

Aanloopstudie XBeach WBI

11202190-001

Titel
Aanloopstudie XBeach WBI


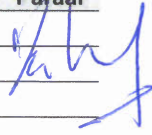

Opdrachtgever RWS/WVL	Project 11202190-001	Kenmerk 11202190-001-ZKS-0005	Pagina's 82
---------------------------------	--------------------------------	---	-----------------------

Trefwoorden
duinafslag, kust, toetsen, xbeach, duinen

Samenvatting

Het doel van de studie is om te onderzoeken wat het gedrag van XBeach met betrekking tot zowel duinafslag en golfoverslag ten opzichte van bestaande modellen is, om zo vertrouwen in het XBeach-model te vergroten en om richting te geven aan de planvorming om van XBeach een volwaardig in WBI opgenomen instrument te maken voor beoordeling en ontwerp van primair zandige waterkeringen. In deze "Aanloopstudie" wordt het gedrag van het duinafslagmodel XBeach onderzocht voor een variatie van parameters: golfhoogte, waterstand, golfperiode, offshore waterdiepte en korreldiameter. Daarbij wordt een vergelijking gemaakt met het gedrag van DurosTA en Duros+. XBeach reproduceert de meeste trends behalve die voor de korreldiameter en de waterstand (op prototypeschaal). Daarnaast lijkt het effect van een variatie in de golfperiode onderschat te worden in de metingen en daardoor mogelijk ook in de vigerende Duros+ formule. In Hoofdstuk 3 wordt de betekenis en modellering van de "golfomhullende" als representatie van kustnabije golfhoogte onderzocht. Hieruit blijkt dat berekende waarden van de lange golfhoogten overeenkomen met gemeten waarden. Als laatste wordt onderzocht wat de verschillen in overslagvolumes, hydrodynamica en morphodynamica zijn tussen de vigerende aanpak van DurosTA en PCOverslag, XBeach in Surfbeat modus and XBeach in niet-hydrostatische modus. Hieruit blijkt dat de vigerende aanpak een grote onderschatting van de golfoverslag geeft ten opzichte van de XBeach modi en empirische relaties.

Referenties
KPP B&O Kust 11202190

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1.1	12 dec.	Ellen Quataert		Dirk Jan Walstra		Frank Hoozemans	
		Robbin van Santen					
		Robert McCall					
		Ap van Dongeren					
		Henk Steetzel					

Status
definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Aanleiding	1
1.2 Doel van deze studie	1
1.3 Aanpak	1
2 Taak 1: Analyse gedrag XBeach	3
2.1 Inleiding	3
2.2 Laboratoriumschaal berekeningen Deltagoot 2006	3
2.2.1 Methode	3
2.2.2 Vaststellen XBeach settings	5
2.2.3 Effect forcering XBeach met PM spectrum of gemeten golfsignaal	7
2.2.4 Resultaten gevoeligheidsanalyse.	8
2.3 Prototypeschaal berekeningen Deltagoot 2006	12
2.3.1 Methode	12
2.3.2 Resultaten: referentiecasse	14
2.3.3 Resultaten: vergelijking prototypeschaal en lab-schaal	15
2.3.4 Resultaten: gevoeligheidsanalyses	19
2.4 Nader onderzoek gevoeligheid korreldiameter	25
2.4.1 Methode	25
2.4.2 Schaalproeven	25
2.4.3 Resultaten	26
2.5 Onderzoek modelaanpassing D_{50} in XBeach	29
2.5.1 Methode	29
2.5.2 Afschatting gevoeligheid α_{D50}	30
2.5.3 Toepassing op Deltagoot 2006 proeven	33
2.6 Effect van langere golfperiode op duinafslag	35
2.7 Conclusies	37
3 Taak 2: Analyse fysische betekenis golf enveloppe in XBeach 1D	39
3.1 Inleiding	39
3.2 Methode	39
3.3 Resultaten	40
3.3.1 Betekenis golfenveloppe	40
3.3.2 1D berekeningen met het Scheveningen ontwerpprofiel	41
3.3.3 Berekende lange golfhoogten op het Scheveningen ontwerpprofiel	45
3.3.4 2D berekeningen met het Scheveningen ontwerpprofiel	48
3.3.5 Effect van de berm/banket (met paviljoens) in het ontwerpprofiel	51
3.4 Overslagvolume	52
3.5 Conclusies	53
4 Taak 3: Verkenning effect van duinafslag op golfoverslag	57
4.1 Inleiding	57
4.2 Methode	57
4.3 Resultaten standaardsommen	62
4.3.1 Morfologische ontwikkeling	62
4.3.2 Hydrodynamica	63
4.3.3 Overslag	65

4.4	Discussie op basis van gevoeligheidssommen	67
4.4.1	Gevoeligheid PC-Overslag hydrodynamische condities teen dijk	68
4.4.2	Gevoeligheid golftransformatie en overslag model	70
4.4.3	Gevoeligheid morfologie	71
4.4.4	Gevoeligheid combinatie hydrodynamica en morfologie	73
4.5	Conclusies	75
5	Conclusies	77
5.1	Hoofdconclusies	77
5.2	Conclusies per Taak	77
5.3	Aanbevelingen	80
6	Referenties	81

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Naar aanleiding van het ongevraagde advies van ENW-Kust d.d. 26 januari en gesprekken met prof. Aarninkhof en dhr. Lodder heeft Deltares in samenwerking met Arcadis en op verzoek van RWS/WVL het volgende voorstel voor een zogenaamde “Aanloopstudie XBeach” opgesteld.

1.2 Doel van deze studie

Het doel van de studie is om te onderzoeken wat het gedrag van XBeach met betrekking tot zowel duinafslag en golfoverslag ten opzichte van bestaande modellen is, om zo vertrouwen in het XBeach-model te vergroten en ook richting te kunnen geven aan de nog verder te onderzoeken onderwerpen. De resultaten van deze studie zijn bedoeld als aanzet tot de planvorming om van XBeach een volwaardig in WBI opgenomen instrument te maken voor beoordeling en ontwerp van primair zandige waterkeringen. De meerwaarde van dit model komt daarbij vooral tot uitdrukking voor de meer complexe gevallen zoals hybride keringen en (in de meer complexe toepassing) overgangen tussen harde en zachte kustdelen.

Deze studie zal uitgevoerd worden in het kader van KPP B&O Kust door Deltares en Arcadis, waarbij de laatste contract-technisch als onderaannemer van Deltares optreedt.

1.3 Aanpak

De werkzaamheden omvatten drie verschillende taken, te weten:

- 1 Analyse gedrag XBeach t.o.v. huidige modellen;
Analyse gedrag XBeach t.o.v. huidige modellen is voornamelijk bedoeld om meer vertrouwen in het model te krijgen. In Deltares (2008, rapport H5019.20) zijn in Hoofdstuk 4.4 van dat rapport een aantal oriënterende berekeningen gemaakt die het gedrag van de XBeach versie van destijds vergeleek met andere modellen (DurosTA, SBeach, Duros). Een conclusie uit dat rapport was dat XBeach redelijk ongevoelig was voor een variatie van de korreldiameter. Deze vergelijking met DurosTA en Duros wordt nogmaals gemaakt met de laatste versie van XBeach (XBeachX beta release, November 2017) en uit te breiden.
- 2 Analyse fysische betekenis golf enveloppe in XBeach 1D;
XBeach berekent in surfbeat mode een golf-omhullende (“wave envelope”) als representatie van het korte golfveld. Deze vraag komt voort uit de observatie dat de maximale waarde van de omhullende aan de hoge kant ligt, zoals berekend in een studie over Jaarrond Paviljoens Scheveningen (Deltares, 2013). In deze taak wordt onderzocht wat de fysische betekenis van deze enveloppe is en waarom deze omhullende ogenschijnlijk zo groot is. Gegeven het referentieprofiel zal hierbij worden gevarieerd in de diepteligging van de offshore-rand en zal worden vergeleken met de resultaten van een 2D berekening met een langs uniforme kust.

Daarnaast wordt onderzocht hoe deze omhullende zich verhoudt tot de golfvorm zoals berekend in XBeach-nonh, wat de betekenis is van de maximale waarde van de omhullende, en wat de statistiek van de kansdichtheidsfunctie van de totale waterstand is.

3 Verkenning effect van duinafslag op golfoverslag.

Voor het beoordelen en ontwerpen van zgn. dijk-in-duin oplossingen wordt op dit moment DurosTA voor de duinafslag en PC-overslag voor de golfoverslag gebruikt. In de gebruikte aanpak wordt daarbij het zandvolume zo gedimensioneerd dat de maximale overslag over de dijk beneden een bepaalde kritische waarde (veelal 1 l/s/m) blijft.

In principe kan golfoverslag in combinatie met duinafslag met hetzelfde model, XBeach-niet-hydrostatisch of de verbeterde versie XBeach-NH+, worden uitgevoerd. Uit het XBeach-JIP project blijkt dat duinafslag al redelijk goed gemodelleerd wordt met XB-NH en uit Roelvink et al 2017 blijkt dat het overslagdebiet redelijk overeenkomt met de CLASH database (met een onderschatting voor kleine debieten).

2 Taak 1: Analyse gedrag XBeach

2.1 Inleiding

In Deltares (2008, rapport H5019.20) zijn een aantal oriënterende berekeningen gemaakt die het gedrag van de XBeach versie van destijds vergeleek met andere modellen (DurosTA, SBeach, Duros). Een conclusie uit dat rapport was dat XBeach redelijk ongevoelig was voor een variatie van de korreldiameter. Taak 1 van de studie omvat het opnieuw uitvoeren en uitbreiden van deze analyse met meest recente versie van XBeach (XBeachX beta release, November 2017).

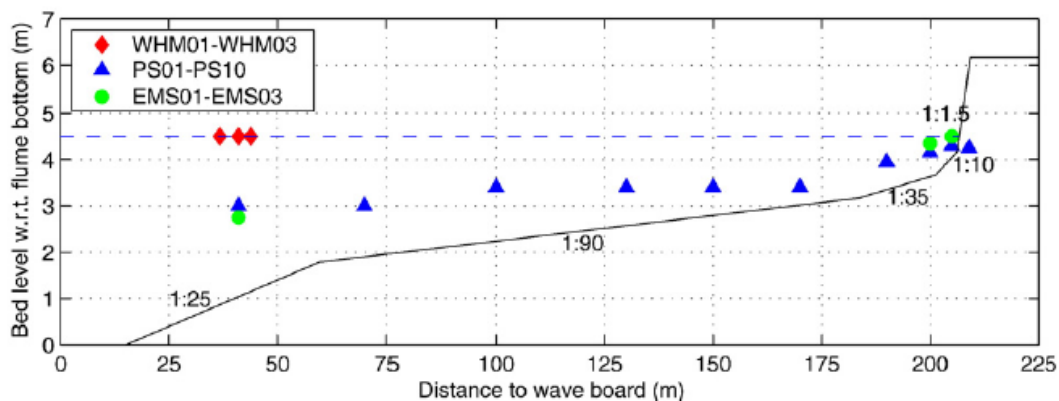
De gevoeligheid van XBeach op het duinprofiel wordt getest door de belangrijkste fysische parameters te variëren. De modelresultaten worden zoveel mogelijk vergeleken met de resultaten van metingen om te kijken of de modelgevoeligheid voor een parameter overeenkomt met de werkelijkheid. Ook worden ter vergelijking berekeningen uitgevoerd met DUROS+ en DUROSTA. Deze vergelijking wordt uitgevoerd op de laboratoriumschaal van de Deltagoot 2006 proeven (Van Gent et al, 2008) en op het laboratorium profiel opgeschaald naar prototype, wat ongeveer overeenkomt met het referentieprofiel van Delfland (maar niet exact hetzelfde is).

De Deltagoot 2006 proeven worden gebruikt om de gevoeligheid van XBeach voor de belangrijkste parameters te testen in paragraaf 2.2. Dezelfde analyse wordt uitgevoerd op prototypeschaal gebaseerd op het profiel van de Deltagoot 2006 proeven in paragraaf 2.3. Daarnaast zijn de schaalproeven van Van de Graaff (1976) en Vellinga (1981) gebruikt om nader onderzoek te doen naar de D_{50} -gevoeligheid in XBeach in paragraaf 2.4. Vervolgens wordt er een aanpassing in het XBeach model gedaan om het modelresultaat gevoeliger te maken voor de D_{50} in paragraaf 2.5. Ten slotte geven paragraaf 2.6 en 2.7 een discussie en conclusies over de analyse van het gedrag van XBeach en DurosTA.

2.2 Laboratoriumschaal berekeningen Deltagoot 2006

2.2.1 Methode

De gevoeligheid van XBeach voor de belangrijkste fysische parameters wordt getest met behulp van de Deltagoot 2006 proeven. Dit was een grootschalig duinafslag experiment uitgevoerd in de Deltagoot (van Gent et al., 2008). Figuur 2.1 geeft een illustratie van het gebruikte beginprofiel gedurende het experiment. Tijdens proef T01 is het profiel blootgesteld aan golven met een hoogte (H_s) van 1,5 m en een periode (T_p) van 4,9 s. Het gemiddelde waterniveau gedurende het experiment was 4,5 (m) boven de bodem van de goot bij het golfschot en de korreldiameter (D_{50}) bedroeg 200 μm . Voor proef T02 en T03 is alleen de golfperiode gevarieerd met een T_p van respectievelijk 6,12 en 7,35 s. Na 0,1; 0,3; 1; 2,04; en 6 uur is het experiment stilgelegd om het profiel in de goot in te meten.



Figuur 2.1 Initieel profiel Deltagoot 2006 proeven (uit: van Gent et al. (2008))

XBeach en DurosTA worden gevalideerd met de in de goot gemeten afslagvolumes en duinprofielen tijdens proef T01. Hierbij wordt XBeach geforceerd met het golfsignaal dat is gemeten gedurende het experiment in de Deltagoot met de golfhoogtemeters nabij $x=40$ m (rode symbolen, Figuur 2.1).

Voor de variatieberekeningen is het niet mogelijk om een gemeten tijdsignaal te gebruiken. Daarom wordt voor deze berekeningen een Pierson-Moskowitz spectrum gebruikt als randvoorwaarde op de modelrand.

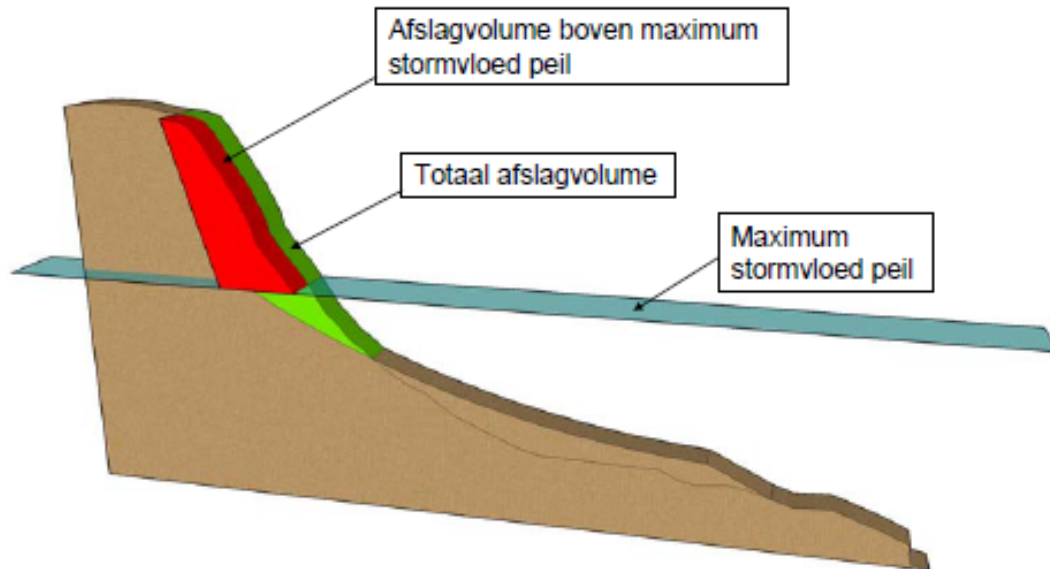
Als eerste stap is voor XBeach vastgesteld welke parameterwaarden worden toegepast in de sommen; de waarden (“settings”) zoals gebruikt in Van Thiel de Vries (2009) of de huidige default settings van XBeachX. Vervolgens worden een aantal belangrijke parameters (waterstand, golfhoogte, golfperiode, sedimentdiameter D_{50} en offshore diepte) gevarieerd om het effect op duinafslag te onderzoeken. De opzet van deze variatie sommen is weergegeven in Tabel 2.1. De waarden worden per grootte gevarieerd waarbij de waarden van de andere parameters op de waarden van proef T01 worden gehouden. De XBeach-sommen worden allen uitgevoerd voor de default sediment transport relatie (Van Thiel van Rijn). De variatie van de korrel diameter zal ook met Soulsby-Van Rijn uitgevoerd worden.

Tabel 2.1 Opzet parameter variatie sommen met XBeach

	Laag	Proef-waarde (T01)	Hoog	Hoog
Waterstand (m) t.o.v. bodemgoot	4	4.5	5	
Hs (m)	1	1.5	2	
Tp (s)	4.5	4.9	6.12 (T02)	7.35 (T03)
D_{50} (mm)	0.150	0.200	0.300	
Offshore diepte (m)	2.5	4.5	14.5	

Het effect van variatie in de parameters wordt aan de hand van het erosievolume vergeleken. De erosievolumes zullen bepaald worden aan het einde van de storm. In eerdere studies (bijvoorbeeld Vellinga, 1986) is het afslagvolume gedefinieerd als het volumeverschil tussen twee profielen boven het maximum stormvloedpeil. Bij exercities waarin dit stormvloedpeil wordt gevarieerd is deze definitie een minder goede maat voor het vergelijken van de gevoeligheid van de resultaten voor zulke veranderingen. Als immers met deze definitie twee stormen met verschillende opzet maar met exact dezelfde profiel ontwikkeling worden

vergeleken kunnen de afslagvolumes verschillen, terwijl de bereikte erosieprofielen gelijk zijn. In deze studie is er daarom voor gekozen om het totale afslagvolume te gebruiken (groene oppervlakte in Figuur 2.2), zoals ook in Deltares (2008) is gebruikt.



Figuur 2.2 Definitie erosievolume (uit Deltares, 2008)

2.2.2 Vaststellen XBeach settings

Een overzicht van de XBeach settings voor de Deltagoot 2006 proeven waarbij de door Van Thiel de Vries (2009) toegepaste settings afwijken van de huidige XBeach defaults, zijn weergegeven in Tabel 2.2. Hierin zijn dzmax en eps (in principe) parameters die afhankelijk zijn van de diepte schaling.

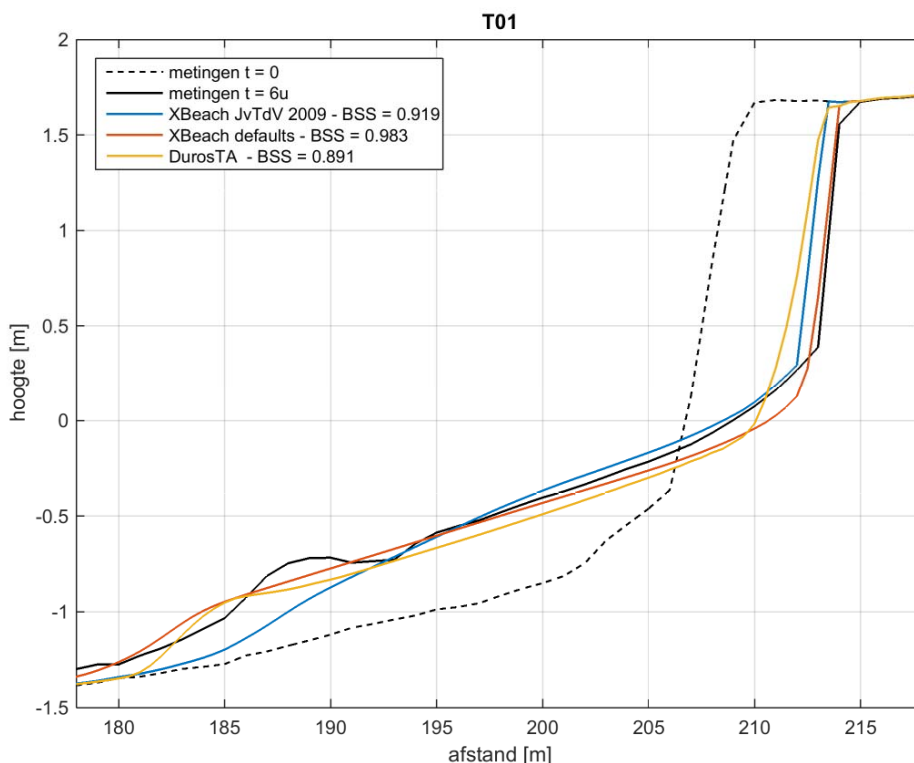
Tabel 2.2 Deltagoot 2006 XBeach settings

parameter	description ¹	Unit	JvTdV 2009	Default XBeachX
rho	Water density	Kg/m3	1000	1025
Gamma	Breaker parameter in roelvink formulation	-	0.5	0.55
Gamax	Maximum ratio wave height to water depth	-	5	2
Tsmin	Minimum adaptation time scale in advection diffusion equation sediment	s	1	0.5
Wetslp	Critical avalanching slope under water	-	0.1	0.3
Dzmax	Maximum bed level change due to avalanching	m	0.003	0.05
Eps	Threshold water depth above	m	0.001	0.005

¹ For a complete description of the model parameters, we refer to <https://xbeach.readthedocs.io/en/latest/>

Rfb	which cells are considered wet Switch to feed back maximum - wave surface slope in roller energy balance	1	0
-----	---	---	---

Voor beide settings is de T01 proef uitgevoerd met XBeach en vergeleken met het gemeten eindprofiel en erosievolume. Merk op dat Xbeach net als DurosTA volume conservatief is. De Van Thiel de Vries (2009) settings resulteren in een hoger profiel (met hogere knik) dan de default settings (Figuur 2.3), maar het duinfront wordt beter voorspeld door de default settings. Het erosievolume wordt bij de Van Thiel de Vries (2009) settings onderschat (Tabel 2.3) en beter benaderd met de default settings. Daarnaast geven de default settings betere resultaten in de depositiezone (Figuur 2.3). DurosTA laat minder afslag zien en ook een lagere knik in het profiel, terwijl de voorspelling van de depositiezone nagenoeg gelijk is aan de XBeach-default resultaten.



Figuur 2.3 T01 proef gemeten initiële en eind profielen. Gemodelleerde XBeach eind profielen berekend met Van Thiel de Vries (2009) settings (blauw) en default settings (rood). DurosTA resultaten in geel. Brier Skill Score (BSS) aangegeven per profiel.

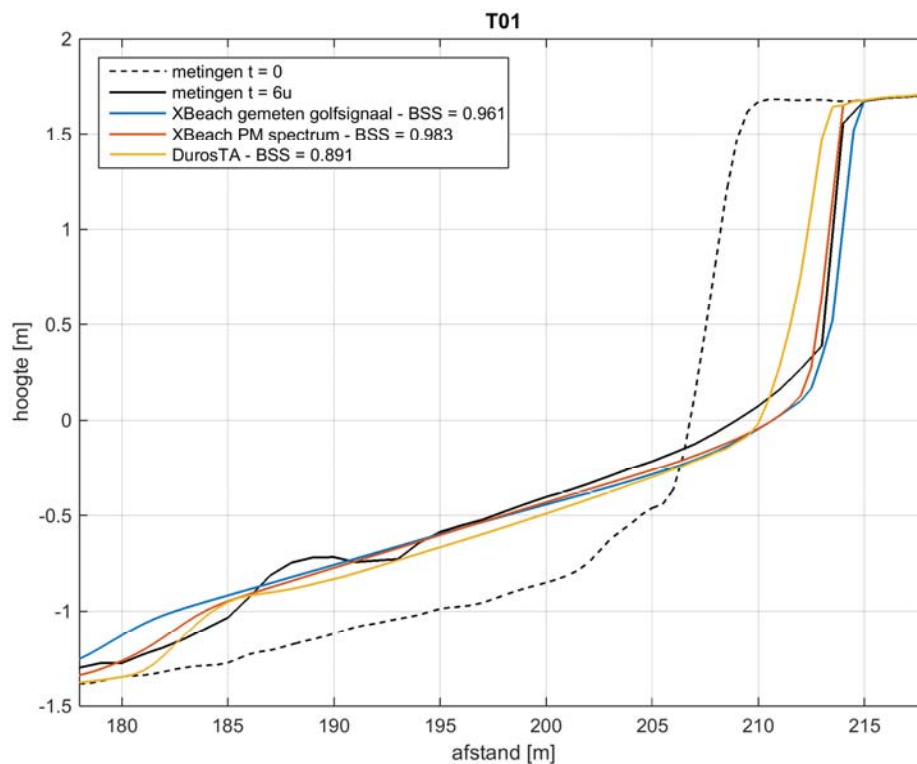
Tabel 2.3 T01 proef gemeten en gemodelleerde erosievolumes.

Settings	Erosievolume [m ³ /m]
Metingen	8.52
JvTdV 2009	7.23
Defaults	8.84
DurosTA	7.14

Omdat het verschil tussen de afslag zoals berekend met de default en JvTdV settings klein is en omdat het doel is om van XBeach een voorspellend model te maken, kiezen we voor het gebruik van de default settings in de gevoeligheidsanalyse.

2.2.3 Effect forcering XBeach met PM spectrum of gemeten golfsignaal

De invloed van het type golfforcering in XBeach, gemeten golfsignaal en een PM-spectrum, op het eindprofiel is weergegeven in Figuur 2.4. De XBeach berekeningen zijn uitgevoerd met default settings. XBeach geeft een goed lijkende reproductie van het eindprofiel voor de T01 proef, waarbij het duinfront beter wordt gereproduceerd wanneer het XBeach wordt geforceerd met het Pierson-Moskowitz spectrum. Dit verschil is ook terug te zien in het erosievolume (Tabel 2.4), XBeach geeft voor beide randvoorwaarden een kleine overschatting van het erosievolume. DurosTA geeft een eindprofiel dat de horizontale verplaatsing van het profiel onderschat ten opzichte van de gemeten waarde. Dit resulteert in een kleine onderschatting van het erosievolume van 16% iets wat ook in lijn is met de bij de DurosTA-ontwikkeling gevolgde aanpak (Tabel 2.4).



Figuur 2.4 T01 proef gemeten initiële en eind profielen (zwart). Gemodelleerde XBeach eind profielen geforceerd met gemeten golfsignaal (blauw), Pierson-Moskowitz spectrum (rood) en DurosTA (geel). Brier Skill Score (BSS) aangegeven per profiel.

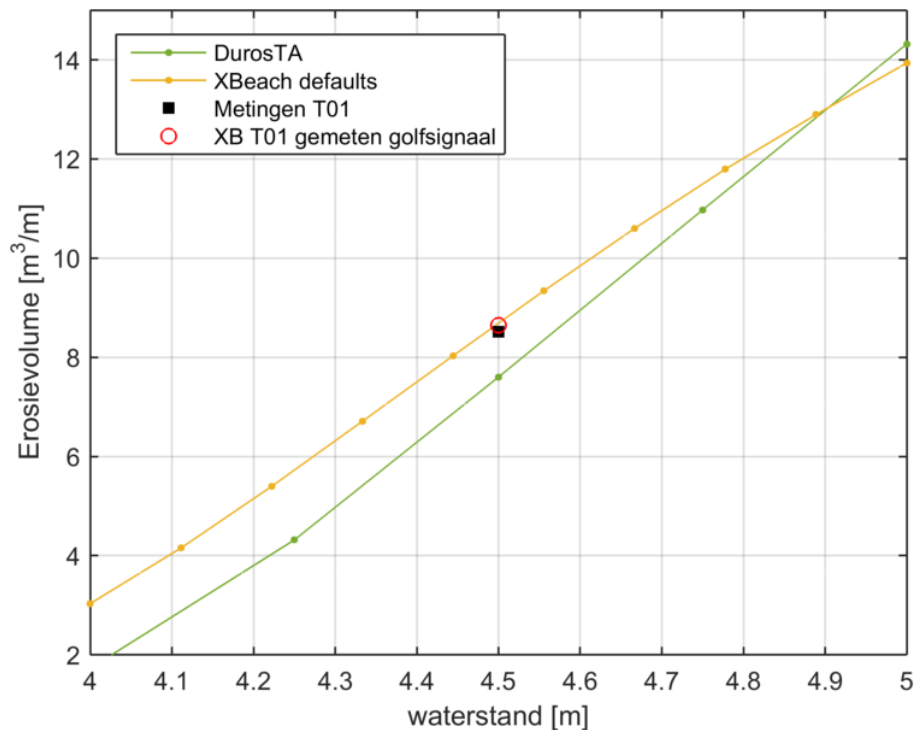
Tabel 2.4 T01 proef gemeten en gemodelleerde erosievolumes.

	Erosievolume [m^3/m]
Metingen	8.52
Pierson-Moskowitz spectrum	8.84
Gemeten golfsignaal	9.86
DurosTA	7.14

2.2.4 Resultaten gevoeligheidsanalyse.

Waterstand variatie

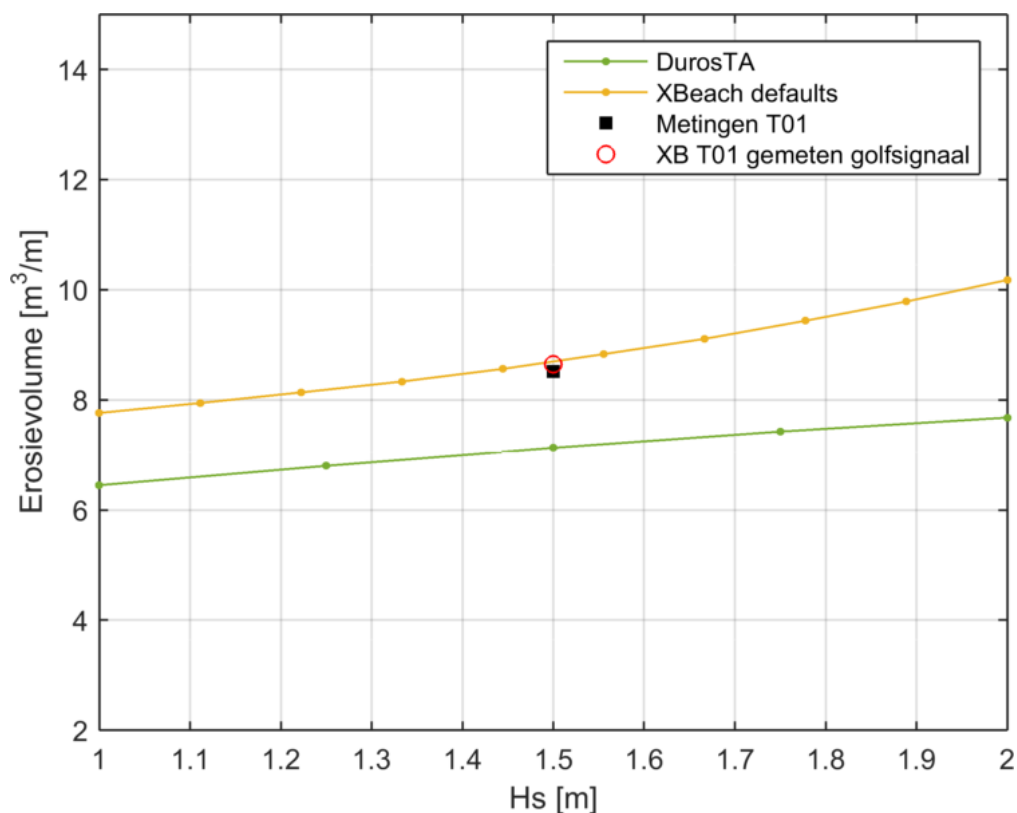
Figuur 2.5 geeft het berekende erosievolume bij een variatie van de gemiddelde waterstanden van 4 tot 5 meter ten opzichte van de bodem van de goot. Bij het variëren van de waterstand is een duidelijke toename van het erosievolume te zien bij toenemende waterstand in zowel het XBeach als DurosTA model. Dit is volgens verwachting omdat het duinprofiel onveranderd is, in vorm en verticale positie. Bij een hogere waterstand komt er meer golfenergie op een hoger deel van het profiel en er meer duinafslag verwacht wordt om het onderwaterprofiel aan te laten passen. Merk op dat in dit geval de berekende erosie met gemeten tijdsignaal en met PM spectrum nagenoeg hetzelfde is (de oranje lijn gaat door de rode cirkel en het zwarte bolletje).



Figuur 2.5 Het effect van waterstand variatie op erosievolumes na 6 uur met XBeach (geel) en DurosTA (groen). Gemeten erosievolumes in zwart, gemodelleerde erosievolumes met gemeten golfsignaal voor T01 in rode cirkels.

Golfhoogte variatie

Bij de golfhoogte variatie sommen wordt de H_s gevarieerd van 1 tot 2 m, met een constante golfperiode uit proef T01 ($T_p = 4.9$ s). In XBeach en DurosTA is het erosievolume licht gevoelig voor variaties in de golfhoogte (Figuur 2.6). Bij een toename van H_s van 1 tot 2 m, neemt het erosievolume toe met 28% in XBeach en 18% in DurosTA, maar zijn de trends nagenoeg gelijk.



