdon et al. (2006). Dit zou deels verklaard kunnen worden doordat:

- de Shore Protection Manual de golfopzet onderschat,
- de golfopzet berekend volgens Stockdon et al. (2006) gevoelig is voor de exacte bodemhelling en er ook onzekerheid is over de toepasbaarheid en geldigheid van deze formule, en
- de golfopzet in SWASH nog sterker verweven lijkt met de golfoploop voor deze profielen.

De maximale golfopzet volgens de numerieke en theoretische methoden geven niet een eenduidig beeld. Een goede schatting van de golfopzet voor de profielen 4, 5, 6, 7 en 8 is dan ook lastig te geven, behalve dat de golfopzet waarschijnlijk tussen de waarde van SWAN en SWASH of Stockdon et al. (2006) in ligt.

Tot slot is in Tabel 3.52 de verhouding tussen golfopzet en de inkomende significante diep water golfhoogte gegeven. Hierin is te zien dat de golfopzet berekend met SWASH en volgens Stockdon et al. (2006) regelmatig een verhouding heeft van rond de 0,2 of hoger. Dit betreft vooral dijken met een steil onderwater taald. Bij de duinprofielen en het profiel bij Den Helder zijn de verhoudingen bij SWASH en Stockdon meer in lijn met de verwachting.

Tabel 3.52: Verhouding tussen golfopzet (η) en inkomende significante diep water golfhoogte ($H_{s,0}$) voor numeriek en theoretisch bepaalde golfopzet en voor alle 8 dwarsprofielen.

#	Profiel	Type	$H_{s,0}$	Irribaren	$\eta/H_{s,0}$ SWAN	$\eta/H_{s,0}$ SWASH	$\eta/H_{s,0}$ SPM	$\eta/H_{s,0}$ Stockdon
1	Delfland	Duin	9,03 [m]	0,10 [-]	0,08 [-]	0,13 [-]	0,07 [-]	0,09 [-]
2	Rijnland	Duin	9,22 [m]	0,10 [-]	0,10 [-]	0,16 [-]	0,08 [-]	0,09 [-]
3	Noord-Holland	Dijk	8,02 [m]	0,29 [-]	0,11 [-]	0,14 [-]	0,07 [-]	0,07 [-]
4	Goeree	Dijk	3,15 [m]	0,76 [-]	0,17 [-]	0,34 [-]	0,10 [-]	0,27 [-]
5	Borssele	Dijk	4,15 [m]	0,80 [-]	0,14 [-]	0,18 [-]	0,07 [-]	0,28 [-]
6	Harlingen	Dijk	3,24 [m]	0,94 [-]	0,12 [-]	0,17 [-]	0,07 [-]	0,33 [-]
7	Noordoostpolder	Dijk	3,19 [m]	0,63 [-]	0,11 ² [-]	0,17 [-]	0,08 ² [-]	0,22 ² [-]
8	Zuidwest Friesland	Dijk	1,23 [m]	0,96 [-]	0,10 [-]	0,17 [-]	0,10 [-]	0,33 [-]

3.11.2 Relevantie van golfopzet bij het WBI-uitvoerpunt

In Tabel 3.53 is een overzicht te zien van de met SWAN en SWASH berekende lokale golfopzet op de locatie van het WBI-uitvoerpunt voor alle 8 dwarsprofielen bekeken in dit hoofdstuk. Deze tabel laat zien dat lokale golfopzet eigenlijk alleen relevant is in het WBI-uitvoerpunt van profiel 3 in Noord-Holland. Hoewel voor de profielen 6 en 7, respectievelijk Harlingen en de Noordoostpolder, ook

² Golfopzet is bepaald met een breker criterium (γ) van 0,9, aangezien dit betere model resultaten opleverde en representatiever is voor de bepaling van de bodemhelling in het dwarsprofiel.

enige golfopzet wordt berekend door respectievelijk SWAN en SWASH. De golfopzet bij deze profielen is echter bij het WBI-uitvoerpunt nog verwaarloosbaar, net zoals voor de profielen 1, 2, 4, 5 en 8.

Ook de uitvoerpunten in de Waddenzee zijn gevoelig voor golfopzet, maar dit is de grootschalige golfopzet die al impliciet in de gebruikte waterstandstatistiek van de kuststations is meegenomen (zie bijvoorbeeld ook paragraaf 2.4). Dit geldt vermoedelijk ook voor de Zeeuwse Delta.

Tabel 3.53: Relevantie van golfopzet bij de WBI uitvoerpunten voor alle 8 dwarsprofielen.

#	Profiel	Diepte (D) WBI-uitvoerpunt	Golfhoogte (H _s) WBI-uitvoerpunt	H _s /d WBI-uitvoerpunt	Golfopzet SWAN	Golfopzet SWASH
1	Delfland	25,73 [m+SWL]	9,03 [m]	0,35 [-]	0,00 [m]	-0,01 [m]
2	Rijnland	25,75 [m+SWL]	9,22 [m]	0,36 [-]	0,00 [m]	-0,01 [m]
3	Noord-Holland	4,89 [m+SWL]	3,53 [m]	0,72 [-]	0,42 [m]	0,27 [m]
4	Goeree	6,96 [m+SWL]	2,94 [m]	0,42 [-]	0,01 [m]	-0,01 [m]
5	Borssele	29,08 [m+SWL]	4,06 [m]	0,14 [-]	0,00 [m]	-0,04 [m]
6	Harlingen	5,77 [m+SWL]	3,24 [m]	0,56 [-]	0,06 [m]	-0,00 [m]
7	Noordoostpolder	5,13 [m+SWL]	3,19 [m]	0,62 [-]	0,00 [m] ³	0,04 [m]
8	Zuidwest Friesland	2,44 [m+SWL]	1,00 [m]	0,41 [-]	0,02 [m]	-0,01 [m]

In de gevallen dat golfopzet bij het WBI-uitvoerpunt relevant is of enigszins relevant begint te worden neemt de verhouding tussen significante golfhoogte en waterdiepte toe. Voor profiel 3, Noord-Holland, waar golfopzet relevant is ligt de verhouding tussen significante golfhoogte en waterdiepte rond 0,7. Voor de profielen 6 en 7 waar golfopzet ook enigszins relevant begint te worden is de verhouding tussen significante golfhoogte en waterdiepte ook relatief hoog, namelijk rond de 0,56 en 0,62. Dit lijkt dus een goede indicator te zijn voor de relevantie van de golfopzet bij het WBI-uitvoerpunt.

3.12 Discussie

3.12.1 Relevantie van golfopzet bij het WBI-uitvoerpunt Profiel 3

De golfopzet nabij het WBI-uitvoerpunt is volgens de berekeningen relevant voor profiel 3 in Noord-Holland.

Er valt hier te discussiëren over wat de juiste en meeste logische diep water golftrandvoorwaarde moet zijn voor de 1D modellen voor dit profiel. Dit kan vervolgens invloed hebben op de berekende golfopzet. In de huidige afregeling van de modellen voor dit profiel is de modelrandvoorwaarde aanzienlijk verhoogd om de significante golfhoogtes in het WBI-uitvoerpunt te reproduceren. Zo is op de modelrand een significante golfhoogte van 8 meter opgelegd om op het WBI-uitvoerpunt een significante golfhoogte van 3,53 meter te halen. Enerzijds is het logisch dat de afgeregelde golfhoogte op de modelrand in diep water hoger is, zeker gezien het feit dat de golfhoogte op de 20m-NAP lijn voor de nabij gelegen Noord-Hollandse duinen (500 meter zuidelijker, WBI-uitvoerpunt 7-150) 10,16 meter is. Anderzijds ligt het WBI-uitvoerpunt bij Huisduinen mogelijk meer beschut achter de Noorderhaaks. Het zou ook kunnen dat er 2D golf effecten van belang zijn in dit gebied. Desondanks is het zeer aannemelijk dat golfopzet al relevant is in het WBI-uitvoerpunt gezien het feit dat 1) de verhouding tussen de significante golfhoogte uit RisKeer en waterdiepte met ca. 0,7

³ Golfopzet is bepaald met een aangepaste modelinstelling, breker criterium/gamma van 0,9, aangezien dit betere model resultaten opleverde en representatiever is voor de bepaling van de bodemhelling in het dwarsprofiel.

relatief hoog is en 2) de significante golfhoogte op diep water waarschijnlijk groter is dan op het WBI-uitvoerpunt.

In dit verband kan de vraag gesteld worden of de locatie van het WBI-uitvoerpunt hier wel goed gekozen is. Het punt ligt in de brekerzone dicht bij de teen van de dijk op een diepte van 0,5m-NAP, terwijl de diepte op een afstand van 1 golflengte zeewaarts oploopt tot 30m-NAP.

3.12.2 Afregelen SWAN en SWASH modellen

In het afregelen van de 1D SWAN en SWASH modellen is gebleken dat het voor de profielen 6 en 7 niet mogelijk was om de beoogde significante golfhoogte uit RisKeer te reproduceren, zelfs niet door de golfhoogte op de rand verder te vergroten. Dit terwijl de RisKeer en/of Hydra-NL randvoorwaarden op het WBI-uitvoerpunt ook zijn bepaald met SWAN. De hoofdoorzaak hiervan is vermoedelijk de 1D aanpak, terwijl in werkelijkheid ook 2D effecten een grote rol spelen. Verdere oorzaken zouden kunnen zijn:

- Verschil in de mate van detail in het model en in de bodem.
- Verschil in opgelegde waterstand in de SWAN modellen.
- Verschil in gebruikte modelinstellingen (bijv. breker criterium). In deze studie zijn de standaard instellingen voor SWAN (en ook voor SWASH) gebruikt. Toepassing van WBI instellingen (voor SWAN) kan mogelijk tot andere resultaten leiden.

4 METINGEN IN NEDERLAND

4.1 Algemeen

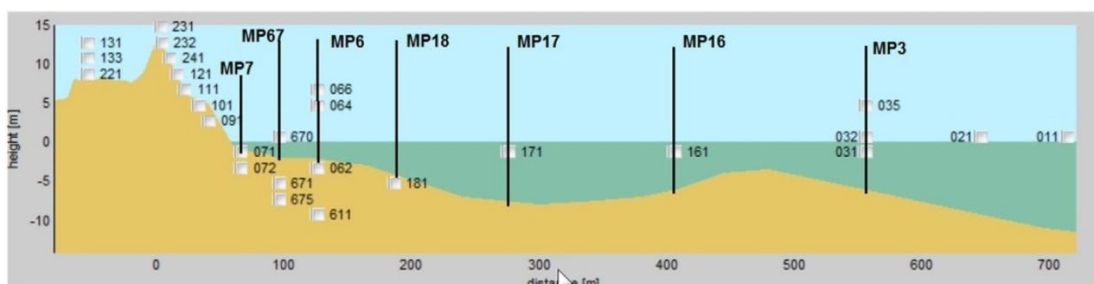
Naast de analytische beschrijvingen, gootproeven en metingen in het buitenland is het zeer zinvol om daadwerkelijk gemeten golfopzet langs de Nederlandse kust of oevers te hebben. Hiermee kan dan onomstotelijk de grootte van de golfopzet langs een kustprofiel onder bepaalde golfcondities worden vastgesteld. Er zijn drie locaties gevonden waar in het verleden metingen zijn uitgevoerd waar mogelijk informatie over golfopzet te vinden is. Dit zijn Petten, Egmond aan Zee en Terschelling. Verder wordt ook nog kort stilgestaan bij enkele andere locaties.

4.2 Petten

Een overzicht van bijna 20 jaar aan veldmetingen op de meetlocatie in Petten is beschreven in Wenneker et al. (2016). De locatie bevond zich langs de Hondsbossche en Pettemer zeekering, zie Figuur 4.1. Inmiddels is de harde zeekering vervangen door een zandige oplossing en daarmee is de meetlocatie verdwenen. Een dwarsdoorsnede van de voormalige meetlocatie met daarop aangegeven de positie van de diverse meetinstrumenten is weergegeven in Figuur 4.2. Een groot aantal van deze instrumenten was in staat om het waterniveau te meten. Hiermee zou langs het dwarsprofiel het verloop van de waterstand geanalyseerd kunnen worden.



Figuur 4.1: Luchtfoto meetlocatie Petten (links) en locatie meetinstrumenten (Wenneker et al., 2016).



Figuur 4.2: Dwarsprofiel meetlocatie Petten met locatie meetinstrumenten (Wenneker et al., 2016).

Om te achterhalen of gedurende deze lange meetperiode ook analyses zijn gemaakt van de (golf) opzet is er contact geweest met de volgende personen:

- Als eerste is er contact gezocht met Bart Spelt (RWS), de tweede auteur Wenneker et al. Hij vertelt dat er met name is gekeken naar het verloop van de golfhoogte en niet naar de waterstand. Zijn advies is contact op te nemen met Herman Peters (RWS).
- Herman Peters is de derde auteur van Wenneker et al. Volgens hem zou de data wel aanwezig moeten zijn, maar hij weet niet of er iets over golfopzet is gedocumenteerd. Na een uitgebreide zoektocht van zijn kant meldt hij: *Mijn zoektocht is helaas vruchteloos gebleken. Ik heb nu intussen alle mappen en dozen gehad, maar niets gevonden, waar ik jullie mee zou kunnen helpen. Het lijkt me daarom het beste om te rapporteren dat er (althans voor zover wij nu kunnen nagaan) niets met de Petten data is gedaan om meer te weten te komen over golfopzet, dan wel golf set-down, maar we kunnen uiteraard wel de aanbeveling doen dat het nuttig lijkt om met de bestaande dataset alsnog een golfopzet analyse uit te voeren. Dat zou een interessant stukje werk kunnen betekenen!*
- Ook Dennis Hordijk en Jacco Groeneweg (via Caroline Gautier) zijn benaderd, maak ook zij weten niet van het bestaan van uitgevoerde analyses betreffende golfopzet.

Wel blijkt dat de meetgegevens van Petten allemaal bewaard zijn gebleven. Dus een nadere analyse op de data om de golfopzet te onderzoeken lijkt zeer zinvol. Aandachtspunt hierbij is het verticale referentieniveau van de meetapparatuur en eventuele aanwezigheid van stroomdruk.

4.3 Egmond aan Zee

Herman Peters (RWS) gaf aan dat er in het verleden door RWS ook in Egmond aan Zee is gemeten. In zijn zoektocht naar Petten data heeft hij ook gekeken naar Egmond, maar ook hier helaas niet een reeds uitgevoerde analyse kunnen vinden.

Op Advies van Quijrijn Lodder is contact opgenomen met Maarten Kleinhans van de Universiteit Utrecht. Volgens hem wordt een golfopzet analyse lastig bij Egmond aan Zee en hij adviseerde om ook Gerben Ruessink te benaderen.

Volgens Gerben Ruessink zijn er door de Universiteit Utrecht veel veldmetingen gedaan aan golftransformatie op het intergetijde-strand, ook tijdens stormen (tot offshore significante golfhoogte van orde 5 à 6m). Deze metingen zijn gedaan bij Egmond aan Zee, de Zandmotor, Ameland en nog een aantal plaatsen. Maar volgens hem is het voor goede golfopzet en golf set-down metingen essentieel om de sensorhoogte t.o.v. NAP heel nauwkeurig te kennen (binnen 1-2 cm nauwkeurig). Daar heeft de focus van de metingen nooit gelegen en soms was het in het veld ook niet mogelijk om die nauwkeurigheid te halen. Daarom is er bij deze metingen ook nooit onderzoek gedaan naar golfopzet en golf set-down.

4.4 Terschelling

In het artikel van Stockdon et al. (2006) worden metingen van Terschelling gepresenteerd. Meer informatie over deze metingen is tot nu toe niet achterhaald.

4.5 Amelander Zeegat

Momenteel wordt er in het kader van het SBW programma veel gemeten in het Amelander zeegat. Quijrijn Lodder vermoedt dat hier misschien ook wel iets gemeten gaat worden betreffende golfopzet.

4.6 Begroeid voorland kust Groningen

Door Vincent Vuik (HKV, TU Delft) zijn metingen uitgevoerd op diverse locaties in een kwelder gebied in noordoost Groningen. In Figuur 4.3 is in het linker paneel de meetlocatie in Groningen weergegeven en in het rechter paneel is de locatie van de verschillende meetinstrumenten te zien.

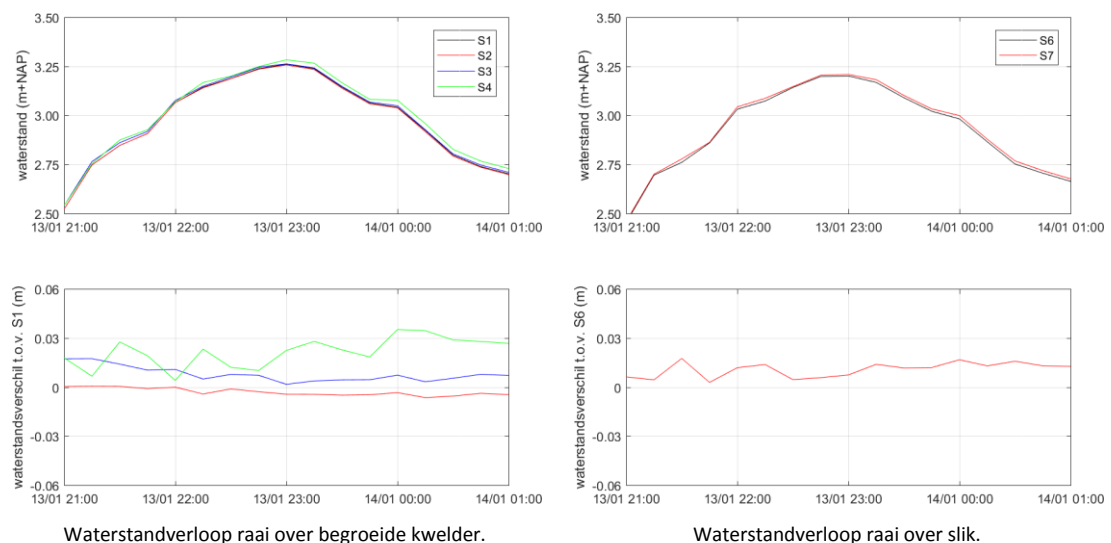


Figuur 4.3: Locatie metingen begroeide kwelders uit onderzoek van Vincent Vuik.

Gedurende een storm op 13 en 14 januari 2017 zijn op diverse locaties langs twee raaien met behulp van drukdozen de waterstand en de golfhoogte gemeten. In Tabel 4.1 is voor de diverse meetlocaties het bodemniveau gegeven.

Tabel 4.1: Meetinstrumenten tijdens storm in januari 2017 (Vincent Vuik).

Gauge	Description	Lon	Lat	Bed level (m+NAP)	Sensor height (m)
S1	Marsh edge -2.5 m	6.65887	53.45689	1.10	0.11
S2	Marsh edge +50 m	6.65905	53.45645	1.36	0.09
S3	Marsh edge +100 m	6.65925	53.45601	1.63	0.11
S4	Near dike, in line with S1-S4	6.65990	53.45435	1.59	0.10
S5	Near dike, pioneer marsh	6.66946	53.45673	1.25	0.10
S6	Mudflat, 290 m offshore	6.67400	53.46059	0.60	0.19
S7	Mudflat, near dike	6.67503	53.45823	1.16	0.12



Waterstandverloop raai over begroeide kwelder.

Waterstandverloop raai over slik.

Figuur 4.4: Waterstandverloop langs 2 raaien gedurende storm op 13-14 januari 2017 (Vincent Vuik).

De gemeten waterstand voor raai S1-S2-S3-S4 (links) en raai S6-S7 (rechts) is te zien in Figuur 4.4. Tevens is hier het waterstandverschil ten opzichte van S1 (links) en S6 (rechts) weergegeven. Het waterstandverschil over de raaien is 1 tot 4cm. De significante golfhoogte net voor het voorland is ongeveer 0,85m nabij S1 en 1,05m nabij S6. Met een waterstand van circa 3,25m+NAP en een maximale bodemligging van $\pm 1,60\text{m}+\text{NAP}$ voor de linker raai en $\pm 1,20\text{m}+\text{NAP}$ voor de rechterraai varieert de waterdiepte tussen de 1,6m (links) en 2,0m (rechts). Bij deze verhouding tussen golfhoogte en waterdiepte beginnen de hoogste golven (H_{max}) te breken. Dit zijn echter nog individuele golven die discontinu voorkomen en dit zal waarschijnlijk nog geen golfopzet van betekenis veroorzaken. De waterstandverhoging van 1 tot 4cm is vermoedelijk niet of nauwelijks het gevolg van golfopzet maar waarschijnlijk van windopzet. Ook de schuine golfval en het effect van de vegetatie reduceren mogelijke golfopzet.

4.7 Duck, North Carolina, USA

Tot slot wordt hier ook nog een locatie buiten Nederland genoemd; Duck, North Carolina, USA. In diverse publicaties wordt verwezen naar golfopzet metingen uit Duck, zie bijvoorbeeld Stockdon et al. (2006). Ook tijdens het gesprek met Gerben Ruessink wordt verwezen naar metingen bij Duck.

Herman Peters (RWS) heeft in het kader van zijn zoektocht naar meetdata contact gehad met Kent Hathaway (Research Oceanographer bij USACE Field Research Facility) om te informeren of op de USACE Research Facility bij Duck (<http://www.frf.usace.army.mil/>) ook gemeten is naar golfopzet. Volgens Kent Hathaway is er in het verleden wel gemeten aan golfopzet, maar wordt getwijfeld aan de kwaliteit van deze metingen.

Zijn antwoord is:

We have made some attempts at measuring wave set-up but still have not done well at quantification. There are datasets collected during our special experiments that had cross-shore arrays of gauges (pressure, currents, sonar altimeters) but these sensors and others we put out had offsets that would need to be considered. Mainly the Bernoulli Effect due to currents. Recently, the past couple years, we have collected data from buried pressure gauges in the hope to reduce the Bernoulli pressure drop. These gauges are primarily for wave measurement but will be looking at set-up.

Wave set-up is of high interest to the Corps, it's just that it has been difficult to obtain quality data. We're hoping to see something come from these few cross-shore gauges collecting the past couple years.

5 GOLFOFZET IN MODELLEN EN MODULES WBI

5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt eerst de herkomst van de hydraulische randvoorwaarden (waterstand, golfhoogte en –periode en eventueel golfrichting) in de WBI-uitvoerpunten besproken. De methodiek om tot deze randvoorwaarden te komen kan per watersysteem verschillen.

Vervolgens worden de verschillende rekenmodules besproken die binnen het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium worden gebruikt om de hydraulische randvoorwaarden in de WBI-punten te vertalen naar een belasting nabij de teen van de waterkering of om direct een belastingsituatie uit te rekenen (zie ook Deltares, 2017a). Er is in deze studie alleen gekeken naar die rekenmodules die met golfopzet hebben te maken.

De volgende modellen en modules worden besproken:

- SWAN
- DaF
- DUROS-plus
- XBeach
- Golfoverslag uit RisKeer

5.2 Hydraulische randvoorwaarden

5.2.1 SWAN

In de bepaling van de hydraulische randvoorwaarden voor het WBI speelt het numerieke golfmodel SWAN een belangrijke rol. 2D SWAN wordt bijvoorbeeld gebruikt om de diep water golfcondities te vertalen naar condities nabij de kust of om op gesloten watersystemen (bijvoorbeeld het IJsselmeer) de golfcondities te modelleren. Voor SWAN worden hierbij speciale WBI instellingen gebruikt.

Caroline Gautier (Deltares) meldt dat in 2D SWAN wordt gerekend zonder golfopzet. Binnen 2D SWAN bestaat wel de optie om, stand-alone, te rekenen met golfopzet, maar dit is onnauwkeurig en met veel mitsen en maren omgeven (zie ook de gebruikershandleiding van SWAN (Delft University of Technology, 2016)). Uit het interview met Gerbrant van Vledder kan worden geconcludeerd dat 2D SWAN alleen gekoppeld met een stromingsmodel geschikt is om de golfopzet correct te bepalen. Dit wordt vooralsnog niet toegepast binnen het WBI.

5.2.2 Duinen

Quirijn Lodder (RWS) meldt dat voor de Nederlandse duinenkust de hydraulische randvoorwaarden (waterstand, golfhoogte en -periode) in de WBI-uitvoerpunten gebaseerd zijn op de diep water statistiek. Dus op metingen afkomstig van diep water meetstations.