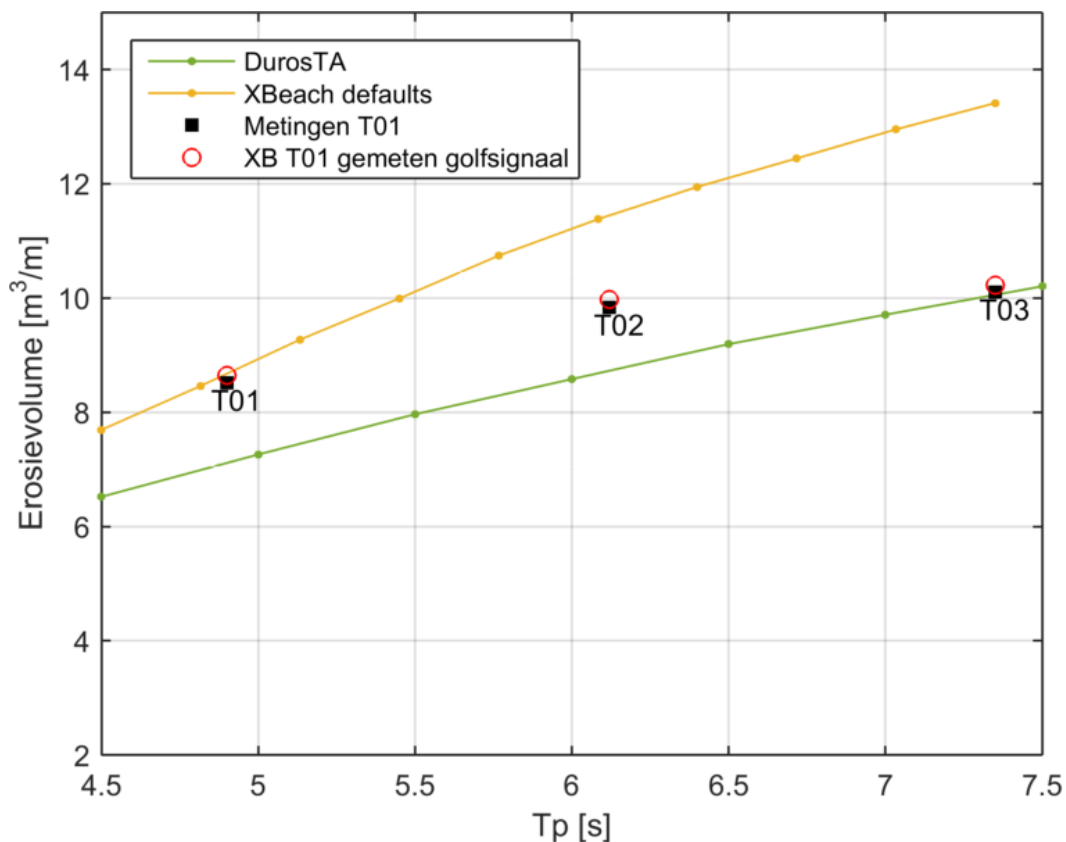
Figuur 2.6 Het effect van golfhoogte (H_s) variatie op erosievolumes na 6 uur met XBeach (geel) en DurosTA (groen). Gemeten erosievolumes in zwart, gemodelleerde erosievolumes met gemeten golfsignaal voor T01 in rode cirkels.

Golfperiode variatie

Wanneer het gemeten golfsignaal worden opgelegd in XBeach (rode cirkels in Figuur 2.7) komen de berekende erosievolumes voor proef T01, T02 en T03 overeen met de gemeten waarden. Bij de Pierson-Moskowitz forcering is het in XBeach gemodelleerde erosievolume veel gevoeliger voor variatie in golfperiode. Uit de metingen volgt dat een toename van de golfperiode van 4.9 naar 7.35 s leidt tot ongeveer 15% meer duinafslag na 6 uur (van Gent et al, 2008). In XBeach leidt dit tot 75% meer duinafslag bij een Pierson-Moskowitz spectrum.

Dit verschil wordt veroorzaakt door verschillen in de gemodelleerde en gemeten lange golfhoogte over het dwarsprofiel, wat weer het gevolg is van de opgelegde randvoorwaarde bij de offshore rand. Dit wordt nader toegelicht in de discussie, paragraaf 2.6.

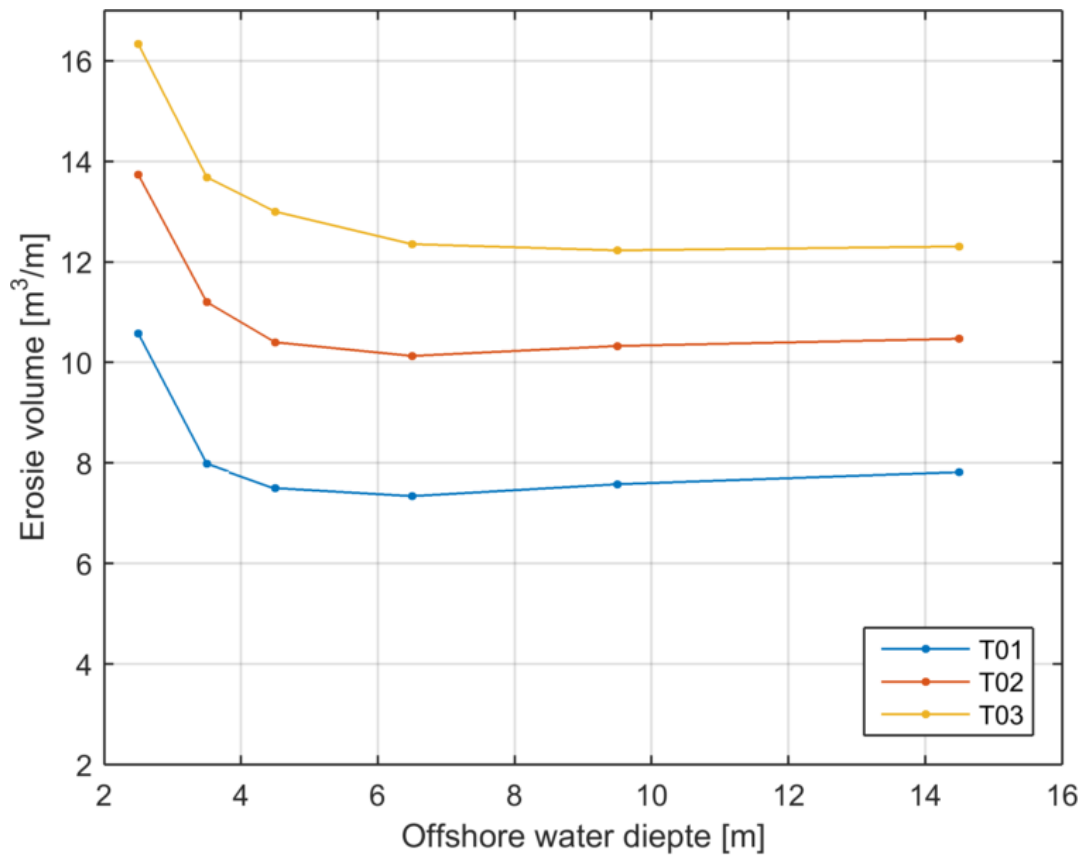
Het erosievolume in DurosTA is minder gevoelig voor de golfperiode variatie dan de XBeach resultaten maar heeft een grotere trend dan de metingen laten zien. Op basis van de metingen lijkt er immers nauwelijks een verschil aanwezig tussen het erosievolume voor een golfperiode van 6,12 en 7,35 s. Niet uitgesloten moet dus worden dat het meetresultaat voor de langere golfperiode minder betrouwbaar is. De positieve trend is voor zowel XBeach als DurosTA wel aanwezig.



Figuur 2.7 Het effect van golfperiode (T_p) variatie op erosievolumes na 6 uur met XBeach (geel) en DurosTA (groen). Gemeten erosievolumes in zwart, gemodelleerde erosievolumes met gemeten golfsignaal voor T01, T02 en T03 in rode cirkels.

Offshore diepte variatie

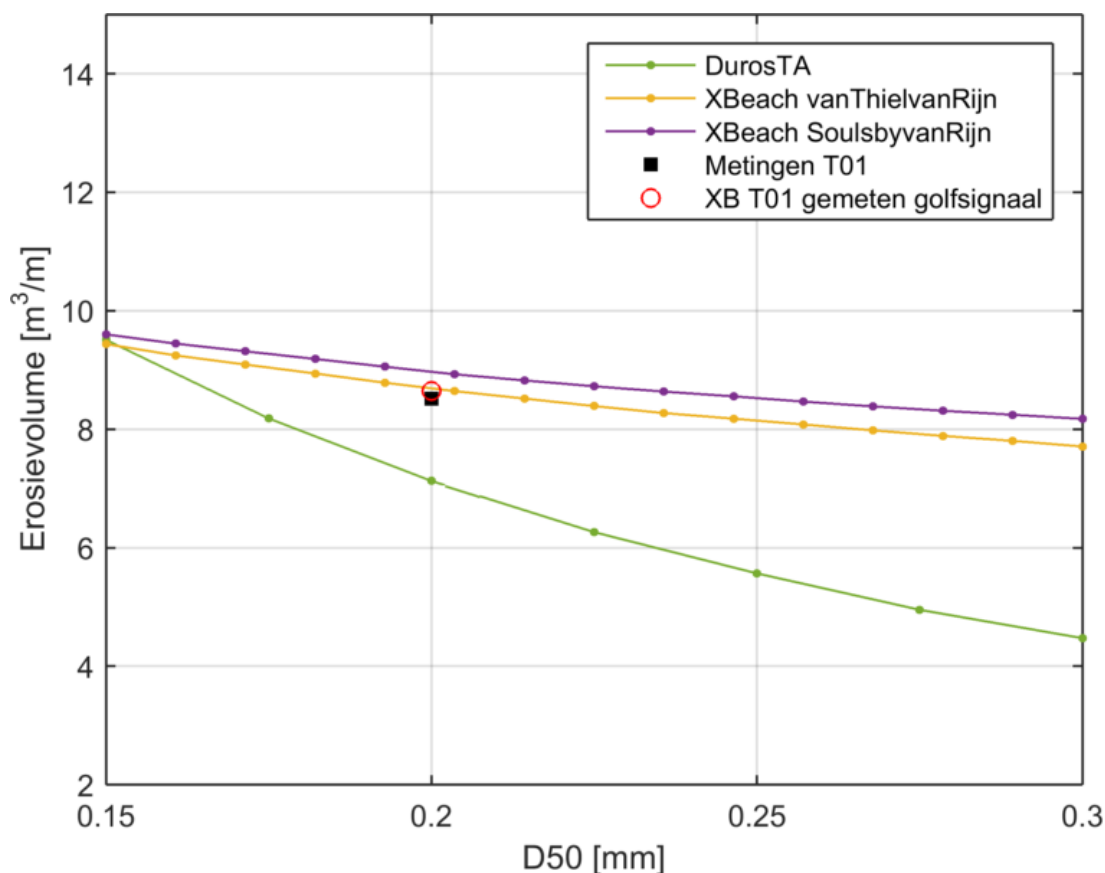
De offshore waterdiepte in XBeach model wordt gevarieerd door de bodemhelling (1:25) door te trekken tot een diepte van 2.5, 3.5, 6.5, 9.5 en 14.5 m voor proef T01, T02 en T03. De golfhoogte forcering is aangepast door middel van lineaire de-shoaling. Het effect van offshore diepte variaties op de erosievolumes in XBeach is weergegeven in Figuur 2.8. Er is een kleine gevoeligheid in erosievolume wanneer de offshore startdiepte wordt vergroot ten opzichte van de originele diepte van 4,5 m. Dit betekent dat de oorspronkelijke offshore waterdiepte goed gekozen is en dat er weinig niet-lineaire golfdynamica (m.n. lange golfopwekking) in waterdieptes groter dan 4,5 meter plaatsvindt. Wanneer de offshore rand wordt verplaatst naar ondieper water (diepte kleiner dan 4,5 m) ontstaan er erosievolumes die niet overeenkomen met de gemeten waarden. Dit wordt veroorzaakt doordat de evenwichtsrandvoorwaarde in XBeach niet geldig voor zeer ondiep water, waar de groepssnelheid de ondiepwatersnelheid benadert.



Figuur 2.8 Het effect van offshore diepte variatie op erosievolumes na 6uur voor proef T01 (blauw), T02 (rood) en T03 (geel).

Sedimentdiameter (D_{50}) variatie en sediment transport relaties

Het effect van variaties in de D_{50} op het erosievolume in XBeach is weergegeven in Figuur 2.9. De variatie sommen zijn uitgevoerd met twee sediment transport relaties; Van Thiel-Van Rijn en Soulsby-Van Rijn. XBeach laat een kleine gevoeligheid van het erosievolume zien voor variaties in de D_{50} , het erosievolume neemt af met 1.2 m^3 per 0.1 mm D_{50} toename. DurosTA laat een grotere gevoeligheid voor de D_{50} zien, het erosievolume neemt af met 4.0 m^3 per 0.1 mm D_{50} toename. De verschillende sediment transport relaties in XBeach resulteren in een klein verschil in erosievolume, maar laten gelijke trends zien met een variërende D_{50} . In paragraaf 2.5 wordt de gevoeligheid voor de korreldiameter nader beschouwd.



Figuur 2.9 Het effect van D_{50} variatie op erosievolumes na 6 uur met XBeach (transport relatie van Thiel-vanRijn in geel en Soulsby-vanRijn in paars) en DurosTA (groen). Gemeten erosievolumes in zwart, gemodelleerde erosievolumes met gemeten golfsignaal voor T01 in rode cirkel

2.3 Prototypeschaal berekeningen Deltagoot 2006

2.3.1 Methode

Op een vergelijkbare wijze als voor de laboratoriumschaal-berekeningen (zie voorgaande sectie) zijn modelberekeningen uitgevoerd om het modelgedrag van XBeach (en DurosTA) op prototypeschaal te analyseren. Om enige relatie te houden met de berekeningen op basis van de Deltagoot 2006 proeven is er voor gekozen om een opgeschaalde variant van deze proeven te beschouwen. Dit betekent dat de opzet van de berekeningen zodanig is gekozen dat dezelfde (ruimtelijke) verhoudingen zijn gehanteerd; waarbij de ruimtelijke dimensies (profieldefinitie, waterstand, golfhoogte) met een factor 6 zijn opgeschaald. De tijdsdimensies (golfperiode, stormduur) zijn verschaald met een factor $\sqrt{6}$. De korrel diameter (D_{50}) is in de basisberekening(en) echter niet verschaald; bij de gootproeven (labschaal) is een korrel diameter van 200 μm gehanteerd, maar dat is juist ook op prototypeschaal een gangbare waarde².

² Mede doordat de korrel diameter niet is verschaald, en ook de profielverhoudingen constant zijn gehouden (n_s/n_L), is hier strikt genomen geen sprake van een 'nette' toepassing van schaalrelaties voor de vertaling van lab-schaal naar

Voor de basisberekeningen op prototypeschaal zijn, evenredig met de profielverschaling, (verhoudingsgewijs) dezelfde randvoorwaarden gebruikt als voor de lab-schaal proeven. Dit betekent dat de relatieve waterstand (t.o.v. dwarsprofiel) gelijk is, resulterende in een offshore waterdiepte van (6 x 4,5 m =) 27 m. De beschouwde golfcondities zijn: $H_s = (6 \times 1,5 \text{ m} =) 9 \text{ m}$ en $T_p = (\sqrt{6} \times 4,9 \text{ s} =) 12 \text{ s}$.

In tegenstelling tot bij de lab-schaal proeven zijn voor de prototypeschaal berekeningen geen meetgegevens beschikbaar waarmee de modelresultaten kunnen worden vergeleken. Daarom is bij deze uitwerkingen vooral gekeken naar de onderlinge verschillen tussen de beschouwde modellen en/of parameterinstellingen. Daarnaast is, voor zover mogelijk, een relatieve vergelijking gemaakt met de resultaten van de lab-schaal berekeningen (door de eindprofielen weer op eenzelfde wijze terug te schalen).

Voor de schematisering van de golfrandvoorwaarden voor de XBeach berekeningen is gebruik gemaakt van Pierson-Moskowitz spectrum³. Daarnaast is bij het model XBeach een tweetal sets met parameter instellingen gebruikt voor de sommen: de 'default' instellingen en de 'van Thiel de Vries, 2006' ($vTdV$) instellingen⁴. Hierbij is de "scalefac" parameter in Xbeach niet toegepast. De verschillen tussen deze instellingen zijn gepresenteerd in de voorgaande sectie (2.2.2). DurosTA is toegepast met de standaard modelinstellingen.

Aanvullend op de basisberekeningen zijn gevoeligheidsberekeningen uitgevoerd om het modelgedrag op prototypeschaal inzichtelijk te maken voor variërende randvoorwaarden (waterstand, golfhoogte, golfperiode en korreldiameter). Deze uitwerkingen zijn wederom vergelijkbaar met de uitgevoerde lab-schaal berekeningen. In Tabel 2.5 zijn de gehanteerde uitgangspunten voor de gevoeligheidsberekeningen op prototypeschaal gepresenteerd. Hierbij zijn (verhoudingsgewijs) dezelfde bandbreedten (min/max) voor de parameters aangehouden als bij de eerder gepresenteerde labschaal-berekeningen.

Ten behoeve van de gevoeligheidsberekeningen is de waterstand gevarieerd over een range van 6 meter. Voor de korreldiameter D_{50} is een range tussen 150 μm en 300 μm aangehouden, waarbij voor de D_{90} een directe relatie met D_{50} is voorgeschreven ($1,5 \times D_{50}$). Variaties in de golfcondities zijn op verschillende manieren beschouwd: [1] variatie H_s met constante T_p , [2] variatie T_p met constante H_s , en [3] variatie H_s met bijhorende T_p bij constante golfsteilheid.

prototypeschaal (of visa versa). Om het modelgedrag (op prototypeschaal) te valideren op basis van lab-schaal proeven is een meer specifieke studie nodig om het schalingsgedrag van de beschouwde modellen nader te duiden.

³ De keuze voor het PM-spectrum komt voort uit de opschaling van de Deltagoot proef waarin ook een PM-spectrum gebruikt is. Dit om consistent te zijn met eerder uitgevoerde duinerosieproeven. Voor praktijktoepassingen op prototype schaal is het gebruikelijker om een Jonswap-spectrum toe te passen. In dit specifieke geval resulteert een Jonswap spectrum bij gelijke spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$ en -hoogte in (iets) meer duinerosie, omdat er door dit smallere spectrum meer lange golfenergie wordt opgewekt.

⁴ Beide sets met parameter instellingen zijn ongewijzigd toegepast op beide schaalniveaus; zonder eventuele verschaling van (niet-dimensieloze) modelparameters. Het wel/niet verscalen van deze parameters is in deze studie niet verder bekeken; wel wordt aanbevolen om dit te doen als onderwerp van nadere studie.

Tabel 2.5 Uitgangspunten voor gevoeligheidsberekeningen op prototypeschaal (XBeach en DurosTA).

	Laag	Basiswaarde	Hoog
Offshore waterdiepte (m)	24	27	30
>> Equiv. waterstand (m+NAP)*	2	5	8
Hs (m)	6	9	12
Tp (s)	10	12	20
D ₅₀ (mu)	150	200	300

Voor de onderlinge vergelijking van modelresultaten is wederom (vergelijkbaar met de eerder gepresenteerde uitwerkingen) gekeken naar het *totale* erosievolume ter plaatse van het duin (en dus niet boven stormvloedpeil).

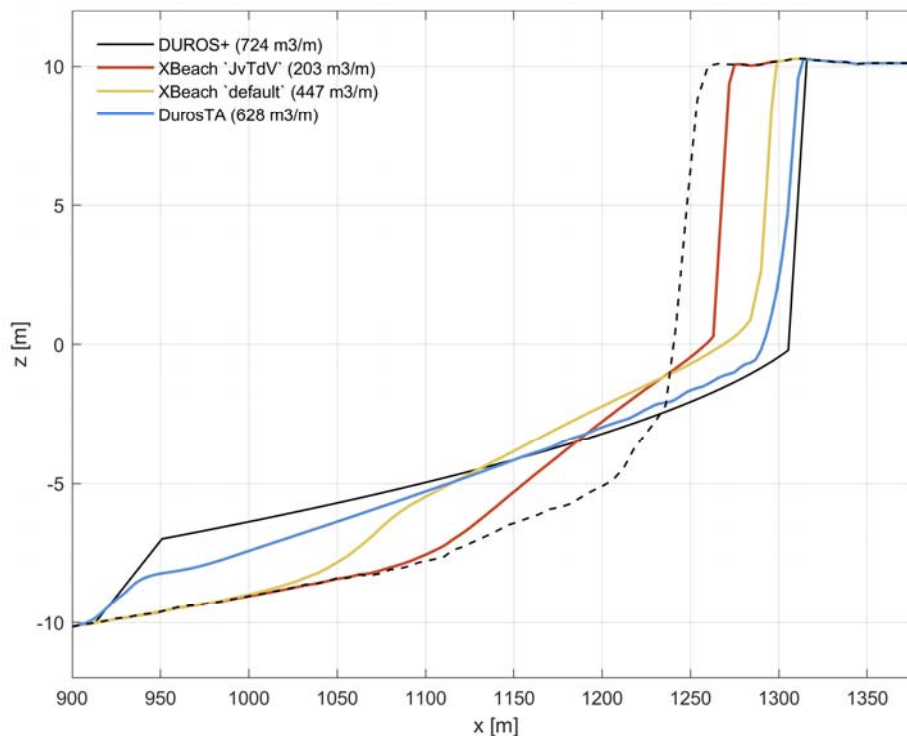
2.3.2 Resultaten: referentiecasse

De basisberekeningen voor de prototypeschaal, met XBeach en DurosTA, resulteren in de eindprofielen die zijn weergegeven in Figuur 2.10. Het figuur toont de afslagprofielen voor XBeach 'vTdV', XBeach 'default' en DurosTA, waarbij de volgende erosievolumes zijn vastgesteld: 203 m³/m (XBeach 'vTdV'), 447 m³/m (XBeach 'default') en 628 m³/m (DurosTA). Zie ook Tabel 2.6.

De resultaten laten zien dat relatief grote verschillen worden berekend door de verschillende modellen en/of door de verschillende modelinstellingen. XBeach met instellingen conform Van Thiel de Vries (2006) resulteert in de minste afslag. XBeach met default instellingen resulteert in meer dan de dubbele hoeveelheid duinafslag (+244 m³/m). Met een vergelijkbare sprong (+181 m³/m) resulteert DurosTA in de meeste afslag. Ter vergelijking is ook het resultaat van een DUROS+ berekening toegevoegd; dit resulteert in een totaal afslagvolume van 724 m³/m, en is weer iets groter dan de DurosTA-waarde.

Tabel 2.6 Resultaat van modelberekeningen voor opgeschaald T01-profiel (prototype schaal): erosievolumes.

	Erosievolume [m ³ /m] (prototypeschaal)
XBeach 'vTdV'	203
XBeach 'default'	447
DurosTA	628
DUROS+	724



Figuur 2.10 Resultaat van modelberekeningen voor het opgeschaalde T01-profiel (prototype schaal; ruimtelijke opschaling met factor 6): XBeach met van Thiel de Vries settings (rood), XBeach met default settings (geel) en DurosTA (blauw). Ter vergelijking is ook het resultaat van een DUROS+ berekening toegevoegd (zwart).

Het grote verschil tussen met name de XBeach-en DurosTA-resultaten hangt nauw samen met het eerder besproken gevoeligheid voor de korreldiameter. In de onderhavige sommen is (ten opzichte van de laboratorium-omgeving) immers sprake van een heel andere verhouding tussen de forcering (zeg H/T-verhouding) en de valsnelheid van het korrelmateriaal. In relatieve zin is het materiaal nu immers veel fijner. Het feit dat XBeach relatief ongevoelig is voor de korreldiameter leidt logischerwijze tot relatief minder afslag dan het DurosTA-model voorspelt.

Los van de verschillen in de berekende hoeveelheid afslag wordt ook geconstateerd dat het profielniveau waar de overgang van het erosiefront naar het flauwere strandprofiel te zien is (knik in afslagprofiel) bij XBeach hoger ligt dan bij DurosTA en DUROS+. Dit is het gevolg van de periodische waterstandsvariaties in XBeach door lange golfwerking. Ook is bij de modelresultaten te zien dat de profielhelling van het afslagprofiel vóór het duin (strand) per model verschillend is, en dat de positie en de vorm van de teen van het afslagprofiel alle gevallen afwijkend is. Kortom, zowel het erosievolume als de profielvorm is in de prototypeberekeningen verschillend voor de verschillende modellen.

2.3.3 Resultaten: vergelijking prototypeschaal en lab-schaal

De resultaten van de basisberekeningen op prototypeschaal geven aanleiding om nader te kijken naar de (verhoudingsgewijze) verschillen en overeenkomsten met de lab-schaal proeven. Het onderlinge (relatieve) verschil tussen de modelresultaten is op lab-schaal

namelijk kleiner dan op prototypeschaal; in dat laatste geval zijn de onderlinge verschillen zelfs opmerkelijk groot (en hebben waarschijnlijk te maken met de beperkte gevoeligheid van XBeach voor een variatie in de korreldiameter). Om een vergelijking te maken tussen de modelresultaten op beide schalen is het eindresultaat van de prototypeberekeningen verschaald naar de labschaal: $V_{\text{ero,lab}} = V_{\text{ero,proto}}/36$; ofwel een verscaling van de horizontale en verticale dimensies met een factor 6.

Een vergelijking van de resultaten van zowel de lab-schaal als de (omgerekende) prototypeschaal is gepresenteerd in Figuur 2.11 en in Tabel 2.7. De tabel toont de berekende (en omgerekende) erosievolumes en de het gemeten erosievolume van de T01-metingen. Het figuur toont de lab-schaal resultaten en de verschaalde prototypesresultaten in één weergave.

De resultaten laten zien dat het erosievolume op prototypeschaal in relatieve zin groter is dan het erosievolume op lab-schaal, uitgaande van de resultaten van DUROS+, DurosTA en XBeach 'default'. DurosTA en Duros+ laten, bij de hier gekozen uitgangspunten, de grootste relatieve toename zien in berekend erosievolume, tussen labschaal en prototypeschaal. De XBeach 'default' is deze toename in relatieve zin kleiner.

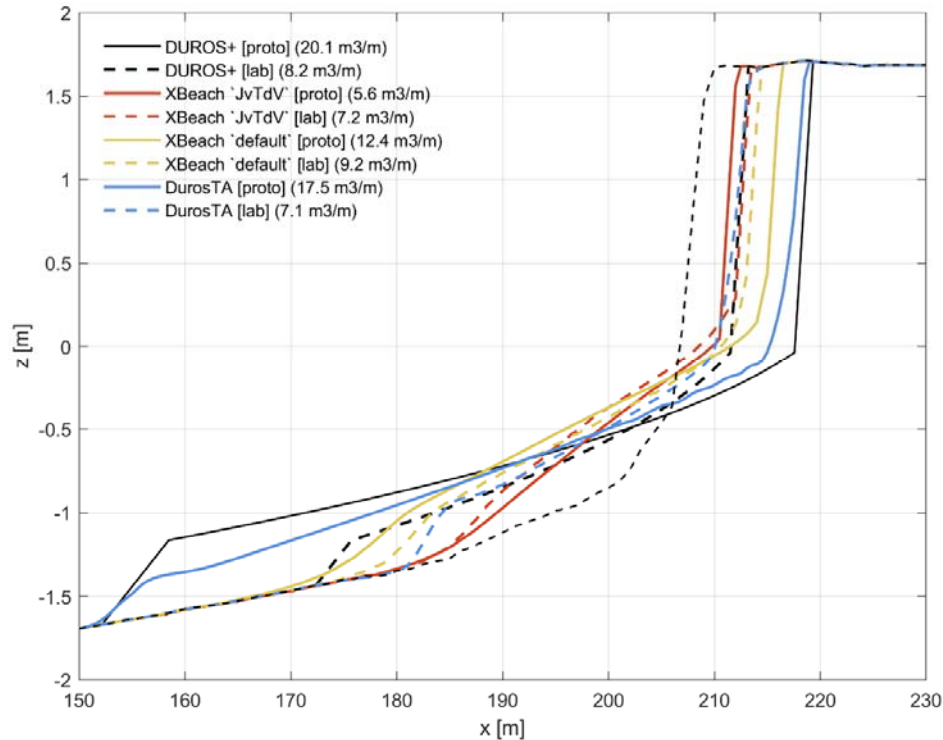
Bij XBeach 'vTdV' is het erosievolume op prototypeschaal verhoudingsgewijs kleiner dan op labschaal. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de parameterinstellingen van het model XBeach invloed (kunnen) hebben op het modelgedrag bij verscaling. Nota bene dat de 'vTdV' settings afgeleid zijn op basis van de labproeven met een oudere versie van XBeach, waarvan niet verwacht wordt dat deze universeel geldig zijn. Niettemin, voor toepassing in WBI is het dus van belang om een vaste set dimensieloze parameters af te leiden op basis van zowel laboratorium als velddata.

Hierbij moet overigens worden opgemerkt dat door het gebruik van hetzelfde sediment (namelijk 200 μ) in theorie wel schaal-effecten mogen worden verwacht. Op basis van de zogenaamde (H/Tw)-schalingsgedachte zou een grotere schaal (H een factor 6 en T een factor $\sqrt{6}$ vragen om een factor $\sqrt{6}$ grotere valsnelheid. Uitgaande van lab-omstandigheden is de valsnelheid van het bodemmateriaal (en dus ook de diameter) te klein. Dit fijnere materiaal zal resulteren in een flauwer afslagprofiel en dus in relatief meer erosie in het prototype. De berekende kwalitatieve trends zijn hiermee deels te verklaren.

Tabel 2.7 Resultaten van modelberekeningen voor prototypeschaal en lab-schaal: erosievolumes.

	Erosievolume [m^3/m] (prototypeschaal)	Erosievolume [m^3/m] (lab-schaal*)	Erosievolume [m^3/m] (lab-schaal)
XBeach 'vTdV'	203	(5.6) [*]	7.2
XBeach 'default'	447	(12.4) [*]	8.8
DurosTA	628	(17.5) [*]	7.1
DUROS+	724	(20,1) [*]	8.2
Metingen T01 (lab-schaal)	-	-	8.5

* = terugvertaling van prototypeschaal naar lab-schaal.



Figuur 2.11 Resultaat van modelberekeningen voor het oorspronkelijke T01-profiel en het opgeschaalde T01-profiel (ruimtelijke opschaling met factor 6): XBeach met van Thiel de Vries settings (rood), XBeach met default settings (geel) en DurosTA (blauw). De resultaten (profielen) zijn teruggeschaald om onderlinge vergelijking tussen beide schalen mogelijk te maken.

Op basis van deze uitwerkingen, en de beschikbare meetdata, kan niet worden geconcludeerd welke resultaten op prototypeschaal 'goed' zijn, en ook niet of er een afhankelijkheid bestaat tussen schaal en erosievolume (en welke afhankelijkheid in dat geval verwacht mag worden).

Bovenal is belangrijk om te concluderen *dat* een dergelijke afhankelijkheid er bij elk van de modellen wel is, en dat deze afhankelijkheid ook samenhangt met de gekozen set met parameterinstellingen. Het is daarbij ook goed om te realiseren dat deze conclusie deels samenhangt met enkele gekozen uitgangspunten bij de modelopzet en de wijze van verscaling van de modelberekeningen (o.a. constante D_{50} en $n_d = n_L$).

Geadviseerd wordt om de verschillen tussen modelresultaten op lab-schaal en op prototypeschaal nader te onderzoeken in een vervolgtraject⁵ aan de hand van veldproeven, en een consistente set parameterwaarden af te leiden voor zowel veld- als labproeven.

⁵ Punt van aandacht hierbij is ook de morfologische tijdschaal. In de voorliggende uitwerkingen is er van uitgegaan dat deze gelijk is aan de hydrodynamische tijdschaal (\sqrt{nd}).

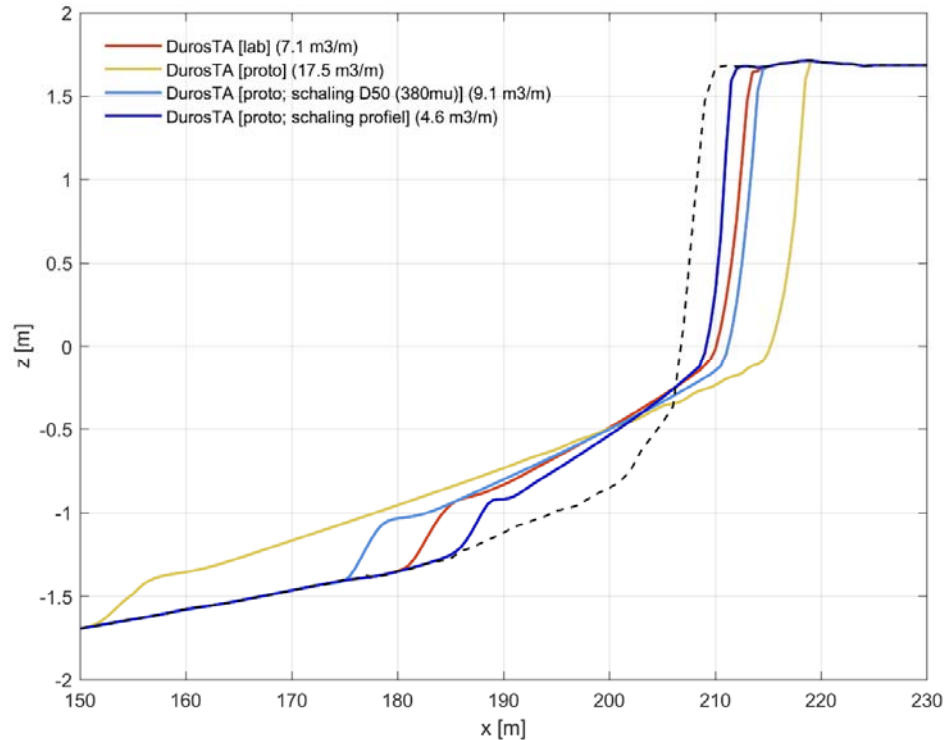
Verkennde uitwerking i.r.t. wijze van opschaling T01-proef

Een nadere blik op de uitgangspunten voor de T01-proef leert dat bij de definitie van het lab-schaal profiel een profielcontractie is toegepast ten opzichte van het beoogde (prototype) testprofiel; het betreft een factor 2 versteiling van het dwarsprofiel (ofwel: $n_L/n_d=2$).

Zonder hier in meer detail in te gaan op het onderwerp schaalrelaties, kan worden gesteld dat bij het uitvoeren van modelproeven vaak gebruik gemaakt wordt van een theoretische relatie tussen profielcontractie en korreldiameter. Profiellengte en korreldiameter zijn vaak limiterende factoren bij proefopstellingen; een te 'lang' profiel past niet en een te fijne korreldiameter resulteert in andere eigenschappen (valsnelheid, kritische schuifspanning, etc.). Bij toepassing van profielcontractie kan – in theorie – worden gezorgd dat verschaling van de korreldiameter niet nodig is. In het geval van de T01 proef betekent dit dat de equivalente prototype case – volgens deze theorie – een 2x zo flauw profiel betreft met dezelfde korreldiameter. Of – bij toepassing van de achterliggende schaalrelaties – een profiel met dezelfde verhoudingen maar dan met een grove korreldiameter van ca. 380 μm .