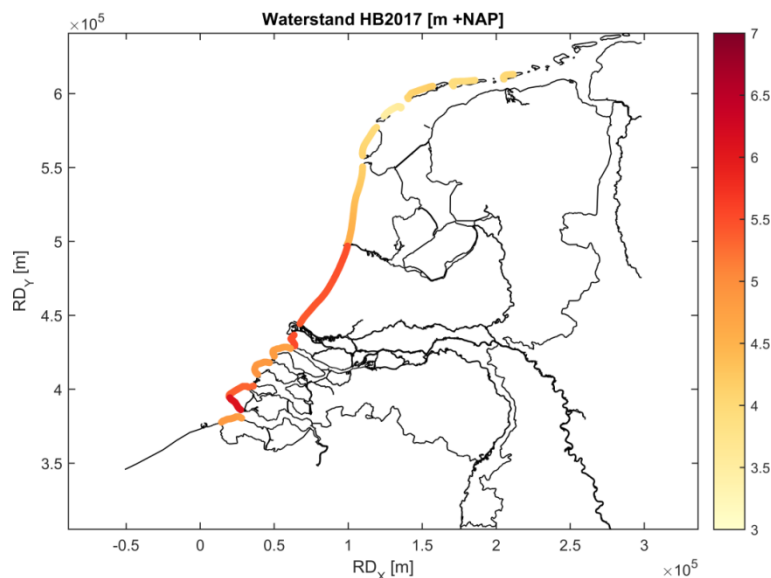
Anders wordt het rond de Zeeuwse kust en rond de zeegaten van de Waddenzee. Door de aanwezigheid van de voordelta en de buitendelta ziet de bodemligging er daar anders uit dan langs de Hollandse Kust.

Ten zuiden van de Maasvlakte tot en met de Zeeuwse duinenkust worden de diep water golf randvoorwaarden getransformeerd, middels golf-reductiefactoren, naar een nieuwe 'diep water' golf dichter bij de kust. Dit wordt gedaan omdat er op de voordelta veel golfbreking plaatsvindt en er anders veel te conservatieve golfcondities worden toegepast. De waterstand blijft ongewijzigd.

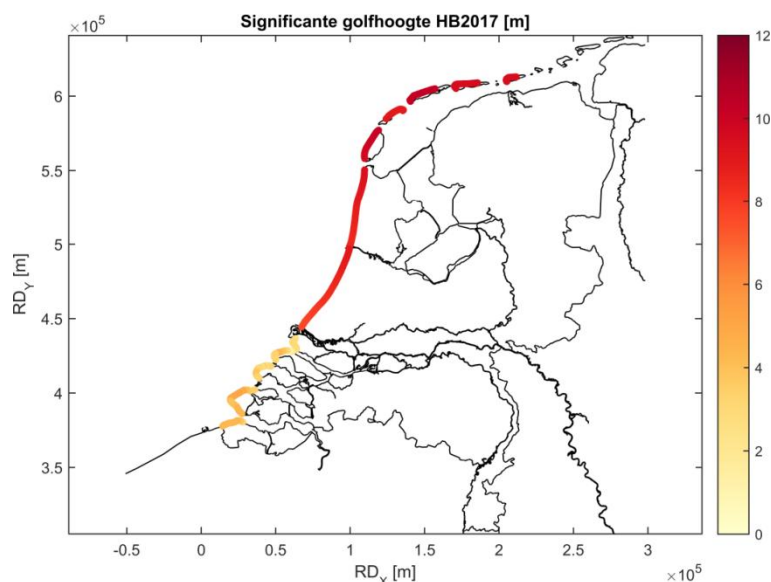
Voor de duinenkust van de Waddeneilanden geldt in eerste instantie de diep water statistiek. Vooral rond de zeegaten is dit meestal te conservatief want daar treedt veel energie dissipatie op. Maar vanwege een getrapte beoordeling is dat niet altijd een probleem. Op sommige plekken zijn de

duinen dermate groot dat ze ook aan die veel te conservatieve waterstanden en golven voldoen. Mochten ze niet voldoen dan wordt met behulp van SWAN een andere golfperiode en golfhoogte afgeleid waarbij de waterstand wel gelijk wordt gehouden.

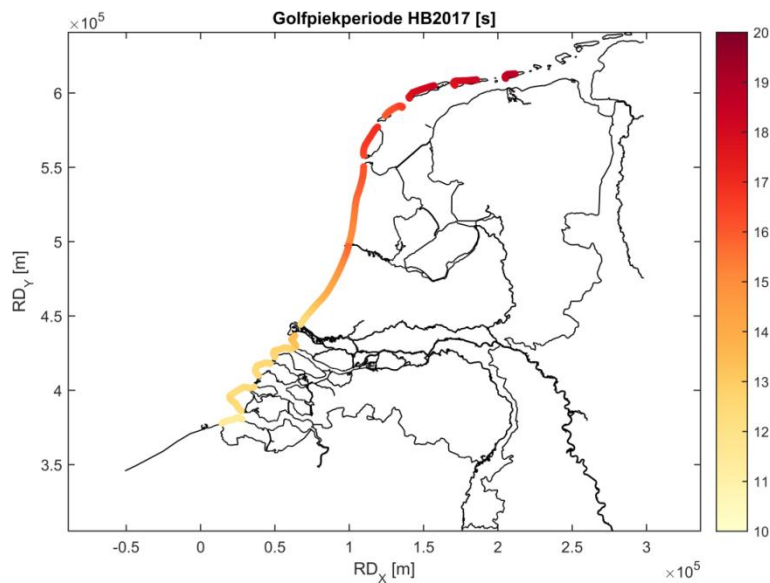
In Deltares (2016a) zijn voor de Nederlandse duinenkust figuren gegeven met daarop de waterstand, de significante golfhoogte en de golfpiekperiode zoals deze gelden voor Hydraulische Belastingen 2017 voor Duinwaterkeringen. Deze zijn hieronder weergegeven in respectievelijk Figuur 5.1 t/m Figuur 5.3. In Figuur 5.2 is duidelijk zichtbaar dat de significante golfhoogte ten zuiden van de Maasvlakte is gereduceerd door de aanwezigheid van de voordelta. Bij de Waddeneilanden geldt nog de diep water conditie.



Figuur 5.1: Waterstand langs de kust volgens HB2017 voor duinwaterkeringen (Deltares, 2016a).



Figuur 5.2: Significante golfhoogte langs de kust volgens HB2017 voor duinwaterkeringen (Deltares, 2016a).



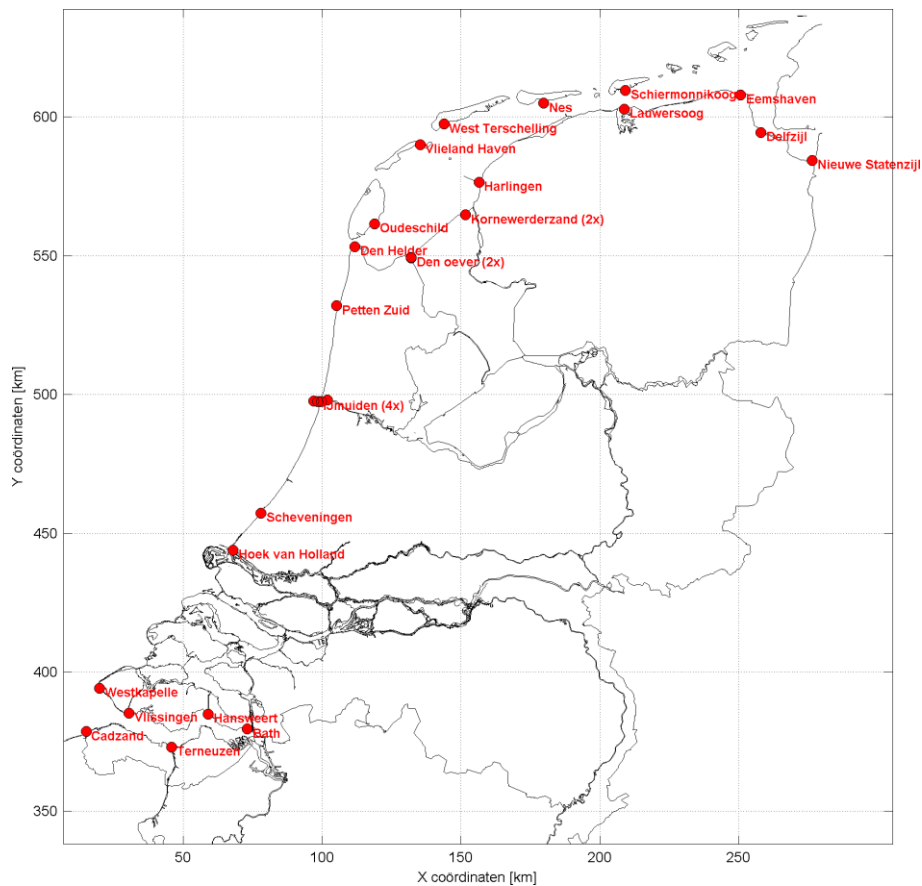
Figuur 5.3: Golfpiekperiode langs de kust volgens HB2017 voor duinwaterkeringen (Deltares, 2016a).

5.2.3 Dijken

Voor de dijken langs de Nederlandse kust, de Waddenzee en de Westerschelde wordt gebruik gemaakt van de waterstandstatistiek van de kuststations, deze stations zijn weergegeven in Figuur 5.4. De waterstanden in de meetstations worden via triangulaire interpolatie, al dan niet gebruik makend van WAQUA resultaten, vertaald naar de diverse WBI-uitvoerpunten.

Voor de zoete wateren, zoals bijvoorbeeld het IJsselmeer, wordt het model WAQUA gebruikt voor het afleiden van de waterstanden. Het WAQUA model is afgeregeld op lokale waterstandsmetingen.

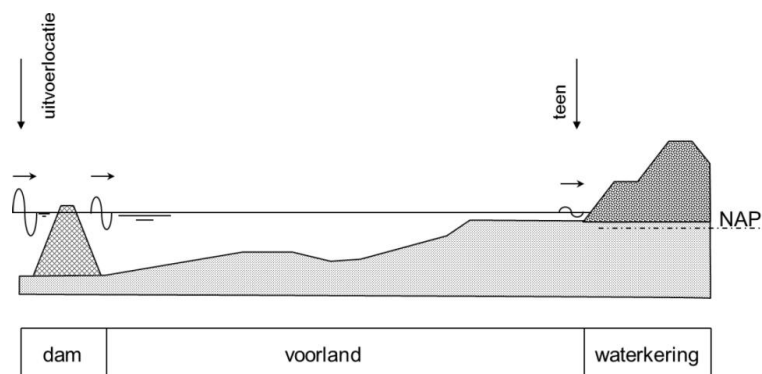
De golfcondities worden bepaald met SWAN op een bepaalde afstand uit de teen van de dijk. Deze afstand is niet gebaseerd op een fysische redenering (bijvoorbeeld buiten de brekerzone) maar meer op cel grootte van het gebruikte model. In de praktijk ligt de uitvoerlocatie zo tussen de 50 en 200 meter buiten de teen.



Figuur 5.4: Waterstandstations langs de kust ten behoeve van waterstandstatistiek.

5.3 Voorlandmodule DaF

Indien men verwacht dat de golfcondities tussen het WBI-uitvoerpunt en de teen van de dijk significant veranderen doordat er een dam of een voorland aanwezig is, dan kan een aanvullende module worden toegepast. Deze voorlandmodule verdisconteert het effect van een dam en/of een voorland op de hydraulische condities. Het principe van de voorlandmodule is weergegeven in Figuur 5.5.



Figuur 5.5: Principe van een voorlandmodule (RWS, 2016).

In het huidige WBI wordt gebruik gemaakt van de voorlandmodule DaF (Dam and Foreshore). DaF is de opvolger van ENDEC. Hieronder volgt een bondige beschrijving van de aanwezige processen met betrekking tot een aanwezig voorland (de dam wordt hier dus buiten beschouwing gelaten). Hierbij

is gebruik gemaakt van informatie uit het interview met Hans de Waal en uit Deltares (2016b) en Deltares (2017b).

In de DaF module wordt de golfhoogte gereduceerd op basis van shoaling, diepte geïnduceerd breken (Baldock et al., 1998) en bodemwrijving (Jonsson, 1966). De golfperiode blijft ongewijzigd. Verder houdt de DaF module geen rekening met een verandering in waterstand door golfopzet of windopzet, ook lokale golfgroei door wind of toename van de golfhoogte door refractie wordt niet meegenomen.

Volgens Hans de Waal wordt de golfopzet doorgaans berekend als waterstandsverhoging op de plaats waar de stilwaterlijn aansluit op de bodem. Op die plek is alle golfenergie gedissipeerd en daarmee de golfopzet maximaal. In de voorlandmodule worden de hydraulische condities bepaald ter plaatse van de teen van de waterkering. In de meeste gevallen is daar nog niet alle golfenergie gedissipeerd en dus is de golfopzet daar kleiner. Desalniettemin kan bij veel golfenergie-dissipatie op het voorland (hoge inkomende golven op een duidelijk oplopend voorland) de golfopzet aan het eind van het voorland toch significant zijn.

De DaF module is dus een vereenvoudigde weergave van de werkelijkheid, waarbij de doelstelling is om aan de conservatieve kant te blijven. Maar door de verwaarlozing van diverse processen, waaronder golfopzet, wordt hier niet noodzakelijkerwijs aan voldaan. In Deltares (2017b) wordt gesteld dat indien er de wens is om deze processen wel in de DaF module te bouwen dat het dan raadzaam is om de DaF module uit te breiden met de golvenmodule van Xbeach.

Hans de Waal stelt dat de relevantie van de golfopzet altijd bekeken moet worden in relatie tot andere processen (zoals bijvoorbeeld windopzet, luchtdrukverschillen en lokale golfgroei door wind) die ook niet worden meegenomen en dat hij het gevoel heeft dat golfopzet van ondergeschikt belang is.

5.4 Duinafslag

Zoals vermeld in paragraaf 5.2.2 wordt voor de hydraulische randvoorwaarden van de duinen gebruik gemaakt van de diep water statistiek. Deze condities bevinden zich dus ver buiten de invloedssfeer van eventuele golfopzet. Tijdens het interview met Quirijn Lodder is gesproken over de Nederlandse duinenkust en de methodiek voor de bepaling van duinafslag. Voor de duinafslagberekeningen wordt momenteel gebruik gemaakt van het programma DUROS-plus, al dan niet met een toeslag voor de kromming van de kust.

DUROS is gebaseerd op uitgebreid onderzoek en golfgootproeven uit de jaren 70, 80 en 90 van de vorige eeuw. Hieruit kwam de TAW Leidraad Duinafslag voort. Hier zat de initiële aanname in dat de maatgevende golfperiode langs de Nederlandse kust 12 seconden was. In 2005 werd duidelijk dat dat niet correct is en dat tijdens stormen ook langere golfperiodes kunnen voorkomen. Toen is DUROS-plus geïntroduceerd waarin ook de golfperiode wordt meegenomen.

Quirijn Lodder geeft aan dat er destijds een groot aantal schaalproeven is gedaan in de deltagoot van het Waterloopkundig Laboratorium in De Voorst. Hierbij is de golfenergie op diep water (dus rond de 20m-NAP) via een afslagparabool gecorreleerd aan de mate van duinafslag. Dit is dus een empirische benadering. Hiervoor zijn allerlei profielen van diep water tot duinvoet onderzocht, dus de helling van de vooroever zit in de proeven. Door deze benadering zitten alle golfprocessen er impliciet in. Je rekent niet de processen uit, je kijkt alleen wat gaat erin en wat komt eruit. Dus golfopzet zit impliciet in de duinafslag modellering van DUROS-plus.

Rijkswaterstaat heeft het plan om op termijn over te stappen op numerieke modellering zoals XBeach. Het is de ambitie om XBeach een vaste plek te gaan geven in het WBI2023. Ook dan zal er voor duinafslag rekening gehouden moeten worden met golfopzet, maar dit proces zit van zichzelf al in XBeach.

Geconcludeerd kan worden dat zowel de huidige methodiek met DUROS-plus als de toekomstige methodiek rekening houdt met golfopzet. Het belangrijkste in de beide methodieken is dan welke probabilistische waarden (de waterstand- en golfstatistiek) als invoer worden gehanteerd. Voor de Hollandse duinen kunnen deze direct worden afgeleid uit metingen maar voor de duinen rond de Zeeuwse kust en rond de zeegaten van de Waddenzee geldt een andere benadering.

Voor de duinen van de Zeeuwse delta worden sinds begin jaren 90 van de vorige eeuw de diep water golfrandvoorwaarden getransformeerd, middels golf-reductiefactoren, naar een nieuwe 'diep water' golf dichter bij de kust. Dit wordt gedaan omdat er op de voordelta veel golfbreking plaatsvindt en er anders veel te conservatieve golfcondities worden toegepast waardoor een zeer groot deel van de duinwaterkeringen in Zeeland als onvoldoende zou worden beoordeeld. De waterstand blijft hierbij ongewijzigd. De verwachting is dat de golfopzet die in de Voordelta optreedt door retourstroming via de oude getijgeulen grotendeels zal vereffenen, waardoor de aanname van ongewijzigde waterstand terecht lijkt.

Voor de duinenkust van de Waddeneilanden geldt in eerste instantie de diep water statistiek. Op de middenstukken van de eilanden gaat dit meestal nog wel goed maar vooral rond de zeegaten is dit meestal te conservatief, daar treedt namelijk veel meer energie dissipatie op dan standaard is aangenomen in DUROS-plus. Maar vanwege een getrapte beoordeling is dat niet altijd een probleem. Op sommige plekken zijn de duinen dermate groot dat ze ook aan die veel te conservatieve waterstanden en golven voldoen. In situaties waar dit niet het geval is volgt middels een geavanceerde beoordeling met SWAN een aangepaste golfperiode en golfhoogte die op ongeveer 5 kilometer uit de kust geldt. Ook hier wordt de waterstand gelijk gehouden en vindt geen correctie plaats ten gevolge van golfopzet. Of dat hier gerechtvaardigd is, valt te bezien. Gezien de bijzondere vorm van de Waddenzee met haar buitendelta wordt de golfopzet zeewaarts van de Waddeneilanden gegenereerd, en verspreidt deze zich vervolgens in de Waddenzee zelf. Daarom lijkt het bij de duinen op de koppen van de eilanden niet uit te sluiten dat er een verhoging van de waterstand optreedt als gevolg van golfopzet op de buitendelta. Voor de duinenkust aan de zee kant van de eilanden geldt echter dat de golfopzet impliciet in de duinafslagberekening wordt meegenomen.

5.5 Golfoverslag

Het overslagdebiet bij een dijk wordt berekend binnen RisKeer. Voor de empirische relaties in dit programma zijn destijds veel gootproeven uitgevoerd, onder andere door Hans de Waal. De proeven waren bijna allemaal gebaseerd op een vlakke bodem. Dus als de golfcondities en de waterstand bij de teen van het talud bekend zijn dan wordt binnen RisKeer het overslagdebiet uitgerekend. Alle processen op het talud van de dijk zijn dan impliciet in de formuleringen verwerkt.

De invloed van een eventueel voorland wordt binnen RisKeer niet meegenomen. Als de hydraulische randvoorwaarden op een bepaalde afstand uit de teen worden bepaald en er is tussen deze locatie en de teen een oplopend voorland aanwezig dan wordt de DaF module toegepast. Maar hierin wordt alleen de gereduceerde golfhoogte ter plaatse van de teen bepaald, en niet de daarbij optredende golfopzet. Dus loopt men het risico een overslagberekening uit te voeren met een te lage waterstand, met name als zeewaarts van het uitvoerpunt al breking optreedt. Afhankelijk van de intensiteit van deze breking en de vorm van het voorland is dit wel of niet verwaarloosbaar.

6 DISCUSSIE OVER BELANG GOLFOPZET VOOR NEDERLANDSE WATERSYSTEMEN

6.1 Algemeen

In dit hoofdstuk is voor ieder onderzocht profiel beschreven waar de onzekerheden zitten met betrekking tot golfopzet. Hierbij komen verschillende onderdelen van de verkennende studie naar golfopzet samen.

6.2 Nederlandse duinenkust

6.2.1 Hollandse duinenkust

Voor de Hollandse duinen kust zijn twee profielen in Delfland en in Rijnland doorgerekend met SWAN en SWASH. Hierbij is onder maargevende condities door SWAN een golfopzet berekend van 0,7 à 0,9 meter. Volgens de methoden uit de Shore Protection Manual en Stockdon et al. (2006) komt de golfopzet uit op 0,7 à 0,8 meter. Dit is dus allemaal dezelfde orde grootte. SWASH berekent een hogere maximale golfopzet van rond de 1,5 meter.

De kustprofielen bij de duinenkust geven bij de maatgevende condities voornamelijk spilling golven.

Voor het WBI zijn de hydraulische randvoorwaarden gebaseerd op diep water statistiek van zowel de golfcondities als de waterstanden. De WBI-uitvoerpunten liggen rond de 20 meter dieptelijn. Voor de hydraulische belasting wordt hier primair naar duinafslag gekeken waarbij gebruik wordt gemaakt van DUROS-plus. De invoer voor DUROS-plus is de diep water conditie, waarna de optredende golfopzet in de empirische formules is verdisconteerd. Mocht men in de toekomst overstappen op XBeach dan wordt ook in dit numerieke model rekening gehouden met golfopzet.

Dus voor de Hollandse duinenkust wordt binnen de methodiek van het WBI keurig rekening gehouden met golfopzet.

6.2.2 Zeeuwse duinenkust

Voor de Zeeuwse duinenkust zijn in het kader van deze studie geen SWAN of SWASH golfopzet berekeningen gemaakt.

Bij de bepaling van de duinafslag wordt gebruik gemaakt van DUROS-plus waarbij vanwege de aanwezigheid van de voordelta de diep water golfcondities worden vertaald naar condities op zo'n 5 à 10 kilometer uit de kust. Hierbij wordt de waterstand niet aangepast. Het gedeeltelijk breken van de diep water golven op de rand van de vooroever zal lokaal golfopzet genereren, maar het is de verwachting dat door de geometrie van de kust deze slechts lokaal, dus ter plaatse van de vooroever, zal zijn.

Door in DUROS-plus gebruik te maken van de gereduceerde diep water golfcondities in combinatie met de diep water waterstand zal de golfopzet die wordt opgewekt in grofweg de laatste kilometers naar de kust verdisconteerd zitten in de resultaten van deze module. Dus ook hier geldt dat binnen het WBI rekening wordt gehouden met golfopzet.

6.2.3 Waddenzee duinenkust

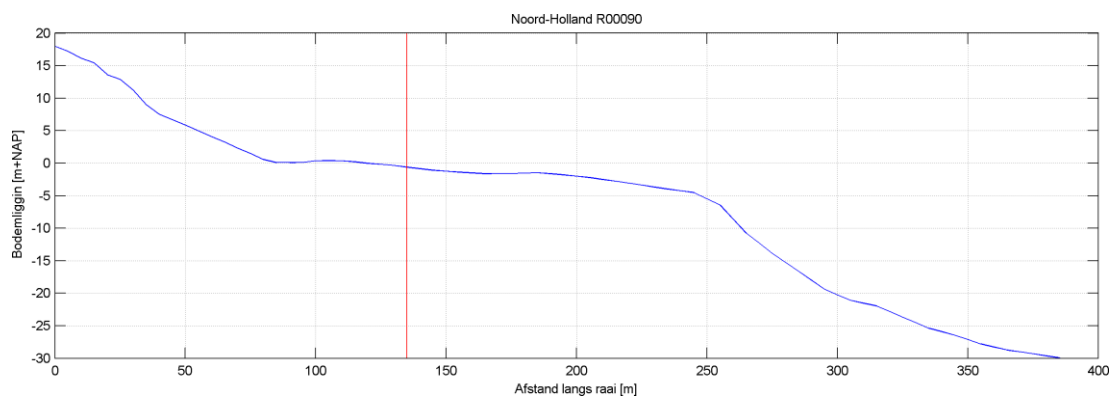
Ook voor de duinen langs de Waddeneilanden zijn in deze studie geen SWAN of SWASH golfopzet berekeningen gemaakt. De hydraulische randvoorwaarden die worden gebruikt in DUROS-plus zijn in eerste instantie afkomstig van de diep water statistiek en er wordt dus geen rekening gehouden met de golfreducerende werking van de buitendelta. Pas als het duin met deze condities als onvoldoende wordt beoordeeld en de geometrie daartoe aanleiding geeft, vindt er met SWAN een aanpassing van

de golfcondities plaats, waarbij de waterstand dan weer ongewijzigd blijft. Dit is mogelijk het geval rond de koppen van de eilanden, aansluitend aan de zeegaten.

In de DUROS-plus berekeningen waarbij gereduceerde golfcondities worden toegepast op de rekenrand zou het mogelijk kunnen zijn dat de waterstand op deze rekenrand te laag is ten gevolge van het brekingsproces op de buitendelta en de daardoor opgewekte golfopzet. Het is duidelijk dat dit een sterk 2-dimensionaal vraagstuk is dat zich niet leent voor een 1D benadering. Een gekoppelde berekening met SWAN en een stromingsmodel zou meer duidelijkheid kunnen geven over de ruimtelijke verdeling van de golfopzet rond de (koppen van de) Waddeneilanden.

6.3 Dijk Helderse zeewering

De Helderse zeewering bij Huisduinen is een zeedijk in het noordwesten van de kop van Noord-Holland. Net ten zuiden hiervan ligt een duinenkust waarbij de hydraulische randvoorwaarden zijn gebaseerd op de diep water condities, maar voor de Helderse zeewering gelden de condities op het WBI-uitvoerpunt op zo'n 50 meter afstand uit de teen van de dijk, zie Figuur 6.1. Voor de dijk ligt een diepe geul met een steile vooroever, voor de teen van de dijk gaat het profiel over in een flauw talud. De golfcondities worden hier voor het WBI bepaald met behulp van 2D SWAN berekeningen en de waterstand volgt uit de statistiek van de waterstandstations langs de kust. De waterstandstations in de nabijheid zijn Den Helder en Petten zuid.