Als een eerste vingeroefening zijn twee extra berekeningen uitgevoerd met DurosTA om op een alternatieve wijze de T01-proef op te schalen naar prototypeschaal. In Figuur 2.12 zijn de extra resultaten gepresenteerd van [1] een prototypecase met een 2x flauwer profiel '[*proto; schaling profiel*]' en [2] een prototypecase met een grovere korreldiameter o.b.v. schaalrelaties (380 μm) '[*proto; schaling D₅₀*]'. Daarnaast zijn in het figuur de resultaten van de oorspronkelijke lab-schaalcase en de eerder gepresenteerde prototypecase '[*proto*]' ingetekend. In alle gevallen zijn de resultaten weer teruggeschaald naar de lab-schaal om een onderlinge vergelijking mogelijk te maken. Beide alternatieve prototypecases resulteren in minder erosie dan de initiële berekening waarbij profielverhouding en korreldiameter beiden gelijk zijn gehouden aan de lab-schaalcase; maar resulteren niet in eenzelfde mate van erosie. Dit suggereert dat de theoretische schaalrelaties niet één-op-één gelijk is aan het schalingsgedrag van de modellen (in dit geval DurosTA).

Ook de in Figuur 2.12 gepresenteerde resultaten geven aanleiding om in een vervolgtraject nader te kijken naar verschaling van lab-schaalproeven ten behoeve van modelverificaties en de wijze waarop (theoretische) schaalrelaties doorwerken in de huidige duinafslagmodellen.



Figuur 2.12 Resultaat van verkennende berekeningen (DurosTA) t.a.v. de wijze van verscaling van lab-schaal naar prototypeschaal. [1] profielsteilheid constant + D50 constant, [2] profielsteilheid constant + D50 opschalen, [3] profielverflauwing + D50 constant. Alle resultaten zijn teruggeschaald naar lab-schaal.

2.3.4 Resultaten: gevoeligheidsanalyses

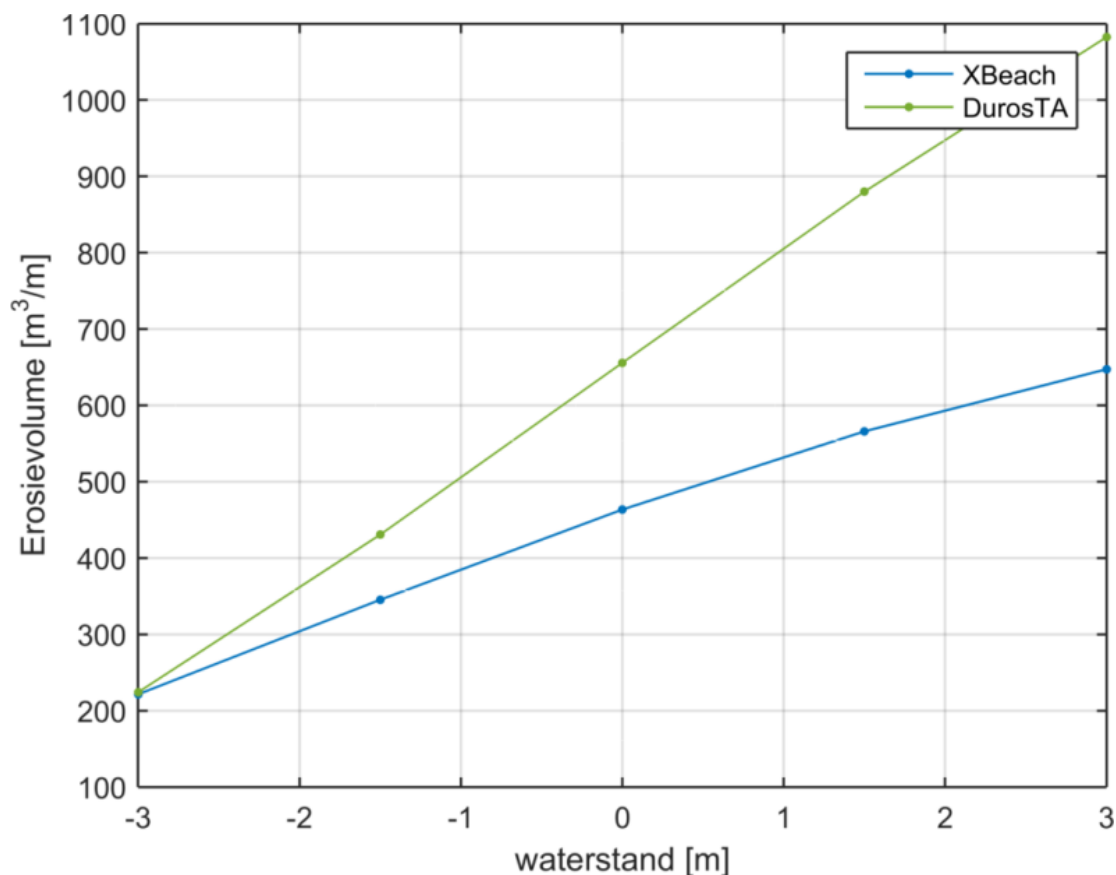
Volgend op de basisberekeningen op prototypeschaal zijn, op een vergelijkbare wijze als voor de lab-schaal, gevoeligheidsanalyses uitgevoerd om de invloed van variaties in de randvoorwaarden op het totale erosievolume inzichtelijk te maken. Achtereenvolgens is gekeken naar de invloed van variaties in waterstand, golfhoogte, golfperiode en korreldiameter.

Waterstand variatie

Figuur 2.13 toont het berekende totale erosievolume als functie van de waterstand ten opzichte van de basiscase. Het figuur toont de resultaten van DurosTA en XBeach (met 'default' instellingen). Voor beide modellen geldt dat er een duidelijke relatie bestaat tussen waterstand en erosievolume; bij DurosTA is deze relatie min of meer lineair en bij XBeach is een afvlakking te zien voor hogere waterstanden. De reden hiervan is te zien in Figure 2.14 en Figure 2.15, waarin te zien is dat Xbeach een hogere en steilere depositiezone genereert dan DurosTA, dat een vlakker profiel met een langere "teen" uitbouwt. Dit heeft gevolgen voor de reductie in de golfaanval en dus de uiteindelijke afslag. Er zijn geen detailmetingen op prototype schaal om te onderzoeken welk profiel de juiste is.

In relatie tot deze gevoeligheidsanalyse dient te worden opgemerkt dat de keuze voor de indicator waarmee de modellen vergeleken worden (hier: totale erosievolume), direct invloed heeft op de resulterende afhankelijkheden. Bij voorbeeld, als positie van het afslagfront zou zijn gehanteerd als indicator voor het hoeveelheid afslag dan zou het beeld anders zijn; namelijk dat de mate van achteruitgang toeneemt bij toenemende waterstand (steeds grotere stappen achteruit).

Daarnaast is ook het beschouwde niveau van het duinprofiel van invloed op het resultaat. Bij een lager duin zal het gedrag van XBeach anders zijn zodra er water op het duin kan komen ten gevolge van waterstandsvariaties door lange golven. Dit wordt nader beschouwd in de volgende onderdelen van deze studie (Taak 2 + 3).



Figuur 2.13 Het effect van waterstand variatie op erosievolumes na 15 uur met XBeach (default settings; blauw) en met DurosTA (groen).

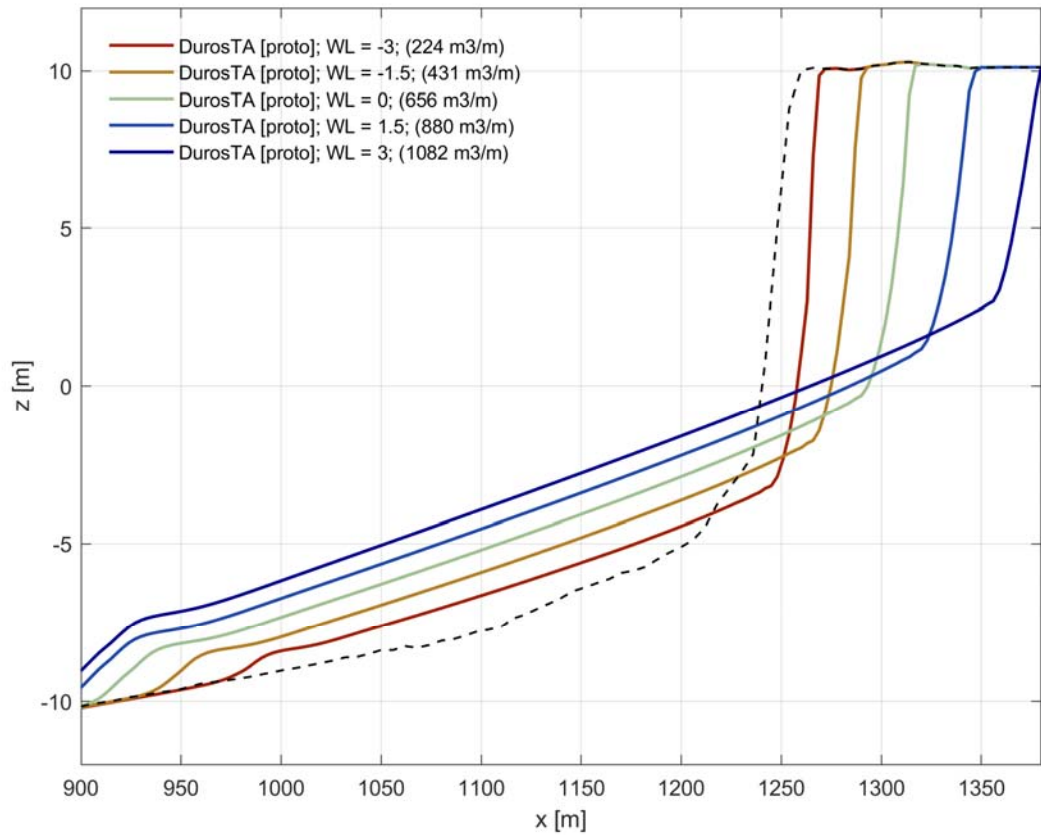


Figure 2.14 Berekende afslagprofielen voor een vijftal waterstanden (afwijkingen in m t.o.v. basiswaarde) voor DurosTA.

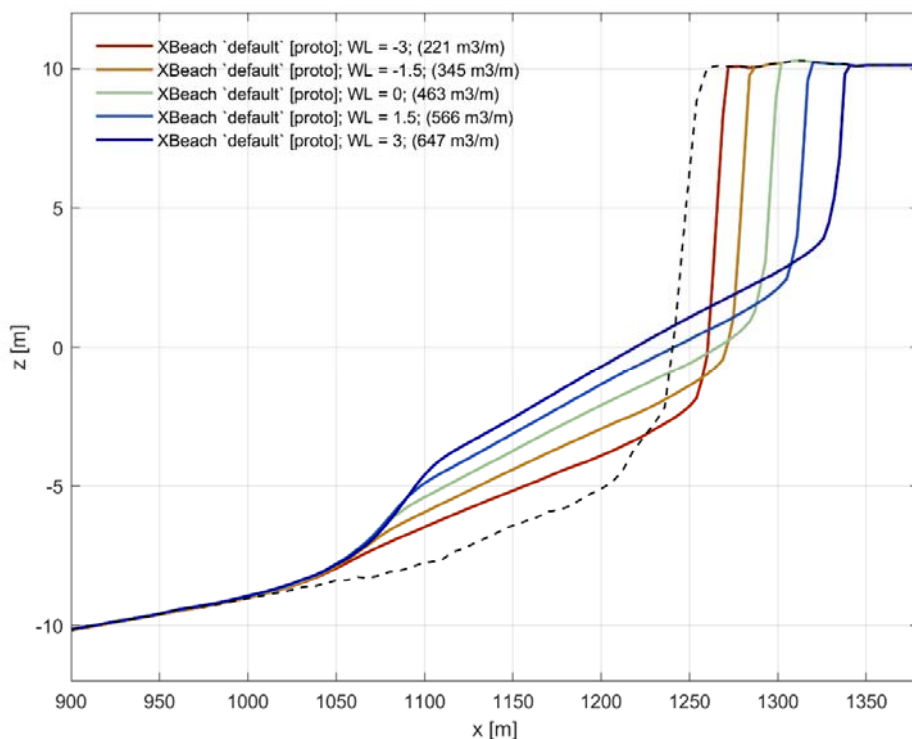
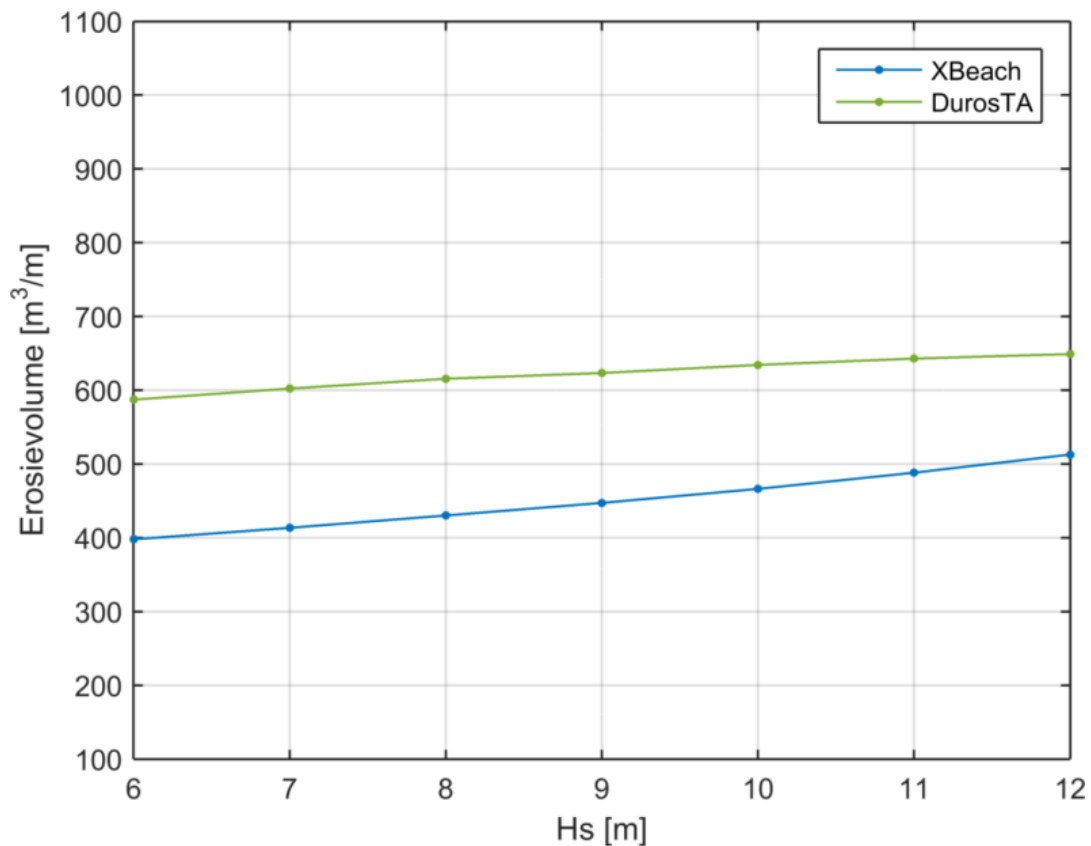


Figure 2.15 Berekende afslagprofielen voor een vijftal waterstanden (afwijkingen in m t.o.v. basiswaarde) voor XBeach 'default'

Golfhoogte variatie (met constante golfperiode)

In Figuur 2.16 is voor zowel DurosTA als voor XBeach ('default') de afhankelijkheid tussen golfhoogte en erosievolume inzichtelijk gemaakt; uitgaande van een constant blijvende golfperiode. Uit de berekeningen blijkt dat de golfhoogteafhankelijkheid voor beide modellen beperkt is. Het relatieve effect is bij XBeach echter iets groter. De voor de vorming van het afslagprofiel verantwoordelijke golfhoogte wordt immers grotendeels bepaald door de waterdiepte net buiten de depositiezone en veel minder door de diepwater condities.



Figuur 2.16 Het effect van golfhoogte (H_s) variatie op erosievolumes na 15 uur met XBeach (default settings; blauw) en met DurosTA (groen).

Golfhoogte variatie (met constante golfsteilheid)

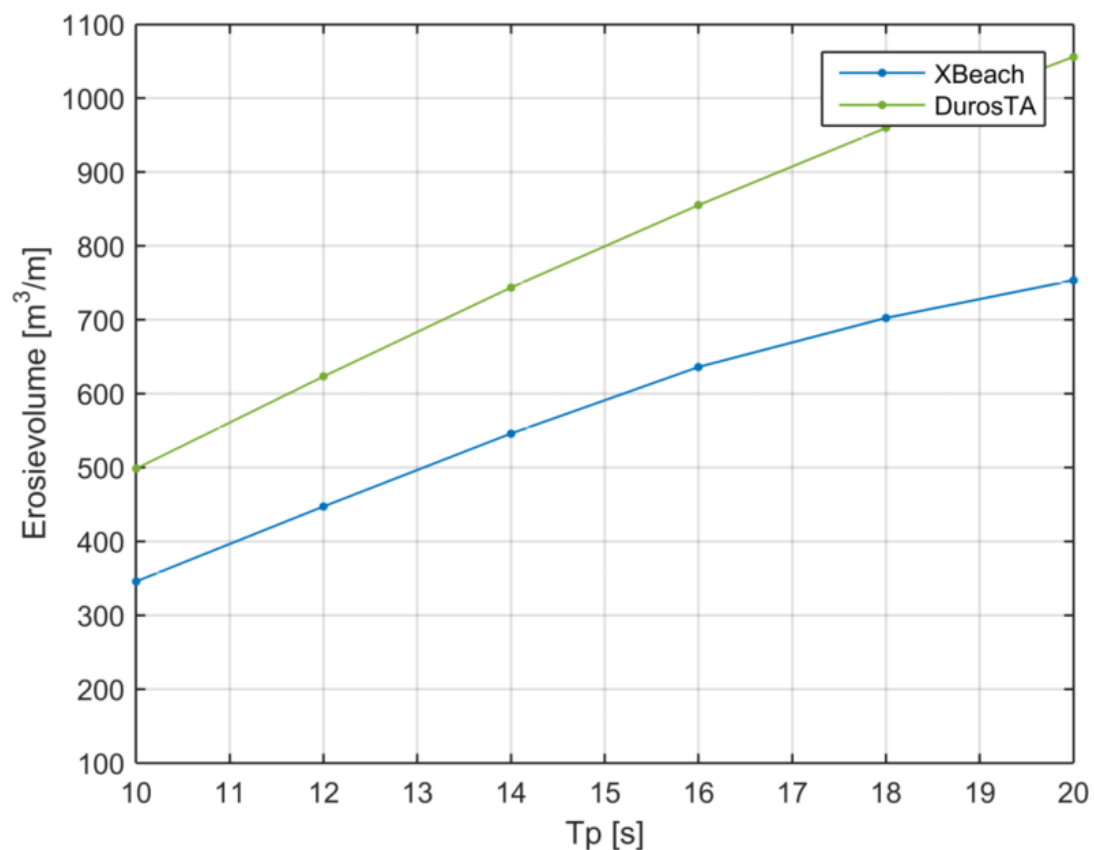
Op eenzelfde wijze als hierboven is ook gekeken naar het gecombineerde effect van een variërende golfhoogte en golfperiode, waarbij de golfsteilheid constant is gehouden. Uit een dergelijke uitwerking blijkt dat er een sterkere relatie bestaat tussen de variërende parameters en het berekende erosievolume. Het relatieve effect is voor beide modellen vergelijkbaar.

Bovenstaande suggereert dat de invloed van golfperiode op de hoeveelheid duinafslag, ten opzichte van de invloed van golfhoogte, relatief groot is. Hieronder wordt dat inzichtelijk gemaakt. (Door de langere periode breken de inkomende golven later en kunnen deze langer doorlopen en effectiever het duinfront aanvallen).

Golfperiode variatie

In Figuur 2.17 is de afhankelijkheid tussen golfperiode en erosievolume inzichtelijk gemaakt voor de twee rekenmodellen, DurosTA en XBeach ('default'). Een toename van de golfperiode (bij constante golfhoogte) resulteert in meer duinafslag; maar de mate van toename neemt geleidelijk af. De afvlakking van de curve is voor XBeach groter dan bij DurosTA. Hoewel het verschil in afvlakking tussen deze modellen niet in deze studie verder is onderzocht voor langere golfperioden dan 20 s, is wel uit theoretische overwegingen bekend dat voor steeds groter wordende golfperioden en gelijke golfhoogte, de maximale golfgeïnduceerde bodemschuifspanning (en daarmee sediment transport) in de limiet naar nul

gaat. Voor hogere (theoretische) golfperiodes wordt voor beide modellen verwacht dat de curve eerst volledig uitvlakt, en daarna een afname in erosievolume weergeeft.

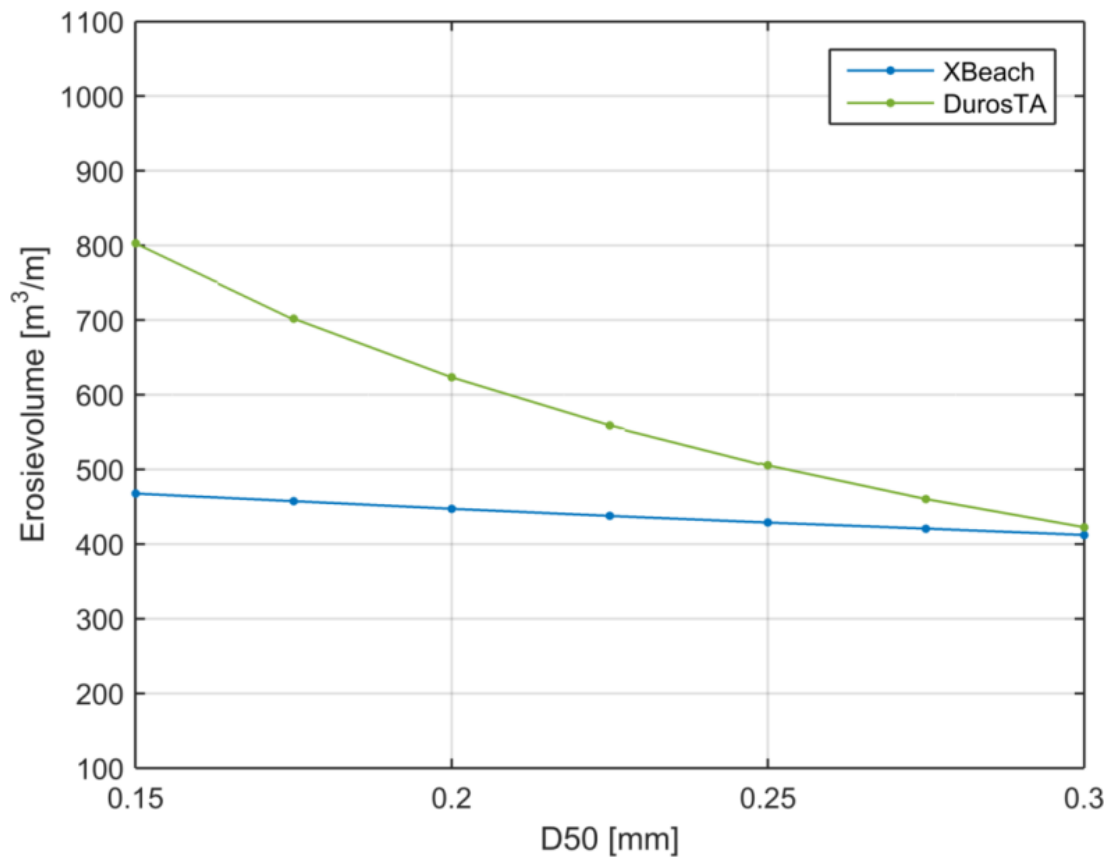


Figuur 2.17 Het effect van golfperiode (T_p) variatie op erosievolumes na 15 uur met XBeach (default settings; blauw) en met DurosTA (groen).

Sedimentdiameter (D_{50}) variatie

Tot slot is de sedimentdiameter (D_{50}) gevarieerd; het resultaat van deze uitwerkingen is gepresenteerd in Figuur 2.18. Vergelijkbaar met de lab-schaal uitwerkingen is te zien dat XBeach relatief ongevoelig is voor de korreldiameter, terwijl er bij DurosTA weldegelijk sprake is van een sterke afhankelijkheid van de korreldiameter op het afslagvolume.

Een nadere beschouwing van de korreldiameterafhankelijkheid voor XBeach is uitgewerkt in de hierop volgende secties.



Figuur 2.18 Het effect van D_{50} variatie op erosievolumes na 15 uur met XBeach (default settings; blauw) en met DurosTA (groen).

2.4 Nader onderzoek gevoeligheid korreldiameter

2.4.1 Methode

Om de D_{50} -gevoeligheid van XBeach nader te onderzoeken wordt het resultaat van het model vergeleken met twee kleine-schaalproeven waarbij de korreldiameter is gevarieerd (Van de Graaff, 1976; Vellinga 1981). Verder wordt 'de term van het DurosTA model die de korreldiameter gevoeligheid stuurt' in XBeach geïmplementeerd om te onderzoeken of in dat geval ook XBeach dezelfde trend laat zien.

2.4.2 Schaalproeven

De van de Graaff (1976) schaalproeven zijn uitgevoerd in de Windgoot van het Laboratorium de Voorst. Van de in totaal 58 experimenten zijn vier paren geselecteerd om met XBeach te vergelijken. Elk paar heeft dezelfde randvoorwaarden en schalen, maar een variërende D_{50} van 150 of 225 μm . Zie Tabel 2.8 voor een overzicht van de experimenten.

Tabel 2.8 Geselecteerde set experimenten uit van de Graaff (1976)

Paar	Experiment	schaal	Profiel contractie	D_{50} (μm)	Water (m)	diepte	Hs (m)	T_p (s)
A	AT33	26	3	150	0.806		0.292	2.35
	DT34	26	3	225	0.806		0.292	2.35
B	BT92	26	3	150	0.806		0.292	1.76
	CT93	26	3	225	0.806		0.292	1.76
C	BT23	47	7	150	0.585		0.163	1.76
	CT24	47	7	225	0.585		0.163	1.76
D	BT25	47	5	150	0.585		0.163	1.76
	CT26	47	5	225	0.585		0.163	1.76

De Vellinga (1981) schaalproeven zijn uitgevoerd met vier verschillende korreldiameter; D_{50} van 225, 150, 130 en 95 μm . In deze studie zijn de experimenten geselecteerd met een diepte schaal van 26 en de experimenten met een diepte schaal van 84 en 47 waarvoor een D_{50} van 225 μm was gebruikt. Een overzicht van de experimenten is weergegeven in Tabel 2.9.

Tabel 2.9 Geselecteerde set experimenten uit Vellinga (1981)

Experiment	schaal	Profiel contractie	D_{50} (μm)	Water (m)	diepte	Hs (m)	T_p (s)
111	84	4.0	225	0.461		0.091	1.31
115	84	2.9	225	0.461		0.091	1.31
101	47	3.4	225	0.585		0.163	1.76
105	47	2.5	225	0.585		0.163	1.76
121	26	3.0	225	0.806		0.292	2.35
125	26	2.0	225	0.806		0.292	2.35
122	26	2.2	150	0.806		0.292	2.35
126	26	1.5	150	0.806		0.292	2.35
123	26	1.6	130	0.806		0.292	2.35
127	26	1.1	130	0.806		0.292	2.35
124	26	1.3	95	0.806		0.292	2.35
128	26	1.0	95	0.806		0.292	2.35

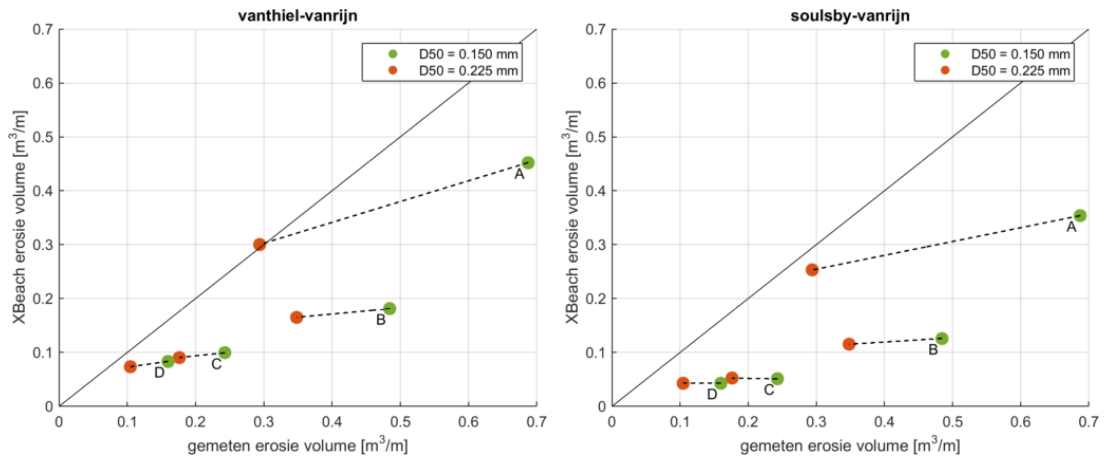
2.4.3 Resultaten

In deze paragraaf worden de resultaten besproken van de schaalproeven met een variërende D_{50} . De modelresultaten worden vergeleken met metingen om te kijken of de modelgevoeligheid voor de D_{50} overeenkomt met de werkelijkheid. Voor alle experimenten wordt het gemeten en gemodelleerde erosievolume bepaald aan het einde van de proef (na 6 uur).

Van de Graaff (1976) schaalproeven

Het gemeten en in XBeach berekende erosievolume voor de schaalproeven van de Graaf (1976) is weergegeven in Figuur 2.19. Voor elk paar is het gemeten erosievolume tijdens het experiment groter bij een kleinere korreldiameter ($D_{50} = 150 \mu\text{m}$). In XBeach is deze gevoeligheid van het erosievolume voor variaties in de korreldiameter nauwelijks te zien (horizontale verbindinglijnen). Ook wordt in het algemeen het erosievolume door XBeach onderschat (de punten bevinden zich in de onderste helft van de figuur). Deze onderschatting

is groter bij een kleinere D_{50} . Voor 225 μm liggen de punten nog redelijk in de buurt van de perfecte overeenkomst.



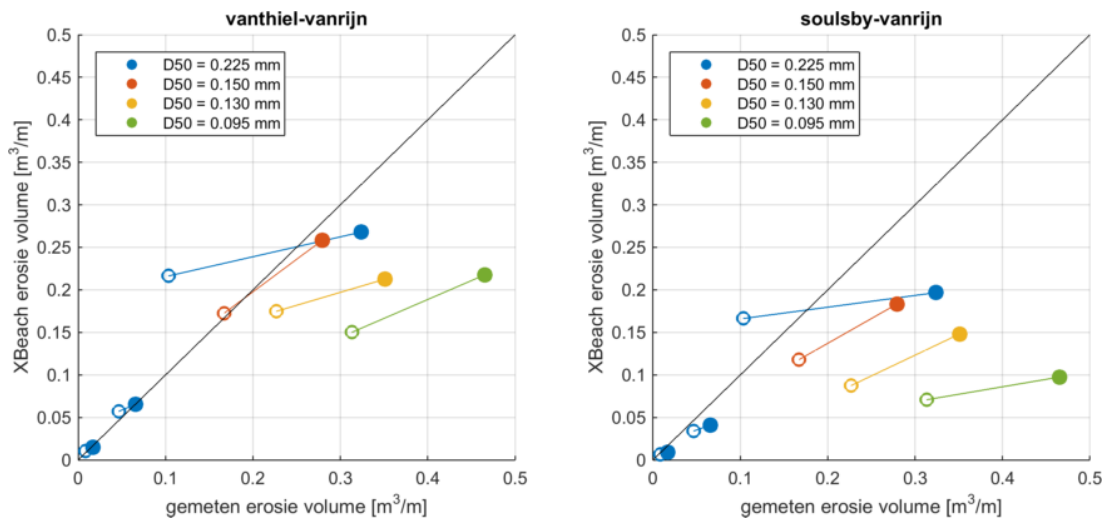
Figuur 2.19 Gemeten en XBeach erosievolumes voor de van de Graaff (1976) schaalproeven. Vier paren (A,B,C en D) met elk een D_{50} van 0.225mm (rode cirkels) en 0.150mm (groen cirkels) zijn gemodelleerd met sediment transport relaties van Thiel- van Rijn (linker figuur) en Soulsby-van Rijn (rechter figuur).

De metingen laten zien dat het erosievolume bij een reductie van de korrel diameter van 225 naar 150 μm grofweg 50 tot 100 % toeneemt. De eerder gepresenteerde DurosTA-resultaten (zie Figuur 2.16) laten een toename van 60 % zien. Dit is te verwachten omdat DurosTA een expliciete term (zie volgende paragraaf) bevat die de korrel diameter afhankelijkheid beschrijft, zie hieronder.