Figuur 6.1: Dwarsprofiel bij Helderse Zeewering (rode lijn geeft locatie WBI-punt weer).

Uit de uitgevoerde SWAN en SWASH golfopzet berekeningen blijkt dat dit WBI-uitvoerpunt tijdens maatgevende condities midden in de brekerzone ligt en dus onder invloed is van golfopzet. Ter plaatse van het WBI-punt wordt een golfopzet berekend van 0,1 à 0,4 meter. Hierbij kan 0,1 meter als een soort ondergrens worden beschouwd voor het wel of niet relevant zijn van golfopzet. Het lijkt er dus op dat de golfopzet op het WBI-punt relevant is.

Voor de duinen direct ten zuiden van de Helderse zeewering geldt een diep water waterstand volgens RisKeer van 4,32m+NAP. Voor de het meest zuidelijke punt van de zeedijk geldt volgens RisKeer een iets lagere waterstand van 4,28m+NAP, terwijl in dit laatste punt juist een verhoging mag worden verwacht in verband met golfopzet (en wellicht ook windopzet). Het is daarom aannemelijk dat de invloed van golfopzet bij de Helderse zeewering ten onrechte niet wordt meegenomen.

De condities op het WBI-punt worden gebruikt voor een golfoverslag berekening met RisKeer. Hierin zal dan een te lage waterstand worden opgegeven. Gezien de geometrie van het profiel landwaarts van het WBI-punt hoeft er waarschijnlijk geen voorlandmodule te worden toegepast en zal het overslagdebiet direct binnen RisKeer kunnen worden bepaald. In dit programma zijn alle processen op het talud van de dijk al impliciet verwerkt, dus ook de golfopzet die landwaarts van het uitvoerpunt op het dijktalud zal optreden.

Een ander aandachtspunt bij een WBI-uitvoerlocatie in de brandingszone is het feit dat de 2D SWAN berekeningen die zijn uitgevoerd voor de bepaling van de hydraulische randvoorwaarden van het WBI niet in staat zijn om een verhoging van de waterstand ten gevolge van golfopzet te berekenen. Hierdoor zouden in werkelijkheid hogere golven kunnen bestaan op het WBI-punt dan door 2D SWAN is berekend. Voor de golfoverslag berekening in RisKeer houdt dit bijvoorbeeld in dat er met zowel een te lage golfhoogte als met een te lage waterstand wordt gerekend.

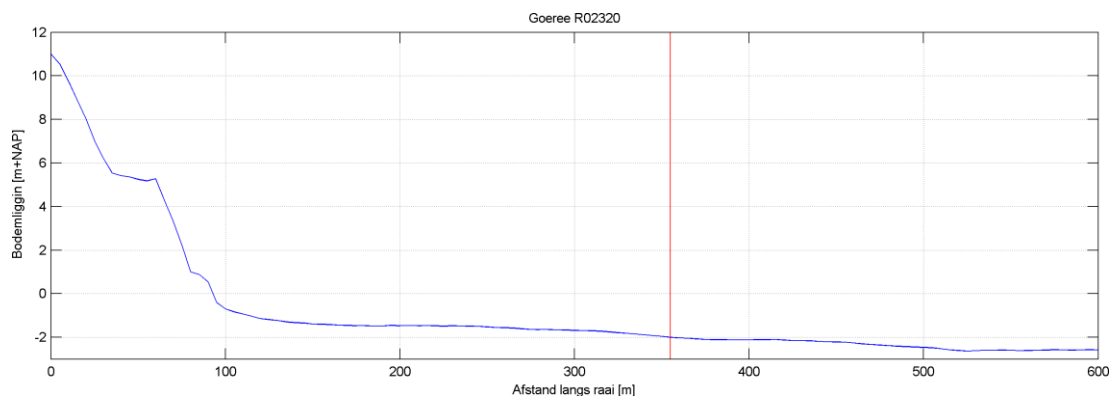
Concluderend kan worden gesteld dat het niet wenselijk is om een WBI-uitvoerpunt in de brandingszone te plaatsen. Hierdoor wordt de golfopzet die zich heeft ontwikkeld vanaf de brekerlijn tot aan het WBI-uitvoerpunt niet meegenomen in de hydraulische randvoorwaarden in dit punt. In het geval van de Helderse zeevering is dit orde grootte decimeters.

Een bijkomend aandachtspunt is de golfhoogte zelf. Als het uitvoerpunt in de brekerzone ligt is de onzekerheid over de juiste golfhoogte groot, omdat het maar de vraag is of de modellen het verloop van de golfhoogte tijdens het proces van breken goed weergeven. Het is bovendien de vraag of de golfhoogte die “ergens” in de brekerzone optreedt de maatgevende golfhoogte is voor de toetsing en voor het ontwerp, niet alleen van de kruinhoogte, maar ook van de sterkte van de bekleding.

Als er in de toekomst wordt gekozen om het WBI-uitvoerpunt buiten de brekerzone te plaatsen dan wordt voor de beoordeling van de dijk de DaF voorlandmodule belangrijk, omdat een deel van het breken van de golven al op het onderwater talud voor de teen van de dijk plaatsvindt. In deze module wordt de invloed van golfopzet niet meegenomen. Uit de SWAN en SWASH berekeningen blijkt de golfopzet ter plaatse van de teen van de dijk tussen de 0,2 en 0,5 meter te zijn.

6.4 Dijk langs Zeeuwse Noordzeekust

Langs de Noordzeekust in Zeeland zijn diverse dijken aanwezig. Dit zijn voornamelijk de dammen tussen de Zeeuwse eilanden. In deze analyse is een dijkprofiel op de Brouwersdam beschouwd. Het profiel wordt gekenmerkt door een lange flauwe vooroever waarbij het WBI-uitvoerpunt zich zo'n 250 meter uit de teen van de dijk bevindt, zie Figuur 6.2.



Figuur 6.2: Dwarsprofiel bij de Brouwersdam (rode lijn geeft locatie WBI-punt weer).

De golfcondities voor het WBI worden hier bepaald met behulp van 2D SWAN en de waterstand volgt uit de statistiek van de waterstandstations langs de kust. De golfhoogte voor locaties langs de Zeeuwse kust is al gereduceerd doordat er op de voordelta, zo'n 5 à 10 kilometer uit de kust, veel golfbreking plaatsvindt. De golfopzet die op de rand van de voordelta wordt opgewekt zal zich vermoedelijk niet geheel richting de Zeeuwse kust verspreiden maar grotendeels via de geulen terugstromen richting de Noordzee. Eventuele golfopzet die de kust wel bereikt is verwerkt in de statistiek van de waterstandstations langs de kust.

De waterstandstations in de nabijheid zijn o.a. Hoek van Holland en Vlissingen. Het is op voorhand niet uit te sluiten dat bij deze stations enige vorm van golfopzet merkbaar zal zijn. Voor Hoek van

Holland geldt dat tijdens noordwesten storm de golfopzet die wordt gegenereerd op de duinenkust zich zou kunnen verplaatsen over de Noorderdam (kruinhoogte van slechts 2m+NAP) richting de meetlocatie in de monding van de Nieuwe Waterweg. De meetlocatie bij Vlissingen ligt in de monding van de Westerschelde. Het is onzeker of op deze locatie ook al enige golfopzet aanwezig zal zijn. Als dit al het geval is dan betekent dit dat de invloed van golfopzet op de Voordelta al verwerkt is in de waterstandmetingen die gebruikt worden voor de bepaling van de hydraulische randvoorwaarden, en hoeft daarvoor dus niet te worden gecorrigeerd. In de monding van de zeegaten kunnen mogelijk ook variaties in windopzet en getij een rol spelen.

Uit de uitgevoerde SWAN en SWASH golfopzet berekeningen blijkt dat het WBI-uitvoerpunt zich onder maatgevende condities buiten de brandingzone bevindt. Ter hoogte van de teen, op circa 1m-NAP, is de berekende golfopzet nog steeds verwaarloosbaar klein. Een golfoverslag berekening met RisKeer kan dan zonder problemen worden uitgevoerd. De golfopzet op het talud van de dijk zit verwerkt in de empirische relaties van dit programma. SWAN en SWASH berekenen uiteindelijk een golfopzet rond de stilwaterlijn tussen de 0,3 en 0,6 meter.

Er kan dus geconcludeerd worden dat voor dit profiel geen problemen worden verwacht in relatie tot golfopzet. De golfcondities in het WBI-uitvoerpunt ondervinden nog geen invloed van golfopzet en voor de gehanteerde waterstand geldt dat er geen invloed wordt gemist. Hooguit kan er zelfs een beperkte toename van waterstand door golfopzet zijn verwerkt in het rekenpeil, maar dit lijkt allemaal in de marge van de onzekerheden weg te vallen. De golfopzet op het dijktaalud zelf is verdisconteerd in de golfoverslag berekening in RisKeer.

6.5 Westerschelde

In de Westerschelde zijn de hydraulische randvoorwaarden bepaald met behulp van 2D SWAN berekeningen (golven) en met de waterstand statistiek van de meetstations in de Westerschelde. Voor de Westerschelde geldt alleen de lokale schaal voor de golfopzet. Eventuele golfopzet die wordt opgewekt op de voordelta heeft naar verwachting geen invloed op de waterstand in de Westerschelde zelf, en zo ja, dan is deze reeds aanwezig in de metingen.

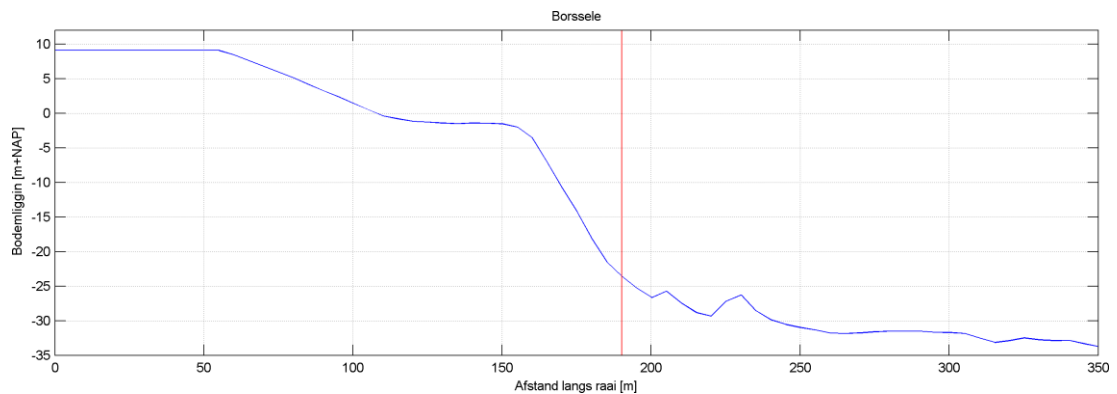
Er wordt ook niet verwacht dat in de waterstand statistiek van de Westerschelde meetstations Vlissingen, Hansweert, Bath en Terneuzen (en wellicht ook Cadzand en Westkapelle) de lokaal opgewekte golfopzet een rol zal spelen.

In de Westerschelde is een profiel gekozen bij Borssele, zie Figuur 6.3. Het profiel kenmerkt zich door een steile voorover van 25m-NAP tot ongeveer 2m-NAP. Daarna volgt een min of meer horizontaal gedeelte tot aan de dijkteen. Het WBI-uitvoerpunt ligt op een diepte van ongeveer 23-NAP. Hier is geen golfbreking en dus ook geen golfopzet aanwezig.

Uit de uitgevoerde SWAN en SWASH golfopzet berekeningen blijkt dat onder maatgevende condities de brekerzone pas nabij de dijkteen (rond een diepte van 2m-NAP) begint. Er hoeft dan ook geen voorlandmodule te worden toegepast waardoor de condities uit het WBI-punt direct kunnen worden gebruikt voor de golfoverslag berekening in RisKeer. Hier geldt weer dat de golfopzet op het dijktaalud in de berekeningen is verwerkt.

SWAN en SWASH berekenen uiteindelijk een golfopzet rond de stilwaterlijn tussen de 0,4 en 0,6 meter.

Voor dit profiel kan worden geconcludeerd dat er voor wat betreft de golfopzet geen problemen worden verwacht bij de toetsing van het dijkprofiel.