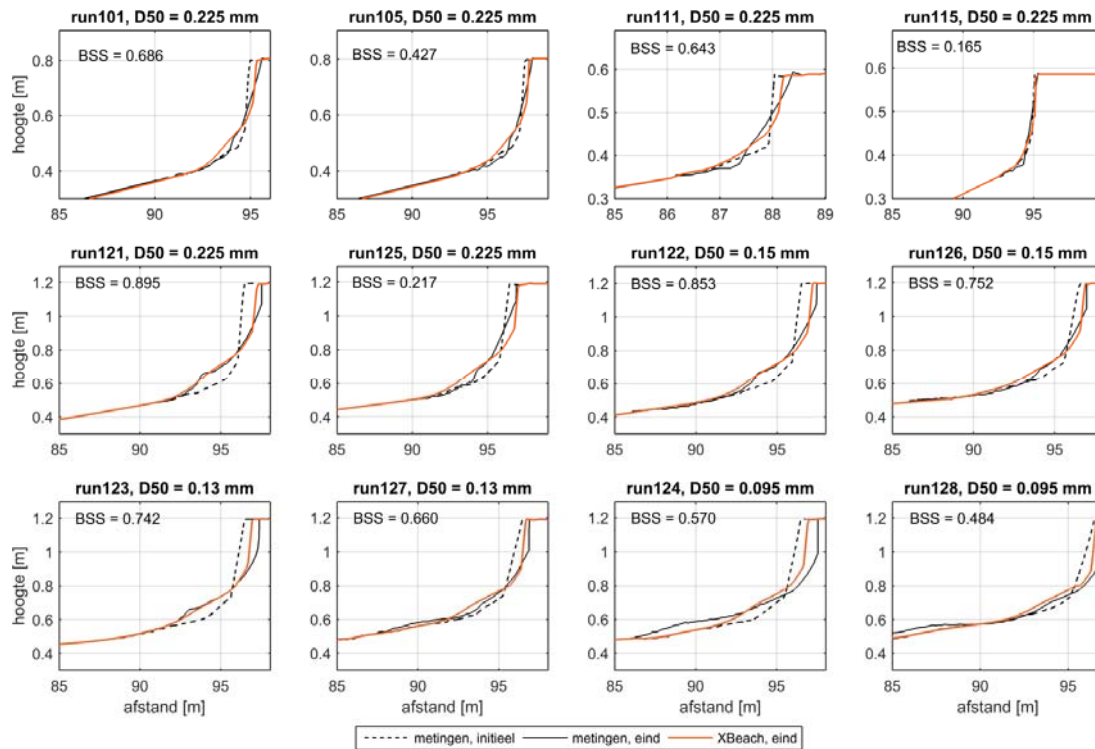
Vellinga (1981) schaalproeven

Het gemeten en in XBeach berekende erosievolume voor de Vellinga (1981) schaalproeven is weergegeven in Figuur 2.20. Het erosievolume in XBeach is minder gevoelig voor de D_{50} variatie in vergelijking met het gemeten erosievolume tijdens het experiment. Wanneer de D_{50} afneemt, laten de metingen een toename in erosievolume zien waar in XBeach een toename in erosievolume wordt voorspeld. De erosievolumes worden door XBeach onderschat bij de lagere D_{50} waarden, dit komt overeen met de bevindingen aan de hand van de Van de Graaff (1976) schaalproeven in Figuur 2.20. De onderschatting van het erosievolume neemt toe bij een groter profiel contractie.

De blauwe open bol in Figuur 2.21 geeft een afwijkende overschatting van het erosievolume door XBeach. Dit wordt veroorzaakt door een laag gemeten erosievolume tijdens het experiment, zie Figuur 2.21 bij run125. Het gemeten duinprofiel wijkt af van de verwachte vorm.



Figuur 2.20 Gemeten en XBeach erosievolumes voor de Vellinga (1981) schaalproeven. Vier korreldiameters D_{50} van 0.225, 0.150, 0.130 en 0.095 mm zijn weergegeven in respectievelijk blauw, rood, geel en groen. De open cirkels staan voor een lage profiel contractie en gevulde cirkels voor een hoge profiel contractie.



Figuur 2.21 Het gemeten initiële (zwarte stippellijn), gemeten eind (zwart) en XBeach eind (oranje) duinprofiel. Run nummers verwijzen naar de experiment nummers in Tabel 2.9. De Brier Skill Score (BSS) is weergegeven links bovenin.

2.5 Onderzoek modelaanpassing D_{50} in XBeach

2.5.1 Methode

Uit bovenstaande analyse blijkt dat de door XBeach berekende afslag tamelijk ongevoelig is voor de variatie in de korreldeiameter. Een reden hiervoor is dat het gemodelleerde avalanching proces dat het aanbod van sediment bepaalt, niet afhankelijk is van de korreldeiameter. Maar belangrijker is dat de sedimenttransportformules die het sediment afvoeren en herverdelen over de vooroever ook tamelijk ongevoelig zijn voor de D_{50} .

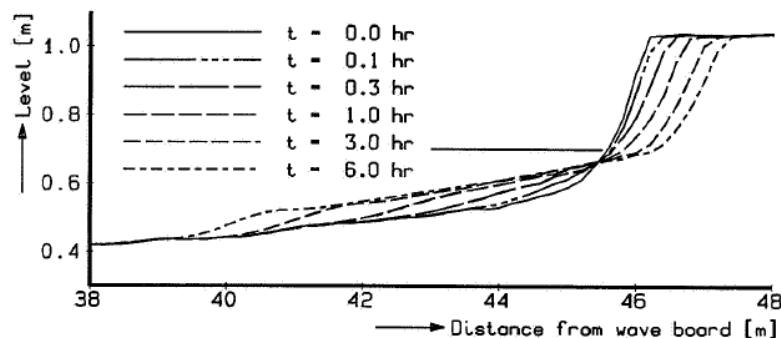
Het DuroSTA model (Steetzel, 1993) laat wel een gevoeligheid voor de D_{50} zien. In deze paragraaf wordt de schalingsterm in dat model dat hiervoor verantwoordelijk is geïmplementeerd in XBeach om te onderzoeken of hier dezelfde gevoeligheid bereikt kan worden. Deze aanpassing is niet zozeer bedoeld als een “quick fix” om het probleem op te lossen maar als een diagnostische ingreep om verdere ontwikkeling van de sediment transport module in gang te zetten.

De term in het DuroSTA model die de korreldeiameter afhankelijkheid bepaald is:

$$F_D = \left(\frac{0.000225}{D_{50}} \right)^{\alpha_{D50}} \quad (0.1)$$

waarin α_{D50} een kalibratie factor is. Wanneer er een D_{50} van 225 μm wordt toegepast is $F_D = 1$ en zal dit geen invloed hebben op het sediment transport. Met een default waarde van $\alpha_{D50} = 0$ is er ook geen effect op het sedimenttransport. Een hogere α_{D50} waarde geeft een hogere F_D waarde voor kleinere korreldeimeters, wat resulteert in een toename in de sediment transporten.

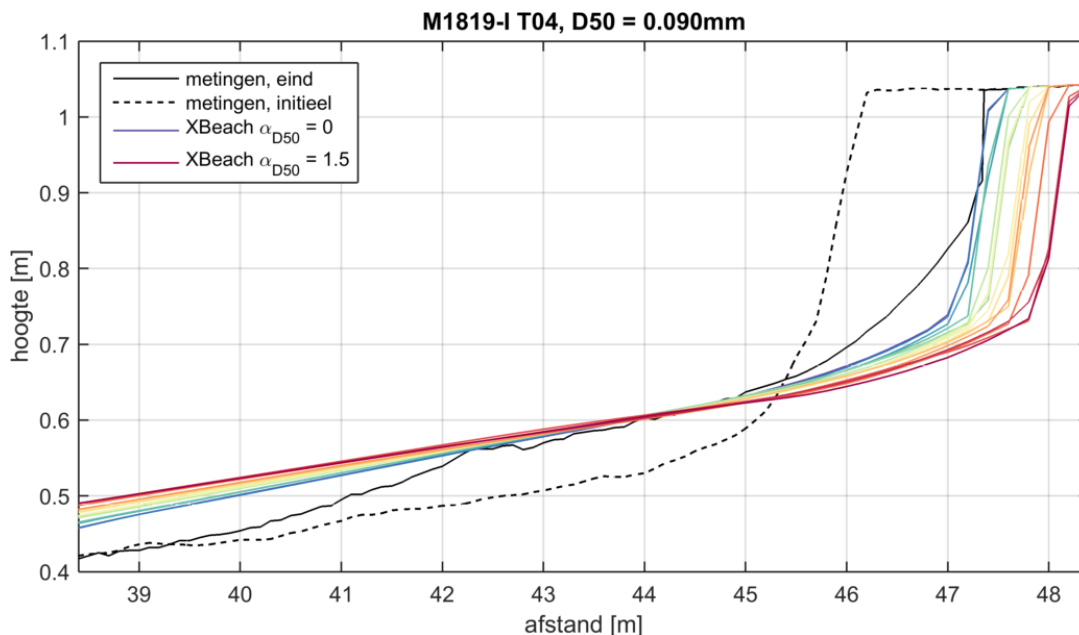
In Steetzel (1993) is test T04 uit het onderzoeksprogramma M1819-I gebruikt voor kalibratie van het transportmodel in DuroSTA. In de proef was de korreldeiameter D_{50} 90 μm . Het gemeten en gemodelleerde profiel kwamen het best overeen bij een α_{D50} van 1.2. Het resulterende profiel is weergegeven in Figuur 2.22.



Figuur 2.22 In DUROSTA berekende profielontwikkeling voor test T04 uit M1819-I met een α_{D50} van 1.2 (Steetzel, 1993)

Dezelfde test T04 van M1819-I is uitgevoerd met de aangepaste versie van XBeach voor een α_{D50} van 0 tot 1.5 in stappen van 0.1. De resulterende profielen zijn weergegeven in Figuur 2.23. Bij een α_{D50} van 0 (geen aanpassingen in het sediment transport) komt het model het

beste overeen met het gemeten profiel. Wanneer de α_{D50} toeneemt, verplaatst het duinprofiel landwaarts en neemt het erosievolume toe. Voor deze proef is er dus geen reden om XBeach aan te passen.



Figuur 2.23 In XBeach berekende profielen voor test T04 van M1819-I met een $\alpha_{D50} = 0$ (blauw) tot $\alpha_{D50} = 1.5$ (rood). Het gemeten initiële en eind profiel zijn weergegeven in zwart.

2.5.2 Afschatting gevoeligheid α_{D50}

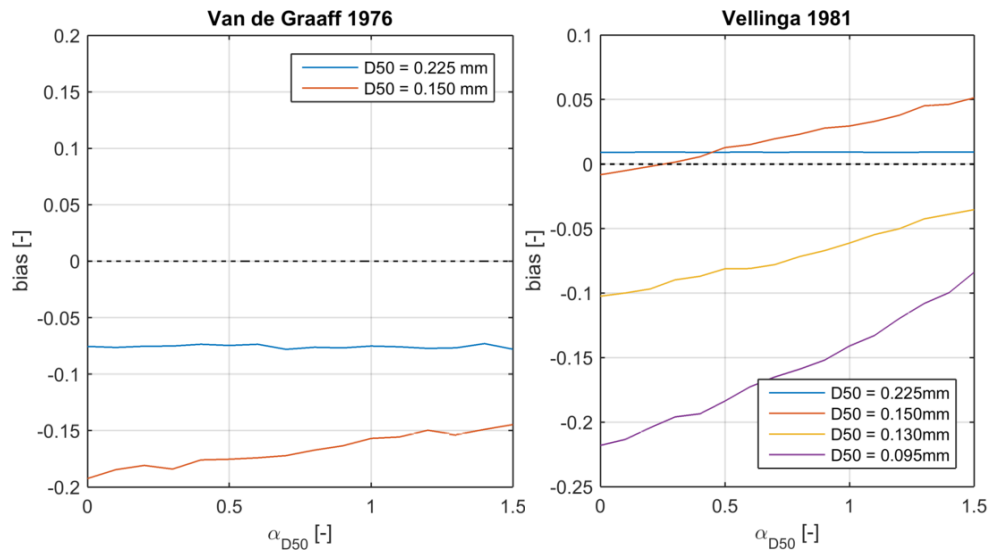
Met de aangepaste versie van XBeach worden de berekeningen van de schaalproeven van Vellinga (1981) en van de Graaff (1976) opnieuw uitgevoerd. Vervolgens worden de D_{50} variatie sommen van de Deltagoot 2006 proeven (Figuur 2.9) uitgevoerd met een α_{D50} van 1.2.

Voor beide schaalproeven wordt α_{D50} gevarieerd van 0 tot 1.5 in stappen van 0.1. De resulterende bias van het erosievolume per α_{D50} variatie wordt weergegeven in Figuur 2.24. Voor zowel de van de Graaf (1976) als Vellinga (1981) sommen is te zien dat bij een D_{50} van 0.225 mm α_{D50} geen invloed heeft op het erosievolume. Dit is volgens verwachting omdat F_D dan gelijk is aan 1, zie vergelijking (0.1), en dus niets veranderd aan de sedimenttransporten.

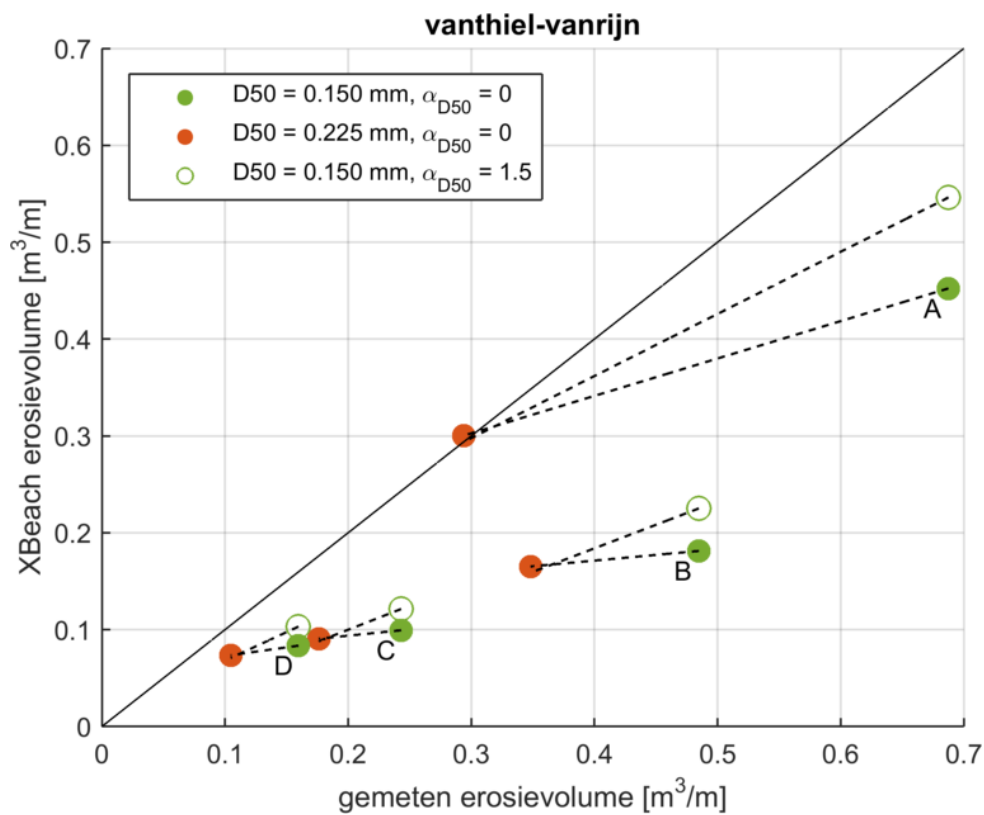
Op basis van Figuur 2.24 is er niet eenduidig een optimale waarde voor α_{D50} in XBeach af te leiden. Voor alle D_{50} -waarden is er een grote spreiding in α_{D50} waarde waarbij de bias het kleinst is. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door de toenemende onderschatting van het erosievolume door XBeach bij kleinere D_{50} in de schaalproeven. Het vermenigvuldigen van het sediment transport met factor F_D is niet voldoende om dit te corrigeren.

In Figuur 2.25 is Figuur 2.19 opnieuw weergegeven, inclusief de resultaten van de sommen met een α_{D50} van 1.5 (open cirkels). Hierin is te zien dat de toevoeging van F_D zorgt voor een verbetering van het berekende erosievolume door XBeach, maar nog niet voldoende is om de metingen te reproduceren. In Figuur 2.26 zijn de gemodelleerde erosievolumes voor α_{D50} van

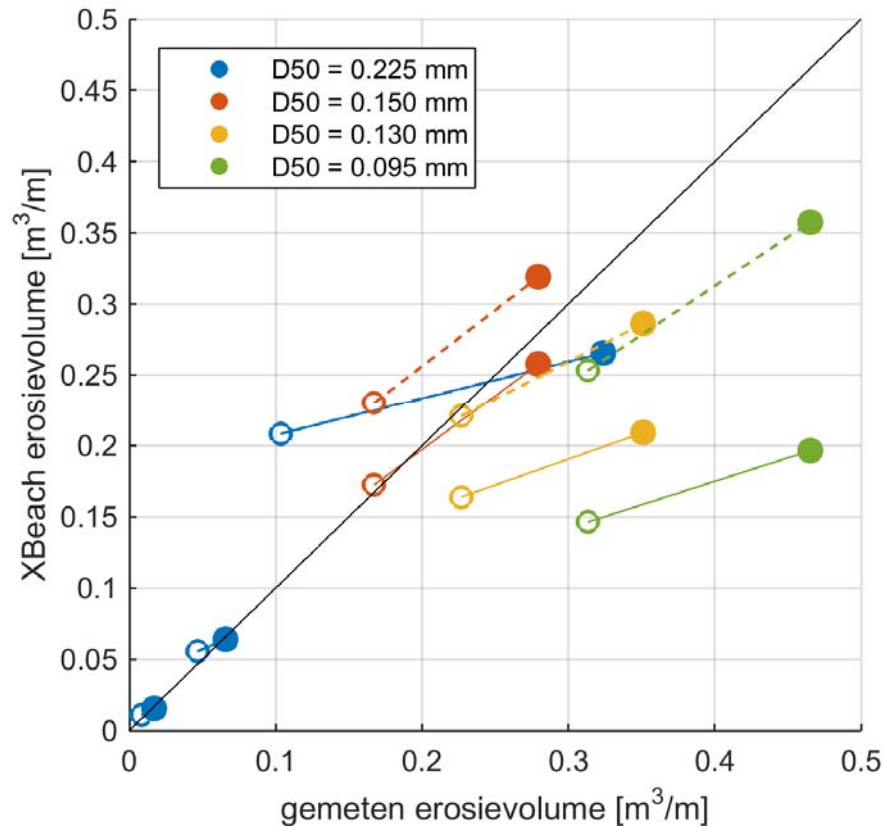
0 (doorgetrokken lijnen) en 1.5 (stippellijnen) te zien. Ook hier wordt het gemodelleerde erosievolume verbeterd, maar is het nog niet voldoende voor de laagste D_{50} waarden.



Figuur 2.24 Bias (gemiddelde van alle sommen met dezelfde D_{50}) van het erosievolume bij variaties in α_{D50} . Linker figuur zijn de van de Graaff (1976) schaalproeven en rechter figuur Vellinga (1981) schaalproeven.



Figuur 2.25 Gemeten en XBeach erosievolumes voor de van de Graaff (1976) schaalproeven. Vier paren (A,B,C en D) met elk een D_{50} van 0.225mm (rode cirkels) en 0.150mm (groen cirkels) zijn gemodelleerd met een α_{D50} van 0 (gevulde cirkels) en α_{D50} van 1.5 (open cirkels).



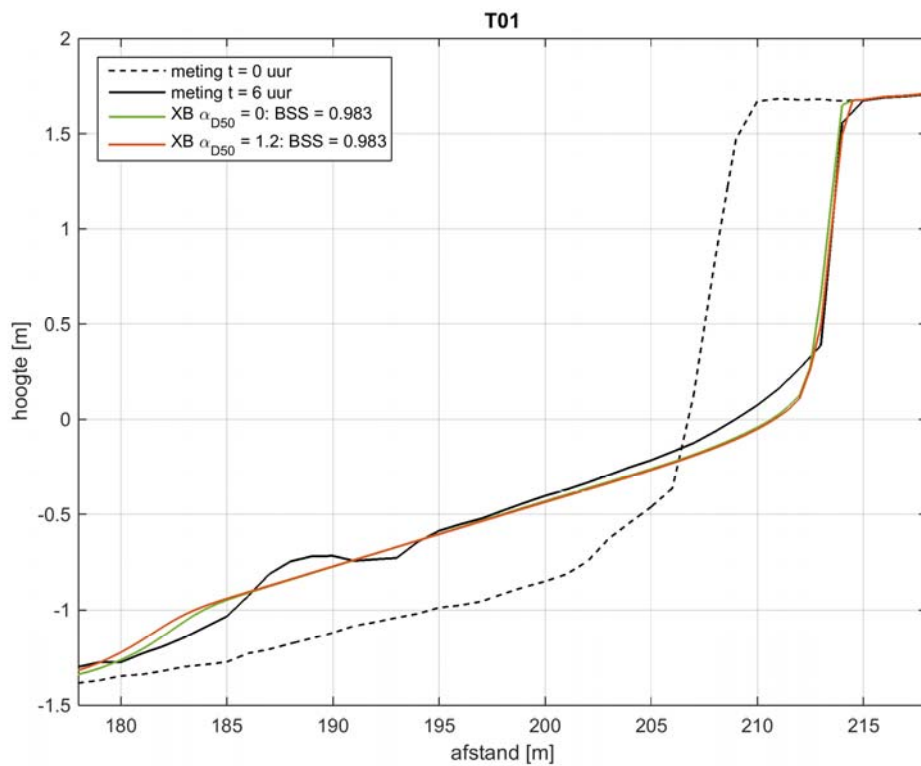
Figuur 2.26 Gemeten en XBeach erosievolumes voor de Vellinga (1981) schaalproeven. Vier korreldiameters D_{50} van 0.225, 0.150, 0.130 en 0.095 mm zijn weergegeven in respectievelijk blauw, rood, geel en groen. De open cirkels staan voor een lage profiel contractie en gevulde cirkels voor een hoge profiel contractie. De doorgetrokken lijn is α_{D50} van 0 en gestippelde lijn α_{D50} van 1.5.

Omdat er geen eenduidige waarde voor α_{D50} gevonden kan worden maar de bias wel verkleind wordt voor waarden groter dan 1, wordt in het vervolg gekozen voor een waarde van 1.2, gelijk aan de waarde gevonden door Steetzel (1993). Dit vereenvoudigt ook de vergelijking van de gevoeligheid van beide modellen.

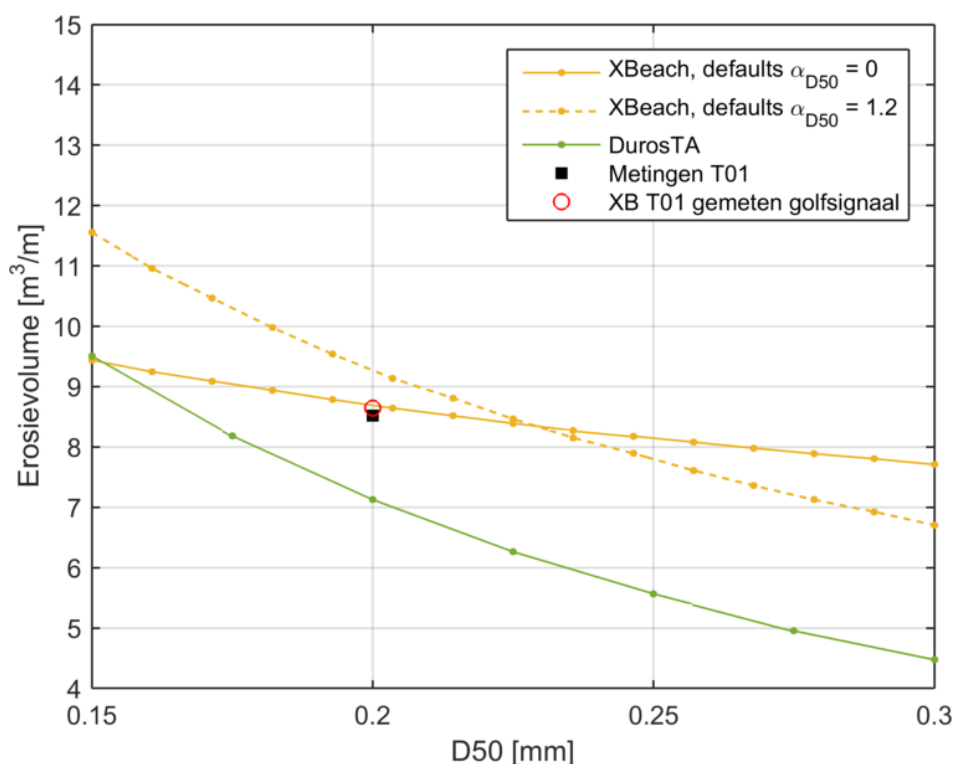
2.5.3 Toepassing op Deltagoot 2006 proeven

De D_{50} variatie sommen van de Deltagoot 2006 proeven (Figuur 2.9) worden nu herhaald met een α_{D50} van 1.2. Het resulterende duinprofiel na 6 uur voor beide α_{D50} is weergegeven in Figuur 2.27, en zijn voor beide α_{D50} nagenoeg gelijk. Een α_{D50} van 1.2 geeft toename van het erosievolume van 0.5 m³/m, door een wat kleinere korreldiameter in de Deltagoot 2006 proeven ($D_{50} = 0.200$ m t.o.v. 0.225 mm).

In Figuur 2.28 is Figuur 2.9 uitgebreid met de erosievolumes bij een α_{D50} van 1.2 voor de D_{50} variatie sommen. Een α_{D50} van 1.2 resulteert in een grotere gevoeligheid van het erosievolume in XBeach voor variaties in de D_{50} , met een helling die nagenoeg gelijk is aan DurosTA. Het toevoegen van factor F_D zorgt dus voor een hogere D_{50} gevoeligheid in XBeach.



Figuur 2.27 Deltagoot 2006 T01 proef gemeten initiële en eind duinprofielen in zwart. Gemodelleerde XBeach eind profielen met α_{D50} van 0 (groen) en α_{D50} van 1.2 (rood).



Figuur 2.28 Het effect van D_{50} variatie op erosievolumes na 6 uur. Gemeten erosievolumes in zwart, gemodelleerde XBeach erosievolumes met gemeten golfsignaal voor T01 in rode cirkels en gemodelleerde DurosTA variatie sommen in groen. Doorgetrokken gele lijn is voor α_{D50} van 0 en gele stippellijn voor α_{D50} van 1.2.

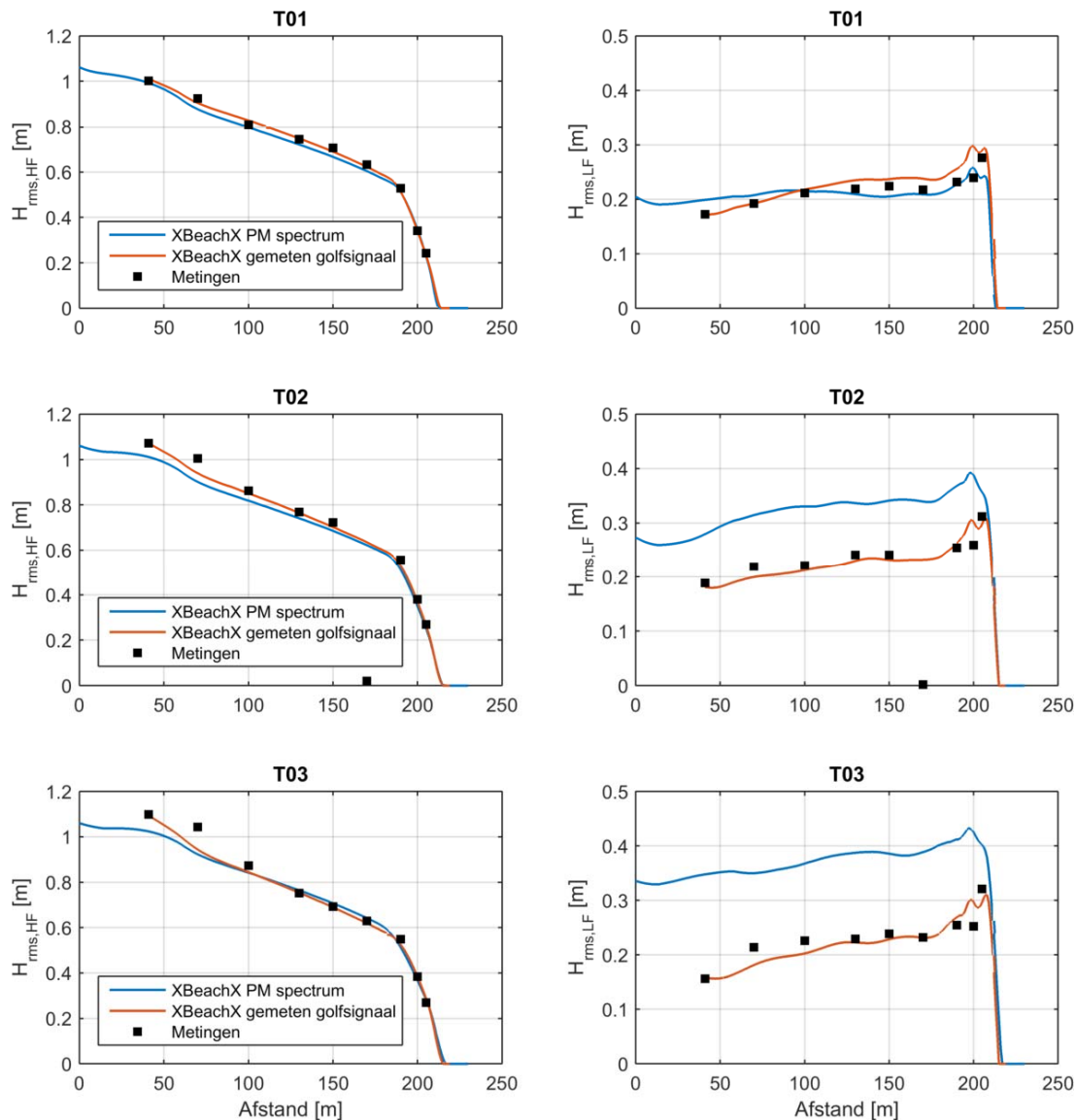
2.6 Effect van langere golfperiode op duinafslag

Uit de Deltagoot 2006 proeven is gebleken dat een toename van de golfperiode van 4.9 naar 7.35 s leidt tot ongeveer 15% meer duinafslag na 6 uur (van Gent et al., 2008). Deze trend wordt met XBeach gereproduceerd als de daadwerkelijk gemeten tijdseries worden gebruikt. Echter, als een Pierson-Moskowitz spectrum wordt gebruikt dan leidt dit tot 75% meer duinafslag bij (Figuur 2.7).

Dit zou tot de conclusie kunnen leiden dat het toepassen van een langer periode in combinatie met het gebruik van een Pierson-Moskowitz spectrum leidt tot een overschatting van de hoeveelheid afslag. In werkelijkheid lijkt het er echter op dat de metingen geen goed beeld geven van de daadwerkelijk 'bedoelde' golfaanval, mogelijk vanwege de beperkte slag van het gebruikte golfschot, en daarmee ook van de hiermee samenhangende golfaanval.

In Figuur 2.29 wordt de korte en lange golfhoogte over het dwarsprofiel weergegeven voor proeven T01, T02 en T03 (met $T_p = 4.9, 6.12$ en 7.35 s respectievelijk). Het korte golfhoogte verloop is nagenoeg identiek voor metingen en XBeach, zowel geforceerd met gemeten golfsignaal als Pierson-Moskowitz spectrum. De lange golf transformatie in XBeach komt goed overeen met de metingen wanneer het gemeten golfsignaal wordt opgelegd. Bij toename van de golfperiode T_p neemt de lange golfhoogte toe in XBeach (met Pierson-Moskowitz spectrum), terwijl deze in de metingen nagenoeg gelijk blijft. De verwachting op basis van de evenwichtstheorie is van Longuet-Higgins and Stewart (1962,1964) dat een

grotere golfperiode leidt tot een toename van de lange golfhoogte. Dit is niet zichtbaar in de metingen. De hypothese is dat dit komt door een beperking in de slag van het golfschot, maar dit moet nader onderzocht worden. Een en ander zou bij direct gebruik van het meetresultaat voor de 7,35 s proef tot een onderschatting van de prototype-erosie kunnen leiden. Bij het gebruik van XBeach of DurosTA (na calibratie om de initiële onderschatting van het erosievolume in de 4,9 s proef te reduceren, zie Figuur 2.7) is dit gevaar kleiner omdat deze modellen een sterkere toename van de erosievolume met de golfperiode laten zien, die beter in lijn is met de theorie.



Figuur 2.29 Korte ($H_{rms,HF}$) en lange ($H_{rms,LF}$) golfhoogte over het dwarsprofiel in de Deltagoot 2006 proeven voor T01, T02 en T03. Metingen (zwart) en XBeach geforceerd met gemeten golfsignaal (rood) en Pierson-Moskowitz spectrum (blauw)

2.7 Conclusies

In dit hoofdstuk is de gevoeligheid van XBeach onderzocht voor variatie van diverse parameters. Deze gevoeligheid is geëvalueerd voor zowel de laboratoriumschaal van de Deltagootproeven als de prototypeschaal, en is vergeleken met de resultaten van het DurosTA en Duros+ model.

De eerste bevinding is dat het gemeten afslagprofiel in de Deltagoot het best wordt benaderd als het XBeach model wordt aangestuurd met de nabij het golfschot gemeten diep water waterstandstijdseries. De profielvorm wordt het best benaderd als gebruik wordt gemaakt van de VanThiel-deVries parameterwaarden. Deze waarden zijn echter specifiek afgeleid op basis van deze proeven. Voor XBeach “default” waarden, die afgeleid zijn op basis van een groot aantal andere laboratorium en velddata, verslechtert de kwaliteit niet noemenswaardig als gekeken wordt naar de Brier Skill Score en de positie van de afslaglijn. Voor deze settings is de “knik” in het profiel iets lager, iets wat het DurosTA-model ook laat zien. Vanwege de verwachting van een betere voorspellende waarde van de default settings, kiezen we ervoor om voor de gevoeligheidsanalyse deze laatste waarden te gebruiken.

Een analyse van het gedrag van DurosTA en Xbeach op laboratorium schaal en prototypeschaal laat zien dat het erosievolume relatief groter is op prototypeschaal dan op laboratoriumschaal voor zowel Xbeach met default settings als DurosTA. Dit kan deels verklaard worden doordat voor deze analyse de laboratoriumprofielvorm geometrisch is opgeschaald (met een factor 6) maar dat de zanddiameter constant is gehouden, omdat de D50 zowel in het laboratorium is gebruikt als in het veld een gangbare waarde is. Dit betekent dat de zanddiameter op prototype schaal relatief kleiner is, waarvoor DurosTA expliciet gevoeliger is en Xbeach in zijn huidige vorm minder.

De gevoeligheid van Xbeach en DurosTA zijn onderzocht voor een variatie van de hydraulische randvoorwaarden: waterstand, golfhoogte, golfperiode, en offshore waterdiepte.

Voor de waterstand laat Xbeach op laboratoriumschaal dezelfde trend zien als DurosTA, namelijk dat de erosie toeneemt met grotere waterstand. Op prototype schaal geeft Xbeach ook een positieve trend maar deze is veel vlakker. Deze vlakke trend kan verklaard worden uit de profielvorm. Deze is in Xbeach hoger en iets steiler wat leidt tot een hogere depositiezone en een reductie van de golfaanval en dus de erosie. De oorzaak hiervan kan liggen aan de D50 (on)gevoeligheid en aan het gebruik van niet-dimensieloze parameters, die niet mee schalen. Deze verandering in de helling van de trendlijnen tussen laboratorium en veldschaal geeft aanleiding tot het bepalen van een robuuste set dimensieloze parameters op basis van zowel veld- als laboratoriumproeven.

Voor de golfhoogte laten DurosTA en Xbeach dezelfde positieve trend zien op beide schalen. Dit is ook het geval voor beide modellen voor de golfperiode. Echter, de laboratoriummetingen laten een veel gematigder trend zien. Dit verschil blijkt te komen door de toegepaste type randvoorwaarde: als aangestuurd wordt met de gemeten tijdseries in plaats van de Pierson-Moskowitz spectra worden de metingen wel gereproduceerd. Het verschil tussen deze twee typen zit in de grootte van de lange golf op de modelrand. Deze varieert nauwelijks als functie van de periode in geval van de tijdseries, terwijl dat theoretisch wel verwacht zou worden en in feite ook de bedoeling was. Deze theorie ligt ten grondslag aan de randvoorwaardenmodule in Xbeach die deze trend dan ook laat zien.

Voor de variatie van de offshore waterdiepte laten de resultaten zien dat de afslag niet noemenswaardig verandert als de waterdiepte aan de rand van het model groter wordt. Dit is een positief resultaat want het betekent dat in het schaalmodel de rand van het model niet in te diep water lag. Als de rand nog ondieper wordt gelegd neemt de afslag toe. De reden hiervan is dat de randvoorwaardeafhandeling in XBeach niet geldig is in te ondiep water waar de zogenaamde groepssnelheid van de golfgroepen de ondiepwatersnelheid benadert. Ook dit is een verwacht resultaat en geeft aan dat de rand van het schaalmodel niet in te ondiep water lag.

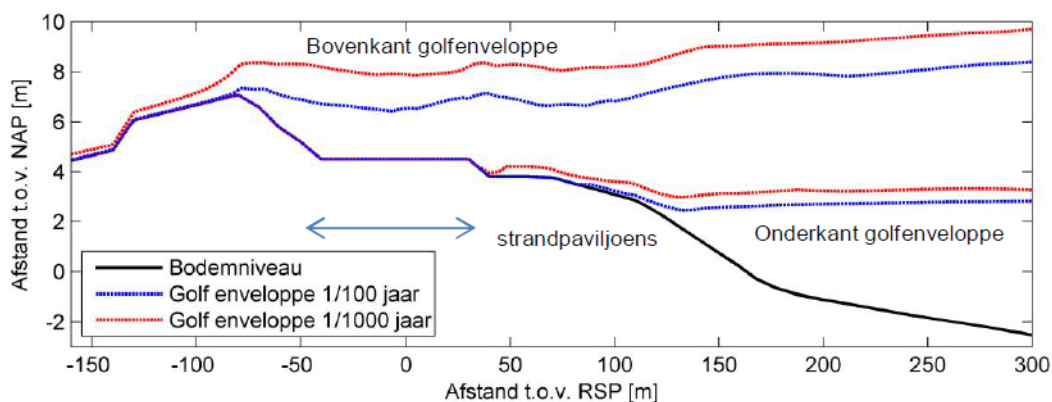
Als laatste is de korreldiameter gevarieerd, waarvoor XBeach nauwelijks gevoelig is. Het DurosTA model kent deze gevoeligheid wel via een ingebouwde factor F_d . Deze factor is ook in Xbeach geïmplementeerd. Na afregeling van een vrije parameter op beschikbare kleine schaalproeven met een variërende korreldiameter laat ook Xbeach dezelfde trend zien als DurosTA. Deze implementatie is niet bedoeld als een “quick-fix” om het model het juiste gedrag te laten vertonen maar geeft aanleiding tot nader onderzoek naar de kleine gevoeligheid voor de korreldiameter in de sedimenttransportformules.

3 Taak 2: Analyse fysische betekenis golf enveloppe in XBeach 1D

3.1 Inleiding

Ten behoeve van het toetsen van jaarrondexploitatie van strandpaviljoens bij Scheveningen zijn golf- en afslagberekeningen uitgevoerd door Deltares (2013). Hierin zijn berekeningen met XBeach in surfbeat mode (XBeach-SB) uitgevoerd om de waterstanden en golven ter plaatse van de paviljoens te bepalen. Om een voorspelling te doen van de maximale waterstand en golfoploop in XBeach-SB, is de zogenaamde “golfenveloppe” bepaald (Figuur 3.1). In de figuur is te zien dat voor 1/100 jaar omstandigheden (blauwe stippelijijn behorende bij een waterstand van NAP+3,5 m) er al water over de op NAP+7 m gelegen kruin van het achterliggende profiel (de waterkering) lijkt te lopen, iets wat niet overeenkomt met Arcadis (2013). Deze kwestie is in Deltares (2013) niet verder onderzocht.

In de huidige taak wordt wel verder ingegaan wat de fysische betekenis van deze enveloppe is en waarom deze omhullende en de maximale waterstand eventueel zo groot is.



Figuur 3.1 Golfenveloppe voor de kansen van 1/100 en 1/1.000 per jaar met XBeach. Uit Deltares (2013).

3.2 Methode

Om de resultaten van de studie over Jaarrond Paviljoens Scheveningen (Deltares, 2013) te onderzoeken, wordt eerst een toelichting gegeven over de betekenis van de golfenveloppe. Deze wordt onder meer vergeleken met de rms-golfhoogte. De XBeach berekeningen uit Deltares (2013) zijn opnieuw uitgevoerd met de toenmalige versie van XBeach (v2780). Vervolgens worden de sommen met de meest recente versie van XBeach uitgevoerd en worden er enkele verbeteringen gemaakt met betrekking tot de richtingsverspreiding in de golfvoorwaarden en de diepteligging van de offshore-rand. Deze sommen worden allen uitgevoerd met de surfbeat module van XBeach (XBeach-SB).

Om verder te onderzoeken wat de betekenis van de golfenveloppe is, zijn er enkele variaties op de 1D XBeach-SB sommen uitgevoerd:

- 1D berekeningen van het Scheveningen ontwerp-profiel worden met de niet-hydrostatische module van XBeach (XBeach-NH) uitgevoerd. XBeach-NH simuleert

- zowel de lange en korte golven wat een betrouwbaarder beeld geeft van de golfloop en –overslag.
- 2D berekeningen met een langs uniforme kust van het Scheveningen ontwerp-profiel laat het effect van richtings-spreiding in de golfenergie op de uiteindelijke golfloop en maximale waterstanden bij de surfzone zien. Deze zijn uitgevoerd met zowel XBeach-SB als XBeach-NH.
 - Berekeningen met het opgeschaalde Deltagoot 2006 profiel (van Gent et al. 2008) om het effect van de berm met strandpaviljoens in het ontwerp profiel te onderzoeken. Hierbij zijn ook de effecten van 1D/2D en XBeach-SB/XBeach-NH op de resultaten onderzocht.

De hydraulische randvoorwaarden die zijn toegepast in de berekeningen zijn afkomstig uit Deltares (2008, H5016), zie Tabel 3.1. De berekeningen zijn uitgevoerd met een stormduur van 5 uur met een constante waterstand. Voor de golf-forcering is een JONSWAP spectrum opgelegd op basis van de golfhoogte en –periode in Tabel 3.1. Het initiële bodemprofiel is gebaseerd op het ontwerp-profiel zoals gebruikt in Deltares (2013), waarbij de bermhoogte (en de strandpaviljoens) op NAP+4,5 m ligt. De berekeningen worden uitgevoerd zonder sedimenttransport en morfologische veranderingen, en voor alle model parameters worden de XBeachX default-waarden gebruikt.

Tabel 3.1 Hydraulische randvoorwaarden

Kans [1/jaar]	Rekenpeil h [m+NAP]	Golfhoogte H _s [m]	Golfperiode T _p [s]
1/100	3.5	6.45	11.53
1/1000	4.2	7.15	12.36

3.3 Resultaten

3.3.1 Betekenis golfenveloppe

In XBeach-SB worden golven op de schaal van golfgroepen berekend (de zogenaamde “lange golven”). Van de korte golven wordt alleen de tijds- en ruimtevariatie van de golfhoogte berekend, genaamd de “golfomhullende” (strikt genomen wordt de golfactie berekend waaruit de golfhoogte afgeleid wordt). De fase van de korte golven wordt niet uitgerekend, waardoor de bijdrage van de korte golven op de golfloop niet expliciet is. Echter, tijdens stormen spelen de korte golven een belangrijke rol in de (maximale) golfloop. Om een voorspelling te doen van de maximale waterstand in XBeach-SB is de daarin zogenaamde “golfenveloppe” berekend in Deltares (2013). Deze golfenveloppe wordt in dit rapport *waterstandsomhullende* genoemd, en is gedefinieerd als het laagste en het hoogste niveau van het wateroppervlak tijdens een berekening, inclusief het effect van de lange en korte golven volgens:

$$\text{waterstandsomhullende}(x) = z_{s_{\min}}(x) - 0.5 \cdot H_{\text{rms,max}}(x) \ \& \ z_{s_{\max}}(x) + 0.5 \cdot H_{\text{rms,max}}(x) \quad (0.2)$$

waarin x de locatie langs het dwarsprofiel. $z_{s_{\max}}$ is de maximale waterstand veroorzaakt door de stormopzet, de golf-geïnduceerde opzet en de lange golven, en $H_{\text{rms,max}}$ is de maximale rms-golfhoogte berekend uit de golfenergie binnen de golfomhullende (golfgroep). Per locatie is dit dus een optelling van twee maxima die niet noodzakelijkerwijs op hetzelfde moment plaatsvinden. De waterstandsomhullende is dus niet hetzelfde als de golfomhullende (die alleen de korte golven betreft).

Op deze manier is de waterstandsomhullende dus indicatief voor de meest extreme en minst gunstige moment tijdens de storm, waarbij de maximale waterstand samenvalt met de maximale golfhoogte op elke locatie langs het dwarsprofiel gedurende de storm. Onder de onderkant van de waterstandsomhullende is het gedurende de storm altijd nat, boven de bovenkant van de waterstandsomhullende is het gedurende de storm altijd droog. Deze waterstandsomhullende moet niet geïnterpreteerd worden als de de significante of rms golfhoogte, waarover later meer.

Merk op dat de individuele golven in XBeach-NH worden opgelost in het model en dat de berekende maximale waterstand hierdoor ook de bijdrage van de korte golven bevat.

3.3.2 1D berekeningen met het Scheveningen ontwerpprofiel

De 1D berekeningen van het Scheveningen ontwerpprofiel zijn eerst met XBeach-SB uitgevoerd, met de XBeach versie en modelinstellingen zoals in Deltares (2013). De resulterende waterstandsomhullende (Figuur 3.2a) laat voor zowel de 1/100 als 1/1000 storm zien dat er golfoverslag over de dijk lijkt op te treden. Dit komt overeen met de resultaten in Deltares (2013).

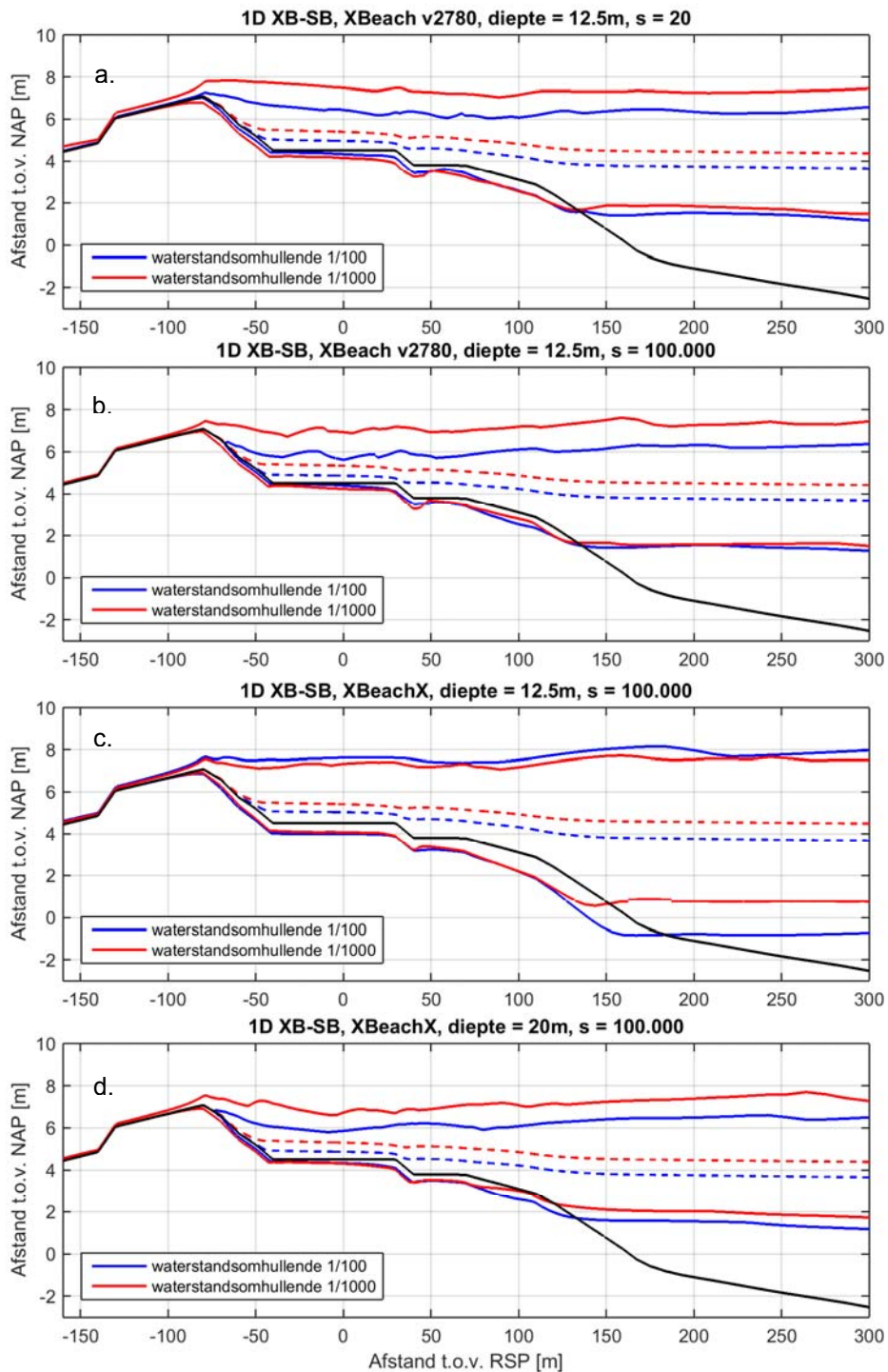
Effect richtingsspreiding

In deze originele som is de richtingsspreiding (s) in de golfrandvoorwaarde op een waarde van 20 gezet. Dit is een gangbare waarde voor richtingsspreiding in een windzee, maar deze randvoorwaarde is niet consistent met de 1D raai benadering. De randvoorwaarde op de zeerand moet aansluiten bij de vergelijkingen die in het domein worden opgelost, anders treden er verstoringen op. Deze uiten zich als stoorgolven die door het domein heen lopen. In een 1D som propageren alle golfcomponenten in dezelfde (kustwaartse) richting, waardoor een maximale energieoverdracht tussen de componenten plaatsvindt. Hierdoor worden via drie-golfwisselwerkingen energie overgedragen naar hoog-frequentere componenten en laag-frequentere componenten, de zogenaamde infragravity of IG golven. In een 1D benadering zijn deze IG golven dan ook hoger dan in 2D. De randvoorwaarde moet hierop aansluiten en gespecificeerd worden als een 1D randvoorwaarde met inputwaarden die overeenkomen met loodrecht inkomende golven. Dit wordt bewerkstelligd door “geen richtingsspreiding” op te leggen (een s waarde van oneindig, en in de praktijk van een zeer grote waarde van 100.000). Wanneer geen richtingsspreiding wordt toegepast op de 1D som voor het Scheveningen ontwerpprofiel, resulteert dit in een afname van de waterstandsomhullende bij de berm met paviljoens en verwachte golfoverslag bij de dijk (Figuur 3.2b). Dit is een opmerkelijk resultaat omdat in het geval van geen richtingsspreiding de lange golfhoogte op de modelrand groter is en juist een vergroting van de maximale waterstand verwacht zou worden. Echter, door de consistente modellering worden stoorgolven sterk verminderd, waardoor de maximale waterstand verkleind wordt. Dit aspect van consistente modellering is in deze studie niet verder onderzocht maar is wel een punt van aandacht in het vervolg. In het vervolg wordt daarom uitgegaan van een situatie zonder richtingsspreiding (met een S -waarden van 100.000)

Effect waterdiepte golfaansturing

De volgende stap is om dezelfde som uit te voeren met de laatste versie van XBeach, XBeachX. Dit geeft een sterke toename van de waterstandsomhullende voor de 1/100 storm (Figuur 3.2c). Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door enkele tussentijdse modelaanpassingen om de golfrandvoorwaarden te verbeteren. Echter, de sommen zijn uitgevoerd met een te kleine bodemhoogte van NAP-12,5 m. De offshore-rand moet op voldoende diep water te liggen om niet-fysische grootte van de lange golven te vermijden, zie ook Figuur 2.8. Wanneer de offshore rand wordt verlengd naar een regulier toegepaste diepte van NAP-20 m, wat ook de diepte is waarop de golfrandvoorwaarde is bepaald (Deltares,

2008), neemt de lange golfopwekking aan de offshore rand af en resulteert in een kleinere waterstandsomhullende, Figuur 3.2d. Dit benadrukt nog eens het belang van de keuze van deze startpositie. Er zal nu naar verwachting alleen bij de 1/1.000 jaar storm golfoverslag over de dijk plaatsvinden. Deze modelgevoeligheid voor de diepteligging van de offshore-rand komt overeen met de bevindingen in Taak 1 en het resultaat sluit nu ook beter aan bij de inschatting van het effect.



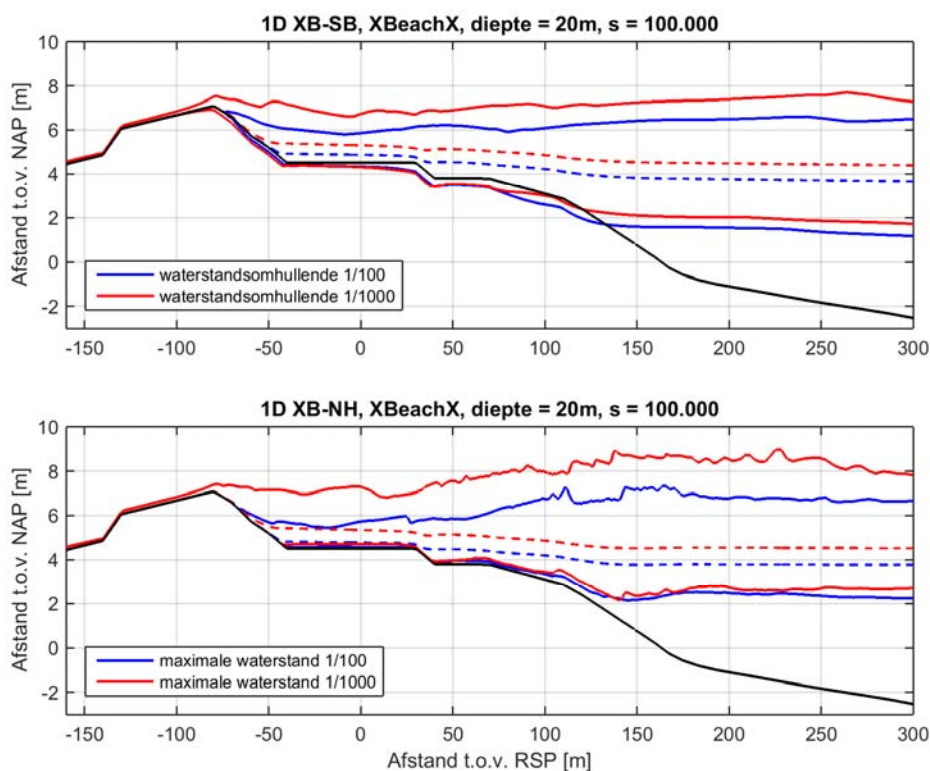
Figuur 3.2 Bovenkant en onderkant van de waterstandsomhullende voor de kansen van 1/100 (blauw) en 1/1.000 (rood) per jaar, bodemniveau (zwart) en de gemiddelde waterstand tijdens de storm (stippellijn). De locatie van de strandpaviljoens is op het op NAP+4,5 m gelegen banket tussen -50 en 25 m t.o.v. RSP. In deze berekeningen is de onderkant van de waterstandsomhullende in XB-SB (nog) niet gecorrigeerd voor het lokaal aanwezige bodemniveau.

Gebruik niet-hydrostatische versie XBeach-model

Om de betekenis van de waterstandsomhullende beter te duiden zijn vervolgens berekeningen uitgevoerd met XBeach-NH. De waterstandsomhullende uit XBeach-SB wordt hier vergeleken met de maximale waterstand berekend in de XBeach-NH sommen., zie Figuur 3.3. Merk op dat XBeach-NH de daadwerkelijke maximale totale waterstand uitrekent, terwijl in XBeach-SB de maximale waterstand zonder korte golven wordt gecombineerd met de maximale rms kortegolfhoogte. Deze uitwerking zal in principe een nauwkeuriger resultaat opleveren. De maximale waterstand op de berm met paviljoens is in XBeach-NH lager dan de maximale waterstand op basis van de waterstandsomhullende in XBeach-SB. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door een lagere tijdsgemiddelde waterstand op de berm met paviljoens in XBeach-NH ten opzichte van XBeach-SB. Met XBeach-NH wordt daarom een lagere maximale golfloop voorspeld voor de 1/100 jaar storm en minder golfoverslag verwacht voor de 1/1000 jaar storm. Ook dit laatste draagt weer bij aan het vertrouwen de uitkomst van deze modellering. De XBeach-SB-uitwerkingen gaven per definitie een conservatief beeld van de waterstandsomhullende.

Effect van het banket

Het effect van de berm met paviljoens (banket) op het gedrag van de lange golven is vergelijkbaar met wat op kustlijnen met (koraal) rif platformen wordt waargenomen. Daar zorgt golfopzet voor een toename in de gemiddelde waterstand op het rif platform (Vetter et al., 2010) en een toename van de lange golfhoogte (Pomeroy et al., 2012). Bij de validatie van XBeach aan de hand van laboratoriumproeven met een rifplatform (Lashley et al., 2018) wordt met XBeach-SB de golfopzet op het platform iets overschat ten opzichte van de metingen. Met XBeach-NH komen de gemeten en berekende waterstanden op het rif platform wel goed overeen. Hetzelfde is te zien in de sommen met XBeach voor het Scheveningen ontwerpprofiel op de berm met de paviljoens. Ook hier voorspelt XBeach-SB een iets hogere golfopzet op de berm ten opzichte van XBeach-NH.

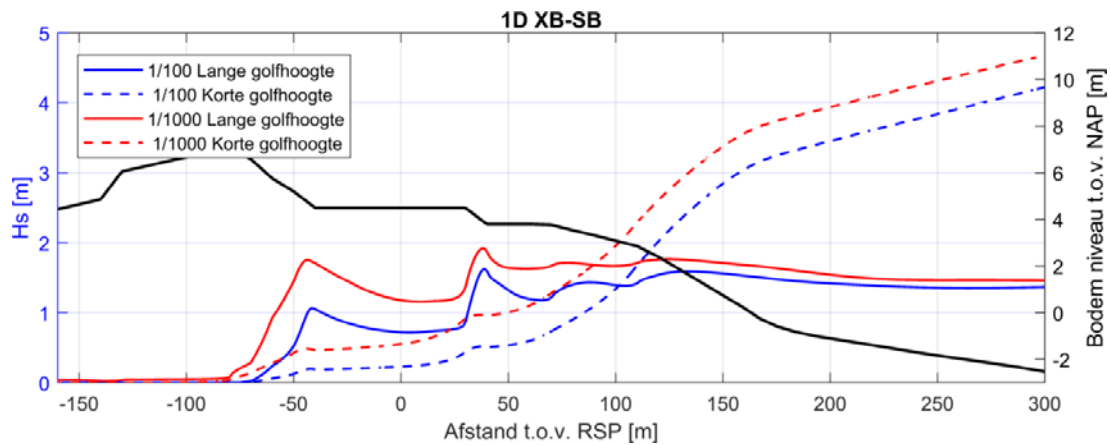


Figuur 3.3 Bovenkant en onderkant van de waterstandsomhullende (XBeach-SB) en maximale waterstand (XBeach-NH) voor de kansen van 1/100 (blauw) en 1/1.000 (rood) per jaar, bodemniveau (zwart) en de gemiddelde waterstand tijdens de storm (stippellijn). De locatie van de strandpaviljoens is tussen -50 en 25 m t.o.v. RSP. In deze berekeningen is de onderkant van de waterstandsomhullende in XB-SB (nog) niet gecorrigeerd voor het lokaal aanwezige bodemniveau.

3.3.3 Berekenende lange golfhoogten op het Scheveningen ontwerpprofiel

De waterstandsomhullende wordt berekend door optelling van de maximale waterstand en maximale (korte) golfhoogte op elke lokatie, zodat de lange golven onderdeel zijn van de maximale waterstand. Dit blijkt een vertekend beeld te geven van de lange golfhoogten ten opzichte van in de literatuur gerapporteerde waarden.

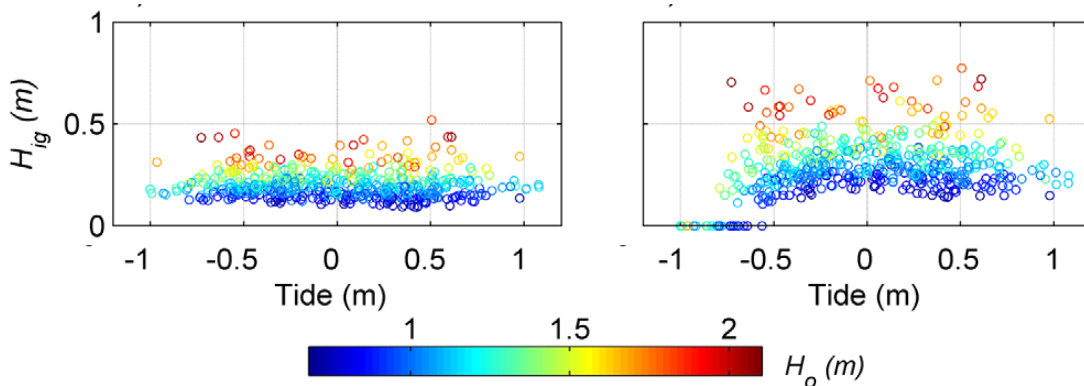
In plaats van de waterstandsomhullende zijn in Figuur 3.4 zowel de korte en totale lange golfhoogte (H_s) weergegeven voor de XB-SB berekeningen uit Figuur 3.3. De korte golfhoogte neemt af richting het duin, waarbij de berm met paviljoens zorgt voor extra korte golfdissipatie door het breken van golven op de berm-rand. In de figuur is de totale lange golfhoogte geplot, die bestaat uit zowel de inkomende als de gereflecteerde component. Deze neemt bij de berm-rand wat af, maar wordt op de berm richting de duinvoet weer groter tot 1,0 m (1/100) en 1,7 m (1/100). Deze variatie wordt veroorzaakt door reflecties van de lange golven op de bermrand en op de kustlijn en door energieoverdracht van de korte naar de lange golven door radiationstress-gradienten, die op de ondiepe berm groot zijn. De lange golven spelen dus een belangrijke rol op ondiepe voorlanden zoals de paviljoen berm.



Figuur 3.4 Golfhoogte (H_s) over het dwarsprofiel (zwarte lijn) voor de korte (stippellijn) en lange golven (doorgetrokken lijn) voor de kansen van 1/100 (blauw) en 1/1.000 (rood) jaar.

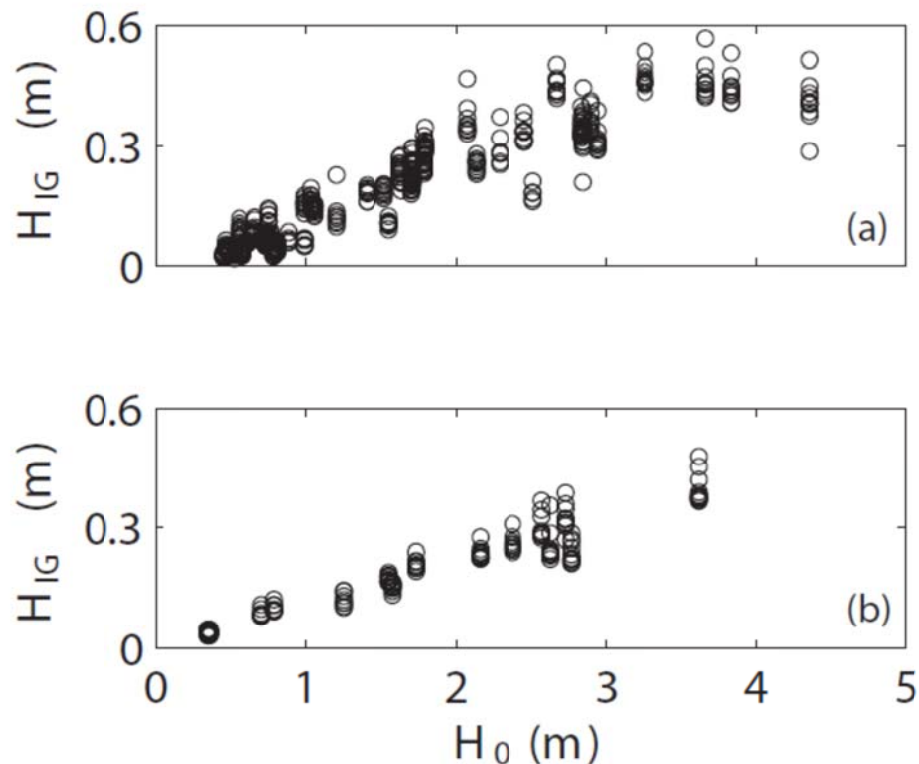
Controle relatieve grootte lange golfhoogte

Voor het scheveningen ontwerpprofiel vinden we een relatie tussen de lange golfhoogte en offshore korte golfhoogte met een ratio van $H_{s,IG}/H_{s,off} = 1,0/6,45 = 0,16$ voor de 1/100 per jaar conditie en $H_{s,IG}/H_{s,off} = 1,7/7,15 = 0,24$ voor de 1/1.000 per jaar conditie. Deze verhoudingen zijn vergelijkbaar met gemeten lange golfhoogten op een smal rif platform bij Funafuti Atoll, Tuvalu door Beetham et al. (2016). Hier is een ratio gemeten van $H_{IG}/H_0 = 0,4/1,8 = 0,20$ op het rif platform en $H_{IG}/H_0 = 0,6/1,8 = 0,30$ dicht bij de kust (Figuur 3.5). Merk op dat dit gemeten condities zijn die kleiner zijn in absolute zin dan de Nederlandse normomstandigheden. Het gaat hier echter om de verhouding.



Figuur 3.5 Lange golfhoogte (H_{IG}) ten opzichte van het getij voor verschillende offshore golfhoogten (H_0). Links zijn de observaties op het rif platform en rechts de observaties bij de kustlijn (uit Beetham et al., 2016). De offshore H_{IG} is niet gegeven in de paper, maar is over het algemeen nihil offshore in geval van rifkusten. Reproductie van figuur van Beetham et al. (2016)

Een ander voorbeeld betreft metingen door De Bakker (Ph.D. Thesis, 2016) op Ameland en Egmond. De verhouding H_{IG}/H_0 kan een waarde van $0,45/3 = 0,15$ bereiken tijdens gemeten stormen, die in absolute zin kleiner zijn dan de maatgevende stormen.



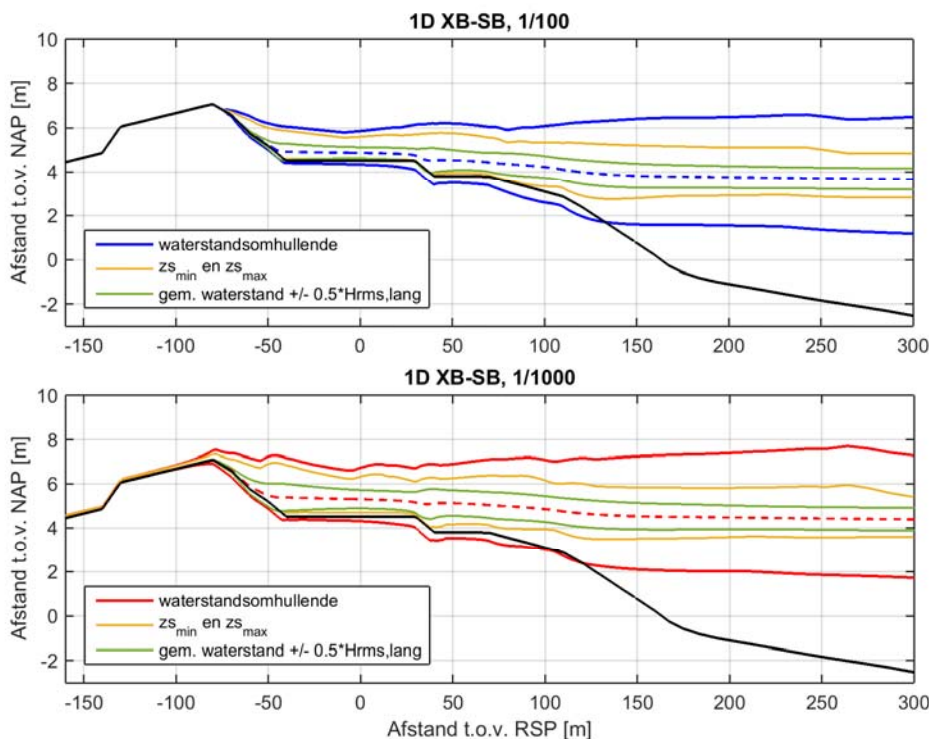
Figuur 3.6 Gemeten significante lange golfhoogte (H_{IG}) ten opzichte van de offshore totale golfhoogte (H_0) op Ameland (boven) en Egmond (onder). Reproductie van Figuur 2.2 van De Bakker (2016)

Als laatste worden twee voorbeelden van IG golven gemeten op het strand van Truc Vert (Frankrijk) en Perranporth (UK) gegeven. Op het strand van Truc Vert (Ruessink, 2010) werden nearshore IG golven met een hoogte van maximaal 1,52 meter gemeten in 3 meter waterdiepte bij offshore golfhoogten van meer dan 6 meter significant (met andere woorden: in de buurt van de maatgevende golfhoogten bij Scheveningen). De proportionaliteitscoëfficiënt was $H_{IG}/H_0 = 0,17$. Op Perranporth (Inch et al, 2017) werd een coëfficiënt van 0,18 gevonden.