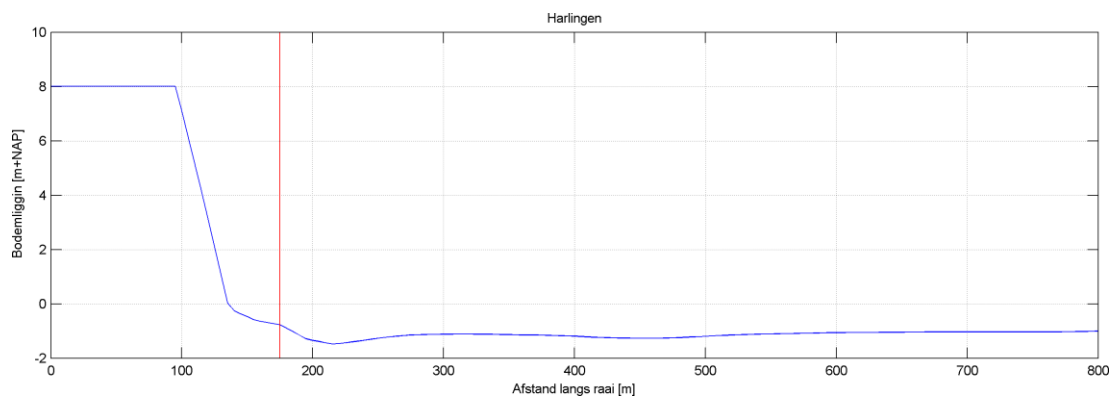
Figuur 6.3: Dwarsprofiel bij Borssele (rode lijn geeft locatie WBI-punt weer).

6.6 Waddenzee dijken

Voor de dijken langs de Waddenzee geldt voor de golfopzet de grootschalige en de kleinschalige beschouwing (zie ook paragraaf 2.4). De grootschalige golfopzet wordt gegenereerd op de buitendelta en zal zich min of meer integraal verspreiden over de Waddenzee. Daarnaast zal er op de ondiepe vooroevers en/of het dijktaalud nog enige golfopzet plaatsvinden, dit valt onder de kleinschalige beschouwing.

De grootschalige golfopzet die o.a. optreedt tijdens noordwestelijke stormen zit verwerkt in de waterstandstatistiek van de meetstations in de Waddenzee. Daarmee hoeft er geen correctie plaats te vinden voor het rekenpeil in het WBI-uitvoerpunt. De golfcondities in de WBI-punten worden bepaald met 2D SWAN berekeningen..

De dijken langs de Waddenzee kenmerken zich bijna allemaal door een ondiep voorland met een relatief steil dijktaalud. Voor de golfopzet studie is een profiel gekozen net ten zuiden van Harlingen. Het profiel is weergegeven in Figuur 6.4. Het WBI-punt ligt ongeveer 35 meter uit de teen van de dijk.



Figuur 6.4: Dwarsprofiel bij Harlingen (rode lijn geeft locatie WBI-punt weer).

Uit de uitgevoerde SWAN en SWASH golfopzet berekeningen blijkt dat onder maatgevende condities op het WBI-uitvoerpunt niet of nauwelijks sprake is van golfopzet. Ook bij de teen van dijk, op 0m+NAP, is in de berekeningen nog geen duidelijke golfopzet zichtbaar. Pas op het talud van de dijk neemt de golfopzet toe tot enkele decimeters. Er hoeft dan ook geen voorlandmodule te worden toegepast waardoor de condities uit het WBI-punt direct kunnen worden gebruikt voor de golfoverslag berekening in RisKeer. Hier geldt weer dat de golfopzet op het dijktaalud in de berekeningen is verwerkt.

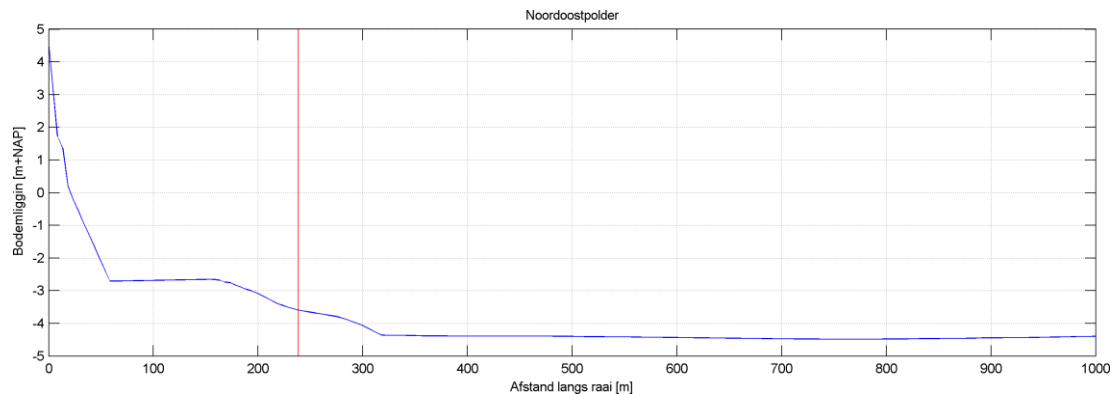
Voor dit profiel kan worden geconcludeerd dat er voor wat betreft de golfopzet geen problemen worden verwacht bij de toetsing van het dijksprofiel.

6.7 IJsselmeer dijken

Voor het IJsselmeer geldt voor het WBI dat de waterstanden worden bepaald met WAQUA en de golfcondities met 2D SWAN. Het WAQUA model is afgeregeld op lokale waterstandsmetingen. Het IJsselmeer is relatief ondiep, met een gemiddelde bodemligging van grofweg 4m-NAP. Er zijn op het IJsselmeer twee profielen onderzocht; één met een steile vooroever en één met een breed voorland.

6.7.1 Steile vooroever

Voor een profiel met een steile vooroever is gekozen voor een locatie waar de bodemligging tot aan het dijksprofiel ongeveer 4m-NAP is. De keuze is gevallen op een profiel in de Noordoostpolder, zie Figuur 6.5. Het WBI-uitvoerpunt ligt op ongeveer 180 meter uit de teen van de dijk op een overgangtalud van 4m-NAP naar 3m-NAP. Dit plateau van 3m-NAP is zo'n 120 meter breed.



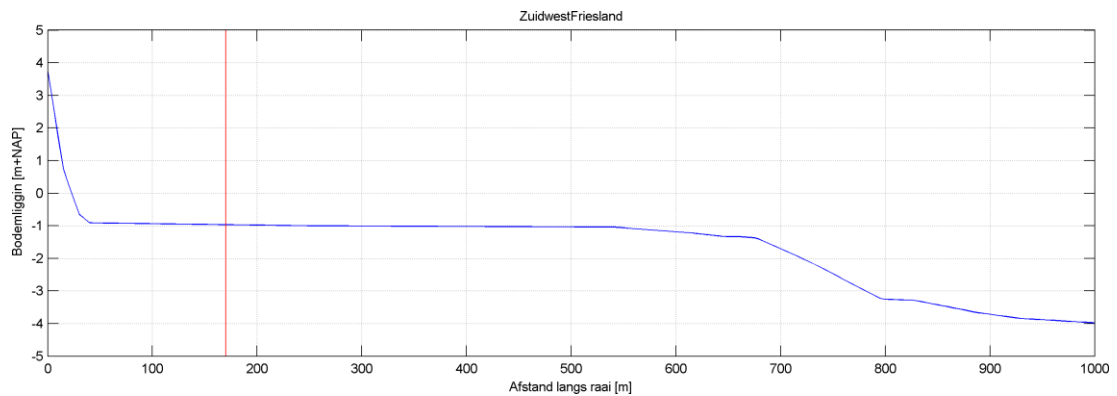
Figuur 6.5: Dwarsprofiel bij Noordoost Polder (rode lijn geeft locatie WBI-punt weer).

Uit de uitgevoerde SWAN en SWASH golfopzet berekeningen blijkt dat onder maatgevende condities op het WBI-uitvoerpunt niet of nauwelijks sprake is van golfopzet. Ook bij de teen van dijk, op 3m-NAP, is in de berekeningen nog geen duidelijke golfopzet zichtbaar. Pas op het talud van de dijk neemt de golfopzet toe tot enkele decimeters. Er hoeft dan ook geen voorlandmodule te worden toegepast waardoor de condities uit het WBI-punt direct kunnen worden gebruikt voor de golfoverslag berekening in RisKeer. De golfopzet op het dijktalud is verdisconteerd in de empirische relaties van de golfoverslag berekeningen.

Voor dit profiel kan worden geconcludeerd dat er voor wat betreft de golfopzet geen problemen worden verwacht bij de toetsing van het dijksprofiel.

6.7.2 Breed voorland

Een profiel met een breed en relatief ondiep voorland is gevonden langs de IJsselmeer oevers in Zuidwest Friesland. De bodem gaat hier op grote afstand uit de over van 4m-NAP naar 1m-NAP. Dit ondiepe voorland zet zich door tot aan de teen van de dijk, zie Figuur 6.6. Het WBI-uitvoerpunt bevindt zich ongeveer 130 meter uit de teen van de dijk.



Figuur 6.6: Dwarsprofiel in Zuidwest Friesland (rode lijn geeft locatie WBI-punt weer).

Met behulp van SWAN en SWASH is voor dit profiel onder maatgevende condities de golfopzet berekend. Op het WBI-uitvoerpunt is niet of nauwelijks sprake van golfopzet. Ook bij de teen van dijk is in de berekeningen geen duidelijke golfopzet zichtbaar. Pas op het talud van de dijk neemt de golfopzet toe tot maximaal 0,1 à 0,2 meter. Ook hier hoeft dan geen voorlandmodule te worden toegepast waardoor de condities uit het WBI-punt direct kunnen worden gebruikt voor de golfoverslag berekening in RisKeer. De golfopzet op het dijktalud is verdisconteerd in de empirische relaties van de golfoverslag berekeningen.

Voor dit profiel kan worden geconcludeerd dat er voor wat betreft de golfopzet geen problemen worden verwacht bij de toetsing van het dijksprofiel.

7 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

7.1 Conclusies

7.1.1 Hoofdpunten

In deze paragraaf worden de belangrijkste conclusies samengevat:

- Op een enkele uitzondering na is er geen reden te veronderstellen dat WBI te optimistisch is door het niet meenemen van golfopzet, in de meeste gevallen is het effect impliciet wel ergens meegenomen.
- Golfopzet bedraagt bij loodrecht invallende golven normaliter maximaal 8-15% van de inkomende diep water significante golfhoogte (en lijkt evenredig met \cos van invalshoek).
- Voor golfopzet kan onderscheid gemaakt worden in globale en lokale golfopzet. De grootschalige golfopzet wordt gegenereerd op de randen van de voordelta en buitendelta en de hierdoor veroorzaakte waterstandverhogingen zijn impliciet aanwezig in de waterstandstatistieken van de meetstations langs de kust. Voor de Waddenzee geldt grofweg dat 10% van de totale opzet wordt veroorzaakt door deze globale golfopzet. Naast deze globale golfopzet treedt er nabij de waterkering lokale golfopzet op.
- Significante golfopzet treedt pas landwaarts van de brekerlijn op, in veel gevallen zelfs pas boven het onderwatertalud van de dijk. Golfopzet is zelden van belang op de WBI-uitvoerpunten en is, behalve bij relatief lage waterstanden, vaak zelfs op de dijkteen nog vrij beperkt. In zeldzame gevallen kan het WBI te optimistisch zijn, wanneer het uitvoerpunt in de brekerzone ligt, zoals bij de zeedijk bij Den Helder.
- Een WBI-uitvoerpunt moet, vanuit het oogpunt van golfopzet, idealiter zeewaarts van de (lokale) brekerzone liggen. Hierdoor zal het verdisconteren van golfopzet (expliciet, of via de huidige aanpak vaak al impliciet) plaatsvinden via de golfoploop/overslagformuleringen. Indien een aanwezig voorland de golfcondities nabij de teen van de dijk significant beïnvloedt moet de voorlandmodule worden toegepast. De huidige voorlandmodule DaF houdt echter geen rekening met golfopzet. Er zijn echter ook andere overwegingen die de locatiekeuze van het WBI-uitvoerpunt bepalen.
- De modelvoorspellingen van golfopzet lopen nogal uiteen, en dat geldt ook voor de theoretische en empirische schattingen. De discrepanties zijn juist het grootst op de plek die praktisch het meest van belang is vanuit het oogpunt van golfopzet (en waar de grootste golfopzet optreedt): het onderwatertalud van een dijk. Betere empirische onderbouwing is gewenst om een betere modelkeuze te maken, en vervolgens een onzekerheidsband en biascorrectie bij het eventueel te gebruiken model (of parametrisatie) van golfopzet vast te stellen.
- Voorzichtigheid is geboden bij het gebruik van SWASH: zodra de waterstand de onderzijde van de golfklapzone bereikt (en tijdelijke droogval optreedt) dreigt golfoploop deels te worden opgevat als golfopzet.
- Modeluitkomsten uit SWAN en SWASH zijn gevoelig voor de gehanteerde brekerformulering en zijn op dit punt nog niet consistent.
- Duinen maken bij de WBI-beoordeling gebruik van diep water golfrandvoorwaarden, en in de rekenregel is golfopzet impliciet meegenomen. Wanneer wordt overgestapt op XBeach kan golfopzet zelfs expliciet worden meegenomen.