Samenvattend blijkt uit deze korte literatuurschouw dat grote IG golfhoogten (nearshore) ook daadwerkelijk gemeten zijn en 20% (of meer) van de offshore golfhoogte kunnen bedragen. De door XBeach berekende golfhoogten zijn derhalve niet ondenkbaar, alhoewel een gerichte verificatie voor de Nederlandse situatie natuurlijk wenselijk blijft.

Weergave waterstandsomhullende

In Figuur 3.7 zijn de drie manieren van plotten van de waterstand opnieuw weergegeven: de waterstandsomhullende (maximale waarde van korte en lange golven; blauwe en rode lijnen), de omhullende van alleen de lange golven (gele lijn), en de gemiddelde waterstand +/- de helft van de rms-waarde van de lange golfhoogten (groene lijn). Voor zowel de 1/100 als 1/1.000 per jaar storm is te zien dat de bijdrage van de korte golven klein is op de berm met paviljoens, omdat de rode en blauwe lijnen dicht bij de gele lijnen liggen. De rms golfhoogten (groene lijnen) zijn op de berm gemiddeld 0,7m (1/100) en 1,0m (1/1.000) lager dan de maximale waterstand (gele lijnen). Dit laat zien dat de weergave van de omhullende een vertekend beeld geeft ten opzichte van de rms waarde die berekend wordt.



Figuur 3.7 Waterstandsomhullende voor de kansen van 1/100 (blauw in panel boven) en 1/1.000 (rood in panel onder) per jaar, bodemniveau (zwart), de gemiddelde waterstand tijdens de storm (stippellijn), maximale en minimale waterstand in XB-SB (geel) en lange golf omhullende (groen).

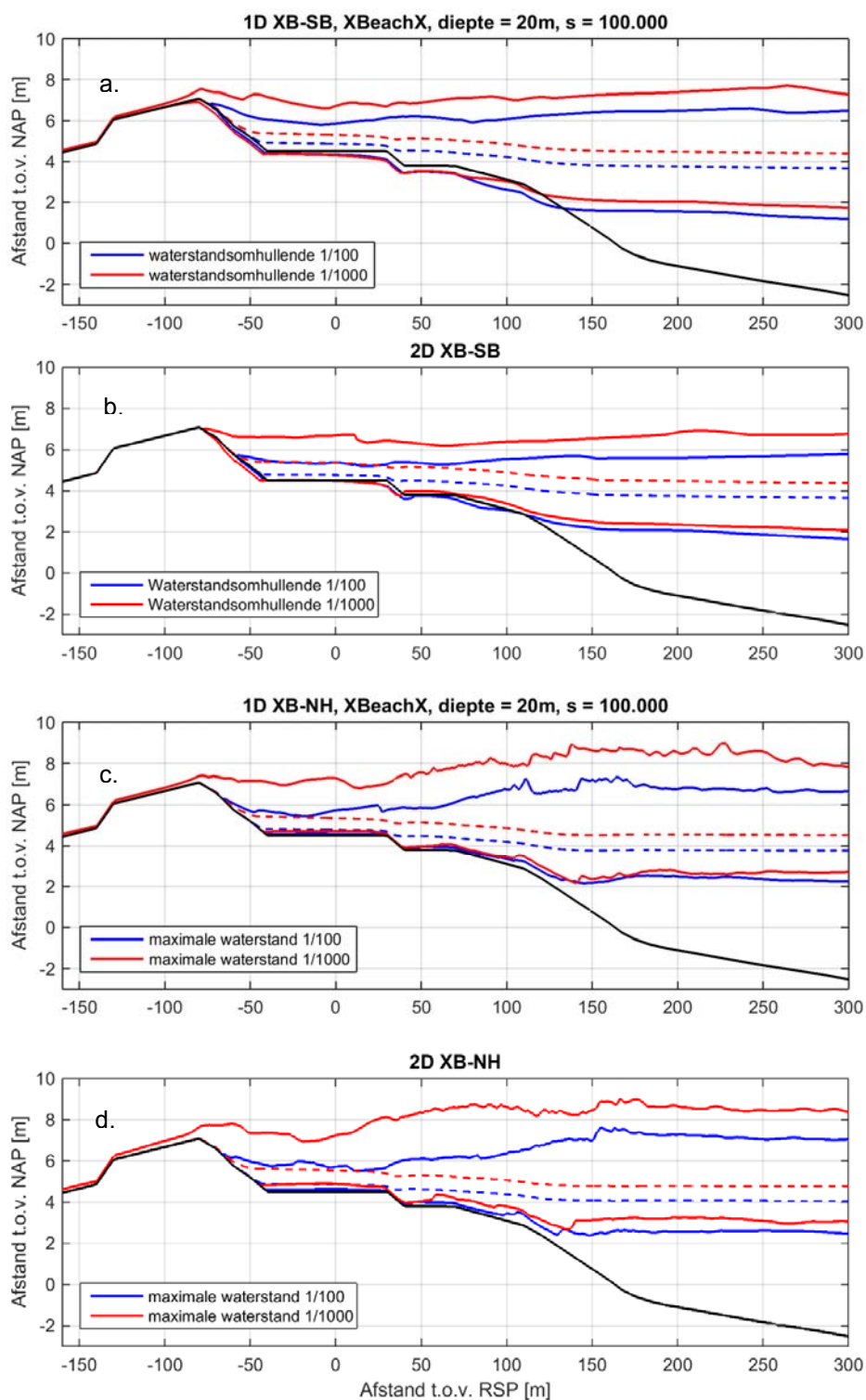
3.3.4 2D berekeningen met het Scheveningen ontwerpprofiel

Het 1D model van het Scheveningen ontwerpprofiel is vervolgens uitgebreid naar een 2D model met een kustlangs uniforme bodem. In het 2D model worden golfvariaties in kustlangse richting meegenomen door een richtings spreiding van 20 op te leggen met 9 golfbins. In Figuur 3.8 wordt de resulterende waterstandsomhullende in XBeach-SB en maximale waterstand in XBeach-NH weergegeven voor zowel de 1D als de 2D sommen.

XBeach-SB geeft een substantieel kleinere waterstandsomhullende in de 2D sommen t.o.v. de in 1D berekende waterstandsomhullende (Figuur 3.8a en b). In de 2D XBeach-SB sommen wordt voor zowel de 1/100 en 1/1.000 jaar storm geen golfoverloop verwacht. Het toepassen van een richtings spreiding in de berekening van de golven zorgt dus voor een afname in de maximale waterstanden en golfoploop in XBeach-SB. Deze afname wordt veroorzaakt door het feit dat – in tegenstelling tot de 1D benadering – golfcomponenten in een 2D som in verschillende richtingen kunnen lopen en daardoor minder interactie hebben. Dit resulteert in minder energieoverdracht naar de lange golfcomponenten en dus een kleinere infragravity golfhoogte. Net als in de 1D som moeten de randvoorwaarden aansluiten op de veldvergelijkingen, wat betekent dat de specificatie van een randvoorwaarde met richtings spreiding hier consistent is.

Hetzelfde effect (afname maximale waarden bij toepassing van richtings spreiding) van 2D t.o.v. 1D berekeningen is echter niet terug te zien in de maximale waterstanden in XBeach-

NH (Figuur 3.8c en d). In Xbeach-NH zijn de resultaten nagenoeg gelijk en wordt er golfoverslag verwacht bij de 1/1.000 per jaar storm. Dit uitblijven van de afname van de maximale waterstanden en oploop in XBeach-NH is opmerkelijk maar is in deze studie niet verder onderzocht.

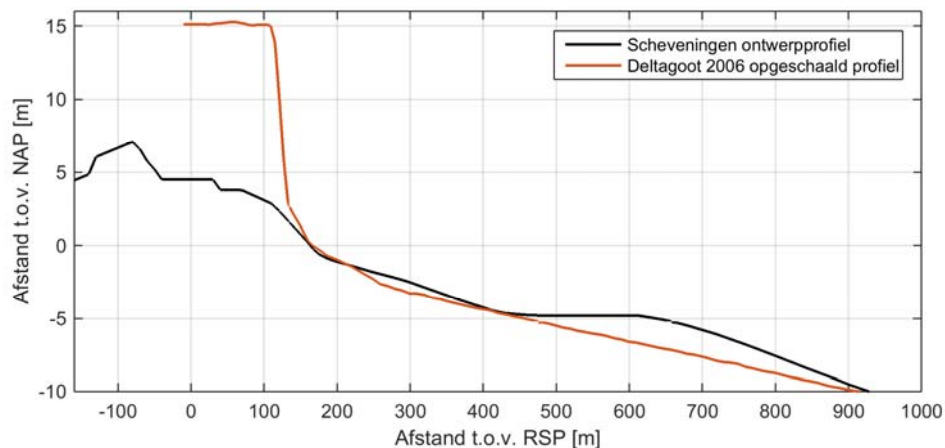


Figuur 3.8 Bovenkant en onderkant van de waterstandsomhullende in XBeach-SB (a. en b.) en maximale waterstand XBeach-NH (c. en d.) voor de kansen van 1/100 (blauw) en 1/1.000 (rood) per jaar, bodemniveau (zwart) en de gemiddelde waterstand tijdens de storm (stippellijn).

3.3.5 Effect van de berm/banket (met paviljoens) in het ontwerpprofiel

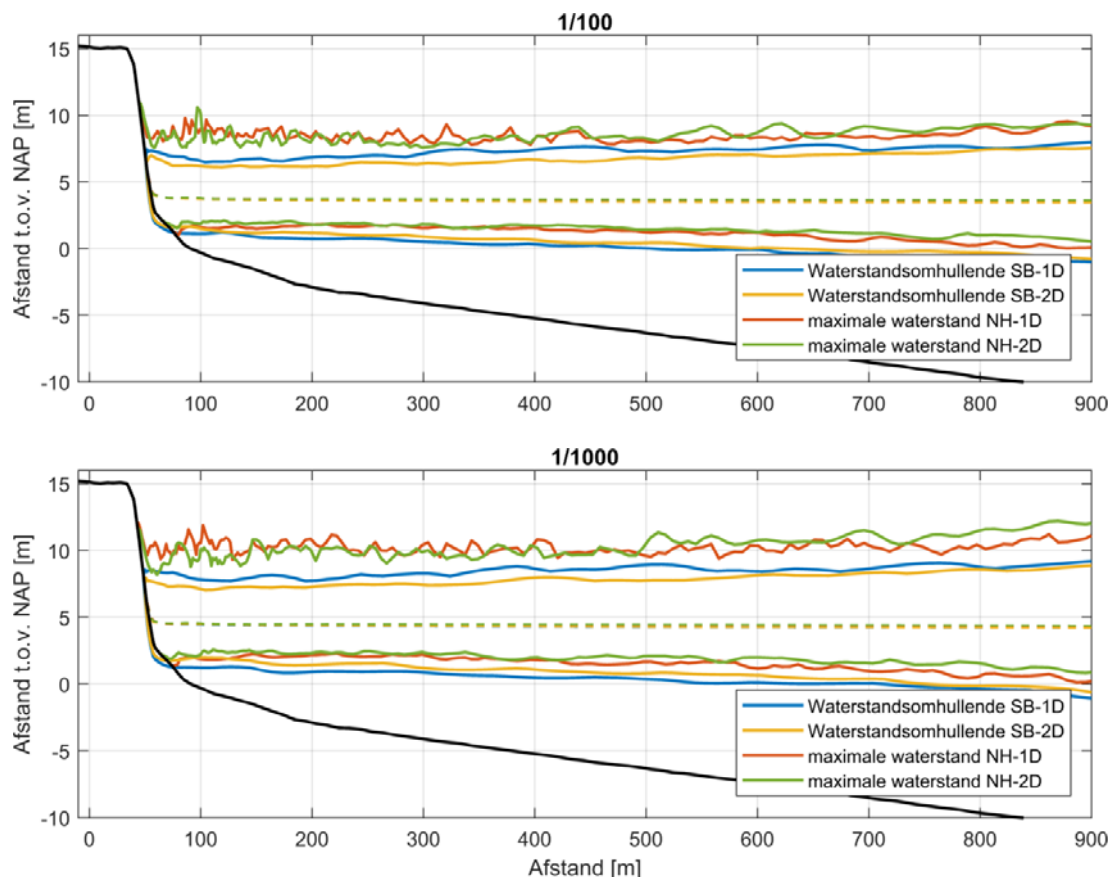
De resultaten in paragraaf 3.3.2 en 3.3.3 laten zien dat de berm met paviljoens in het ontwerpprofiel zorgt voor golfopzet en een toename in de gemiddelde waterstand op de berm. Om het effect van de berm op de waterstanden weer te geven zijn er berekeningen uitgevoerd op het opgeschaalde Deltagoot 2006 profiel (paragraaf 2.3), wat vergelijkbaar is met het referentieprofiel van Delfland. Voor deze sommen zijn dezelfde hydraulische randvoorwaarden en modelinstellingen gebruikt.

In Figuur 3.9 zijn het Scheveningen ontwerpprofiel en Deltagoot 2006 samen weergegeven en kruisen ze elkaar op het NAP+0 m niveau. Het Deltagoot 2006 profiel heeft een simpel profiel met een steil duinfront en het Scheveningen ontwerpprofiel heeft meer variaties langs het profiel.



Figuur 3.9 Bodemniveau voor het scheveningen ontwerpprofiel (zwart) en het opgeschaalde Deltagoot 2006 profiel (rood), allen ten opzichte van NAP.

De resultaten voor de berekeningen met het Deltagoot 2006 profiel zijn weergegeven in Figuur 3.10. Voor alle sommen is te zien dat de gemiddelde waterstand voor XBeach-SB en XBeach-NH en voor beide herhalingstijden nagenoeg constant is over het dwarsprofiel en dus niet de extra golfopzet heeft zoals bij het Scheveningen ontwerpprofiel. Verder zijn de resultaten consistent met de bevindingen op het Scheveningen ontwerpprofiel; met 2D XBeach-SB wordt de waterstandsomhullende kleiner ten opzichte van 1D XBeach-SB en de maximale waterstanden in XBeach-NH 1D en 2D zijn nagenoeg gelijk.



Figuur 3.10 De bovenkant en onderkant van de waterstandsomhullende in XBeach-SB (1D en 2D) en maximale waterstand XBeach-NH (1D en 2D) voor de kansen van 1/100 (boven) en 1/1.000 (onder) per jaar. De gemiddelde waterstand tijdens de storm (stippellijn) en het bodemniveau (zwart) zijn in beide figuren ter referentie weergegeven.

3.4 Overslagvolume

Het doel van de studie voor de jaarrond strandpaviljoens bij Scheveningen (Deltares, 2013) was om de hydrodynamische condities ter plaatse de strandpaviljoens te bepalen. Daarom is er toen gekozen voor het weergeven van de model resultaten met de waterstandsomhullende, een combinatie van de maximale waterstand en maximale golfhoogte, zonder aandacht voor de condities ter plaatse van en op de waterkering.

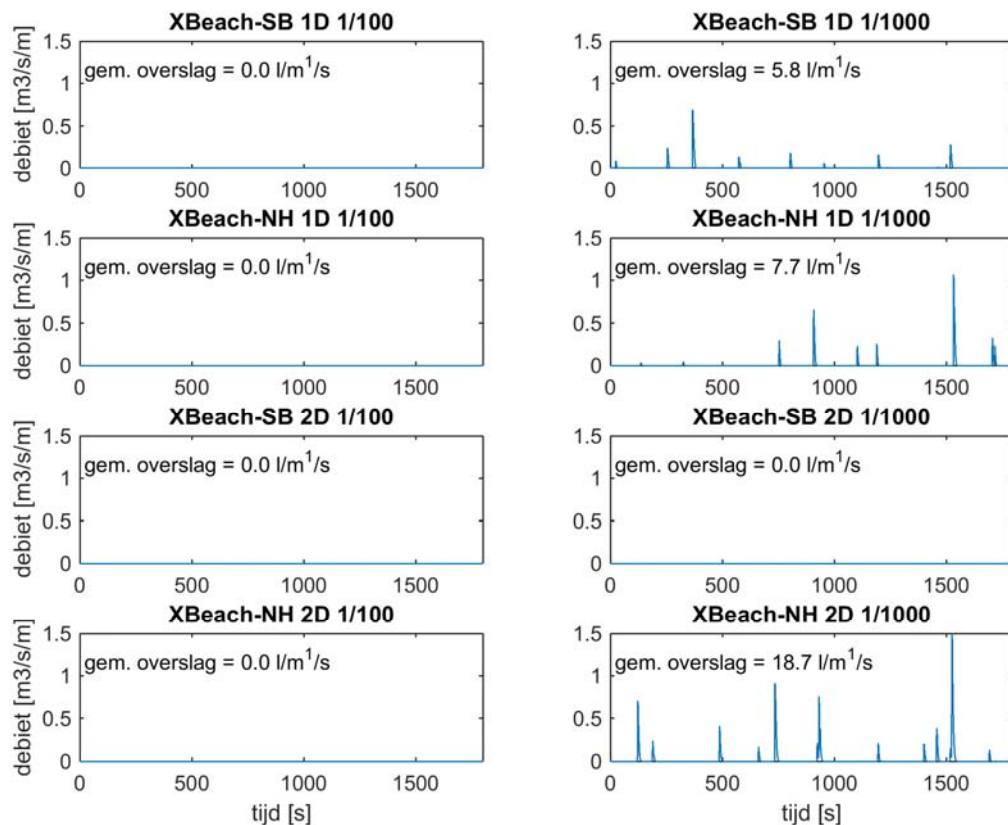
Het doel van de huidige studie is om te onderzoeken wat de betekenis is van de in Deltares (2013) bepaalde “golfenveloppe”. Het maximum van de “golfenveloppe” was hoger dan de kruin van de waterkering en leek golfoverslag te suggereren. Het is echter beter om het overslagdebiet direct uit de modelresultaten te bepalen.

Hierbij worden uitvoergegevens opgevraagd uit het model op een punt net landwaarts van de kruin van de dijk (op -80 m t.o.v. RSP). Deze positie bevindt zich dus op het dijktafud.

Hieruit volgt het overslagdebiet in m³/s/m gedurende de simulatie. Het (gemiddelde) overslagdebiet voor de sommen met het Scheveningen ontwerpprofiel zijn weergegeven in Figuur 3.11. Hieruit volgt dat voor de 1/100 per jaar storm geen overslag wordt voorspeld voor alle combinaties van modellen; XBeach-SB/XBeach-NH en 1D/2D.

Bij de 1/1.000 jaar per storm wordt er wel overslag verwacht, behalve in het 2D XBeach-SB model. Opvallend is dat de resultaten voor XBeach-NH in 1D en 2D nagenoeg gelijk zijn wanneer er naar de maximale waterstanden wordt gekeken (Figuur 3.8c en d), maar uit het overslagdebiet blijkt dat met 2D er meer golfoverslag plaatsvindt (5.8 l/m¹/s in NH-1D ten opzichte van 18.7 l/m¹/s in NH-2D in Figuur 3.11). Let wel dat in XBeach-SB alleen de lange golven bijdragen aan de overslag terwijl in XBeach-NH ook de korte golven bijdragen.

Anders dan de in 2013 gerapporteerde resultaten (met een boven de kruin reikende golfenveloppe) volgt uit deze verkenning dat er naar verwachting geen sprake is van golfoverslag over de dijk onder de 1/100 per jaar omstandigheden. Dit sluit aan bij het vermoeden dat deze eerste resultaten (Deltares, 2013) zeer conservatief waren ingestoken (Arcadis, 2013).



Figuur 3.11 Overslagdebiet bij het Scheveningen ontwerpprofiel voor 1/100 en 1/1000 jaar storm, voorspeld door XBeach-SB en XBeach-NH in een 1D en 2D model.

3.5 Conclusies

In Deltares (2013) is de golfenveloppe voor XBeach-SB gedefinieerd als het laagste en het hoogste niveau van het wateroppervlak tijdens een berekening als een optelling van de maximale golfamplitude en de minimale/maximale waterstand gedurende een bepaalde periode (bijv. 1 uur). Deze enveloppe is gebruikt als indicatie voor de hydraulische condities ter plaatse van het strandpaviljoen, zonder nadere aandacht voor eventuele overslag over de waterkering. Ter plaatse van de kering leek er visueel sprake van overslag, ook voor 1/100 per jaar omstandigheden, wat nadere interpretatie noodzakelijk maakte.

Ten eerste zijn de gebruikte modelinstellingen en -schematisaties onderzocht. Hieruit is gebleken dat voor XBeach-SB voor de 1/100 per jaar omstandigheid de waterstandsomhullende lager wordt als de offshore diepte op de juiste plaats (NAP -20 m) wordt gekozen en er een voor de 1D raai modus consistente randvoorwaarde van “geen richtingsverspreiding” wordt toegepast. Als het model uitgebreid wordt naar 2D, zijn richtingsgespreide golven wel mogelijk, treedt er minder overdracht naar de lange golven op, hetgeen resulteert in een verdere reductie⁶ van de waterstandsomhullende. Deze resultaten sluiten beter aan bij het beeld van het al dan niet daadwerkelijk optreden van overslag over de waterkering

Ten tweede is XBeach-NH, een andere model modus waarin de korte golven expliciet beschreven worden toegepast. In 1D modus, wordt voor de 1/100 jaar omstandigheid de maximale waterstand verder verlaagd als XBeach-NH wordt gebruikt waarin expliciet de maximale waterstand (zonder optelling van twee maxima zoals in XBeach-SB noodzakelijk is) berekend kan worden. Vooral de gemiddelde waterstand ter plaatse van de berm waar de strandpaviljoens is lager als XBeach-NH wordt gebruikt. Dit gedrag is consistent met modelresultaten voor XBeach-SB en XBeach-NH over een koraalrifplateau dat een soortgelijke geometrie heeft. Voor de 1/1.000 per jaar omstandigheid leidt het toepassen van XBeach-NH niet tot een noemenswaardige verlaging van de maximale waterstand.

Ten derde is de betekenis van de waterstandsomhullende nader beschouwd. Deze is niet hetzelfde als de rms- of significante golfhoogte die over het algemeen lager is. De berekende significante lange golfhoogten bij het duin komen overeen met gemeten waarden en gemeten verhoudingen ten opzichte van de offshore golfhoogte van ongeveer 20% zoals gemeten op koraalriffen (die een vergelijkbaar bermprofiel hebben), Noordzeestranden, een Atlantisch Frans en Engels strand met hoge golfcondities. De door Xbeach berekende waarden zijn daarom aannemelijk maar zouden in het vervolg nader vergeleken moeten worden met gemeten data.

Een berekening van de overslag leert dat in geen van de gevallen (Xbeach SB/NH en 1D of 2D berekeningen) er overslag plaatsvindt in de 1/100 per jaar omstandigheid. In de extremere 1/1.000 situatie treedt die wel op in alle combinaties behalve in de Xbeach-SB in 2D modus. Dit laatste komt omdat in dat geval de lange golven dan richtingsgespreid zijn en er geen korte golven meegenomen worden in de berekening.

Dat de verschillen tussen de modi grotendeels veroorzaakt wordt door de specifieke geometrie van het profiel met een berm ter plaatse van de strandpaviljoens, blijkt als het opgeschaalde referentieprofiel wordt beschouwd. In dit geval zijn geen grote verschillen waarneembaar tussen XBeach-SB in 1D en 2D modus en XBeach-NH in 1D en 2D modus.

In vervolgonderzoek zou aandacht kunnen worden gegeven aan een analyse van het uitblijven van het reducerende effect van golfrichtingsspreiding als XBeach-NH wordt gebruikt. Daarnaast verdient het effect dat flauwe vooroevers en bermen (paviljoenbanketten) hebben op de golf-geïnduceerde opzet, opwekking van lange golven en de golfoploop aandacht. Wereldwijd is er nog veel velddata voorhanden waarvoor XBeach niet gevalideerd is.

⁶ Het inconsistent toepassen van 2D randvoorwaarden op een 1D (raai) profiel gaf juist een grotere waterstandsomhullende.

In het kader van het POV-onderzoek 'Effectiviteit voorlanden HR' komt deze kwestie ook aan bod en worden voorstellen geformuleerd voor WBI-onderzoek naar met name de lange golfopwekking (Arcadis, Deltares, HKV, 2017, 2018) in relatie tot golfoverslag bij dijken. Hier is dus sprake van een relevant raakvlak tussen twee (in praktijk vaak enigszins gescheiden) werkvelden.

4 Taak 3: Verkenning effect van duinafslag op golfoverslag

4.1 Inleiding

Voor het beoordelen en ontwerpen van dijk-in-duin oplossingen wordt op dit moment gebruik gemaakt van een hybride simulatie methode, waarbij zowel duinafslag als golfoverslag wordt beschouwd. Hierbij wordt DurosTA gebruikt om de duinafslag en hydrodynamische condities bij de teen van de dijk te bepalen, waarna PC-Overslag gebruikt wordt om (op basis van deze hydrodynamische condities) de golfoverslag over de dijk te bepalen. In de gebruikte aanpak wordt daarbij het zandvolume van de duin zo gedimensioneerd dat de maximale overslag over de dijk beneden een bepaalde kritische waarde (veelal 1 l/s/m) blijft. Hoewel er officieel vastgestelde richtlijnen bestaan voor het uitvoeren van dergelijke hybride simulatie methoden bij het ontwerp en toetsen van dijk-in-duin oplossingen, kan de bepaling van overslaggebieden gevoelig zijn voor modelkeuzes met betrekking tot de koppeling tussen DurosTA en PC-Overslag, in het bijzonder het bepalen van de ondiepwater golfcondities, en de bepaling van de referentielocatie voor de teen van de dijk in een morfodynamische simulatie.

Het bepalen van duinerosie en overslagdebiet kan ook volledig uitgevoerd worden met XBeach (surf-beat, in geval van vrij lage vrijboord; of niet-hydrostatisch, in geval van een hoger vrijboord). Uit eerder onderzoek (Roelvink et al., 2017) blijkt dat XBeach niet-hydrostatisch (XBNH) het overslagdebiet over keringen in de CLASH-database redelijk goed kan voorspellen (met een onderschatting voor kleine debieten).

Om inzicht te krijgen in de toepasbaarheid van DurosTA in combinatie met PC-Overslag (D-PCO), XBeach surf-beat (XBSB) en XBNH als ontwerp en toetsmodel voor dijk-in-duin oplossingen is het nodig om de verschillen en gevoeligheden van deze modellen in kaart te brengen. In dit onderzoek worden deze onderwerpen onderzocht aan de hand van een fictief dijk-in-duin ontwerp met een vrij lage kruin (lage vrijboord). Paragraaf 4.2 beschrijft de aanpak van deze studie. Vervolgens wordt in paragraaf 4.3 verschillen aangegeven tussen een aanpak met D-PCO, XBSB en XBNH, en in paragraaf 4.4 door middel van gevoeligheids simulaties de oorzaak van de verschillen onderzocht. Conclusies worden in paragraaf 4.5 beschreven.

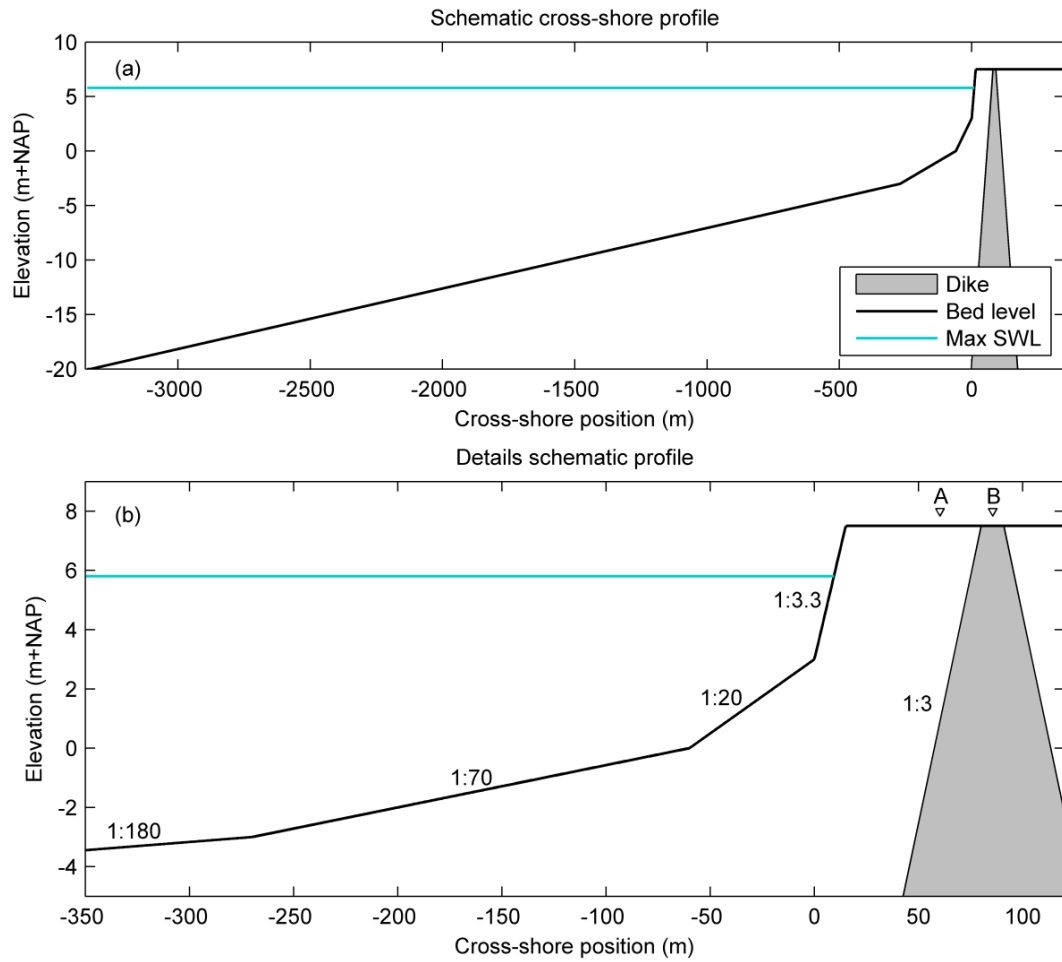
4.2 Methode

De simulaties met DurosTA, PC-Overslag, XBSB en XBNH worden uitgevoerd met een schematisch dijk-in-duin ontwerp (Figuur 4.1). In dit ontwerp heeft de dijk een hellingshoek van 1:3 en een kruinhoogte van NAP + 7,5 m (Figuur 4.1b). Voor de dijk ligt een zandige duin met een breedte van ongeveer 65 m (afstand kruin dijk–duin), een gelijke kruinhoogte als de dijk (NAP + 7,5 m) en een helling van 1:3,3. De zandige duin gaat in zeewaartse richting over in een schematisch referentieprofiel voor de Hollandse kust met een intragetijde strandprofiel (helling 1:20–1:70) en een offshore helling van 1:180 tot een diepte van NAP - 20 m.

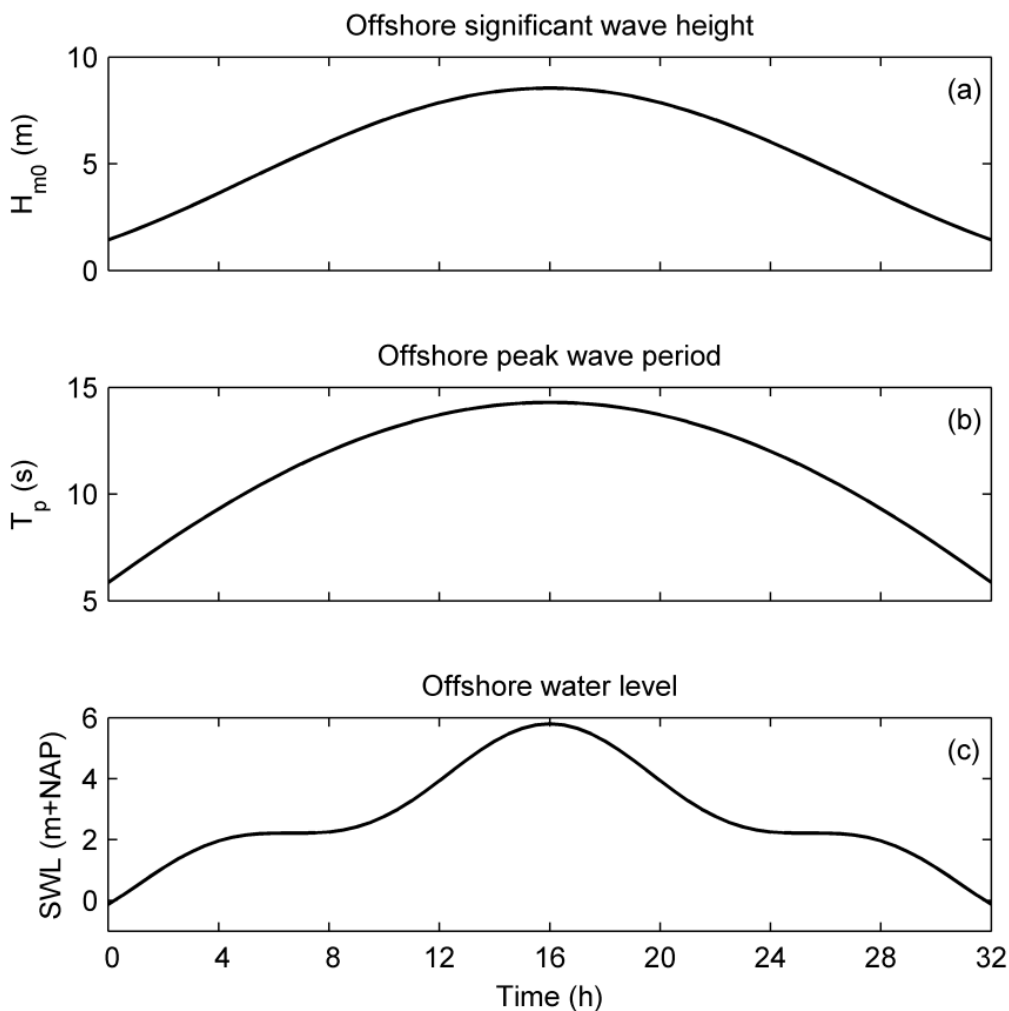
In de modelsimulaties wordt het schematisch dijk-in-duinprofiel belast met ontwerp stormcondities voor de Hollandse kust (Figuur 4.2). De duur van het ontwerpstorm is 32 uur, waarbij de maximale significante golfhoogte op diep water 8,55 m is, en de maximale waterstand (still water level; SWL) op diep water NAP + 5,8 m is (Tabel 4.1). Tijdens de piek van de storm is de vrijboord van de kruin van de dijk op basis van de SWL 1,7 m, ongeveer 20% van de offshore significante golfhoogte.