7.1.2 Berekening golfopzet

Voor de bepaling van de te verwachten golfopzet (in het Engels *wave set-up*) op strandprofielen geeft de aanpak uit de Shore Protection Manual (SPM) en die van Stockdon et al. (2006) een goede eerste schatting. Indien de golven pas breken op het steile talud van een dijk lopen de resultaten van beide methodieken uit elkaar. Het is de vraag of de beide aanpakken op deze steile taluds nog binnen het geldigheidsgebied liggen. In de SPM is de maximale helling waarvoor de golfopzet is afgeleid 1/15 en in de parametrisatie van Stockdon et al. (2006) heeft het steilste strand een gemiddelde helling van 1/9.

Voor de uitgevoerde 1D simulaties in deze studie berekent SWASH een hogere golfopzet dan SWAN. Dit wordt onder andere veroorzaakt door verschillen in de manier waarop het breken van de golven in de verschillende modellen wordt berekend. Verder is het lastig om in SWASH de maximale golfopzet te bepalen omdat dit is verweven met de golfloop.

Voor sterk dissiperende profielen zoals de Hollandse duinenkust in Noord-Holland en Zuid-Holland (Irribarren getal kleiner dan 0,3) liggen de resultaten van SWAN dicht bij de golfopzet die kan worden bepaald met de methode uit de SPM en die van Stockdon et al. (2006). De resultaten van SWASH zijn dan vaak een stuk hoger. Grofweg kan worden gezegd dat de golfopzet tijdens storm condities 7 à 8% is van de significante diep water golfhoogte (methode SPM). Op basis hiervan is de golfopzet langs de Hollandse duinenkust orde grootte 0,5 à 1,0 meter.

In een puur theoretische 1-dimensionale beschouwing is de golfopzet voor monochromatische golven ongeveer 25% van de golfhoogte op het moment van breken. In een echte storm met een random golfveld is de golfopzet ongeveer 3 keer zo klein. Dit wordt verklaard doordat richtingspreiding en frequentiespreiding van het golfveld een verlaging van de golfopzet tot gevolg hebben. Ook een 2-dimensionale beschouwing en een toenemende hoek van inval zorgen voor een verlaging van de golfopzet.

Als de golven pas beginnen te breken op het steile talud van de dijk (Irribarren getal vaak veel groter dan 0,3) is het minder eenvoudig om een vuistregel voor de golfopzet te geven. De resultaten van SWAN en SWASH, maar ook die volgens de methode van de SPM en Stockdon et al. (2006), lopen dan verder uiteen. De verschillende resultaten geven dan een bandbreedte van de te verwachten golfopzet.

Bovenstaande conclusies gelden allemaal voor een 1-dimensionale benadering, maar in sommige kustsystemen spelen 2-dimensionale processen een belangrijke rol waardoor deze benaderingen niet voldoen. Hierbij valt te denken aan de duinenkust van de Waddeneilanden of de Zeeuwse delta. Maar ook kusten en oevers in kleinschaligere systemen kunnen bij een 2D benadering wellicht een lagere golfopzet geven dan volgens de 1D benadering is voorspeld.

De golfopzet in de Waddenzee wordt gegeneerd op de buitendelta en verspreidt zich vervolgens in de Waddenzee zelf. Volgens Alkyon (2009) is deze golfopzet op de Waddenzee ongeveer 10% van de totale opzet en is tijdens storm condities orde grootte 0,3 tot 0,5 meter.

7.1.3 Metingen golfopzet

In de literatuur zijn metingen van golfopzet te vinden voor zowel laboratorium opstellingen (golfgoot) als metingen in het veld. Metingen in een goot kunnen als 1D worden beschouwd terwijl veldmetingen het complete 2-dimensionale beeld geven.

Als het gaat om veldmetingen is er in Duck, North Carolina, veel aan golven gemeten, waaronder ook golfopzet. Ook in Nederland is er bij Petten veel gemeten aan golven. Hierbij is geen analyse uitgevoerd naar golfopzet, maar alle meetdata van Petten is nog aanwezig zodat een nadere analyse naar dit verschijnsel achteraf alsnog kan worden uitgevoerd.

Er zijn diverse deskundigen in binnen- en buitenland die twijfels hebben bij de haalbaarheid om in het veld betrouwbare metingen te verrichten aan golfopzet. Bij de druk sensoren die in het verleden zijn gebruikt om de waterstand te meten zou onvoldoende aandacht geweest zijn voor afwijkingen in het verticale referentieniveau. Onderlinge vergelijking van de resultaten op kalme dagen zou hier een oplossing voor kunnen zijn. Toepassing van een betere verticale fixering van het instrument geeft naar verwachting ook betere resultaten, maar dat is alleen mogelijk bij toekomstige meetcampagnes.

7.1.4 Modellen en modules binnen WBI die van belang zijn voor golfopzet

Ten behoeve van het WBI wordt voor het afleiden van de golfrandvoorwaarden in de WBI-uitvoerpunten gebruik gemaakt van het 2-dimensionale SWAN berekeningen. Dit numerieke golfmodel wordt toegepast zonder golfopzet mee te nemen, omdat stand-alone 2D SWAN berekeningen hier niet voor geschikt zijn. Voor de waterstandvelden wordt het numerieke model WAQUA gebruikt, maar er is geen online koppeling tussen beide modellen. Voor een correcte bepaling van de golfopzet moet er gerekend worden met een gekoppeld model, waarbij een stromingsmodel is gekoppeld met een golfmodel. Hierbij wordt onderling continu informatie uitgewisseld over o.a. stroming, waterstand en golven.

Voor de bepaling van duinafslag wordt het programma DUROS-plus gebruikt. Dit programma is gebaseerd op een groot aantal schaalproeven in de deltagoot, waarbij steeds het hele profiel van diep water tot duinvoet is onderzocht. De resulterende empirische relaties zijn de basis voor DUROS-plus. Door deze benadering zijn alle golfprocessen, dus ook golfopzet, in het programma verwerkt. Zolang op de zeerand de diep water condities gelden wordt golfopzet automatische meegenomen in de berekening.

Binnen Rijkswaterstaat bestaat de wens om voor duinafslag op termijn over te gaan op het numerieke model XBeach. Dit model is in staat om processen zoals golfopzet mee te nemen in de berekeningen. Dus voor duinafslagberekeningen, nu en in de toekomst, wordt golfopzet gewoon meegenomen zolang op de zeerand de golfopzet nog niet relevant is.

Voor golfoverslag berekeningen bij een dijk wordt binnen het WBI gebruik gemaakt van de mogelijkheden binnen RisKeer. De basis hiervoor zijn de empirische relaties die zijn gevonden tijdens vele gootproeven. Deze proeven bestonden (bijna) allemaal uit een vlakke bodem met aan het eind een dijktalud. Alle processen op het talud van de dijk zijn dan impliciet in de golfoverslag formuleringen verwerkt.

In het geval dat er voor de dijk een hellend voorland aanwezig is, dan kan de golfconditie met de voorlandmodule DaF worden aangepast. Hierbij wordt de golfhoogte gereduceerd op basis van shoaling, diepte geïnduceerd breken en bodemwrijving. De golfperiode blijft ongewijzigd. Verder houdt de DaF module geen rekening met een verandering in waterstand door golfopzet of windopzet, ook lokale golfgroei door wind of toename van de golfhoogte door refractie wordt niet meegenomen. Indien er de wens is om deze processen wel binnen de DaF module mee te nemen is te overwegen om de DaF module uit te breiden met de golvenmodule van Xbeach. In dat geval worden alle relevante processen weer meegenomen.

7.1.5 Belang van golfopzet voor de Nederlandse watersystemen

Nederlandse duinenkust

De basis voor de hydraulische randvoorwaarden voor de Nederlandse duinenkust is de statistiek van de diep water golfcondities en waterstanden. Deze condities worden gebruikt voor de duinafslag berekeningen met DUROS-plus. De golfopzet is impliciet verwerkt in deze berekeningen.

- Voor de Hollandse duinenkust (Noord-Holland en Zuid-Holland) wordt daardoor binnen de methodiek van het WBI rekening gehouden met golfopzet.

- Voor de Zeeuwse duinenkust worden de diep water golfcondities (golfhoogtes) in verband met de aanwezigheid van de voordelta vertaald naar condities op 5 à 10 kilometer uit de kust. Hierbij wordt de waterstand niet aangepast. De golfopzet op de rand van de voordelta zal, door de geometrie van de kust, naar verwachting geen invloed hebben nabij de Zeeuwse duinen. Daardoor geldt ook hier dat binnen het WBI rekening wordt gehouden met golfopzet.
- Tot slot geldt voor de duinenkust rond de Waddenzee dat in eerste instantie ook gebruik wordt gemaakt van de diep water statistiek en wordt er dus geen rekening gehouden met de aanwezigheid van de buitendelta. Pas als het duin met deze condities als onvoldoende wordt beoordeeld en de geometrie daartoe aanleiding geeft, vindt er met SWAN een aanpassing van de golfcondities plaats, waarbij de waterstand dan weer ongewijzigd blijft. Dit is mogelijk het geval rond de koppen van de eilanden, aansluitend aan de zeegaten. In de DUROS-plus berekeningen waarbij gereduceerde golfcondities worden toegepast op de rekenrand zou het mogelijk kunnen zijn dat de waterstand op deze rekenrand te laag is ten gevolge van het brekingsproces op de buitendelta en de daardoor opgewekte golfopzet.

Dijken langs Noordzeekust

Voor de dijken langs de Noordzeekust geldt dat het WBI-randvoorwaardenpunt op 50 tot 250 meter uit de teen van de dijk ligt. Golfcondities zijn daar afkomstig uit de 2D SWAN modellering en voor de waterstanden is de statistiek van meetstations langs de kust gebruikt. Als er tussen randvoorwaardenpunt en teen van de dijk een voorland aanwezig is moet ook nog een voorland module worden toegepast, hierin wordt golfopzet niet meegenomen. Afhankelijk van de geometrie van het profiel voor de dijk kan dit punt onder maatgevende condities in de brekerzone liggen.

- Voor de zeedijk bij de Helderse zeewering geldt dat het WBI-uitvoerpunt midden in de brekerzone ligt. Hierdoor wordt er bij dit punt onder maatgevende condities een golfopzet verwacht van 0,1 à 0,4 meter, maar deze is niet verwerkt in de waterstand voor dit punt. Omdat golfopzet ook niet is verwerkt in de 2D SWAN berekeningen kunnen hierdoor ook nog eens de berekende golfcondities te laag zijn. Hierdoor worden in de golfoverslag berekeningen een te lage waterstand en een te lage golfhoogte gebruikt. Ook voor de dimensionering van de dijkbekleding worden door uit te gaan van een golfhoogte halverwege de brekerzone te lage condities gebruikt.
- Voor de dijk op de Brouwersdam geldt dat het WBI-uitvoerpunt zich onder maatgevende condities buiten de brandingzone bevindt. Golfbreken vindt dan pas plaats op het talud van de dijk. Een eventuele golfopzet als gevolg van breking van golven verderop in de voordelta zit impliciet in de waterstandmetingen en is naar verwachting ook zeer beperkt. Een golfoverslag berekening met RisKeer kan daarom zonder problemen worden uitgevoerd. De golfopzet op het talud van de dijk zit verwerkt in de empirische relaties van dit programma. Voor deze locatie worden geen problemen worden verwacht in relatie tot golfopzet.

Dijken langs Westerschelde

Voor de dijken langs de Westerschelde geldt dat het WBI-randvoorwaardenpunt op 50 tot 250 meter uit de teen van de dijk ligt. Golfcondities zijn daar afkomstig uit de 2D SWAN modellering en voor de waterstanden is de statistiek van meetstations langs de Westerschelde gebruikt.

Bij het onderzochte profiel nabij Borssele ligt het WBI-uitvoerpunt buiten de brekerzone. De golven breken pas op het talud van de dijk. Er is dus geen voorlandmodule nodig en bij golfoverslag berekeningen met RisKeer zit de golfopzet van het dijktalud al in de modellering verwerkt. Voor dit profiel worden dan ook geen problemen verwacht in relatie tot golfopzet.

Dijken langs Waddenzee

De hydraulische randvoorwaarden voor de dijken langs de Waddenzee zijn afkomstig van 2D SWAN modellering voor de golven en de waterstandstatistiek van de meetstations langs de kust. Hierdoor zit de golfopzet die afkomstig is van de buitendelta al verwerkt in de waterstandstatistiek van de

meetstations in de Waddenzee. De WBI-uitvoerpunten liggen op beperkte afstand uit de teen van de dijk.