Voor deze studie is het schematisch dijk-in-duinprofiel gesimuleerd in DurosTA, XBSB en XBNH. Hierbij is in DurosTA gebruik gemaakt van een numerieke rekenrooster met een resolutie variërend tussen 50 m in diep water tot 2 m bij de duin. Voor XBSB en XBNH is gebruik gemaakt van gelijke rekenroosters (waarbij de rekenrooster voor XBNH maatgevend is), met een resolutie variërend tussen 1,24 m in diep water tot 0,5 m bij de duin. De dijk is in alle modellen als niet-erodeerbaar object opgenomen. Om consistentie met de voorgaande studies in dit rapport te hanteren zijn in de XBeach en DurosTA modellen standaardinstellingen voor hydrodynamische en morfologische processen gebruikt (zie ook Hoofdstuk 2 en 3), in plaats van gekalibreerde instellingen voor de Hollandse kust (WTI-instellingen; Deltares, 2015). Om de condities met lage piek golfperioden aan het begin en einde van de storm (Figuur 4.2) op diep water goed te kunnen simuleren is hierbij voor XBNH één uitzondering gemaakt ten opzichte van de standaardinstellingen. In de XBNH sommen is hiervoor gebruik gemaakt van het quasi-tweelagen model (parameter $nonhq3d = 1$; Deltares, 2018). Dit optioneel model verbetert de numerieke dispersierelatie op diep water, maar heeft weinig invloed op de propagatie van de primaire golven op ondiep water, golfoploop en golfoverslag.

In alle modelsimulaties worden de tijdsvariërende hydrodynamische condities (waterstand, golfhoogte, golfperiode) ter plaatse van de teen van de dijk in uitvoerpunt A (Figuur 4.2b) opgeslagen voor gebruik in het PC-Overslag model. De locatie van uitvoerpunt A is bepaald op gelijkwaardige wijze als in een ontwerpstudie voor het dijk-in-duin concept voor Katwijk aan Zee (e.g., Arcadis, 2012). De locatie is in de huidige studie 15 m zeewaarts van de doorsnijding van de maximale SWL en het dijkprofiel geplaatst, en komt overeen met de locatie van de overgang tussen golfbreken op het zandige voorland en de dijk tijdens de piek van de storm. In de XBSB en XBNH simulaties worden daarnaast tijdseries van overslag over de kruin van de dijk op ter plaatse van uitvoerpunt B (Figuur 4.2b) opgeslagen, ter vergelijking met de door PC-Overslag berekende waarden.



Figuur 4.1 Dwarsprofiel schematisch dijk-in-duin ontwerp: (a) volledig profiel; (b) detail dijk-in-duin met initiële hellingshoeken en uitvoerpunten A en B.



Figuur 4.2 Verloop hydraulische randvoorwaarden in de tijd: (a) diep water significante golfhoogte; (b) diep water piek golfperiode; (c) waterstand op diep water (getij en windopzet)

Tabel 4.1 Overzicht hydraulische randvoorwaarden

Hydraulische parameters	Randvoorwaarden
Significante golfhoogte	1.43–8.55 m
Piekperiode	5.86–14.3 s
Waterstand	NAP-0.12 m – NAP+5.80 m

Om het verschil in het berekend overslagdebiet te bepalen tussen de drie modellen (D-PCO, XBSB en XBNH) worden drie standaardsommen uitgevoerd (S1-DP, S2-SB, en S3-NH; zie Tabel 4.2). In S1-DP wordt DurosTA gebruikt om de morfologische ontwikkeling van het zandige profiel en de hydrodynamische condities bij de teen van de dijk te bepalen. Overslag wordt vervolgens door PC-Overslag berekend. Simulatie S1-DP komt overeen met de huidige aanpak voor dijk-in-duin oplossingen. In S2-SB en S3-NH wordt XBSB, respectievelijk XBNH, gebruikt om de morfologische ontwikkeling van het zandige profiel, de hydrodynamica over het voorland, en de overslag over de dijk te berekenen. Hierbij wordt dus steeds enkel één model gebruikt om een dijk-in-duin oplossing te simuleren. Het is belangrijk om hierbij te vermelden dat de rekenmodules voor sedimenttransport en morfologische ontwikkeling in

XBNH nog ongevalideerd zijn, alhoewel in het XBeach JIP project uitgevoerde verkennende berekeningen aangaven dat duinafslag in het referentieprofiel redelijk goed berekend werd. De morfologische resultaten van S3-NH worden daarom in deze studie wel ter referentie opgenomen, maar worden als minder betrouwbaar beschouwd dan die van S1-DP en S2-SB.

Naast de standaardsommen S1-DP, S2-SB en S3-NH, zijn negen gevoeligheidssommen uitgevoerd (Tabel 4.2) waarin variaties zijn gemaakt in het gebruikte model voor de bepaling van de morfologische ontwikkeling van het zandige profiel, de transformatie van de golven over het zandige profiel (hydrodynamica), en het bepalen van het overslagdebiet. De namen van de gevoeligheidssommen G0–G8 eindigen met een drie-letterige code, waarin de letters respectievelijk refereren naar het morfologisch, hydrodynamisch, en overslagmodel (DurosTA, PC-Overslag, XBeach Surf-beat en XBeach Niet-hydrostatisch). Omdat online koppelen van DurosTA en XBeach niet mogelijk is, wordt in gevoeligheidssommen G1–G4, gedurende de hele simulatie gebruik gemaakt van de berekende eindbodem van S1-DP (DurosTA eindbodem), in plaats van een dynamisch-veranderende bodem. Deze aanpak is ook gebruikt in gevoeligheidssommen G0 (gebruik DurosTA eindbodem), en G6 en G7 (gebruik XBSB eindbodem).

In S1-DP en de gevoeligheidssommen G0, G1, G3, G5, G6 en G8 wordt het PC-Overslag model gebruikt om golfoverslag te berekenen. In deze sommen worden tijdseries (met een tijdstap van 30 minuten) van de lokale significante golfhoogte H_{m0} en representatieve golfperiode $T_{m-1,0}$ ter plaatse van uitvoerpunt A gebruikt om het PC-Overslag model te forceren. Het berekenen van de lokale golfcondities verschilt per hydrodynamisch model (DurosTA, XBSB en XBNH). In het geval van een DurosTA hydrodynamische model wordt de lokale H_{m0} bepaald uit de berekende integrale significante golfhoogte bij uitvoerpunt A, welke niet expliciet de bijdrage van laag-frequente (infragravity) golven bevat. Omdat er geen spectrale informatie bekend is in het DurosTA model, wordt de lokale $T_{m-1,0}$ bepaald op basis van de piek golfperiode op diep water: $T_{m-1,0} = T_{p,0}/1,1$.

In het geval van XBNH is het volledige (hoog- en laagfrequente) golfspectrum bekend bij uitvoerpunt A. De integrale golfparameters H_{m0} en $T_{m-1,0}$ worden daarom bepaald door spectrale integratie tussen de frequentiegrenzen $0.005\text{Hz} < f < 2\text{Hz}$. Voor verdere analyse wordt er daarnaast een onderscheid gemaakt tussen de laag-frequente golfhoogte (berekend tussen de frequentiegrenzen $0.005\text{Hz} < f < 0.05\text{Hz}$) en de hoog-frequente golfhoogte (tussen de frequentiegrenzen $0.05\text{Hz} < f < 2\text{Hz}$).

In het geval van XBSB is alleen het laag-frequente (infragravity) deel van het golfspectrum bekend op basis van de berekende waterbeweging. Voor het hoog-frequente deel van het spectrum zijn alleen de integrale significante golfhoogte en (offshore) piek golf periode bekend. Om het volledige golfspectrum te reconstrueren wordt daarom het berekende laag-frequente spectrum opgeteld bij een synthetische hoog-frequente golfspectrum, die gevormd wordt uit een JONSWAP-spectrum met een significante golfhoogte gelijk aan de berekende hoogfrequente golfhoogte in uitvoerpunt A en een piek periode gelijk aan de golfperiode op diep water ($T_{p,0}$). Vervolgens worden de integrale golfparameters H_{m0} en $T_{m-1,0}$, evenals de gescheiden hoog- en laag-frequente golfhoogte, op gelijke wijze als XBNH bepaald op basis van spectrale integratie van het gereconstrueerde spectrum.

Om te voorkomen dat golfhoogtes en -periodes berekend worden op “droge” punten uit de XBSB en XBNH resultaten, worden de hydrodynamische condities bij uitvoerpunt A alleen berekend in perioden van 30 minuten waarvoor geldt dat de waterdiepte niet meer dan 10% van de tijd minder dan 0,01 m is. Deze grens wordt in de XBeach modellen aan het begin en

einde van de simulatie overschreden, waardoor er dan geen golfcondities aan de teen berekend worden. In de loop naar de piek van de storm en na deze piek wordt de grens niet overschreden, maar ligt de uitvoerpunt in de inner-surfzone of outer-swashzone. In deze perioden worden de golfcondities wel berekend, maar is een grotere golfopzet (shoreline setup) zichtbaar dan veelal bekend uit golfopzet metingen in de surfzone (surf zone setup). Bij hogere waterstanden tijdens de piek van de storm wordt de berekende opzet bij uitvoerpunt A kleiner, zowel door toenemende waterdiepte, als door het relatief verschuiven van het uitvoerpunt van de inner-surfzone, naar de mid-surfzone.

Tabel 4.2 Overzicht simulaties Taak 3

Set	Naam	Model morfologie	Model hydrodynamica	Model overslag
Standaard	S1-DP	DurosTA	DurosTA	PC-Overslag
	S2-SB	XBSB	XBSB	XBSB
	S3-NH	XBNH	XBNH	XBNH
Gevoeligheid	G0-DDP	DurosTA (eindprofiel)	DurosTA	PC-Overslag
	G1-DSP	DurosTA (eindprofiel)	XBSB	PC-Overslag
	G2-DSS	DurosTA (eindprofiel)	XBSB	XBSB
	G3-DNP	DurosTA (eindprofiel)	XBNH	PC-Overslag
	G4-DNN	DurosTA (eindprofiel)	XBNH	XBNH
	G5-SSP	XBSB	XBSB	PC-Overslag
	G6-SNP	XBSB (eindprofiel)	XBNH	PC-Overslag
	G7-SNN	XBSB (eindprofiel)	XBNH	XBNH
G8-NNP	XBNH	XBNH	PC-Overslag	

4.3 Resultaten standaardsommen

Deze paragraaf beschrijft de resultaten van standaardsommen S1-DP, S2-SB en S3-NH in relatie tot morfologische ontwikkeling van het zandige profiel, de hydrodynamische condities aan de teen van de dijk, en het overslagdebit.

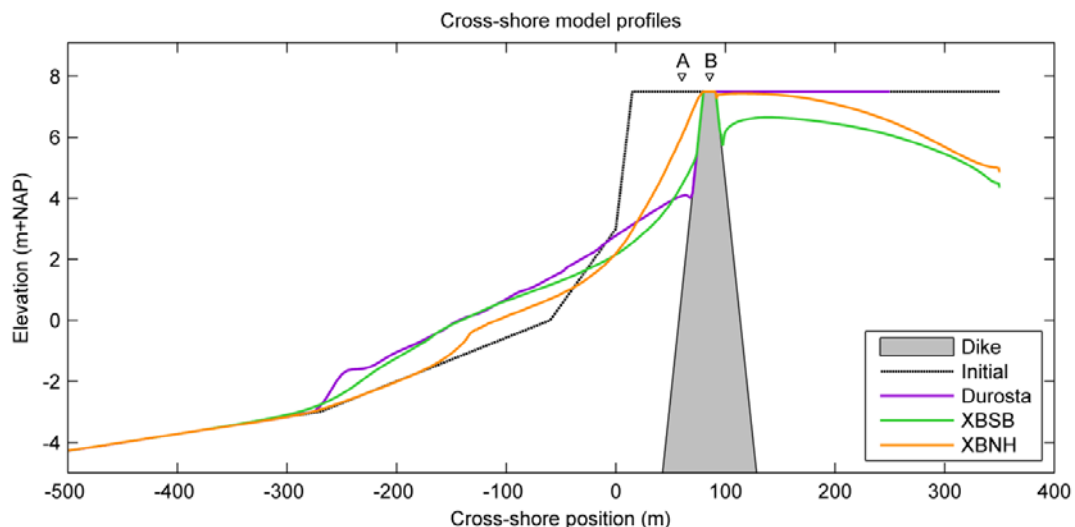
4.3.1 Morfologische ontwikkeling

Het berekende profiel van het duin en strand aan het einde van de simulatie is voor S1-DP (DurosTA), S2-SB (XBSB) en S3-NH (XBNH) in Figuur 4.3 weergegeven. Het figuur laat zien dat alle drie modellen aanzienlijke duinafslag voorspellen die tot aan de dijk reikt. De eindprofielen van DurosTA en XBSB zijn daarbij zeewaarts van de dijk redelijk vergelijkbaar, met echter een iets diepere ligging van het profiel in XBSB in het gebied tussen -100 m en 30 m (dwarspositie), en minder erosie aan de teen van de dijk in XBSB dan in DurosTA.

Zeewaarts van de dijk lijkt in het eindprofiel van XBNH minder duinafslag plaatsgevonden te hebben dan in XBSB en DurosTA. In werkelijkheid is in deze modelsimulatie wel meer afslag berekend tijdens de piek van de storm, maar is dit deels weer teruggeplaatst tegen de dijk in de tweede helft van de storm (niet afzonderlijk weergegeven, maar zie Figuur 4.6 voor een voorbeeld van het berekende profiel tijdens de piek van de storm). Hoewel herstel van het

profiel bij vooral grove sedimenttypen werkelijk snel plaats kan vinden, moet hierbij wel wederom worden gemeld dat de sedimenttransport en morfologische modules in XBNH nog niet gevalideerd zijn, en dat deze resultaten dus minder betrouwbaar worden geacht dan die van Durosta en XBSB. De daadwerkelijke vergelijking moet dus ook beperkt blijven tot deze laatste twee modellen.

Landwaarts van de dijk laten XBSB en XBNH duidelijk erosie zien van het achterland, welke wijst op het substantieel optreden van overslaande golven. Omdat deze morfologische ontwikkeling dicht bij de landwaartse rand van het model plaatsvindt, is het precieze erosievolume achter de dijk in de XBeach modellen niet goed te bepalen, en is geen doel van deze studie. De resultaten van Durosta laten daarentegen geen morfologische verandering achter de dijk zien, welke aangeeft dat in het Durosta model zelf geen water achter de dijk voorkomt. Hierbij moet opgemerkt worden dat door koppeling met PC-Overslag, in S1-DP uiteindelijk wel overslag over de dijk wordt voorspeld (zie Paragraaf 4.3.3).



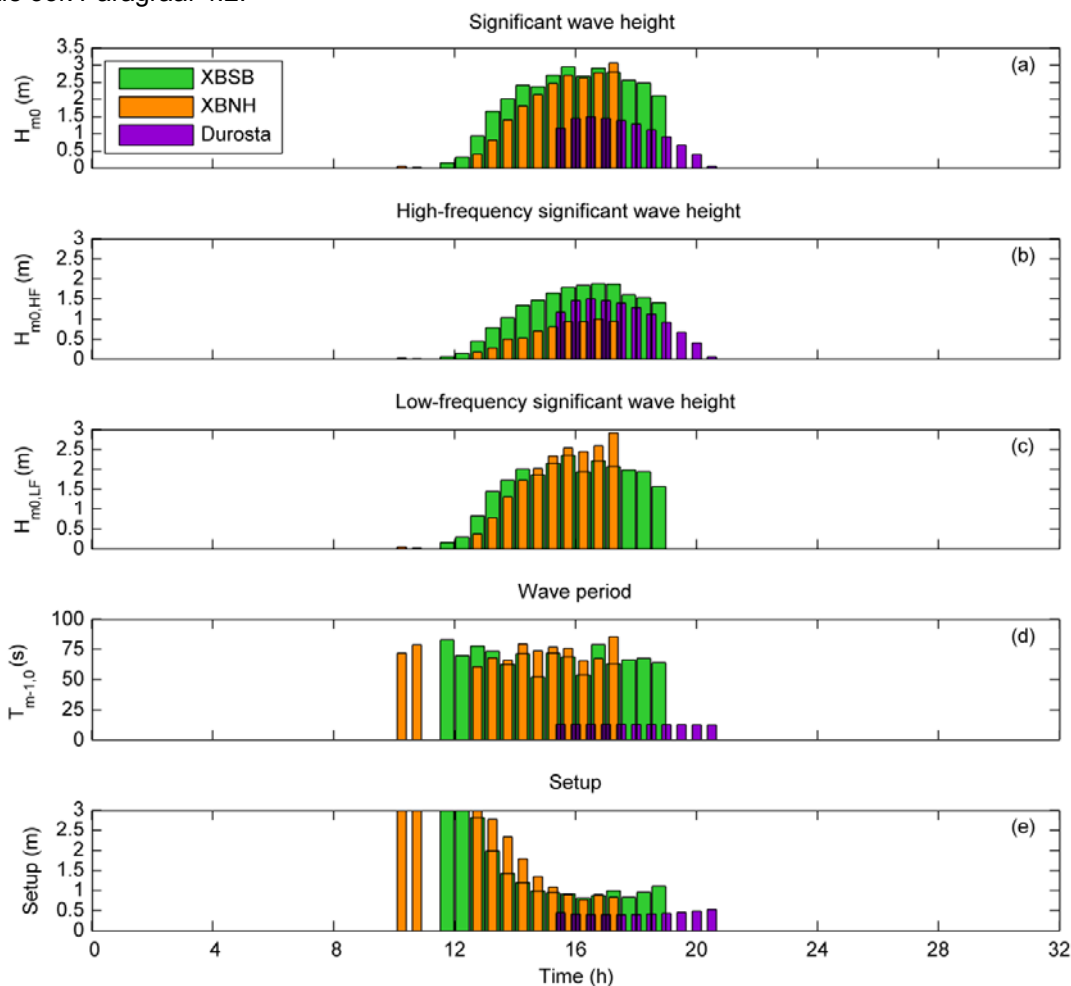
Figuur 4.3 Beginprofiel (zwart) en eindprofiel berekend door Durosta (paars), XBSB (groen) en XBNH (oranje). De uitvoerpunten A en B zijn ter referentie in het figuur opgenomen.

4.3.2 Hydrodynamica

De berekende hydrodynamische condities bij de teen van de dijk (uitvoerpunt A) zijn in Figuur 4.4 voor S1-DP (Durosta), S2-SB (XBSB) en S3-NH (XBNH) weergegeven. Gezien het ontbreken van expliciete laag-frequente golven in het Durosta model is in dit geval voor Durosta alle golfenergie als hoog-frequent geclassificeerd. Het figuur laat zien dat de totale significante golfhoogte (Figuur 4.4a) bij teen in de XBSB en XBNH modellen ongeveer twee keer groter is dan in het Durosta model (zie ook Tabel 4.3). Het figuur (Figuur 4.4b en c) laat zien dat dit verschil vooral veroorzaakt wordt door het verschil in laag-frequente golfhoogte (ontbreken van laag-frequente golven in Durosta ten opzichte van grote laag-frequente golven in XBSB en XBNH), en niet primair veroorzaakt wordt door verschillen in de berekende hoog-frequente golfhoogte. Tussen XBSB en XBNH is vooral verschil te zien in de berekende hoog-frequente golfhoogte, waarbij de resultaten van Durosta tussen die van XBSB en XBNH in liggen. De laag-frequente golfhoogte en integrale significante golfhoogte van XBSB en XBNH komen sterk met elkaar overeen.

Het ontbreken van informatie over de laag-frequente deel van het golfspectrum leidt tot grote verschillen in berekende golfperiode $T_{m-1,0}$ tussen DuroSTA en XBSB/XBNH. Omdat de golfperiode in DuroSTA alleen gebaseerd is op de piekperiode van het gespecificeerde diepwatersgolfspectrum, waar relatief weinig laag-frequente golfenergie aanwezig is, is deze periode (maximaal 13 s) veel korter dan die in de XBeach modellen (ruim 80 s). Door de vergelijkbare voorspelling van de laag-frequente golfhoogte is het verschil in de voorspelling van $T_{m-1,0}$ tussen XBSB en XBNH juist heel klein.

Figuur 4.4e laat de berekende golfopzet (ten opzichte van de offshore waterstand) zien bij de teen van de dijk. De resultaten laten zien dat het golfopzet ongeveer 1 m is tijdens de piek van de storm in de XBSB en XBNH modellen, en ongeveer 0,5 m in DuroSTA. In de aanloop naar de piek van de storm (10–13 uur) zijn zeer hoge waarden voor het golfopzet te zien in de XBeach resultaten. Deze resultaten zijn vooral het gevolg zijn van het bepalen van het golfopzet op zeer ondiep water (uitvoerpunt ligt nog deels op het strand in de swash-zone), zie ook Paragraaf 4.2.



Figuur 4.4 Berekende hydrodynamische condities van S1-DP (DuroSTA), S2-SB (XBSB) en S3-NH (XBNH) bij uitvoerpunt A: (a) integrale significante golfhoogte; (b) hoog-frequente golfhoogte ($0.05 \text{ Hz} < f < 2 \text{ Hz}$); (c) laag-frequente golfhoogte ($0.005 \text{ Hz} < f < 0.05 \text{ Hz}$); (d) spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$; (e) golfopzet. Merk op dat de golfopzet in de niet-piekuren gepaard gaat met een lagere wind- en getij-geïnduceerde waterstand.

Tabel 4.3 Overzicht van maximale hydrodynamische condities aan de teen van de dijk

	Max H_{m0} (m)	Max $H_{m0,HF}$ (m)	Max $H_{m0,LF}$ (m)	Max $T_{m-1,0}$ (s)	Max opzet (m)
S1-DP (DurosTA)	1,50	1,50	0,00	13,0	0,53
S2-SB (XBSB)	2,95	1,88	2,35	82,8	3,82
S3-NH (XBNH)	3,06	1,00	2,91	85,5	4,67

4.3.3 Overslag

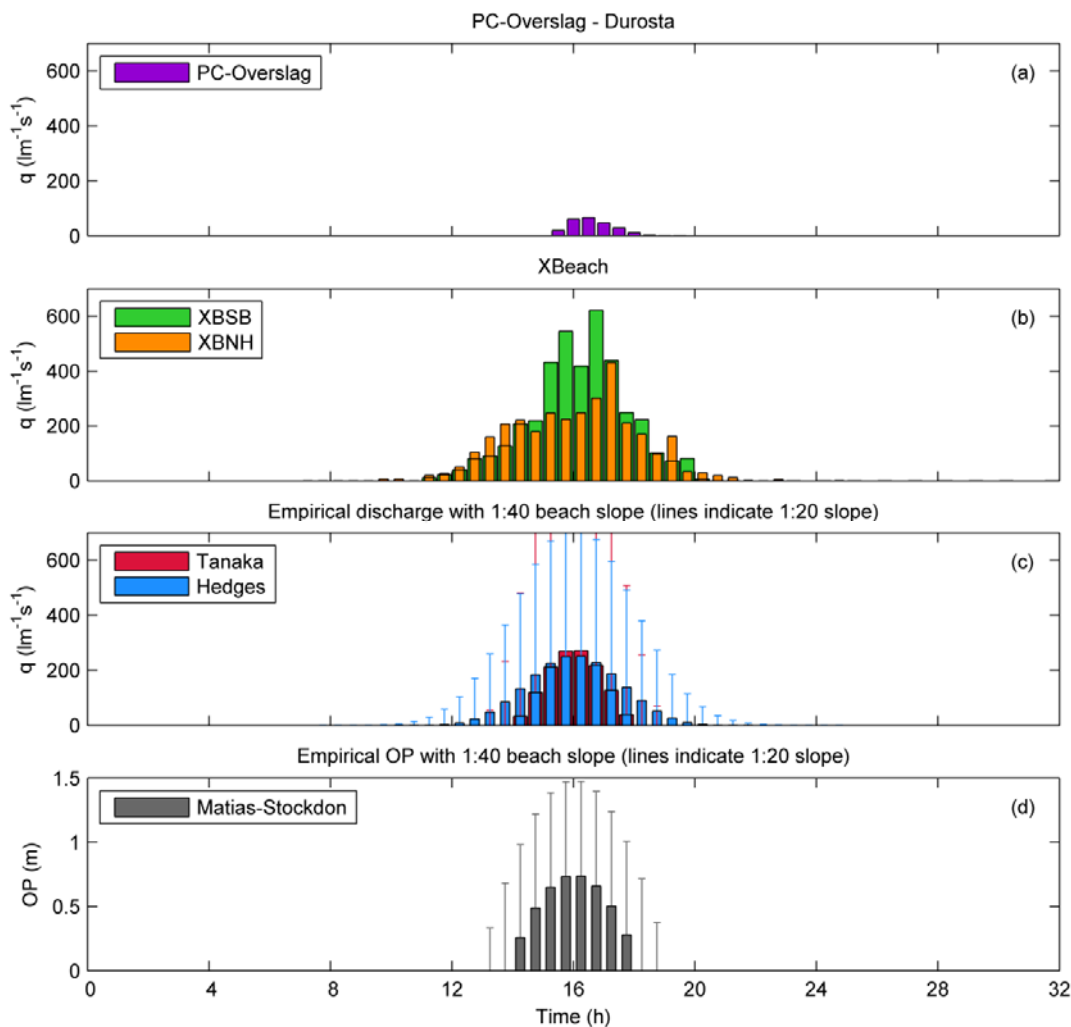
De berekende golfoverslag is in Figuur 4.5a voor S1-DP (PC-Overslag), en in Figuur 4.5b voor S2-SB (XBSB) en S3-NH (XBNH) weergegeven. Ter illustratie van de berekende overslag in S2-SB en S3-NH, is in Figuur 4.6 een snapshot gegeven van overslaande golven tijdens de piek van de storm in XBSB en XBNH. Figuur 4.5 laat zien dat de berekende golfoverslag in S1-DP (maximaal 66 l/s/m; zie Tabel 4.4), op basis van DurosTA en PC-Overslag, veel kleiner is dan de berekende overslag in S2-SB (maximaal 620 l/s/m) en S3-NH (maximaal 431 l/s/m) op basis van de XBeach simulaties. Naast een verschil in maximale golfoverslag, is de berekende duur van golfoverslag in S1-DP (3,5 uur) ook kleiner dan die in S2-SB (10 uur) en S3-NH (13,5 uur). Deze verschillen hebben zowel te maken met verschillen in morfologische ontwikkeling, als verschillen in de berekende hydrodynamica. De invloed van deze hydrodynamische en morfologische processen wordt in Paragraaf 4.4 afzonderlijk onderzocht.

De berekende golfoverslag in S2-SB en S3-NH komen kwalitatief met elkaar overeen, met uitzondering van de periode rond de piek van de storm (15–17 uur), wanneer het XBSB model meer golfoverslag voorspelt. Dit resultaat is, vanwege het ontbreken expliciete kortegolf bewegingen in XBSB, in eerste instantie onverwacht, maar kan gerelateerd worden aan de vrij lage vrijboord van de dijk, waardoor laag-frequente golven over de dijk heen kunnen slaan, in combinatie met de hoger berekende hoog-frequente golfhoogte bij de teen van de dijk in XBSB ten opzichte van XBNH, waardoor meer golfopzet op de dijk ontstaat.

Ter vergelijking met de berekende golfoverslag wordt in Figuur 4.5c twee alternatieve empirische schattingen van golfoverslag op basis van offshore golfcondities, de vrijboord en de strandhelling (Hedges and Reis, 1998; Tanaka et al., 2002) gegeven. Hoewel deze modellen relatief weinig gevalideerd zijn, worden deze gebruikt omdat zij gebruik maken van diepwater golfcondities, en dus onafhankelijke resultaten geven van PC-Overslag op basis van de berekende golfcondities aan de teen van de dijk. Omdat deze empirische modellen gevoelig zijn voor de opgegeven strandhelling, en deze helling gedurende de storm verandert, is in het figuur rekening gehouden met een strandhelling van 1:40 en 1:20. Deze hellingen geven een realistische boven- en ondergrens aan voor de strandhelling, daar het gemiddeld profiel tussen de kruin van de dijk en onderkant van het sedimentatieprofiel in S1-DP~1:35 is, en het gemiddeld profiel tussen de kruin van de dijk en de onderkant van de actieve swash (geschat op piek SWL min de halve offshore golfhoogte) ~1:23 is. De resultaten van de empirische modellen geven een indicatieve maximale overslag bandbreedte aan van 251–1088 l/s/m (Tabel 4.4), en komen daarmee kwalitatief overeen met de resultaten van S2-SB en S3-NH. Het verschil met de resultaten van S1-DP is daarentegen groot. Hoewel de empirische modellen gevoelig zijn voor de opgegeven strandhelling, zou deze zeer klein moeten zijn (1:99 volgens Tanaka et al.; 1:131 volgens Hedges and Reis) om vergelijkbaar lage overslaggebieden als S1-DP te voorspellen. Hierbij moet uitdrukkelijk opgemerkt worden dat de twee empirische modellen niet ontwikkeld zijn voor complexe dijk-in-duin systemen, en dus mogelijk onbetrouwbaar kunnen zijn.

In Figuur 4.5d wordt tenslotte gebruik gemaakt van een goed gevalideerd empirisch golfploopmodel voor zandige kusten (Stockdon, et al., 2005) om de potentie voor

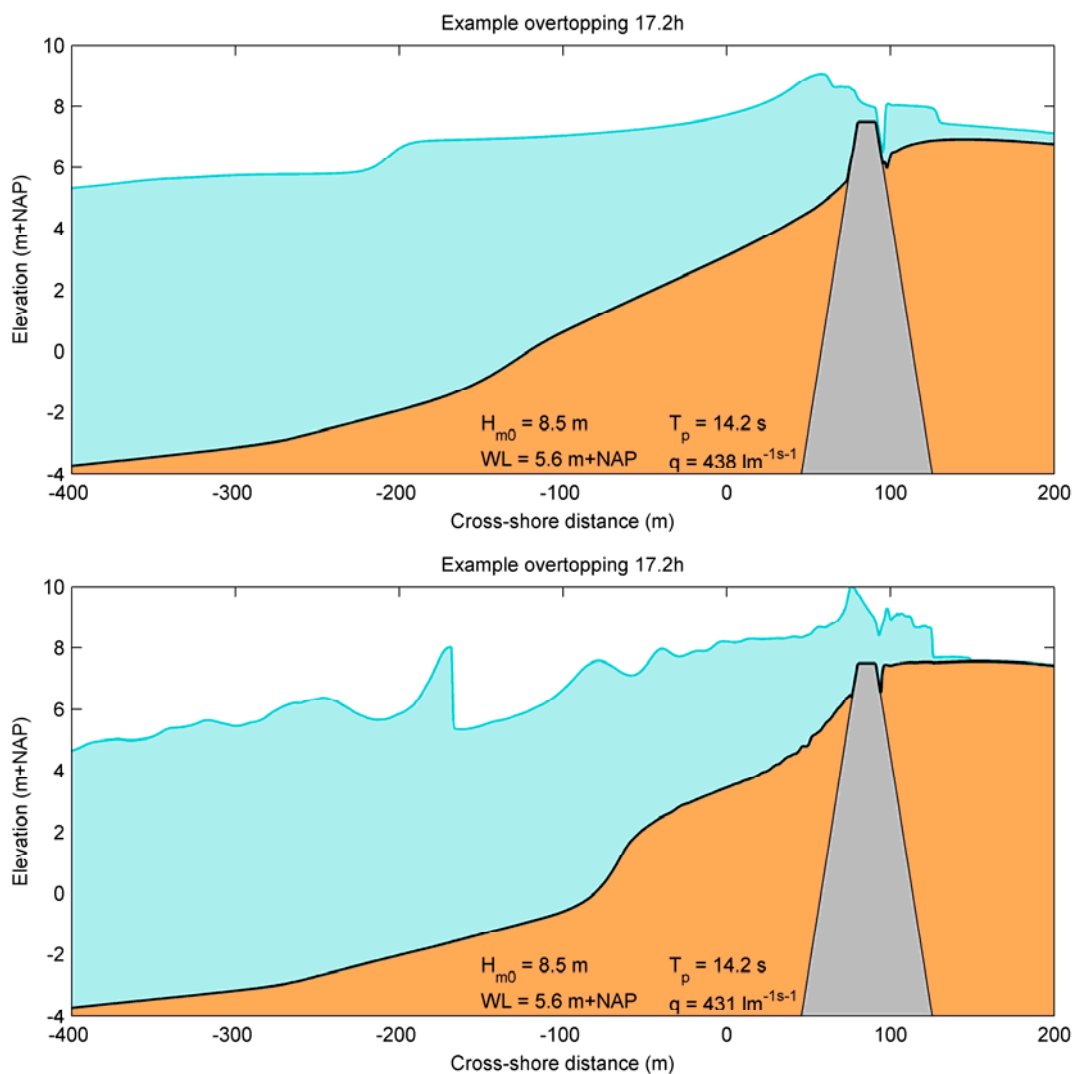
golfoverslag aan te geven. Hierbij is gebruik gemaakt van het concept van Overwash Potential (OP; Matias et al., 2012), waarbij OP het verschil aangeeft tussen de 2% golfploophoogte en de kruin van de dijk (positieve waarden geven aan dat de golfploophoogte hoger is dan de kruin). In het figuur is te zien dat afhankelijk van de opgegeven strandhelling, de maximale % golfploophoogte 0,7–1,5 m hoger is dan de kruin van de dijk (en top van de duin). Op basis hiervan is substantieel overslag te verwachten, welke kwalitatief overeenkomt met de resultaten van S2-SB en S3-NH.