Bij het onderzochte profiel net ten zuiden van Harlingen ligt het WBI-uitvoerpunt buiten de brekerzone. De golven breken pas op het talud van de dijk. Er is dus geen voorlandmodule nodig en bij golfoverslag berekeningen met RisKeer zit de golfopzet van het dijktaalud al in de modellering verwerkt. Voor dit profiel worden dan ook geen problemen verwacht in relatie tot golfopzet.

IJsselmeer dijken

Voor het IJsselmeer geldt voor het WBI-uitvoerpunt dat de waterstanden worden bepaald met WAQUA en de golfcondities met 2D SWAN. Het WAQUA model is afgeregeld op lokale waterstandsmetingen. De WBI-uitvoerpunten liggen op beperkte afstand uit de teen van de dijk.

Voor 2 onderzochte profielen blijkt dat voor de situatie met een relatief diep voorland en een steile oever/dijktaalud (Noordoostpolder) en de situatie met een ondiep voorland en een steil dijktaalud (zuidwest Friesland) er op het WBI-uitvoerpunt nog nauwelijks of geen golfbreken plaats vindt. De golfopzet treedt pas op het talud van de dijk op. De golfopzet op het dijktaalud is verdisconteerd in de empirische relaties van de golfoverslag formules in RisKeer. Voor dit profiel en kan worden geconcludeerd dat er voor wat betreft de golfopzet geen problemen worden verwacht bij de toetsing van het dijkprofiel.

7.1.6 Wanneer moet er rekening worden gehouden met golfopzet

Uit het onderzoek in deze studie blijkt dat golfopzet voor de Nederlandse waterkeringen voor de beoordeling onder maatgevende condities meestal geen problemen oplevert. Maar soms ligt het WBI-uitvoerpunt in de brekerzone, waardoor de invloed van golfopzet meestal niet meer verwaarloosbaar is en de waterkering met te lage hydraulische randvoorwaarden wordt beoordeeld. In de gevallen dat golfopzet bij het WBI-uitvoerpunt relevant is of enigszins relevant begint te worden neemt de verhouding tussen significante golfhoogte en waterdiepte voor dit punt toe. Bij een verhouding van 0,4 of meer begint golfopzet mogelijk een rol te spelen. Als de verhouding 0,6 of hoger is dan is dit een goede eerste indicatie voor mogelijke onderschatting van de hydraulische condities als gevolg van golfopzet.

Een hydraulisch randvoorwaardenpunt ligt, vanuit het oogpunt van de golfopzet, idealiter buiten de brekerzone. Er zijn echter ook andere overwegingen die de locatiekeuze van dit punt bepalen.

Voor de duinen langs de Waddenzee kust geldt dat wanneer er volgens een getrapte beoordeling een aanpassing van de hydraulische randvoorwaarden plaatsvindt, de invloed van de golfopzet van de buitendelta hierin niet wordt verwerkt. De grootte van deze invloed is een sterk 2-dimensionaal vraagstuk waarbij nader onderzoek meer duidelijkheid moet verschaffen.

7.2 Aanbevelingen

Naar aanleiding van deze rapportage worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- Golfopzet is niet verwaarloosbaar. Bij de beoordeling van een waterkering is het daarom van belang te controleren of golfopzet een significante rol speelt en zo ja, hoe deze in de modellentrein is meegenomen, zo niet expliciet, dan wel impliciet.
- Golfopzet in een twee-dimensionale situatie leidt tot lagere waarden dan in een 1D situatie (zoals bij gootproeven). Het 2-dimensionaal gedrag van de golfopzet langs de Nederlandse kust dient daarom beter te worden onderzocht. Om de golfopzet te kunnen berekenen moet SWAN gekoppeld worden aan een stromingsmodel, zodat de ruimtelijke variaties in de golfopzet door het ontstaan van stromingen kunnen worden gereduceerd. Onzekerheden die bij deze

modellering nader moeten worden onderzocht betreffen bijvoorbeeld de toe te passen brekerformulering (die van Battjes-Janssen of bijvoorbeeld de nieuwe β -kd formulering).

- Aanbevolen wordt om met een gekalibreerd gekoppeld model de golfopzet in complexe 2-dimensionale kustsystemen te modelleren. Hierbij is bijvoorbeeld de situatie rond de (koppen van de) Waddeneilanden erg interessant omdat hier mogelijk golfopzet kan ontstaan als gevolg van golfbreking op de buitendelta, en niet alleen door lokale breking. Tevens kan met dit model worden nagegaan in welke mate de waterstandsmetingen die gebruikt worden voor de bepaling van de hydraulische randvoorwaarden invloed ondervinden van golfopzet.
- Ook zonder koppeling met een stromingsmodel is het mogelijk om met 2D SWAN de golfkrachten in de Nederlandse kustsystemen te berekenen. Op deze wijze is het mogelijk om een eerste indruk te krijgen van de gebieden waar golfopzet een rol zou kunnen spelen.
- Zoals is gebleken kan bij zeedijken het WBI-uitvoerpunt in de brekerzone liggen waardoor er een onderschatting plaatsvindt van de hydraulische randvoorwaarden bij deze dijken. Het verdient de aanbeveling om voor alle WBI-uitvoerpunten een quick scan uit te voeren waarbij in eerste instantie wordt gekeken naar de verhouding tussen waterdiepte en golfhoogte op het WBI-uitvoerpunt. Vanuit het oogpunt van golfopzet dient bij hoge waarden de locatie van het uitvoerpunt te worden heroverwogen, met inachtneming van lokale omstandigheden. Er zijn echter ook andere overwegingen die de locatiekeuze van het uitvoerpunt bepalen.
- In de onderzochte kust- en oeverprofielen is het niet voorgekomen dat de DaF voorlandmodule (waarin golfopzet niet wordt meegenomen) een belangrijke rol gaat spelen. Hierdoor is de eventuele onderschatting van de hydraulische randvoorwaarden door toepassing van deze module ook niet aangetoond. Door specifiek op zoek te gaan naar locaties waar de DaF voorlandmodule een relatief grote reductie van de golfhoogte zou opleveren kan deze invloed nader worden onderzocht.
- Het verder analyseren van de meetdata bij Petten verdient eveneens aanbeveling. Ondanks het feit dat de verticale referentie van de meetapparatuur misschien niet erg nauwkeurig is voor deze toepassing, moet het mogelijk zijn om de golfopzet bij stormsituaties waar te nemen. De golfopzet is dan al snel een halve meter, dat moet waarneembaar zijn. Door de hoogteverschillen tussen de meetinstrumenten te analyseren op rustige dagen is het wellicht bovendien mogelijk om het verticale referentieniveau van de instrumenten onderling nauwkeuriger vast te stellen dan tot nu toe gebeurd is. Aandachtspunt is de definitie van de maximale golfopzet, omdat golfopzet en golfoploop in elkaar overgaan.
- Bij nieuwe metingen is het aan te bevelen om golfopzet mee te nemen. Niet alleen voor de dijk en vóór het strand, maar juist ook op het onderwatertalud van de dijk. Dit geldt voor zowel gootproeven als bij veldmetingen. Juist boven die onderwatertaluds is de golfopzet immers het grootst, en zijn de verschillen tussen verschillende modellen en theoretisch-empirische inzichten het grootst. Voor de grootschalige golfopzet is een meting in een raai van diep (zee)water naar strand en van zee via buitendelta en zeegat naar wad aan te bevelen.

Op korte termijn worden de volgende punten aanbevolen:

- Inventarisatie golfhoogte-waterdiepte verhouding voor alle uitvoerpunten. Bij hoge waarden dient de locatie van het uitvoerpunt te worden heroverwogen, met inachtneming van lokale omstandigheden.
- Het analyseren van de meetdata bij Petten. Als hier bruikbare resultaten over de golfopzet uitkomen dan dienen deze gebruikt te worden bij de keuze en kalibratie van de rekenmodellen voor golfopzet.

LITERATUUR

- Alkyon (2009). SWAN hindcast in the Eastern Wadden Sea and Eems-Dollard estuary - Storm of 9 November 2007. A2191R1, november 2009.
- Baldock, T.E., Holmes, P., Bunker, S. and Van Weert, P. (1998). Cross-shore hydrodynamics within an unsaturated surf zone, *Coastal Engineering*, Vol. 34, pp. 173-196.
- Battjes, J.A. (1997). Collegehandleiding Vloeistofmechanica, Technische Universiteit Delft. Maart 1997.
- Boers, M. (1996). Simulation of a Surf Zone with a Barred Beach. Part 1: Wave Heights and Wave Breaking. Delft University of Technology, *Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering*, Report No. 96-5.
- Delft University of Technology (2015). SWASH user manual. SWASH version 3.14, 2015.
- Delft University of Technology (2016). SWAN user manual. SWAN Cycle III version 41.10, 2016.
- Deltares (2016a). Hydraulische Belastingen 2017 voor Duinwaterkeringen. J. den Bieman, kenmerk 1220082-004-HYE-0003, maart 2016.
- Deltares (2016b). Software Package: DaF module. Dam and Foreshore module, Theoretical Documentation. J. Kramer, 10 March 2016.
- Deltares (2017a). Achtergrondrapport Hydraulische Belastingen, Wettelijk Beoordelings-instrumentarium 2017. H. Chbab en H. de Waal, kenmerk 1230087 -008-HYE-000 1, september 2017.
- Deltares (2017b). Discussiememo mb.t. DaF module. H. de Waal, 7 juni 2017.
- Holthuijsen, L.H. (2007). Waves in oceanic and coastal waters. ISBN 978-0-521-12995-4.
- Hsu, T., Hsu, J., Weng, W., Wang, S. and Ou, S. (2006). Wave setup and setdown generated by obliquely incident waves. *Coastal Engineering* 53 (2006) page 865-877.
- Jonsson, I.G. (1966), Wave boundary layers and friction factors, *paper presented at Tenth Int. Conference on Coastal Engineering, ASCE, Tokyo, Japan.*
- King, B.A., Blackley, M.W.L., Carr, A.P. and Hardcastle, P.J. (1990). Observations of Wave-induced Set-up on a Natural Beach. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 95, no. C12, Pages 22,289 – 22,297, December 15, 1990.
- Lerma, A.N., Pedreros, R., Robinet, A. and Sénéchal, N. (2017). Simulating wave setup and runup during storm conditions on a complex barred beach. *Coastal Engineering* 123 (2017) page 29-41.
- Rijkswaterstaat (2016). Schematiseringshandleiding hydraulische condities bij de dijkteen – WBI2017. Rijkswaterstaat, Water Verkeer en Leefomgeving, 1 december 2016.
- Ruessink, G., Michallet, H., Bonneton, P., Mouaze, D., Lara, J.L., Silva, A. and Wellens, P. (2013). GLOBEX: Wave dynamics on a gently sloping laboratory beach. *Coastal Dynamics* 2013, page 1351–1362.
- Salmon, J.E., Holthuijsen, L.H., Zijlema, M., Van Vledder, G. Ph. and Pietrzak, J.D. (2015). Scaling depth-induced wave-breaking in two-dimensional spectral wave models. *Ocean Modelling* 87 (2015) page 30-47.
- Salmon, J.E. and Holthuijsen, L.H. (2015). Modeling depth-induced wave breaking over complex coastal bathymetries. *Coastal Engineering* 105 (2015) page 21–35.

- Smit, P., Zijlema, M. and Stelling, G. (2013). Depth-induced wave breaking in a non-hydrostatic, near-shore wave model. *Coastal Engineering 76 (2013) page 1-16.*
- Stockdon, H.F., Holman, R.A., Howd, P.A. and Sallenger Jr, A.H. (2006). Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering 76 (2006) page 573-588.*
- Suzuki, T., Verwaest, T., Veale, W., Trouw, K. and Zijlema, M. (2012). A numerical study on the effect of beach nourishment on wave overtopping in shallow foreshores. *Coastal Engineering 2012.*
- US Army Corps of Engineers (1984). Shore Protection Manual.
- Vledder, G. Ph., Ruessink, G. and Rijnsdorp, D.P. (2013). Individual wave height distribution in the coastal zone: measurements and simulations and the effect of directional spreading. *Coastal Dynamics 2013, Paper no. 229.*
- Wenneker, I., Spelt, B., Peters, H. and De Ronde, J. (2016). Overview of 20 years of field measurements in the coastal zone and at the Petten sea dike in the Netherlands. *Coastal Engineering 109 (2016) page 96-113.*

SVASEK
HYDRAULICS
COASTAL, HARBOUR AND RIVER CONSULTANTS