Figuur 4.5 Berekende golfoverslag: (a) S1-DP (PC-Overslag); (b) S2-SB (XBSB) en S3-NH (XBNH). Geschatte overslag op basis van empirische formules zijn voor twee strandhellingen in (c) weergegeven. Het verschil tussen geschatte golfploophoogte en kruinhoogte (OP) is voor twee strandhellingen in (d) weergegeven.

Tabel 4.4 Overzicht van berekende maximale golfoverslag.

Model	Piek overslag ($\text{lm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
DurosTA – PC-Overslag	66
XBSB	620
XBNH	431
Tanaka (1:40 – 1:20 strandhelling)	272 – 1088
Hedges (1:40 – 1:20 strandhelling)	251 – 718



Figuur 4.6 Voorbeeld van berekende overslaande golven in S2-SB (boven) en S3-NH (onder) vlak na de piek van de storm.

4.4 Discussie op basis van gevoeligheidssommen

Deze paragraaf beschrijft de resultaten van gevoeligheidssommen G0–G8. In de analyse wordt onderscheid gemaakt naar de gevoeligheid van het voorspellen van overslag met betrekking tot de hydrodynamische condities aan de teen van de dijk voor PC-Overslag (paragraaf 4.4.1), met betrekking tot golftransformatie- en overslagmodel (paragraaf 4.4.2),

met betrekking tot morfologische veranderingen (paragraaf 4.4.3), en met betrekking tot de gecombineerde effecten van hydrodynamica en morfologie (paragraaf 4.4.4).

4.4.1 Gevoeligheid PC-Overslag hydrodynamische condities teen dijk

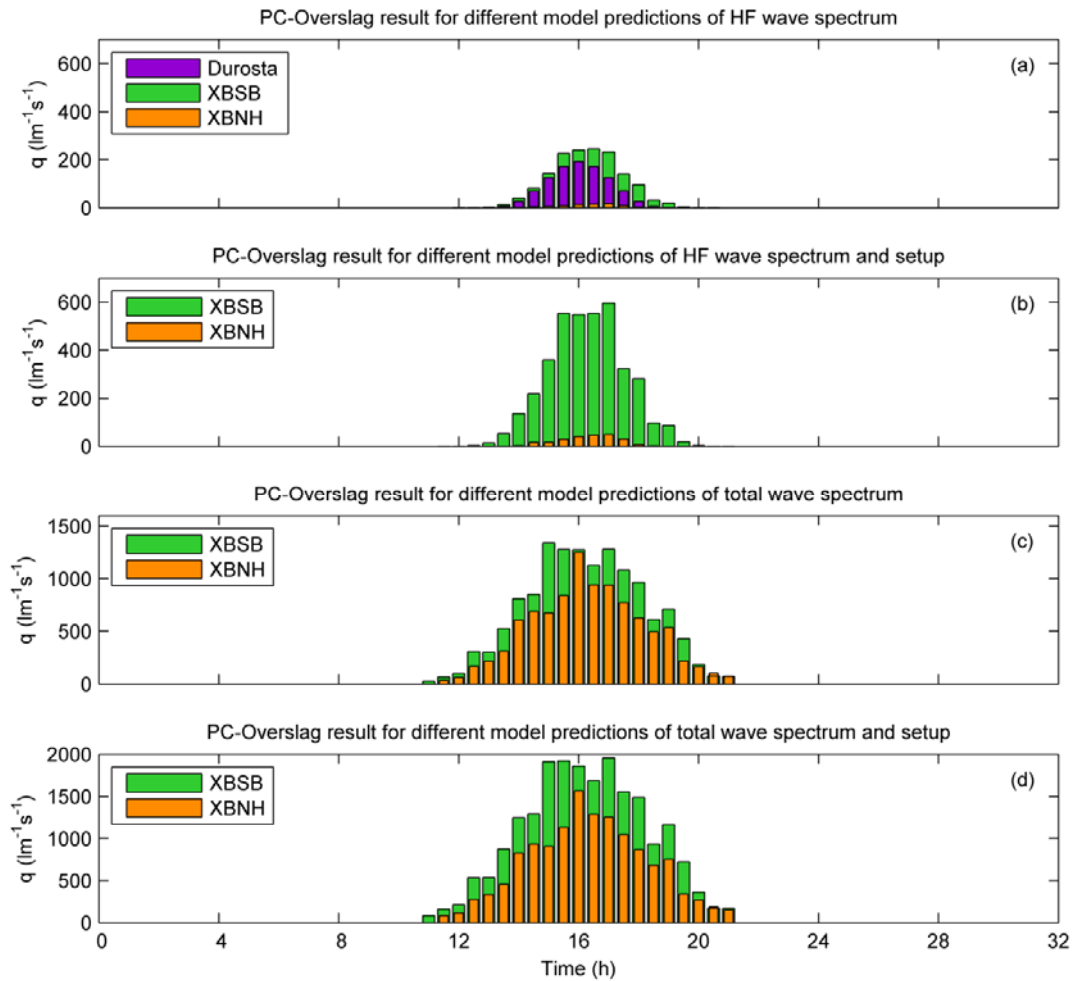
In deze analyse wordt een vergelijking gemaakt tussen voorspellingen van overslag door PC-Overslag op basis van hydrodynamische condities aan de teen van de dijk uit DurosTA, XBSB en XBNH. Om verschillen ten gevolge van verschillen in bodem uit te sluiten, worden de hydrodynamische condities aan de teen van de dijk berekend op een statische bodem, gelijk aan de eindbodem van S1-DP (gevoeligheidssommen G0-DDP, G1-DSP en G3-DNP).

Naast het verschil in overslag door gebruik van drie hydrodynamische modellen, wordt ook de gevoeligheid van PC-Overslag onderzocht voor het wel of niet meenemen van de laag-frequente deel van het spectrum, en het wel of niet meenemen van de lokale golfopzet in het verminderen van de vrijboord. In de huidige systematiek (cf. S1-DP) wordt de laagfrequente gedeelte van het golfspectrum niet gebruikt om PC-Overslag te forceren, maar dit is gegeven de onderliggende relaties in PC-Overslag (TAW, 2002) wel mogelijk en wenselijk. Het meenemen van lokale golfopzet in het verminderen van de vrijboord wordt in de huidige systematiek niet toegepast, en volgt daarmee de aanbeveling van TAW (2002). Daar de relaties in TAW (2002) voor flauwe voorlanden echter gebaseerd zijn op relatief weinig meetcondities, is deze gevoeligheidsstudie alsnog relevant.

De resultaten van deze analyse staan in Figuur 4.7 en Tabel 4.5. Figuur 4.7a laat zien dat bij gebruik van alleen de hoog-frequente golfcondities aan de teen van de dijk, de berekende overslag van G0-DDP, op basis van DurosTA, en G1-DSP, op basis van XBSB, redelijk overeen komen, maar dat de overslag van G3-DNP, op basis van XBNH, ruim 90% kleiner is dan die van G0-DDP.

Ten opzichte van de gevoeligheid in de keuze van hydrodynamisch model, laat Figuur 4.7c zien dat het gebruik van de integrale golfparameters H_{m0} en $T_{m-1,0}$ in plaats van de hoog-frequente golfhoogte en -periode tot veel grotere verschillen kan leiden. In G1-DSP en G3-DNP leidt dit verschil tot een toename van 448–7271% in de door PC-Overslag voorspelde maximale overslag debieten. De door PC-Overslag berekende debieten zijn hierdoor ruim twee keer groter dan de debieten die in de standaardsommen S2-SB en S3-NH door XBeach berekend zijn, evenals dan de berekende overslag in de XBeach gevoeligheidssommen G2-DSS en G4-DNN met gebruik van de DurosTA bodem (beschreven in de volgende paragraaf).

Figuur 4.7b en d, en Tabel 4.5 laten zien dat het meenemen van golfopzet om het vrijboord te verminderen tot ~100–200% toename leidt in de berekende overslag van PC-Overslag. Hierbij moet nogmaals opgemerkt worden dat TAW (2002) deze verlaging van het vrijboord niet voorschrijft.



Figuur 4.7 Berekende golfoverslag in PC-Overlag met invoer van drie hydrodynamische modellen (Durosta, XBSB en XBNH) op basis van: (a) hoog-frequente golfcondities aan de teen; (b) hoog-frequente golfcondities aan de teen en golfopzet; (c) integrale golfcondities aan de teen; (d) integrale golfcondities aan de teen en golfopzet.

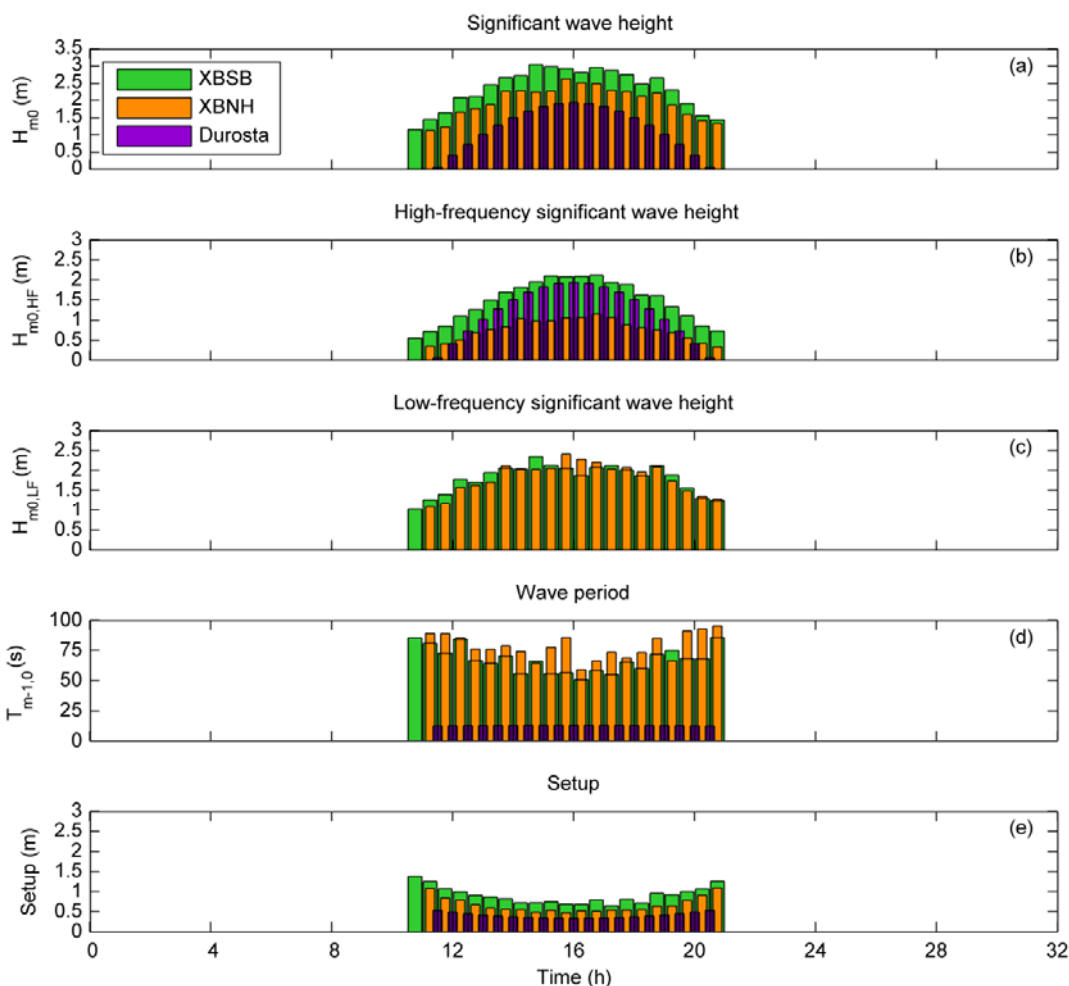
Tabel 4.5 Overzicht van berekende debieten in PC-Overlag

Hydrodynamisch model	Golfspectrum	Waterstand	Piek overslag PC-Overlag ($\text{lm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
Durosta	HF*	SWL	192
XBSB	HF*	SWL	245
	HF*	SWL+golfopzet	595 (+143%)
	HF+LF	SWL	1343 (+448%)
	HF+LF	SWL+golfopzet	1959 (+700%)
XBNH	HF*	SWL	17
	HF*	SWL+golfopzet	50 (+194%)
	HF+LF	SWL	1253 (+7271%)
	HF+LF	SWL+golfopzet	1567 (+9118%)

4.4.2 Gevoeligheid golftransformatie en overslag model

In deze analyse wordt een vergelijking gemaakt tussen voorspellingen van overslag door de combinatie van DuroSTA en PC-Overslag, XBSB en XBNH. Om verschillen ten gevolge van verschillen in bodem uit te sluiten, worden de simulaties uitgevoerd op een statische bodem, gelijk aan de eindbodem van S1-DP (gevoeligheidssommen G0-DDP, G2-DSS en G4-DNN).

De berekende hydrodynamische condities aan de teen van de dijk in G0-DDP, G2-DSS en G4-DNN zijn in Figuur 4.8 en Tabel 4.6 weergegeven. De resultaten laten een vergelijkbaar patroon zien als in paragraaf 4.3.2 (vergelijking S1-DP, S2-SB, S3-NH), met substantiële verschillen in de berekende golfhoogte (ook op gelijke bodems) en -periode tussen de XBeach hydrodynamische modellen en DuroSTA. De resultaten van XBSB en XBNH zijn wederom vergelijkbaar, met uitzondering van de hoog-frequente golfhoogte, waarbij XBNH een lagere waarde voorspelt dan XBSB en DuroSTA.



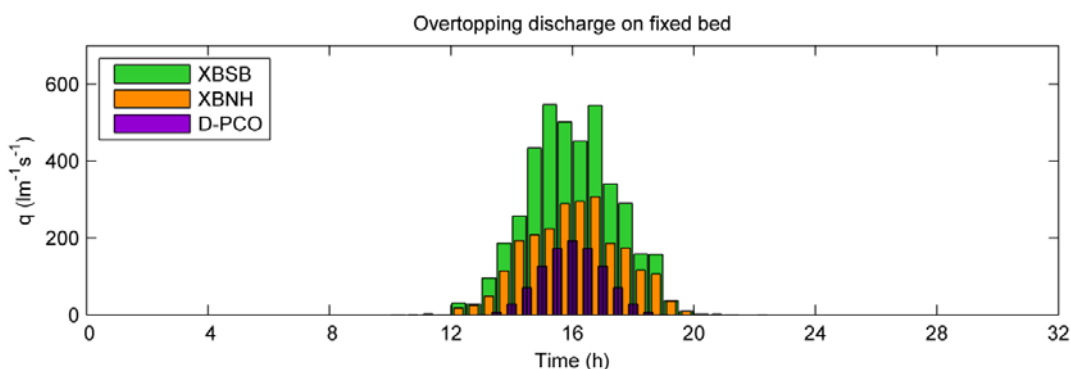
Figuur 4.8 Berekende hydrodynamische condities van G0-DDP (DuroSTA), G2-DSS (XBSB) en G4-DNN (XBNH) bij uitvoerpunt A: (a) integrale significante golfhoogte; (b) hoog-frequente golfhoogte ($0.05 \text{ Hz} < f < 2 \text{ Hz}$); (c) laag-frequente golfhoogte ($0.005 \text{ Hz} < f < 0.05 \text{ Hz}$); (d) spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$; (e) golfopzet.

Tabel 4.6 Overzicht van maximale hydrodynamische condities aan de teen van de dijk

Model	Max H_{m0} (m)	Max $H_{m0,HF}$ (m)	Max $H_{m0,LF}$ (m)	Max $T_{m-1,0}$ (s)	Max opzet (m)
G0-DDP (DurosTA)	1.94	1.94	0.00	13.0	0.53
G2-DSS (XBSB)	3.03	2.11	2.32	87.0	1.38
G4-DNN (XBNH)	2.63	1.15	2.40	95.9	1.09

De berekende overslagdebiët over de dijk in G0-DDP, G2-DSS en G4-DNN is in Figuur 4.9 en Tabel 4.7 weergegeven. De resultaten laten zien dat ook in een simulaties met een gelijke bodem, de combinatie DurosTA en PC-Overslag tot lagere overslagdebieten leidt dan XBSB en XBNH. Het relatieve verschil tussen G0-DPP, en G2-DSS en G4-DNN is echter kleiner dan die tussen S1-DP, en S2-SB en S3-NH. Het verschil tussen berekende debieten in G2-DSS en G4-DNN is 44% (ten opzichte van G2-DSS), en is daarmee vergelijkbaar met het relatieve verschil tussen S2-SB en S3-NH.

Het relatieve verschil tussen G0-DDP, G2-DSS en G4-DNN is echter kleiner dan verschil in PC-Overslag voorspelling met en zonder gebruik van LF spectrum (paragraaf 4.4.1). Dit geeft aan dat voorspellingen van overslag wellicht minder gevoelig zijn voor de keuze voor overslag model, dan voor verschillende keuzes in hydrodynamisch model en bijhorende bepaling van de golfcondities bij de teen van de dijk als randvoorwaarde voor PC-Overslag.



Figuur 4.9 Berekende overslagdebiët in G0-DDP (D-PCO), G2-DSS (XBSB) en G4-DNN (XBNH).

Tabel 4.7 Overzicht van maximale overslagdebiët

Model	Piek overslag ($\text{lm}^{-1} \text{s}^{-1}$)
DurosTA – PC-Overslag	192
XBSB	547 (+185%)
XBNH	306 (+59%)

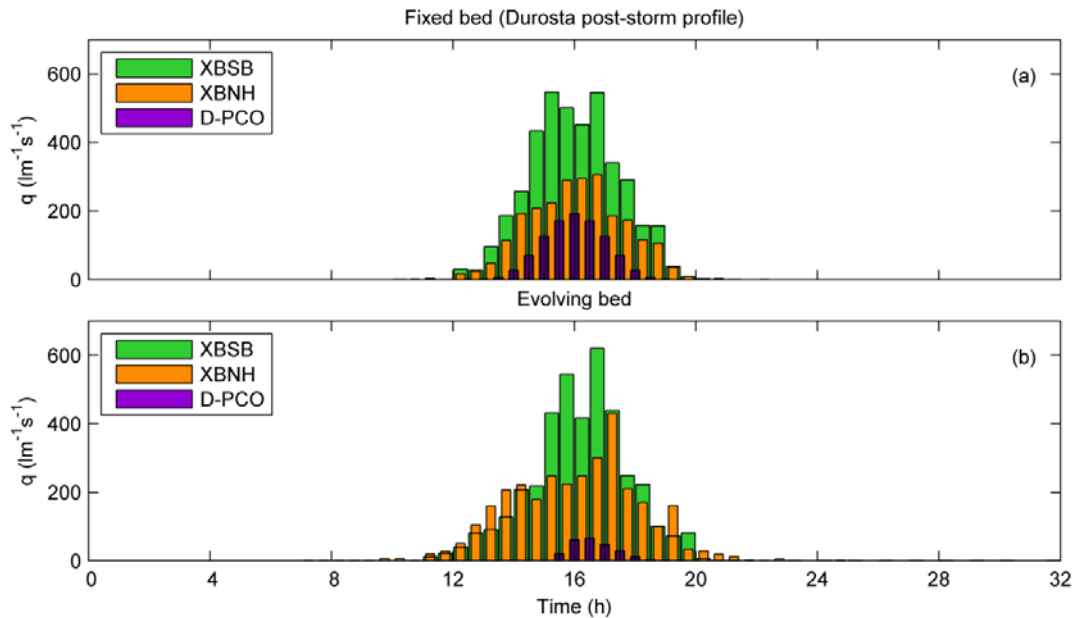
4.4.3 Gevoeligheid morfologie

In deze paragraaf wordt een analyse gemaakt van de gevoeligheid van overslag voorspellingen voor morfologische veranderingen van het zandige profiel. In de analyse wordt gekeken naar het verschil tussen simulaties met gebruik van een statische bodem (G0-DDP, G2-DSS en G4-DNN) en een dynamische bodem (S1-DP, S2-SB, S3-NH). Het overslagdebiët wordt in de simulaties berekend op basis van de combinatie DurosTA en PC-Overslag (G0-DDP, S1-DP), XBSB (G2-DSS, S2-SB) en XBNH (G4-DNN, S3-NH).

De resultaten van deze analyse zijn weergegeven in Figuur 4.10 en Tabel 4.8. Hieruit blijkt dat in de simulaties met de combinatie van DurosTA met PC-Overslag, er bij een dynamische bodem minder overslag plaatsvindt dan bij een statische bodem (66% minder). In XBSB en XBNH simulaties vindt juist hoger (13–41%) maximale overslag plaats bij een dynamische bodem. Dit kan een gevolg zijn van de ontwikkeling van het duinprofiel in de morfo-dynamische simulaties, maar kan ook gerelateerd zijn aan het feit dat de gebruikte statische bodem (uit S1-DP) geen eindbodem van de XBeach modellen is, maar is hier niet verder onderzocht. Ten opzichte van de maximale overslagdebieten, zijn de gemiddelde overslagdebieten rond de piek van de storm (12–20 uur) in XBNH en XBSB relatief ongevoelig voor de keuze voor een statische of dynamische bodem, hoewel er nog wel een verschil in overslagduur blijft bestaan.

De relatieve gevoeligheid van de DurosTA – PC-Overslag simulaties voor de morfologische ontwikkeling bij de teen van de dijk betekent dat een bewuste keuze moet worden gemaakt om PC-Overslag te forceren met golfcondities uit een morfo-dynamisch model (overeenkomstig huidige methodiek, cf. S1-DP). In geval van een dynamische bodem moet wellicht echter ook een steeds veranderende positie voor de teen van de dijk gebruikt worden, wat niet in de huidige methodiek toegepast wordt. Daarnaast is op te merken dat in G0-DDP (statische bodem) overslag eerder plaatsvindt dan in S1-DP (dynamische bodem) omdat het referentiepunt voor de teen van de dijk in G0-DDP eerder grote golven ondervindt. Echter, gegeven het (initieel) steile profiel van het duin en strand is overslag over het zandig profiel ook in die periode in S1-DP in de werkelijkheid ook mogelijk, en zou deze overslag over het zandige profiel in een DurosTA – PC-Overslag methodologie ook meegenomen moeten worden.

Hoewel morfologische veranderingen van het zandige profiel wel leiden tot verschillen in berekende overslag, laten de resultaten ook zien dat de gevoeligheid voor de morfologische verandering niet groter is dan de gevoeligheid voor de keuze van hydrodynamisch en overslagmodel (verschil G0-DDP–G2-DSS: 185%; verschil G0–G4-DNN: 59%; verschil G2-DSS–G4-DNN: 44%).



Figuur 4.10 Berekende overslagdebiet in: (a) G0-DDP (D-PCO), G2-DSS (XBSB) en G4-DNN (XBNH); (b) S1-DP (D-PCO), S2-SB (XBSB) en S3-NH (XBNH).

Tabel 4.8 Overzicht van maximale overslagdebiet

Model	Morfologie	Piek overslag ($\text{lm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
Durosta – PC-Overslag	Statisch	192
	Dynamisch	66 (-66%)
XBSB	Statisch	547
	Dynamisch	620 (+13%)
XBNH	Statisch	306
	Dynamisch	431 (+41%)

4.4.4 Gevoeligheid combinatie hydrodynamica en morfologie

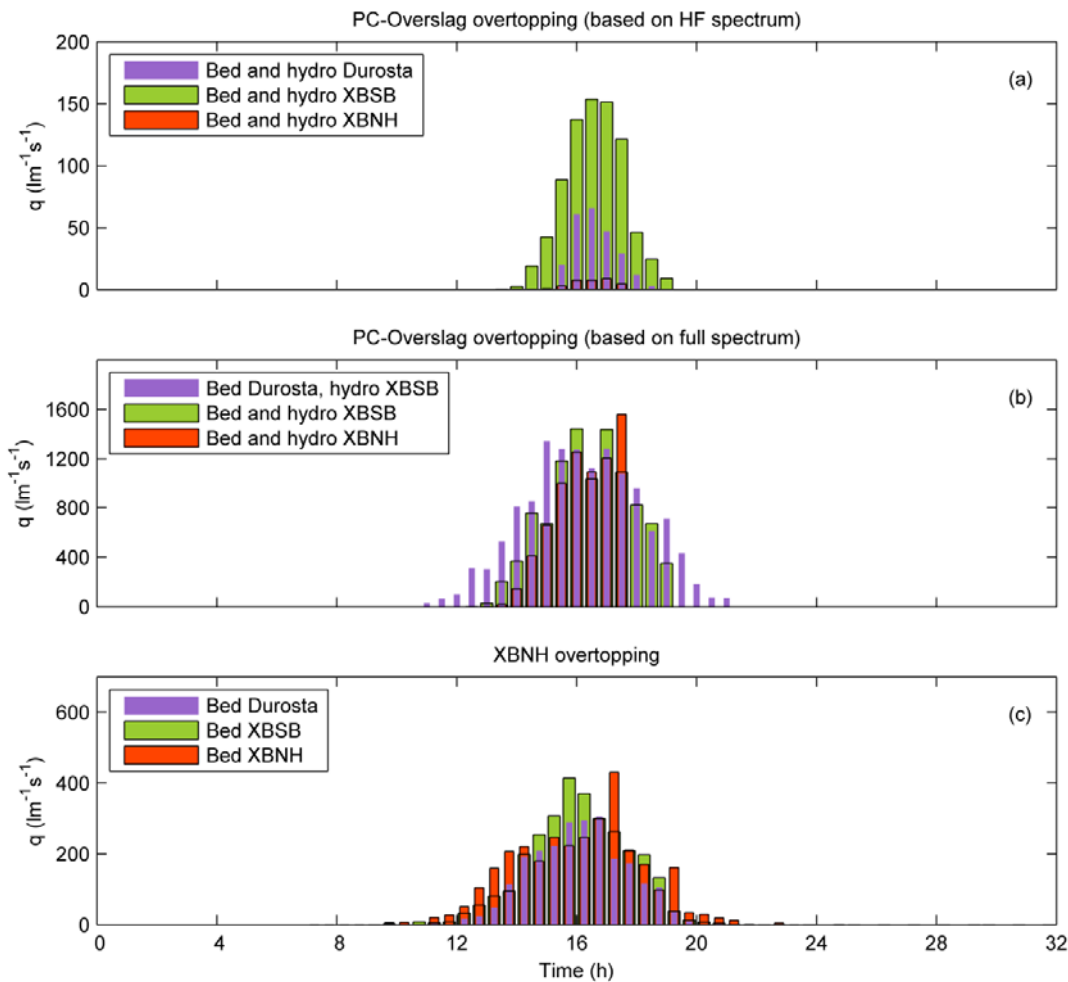
Op een dynamische bodem leidt morfologische ontwikkeling van het zandige profiel ook tot veranderingen in de golftransformatie en daarmee overslag. Omdat het zandige profiel zich anders ontwikkelt in Durosta, XBSB en XBNH, wordt hier een analyse uitgevoerd van de integrale effecten van de morfodynamica van het zandige profiel op het berekende overslagdebiet. In deze analyse worden Durosta, XBSB en XBNH gebruikt om de hydrodynamica en morfologie op het zandige profiel te berekenen, waarna PC-Overslag (met en zonder gebruik van het laag-frequente deel van het spectrum) gebruikt wordt om overslag te bepalen (sommen S1-DP, G5-SSP, G8-NNP, G1-DSP). De gevoeligheid van PC-Overslag wordt daarna vergeleken met de gevoeligheid van XBNH als hydrodynamisch en overslagmodel op bodems met verschillende morfologische ontwikkelingen (G4-DNN, G7-SNN, S3-NH).

De resultaten van deze analyse zijn in Figuur 4.11 en Tabel 4.9 weergegeven. Figuur 4.11a laat zien dat bij gebruik van alleen het hoog-frequente deel van de golfspectrum, PC-Overslag zeer gevoelig (~100%) is voor de keuze van morphodynamisch model (Durosta, XBSB, XBNH). Dit betekent eveneens dat in deze configuratie het berekende overslagdebiet

gevoelig zal zijn voor de precieze bepaling van de locatie van de teen van de dijk, waar de randvoorwaarden van het PC-Overslag model bepaald worden.

Figuur 4.11b laat daarentegen zien dat, mits de integrale (hoog- en laagfrequent) golfparameters aanwezig zijn en gebruikt worden om de overslag te bepalen, PC-Overslag relatief ongevoelig (7–16% verschil) is voor de keuze van morfologisch en hydrodynamisch model. Hierbij moet worden opgemerkt dat bij gebruik van Durosta als morfologisch model, een ander hydrodynamisch model met laag-frequente golven (XBSB, XBNH) gebruikt moet worden om de integrale golfparameters bij de teen te bepalen (e.g., G1-DSP).

De relatief kleine gevoeligheid van PC-Overslag met gebruik van integrale golfparameters wordt gespiegeld in de gevoeligheid van XBNH berekeningen van overslag voor verschillen in morfologische bodems (Figuur 4.11c). Evenals in paragraaf 4.4.2, zijn de overslagdebieten op basis van PC-Overslag echter ongeveer 3–4 keer groter dan die in de XBNH simulaties.



Figuur 4.11 (a) Berekend overslagdebiet in PC-Overslag op basis van hoog-frequente golfcondities aan de teen berekend door Durosta, XBSB en XBNH modellen; (b) berekend overslagdebiet in PC-Overslag op basis van integrale golfcondities aan de teen berekend door Durosta, XBSB en XBNH modellen; (c) XBNH-berekend overslagdebiet bij gebruik van verschillende bodems.

Tabel 4.9 Overzicht van maximale overslagdebiet

Overslag model	Hydrodynamica	Morfologie	Piek overslag ($\text{lm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
PC-Overslag (HF spectrum)	DurosTA	DurosTA	66
	XBSB	XBSB	154 (+133%)
	XBNH	XBNH	9 (-86%)
PC-Overslag (totale spectrum)	XBSB	DurosTA	1343
	XBSB	XBSB	1443 (+7%)
	XBNH	XBNH	1560 (+16%)
XBNH	XBNH	XBNH	431
	XBNH	DurosTA (statisch eindprofiel)	414 (-4%)
	XBNH	XBSB (statisch eindprofiel)	306 (-29%)

4.5 Conclusies

Aan de hand van simulaties met DurosTA en PC-Overslag, XBSB en XBNH zijn verschillen en gevoeligheden onderzocht voor overslag berekeningen op een case-study duin-in-dijk oplossing in een geschematiseerd profiel. De grootste verschillen in het berekende overslagdebiet zijn tussen de resultaten van de combinatie van DurosTA en PC-overslag, ten opzichte van de resultaten van XBSB en XBNH. In het specifieke geval van deze case-study lijkt het overslagdebiet van DurosTA-PC-Overslag laag uit te vallen ten opzichte van andere schattingen van overslag op basis van empirische formules. De berekende overslagdebieten van XBSB en XBNH komen in dit geval daarentegen kwalitatief goed overeen met deze empirische schattingen.

Het verschil in berekend maximum overslagdebiet tussen DurosTA-PC-Overslag en de XBeach modellen wordt voor het grootste deel bepaald door het ontbreken van het laag-frequente (infragravity) deel van het golfspectrum in het in DurosTA gehanteerde golfvoorplantingsmodel, waarin het in de jaren 80 ontwikkelde ENDEC-model wordt gehanteerd. Dit leidt tot een lagere schatting van de spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$ en de totale significante golfhoogte bij de teen van de dijk als invoer voor PC-Overslag. Hierdoor is ook het berekende overslagdebiet in PC-Overslag laag. Daarnaast is een belangrijk verschil in relatie tot de duur van overslag over de dijk dat in de combinatie DurosTA-PC-Overslag, PC-Overslag pas overslag berekent op het moment dat er in DurosTA voldoende erosie heeft plaatsgevonden dat het dijktalud rechtstreeks wordt belast. In de XBeach modellen vindt overslag al over het zandige profiel plaats (welke doorloopt over de dijk) voordat de erosie de teen van de dijk bereikt heeft.

De gevoeligheid van de overslagberekeningen voor verschillen in morfologische ontwikkeling in de morfodynamische modellen is aanzienlijk (O(10–50%), Tabel 4.8). Echter, hiervoor is de gevoeligheid algemeen kleiner dan de gevoeligheid voor de keuze van hydrodynamisch en overslag model (PC-Overslag, XBSB, XBNH; O(50–200%), Tabel 4.7) en de gevoeligheid van PC-Overslag voor het wel of niet meenemen van het laag-frequente deel van het golfspectrum (O(400–7000%), Tabel 4.5).

De gevoeligheid van PC-Overslag voor de keuze van het morfodynamisch model voor het zandige profiel (DurosTA, XBSB, XBNH), en daarmee de precieze hydrodynamische condities en morfologische ontwikkeling bij de teen van de dijk, is hoog (O(100%)) als alleen het hoog-frequente deel van het golfspectrum gebruikt wordt om de overslag te bepalen

(conform de huidige DurosTA–PC-Overslag methodologie). Hoewel deze gevoeligheid onderzocht is voor het gebruik van verschillende morfodynamische modellen, gaat deze conclusie ook op voor de gevoeligheid voor de keuze van de locatie van de teen van de dijk (uitvoerpunt randvoorwaarden PC-Overslag) in het geval van een morfodynamische berekening. De gevoeligheid van PC-Overslag voor keuzes in het morfodynamisch model neemt echter substantieel af (7–16% verschil) als het overslagmodel geforceerd wordt met de integrale (hoog- en laag-frequente) golfspectrum in plaats van het hoog-frequente deel van het golfspectrum (conform de huidige DurosTA–PC-Overslag methodologie). Hiervoor is echter wel een XBSB of XBNH hydrodynamisch model nodig om het laag-frequente golfspectrum te berekenen. Hoewel de relatieve gevoeligheid van PC-Overslag met gebruik van integrale golfspectruminformatie vergelijkbaar is met die van XBNH, is het berekende overslagdebiet in PC-Overslag dan echter 2–4 keer groter dan het berekende debiet in de XBeach modellen.

De studie heeft kwalitatief laten zien dat XBSB en XBNH in staat zijn om overslag over een dijk-in-duin profiel te berekenen. Vergelijking met veld- en labdata van hydrodynamica, morfologische veranderingen en overslagdebieten op echte hybride keringen is echter nodig om deze modellen verder te valideren, en verdere gevoeligheidsanalyses zijn nodig om inzicht te krijgen in het effect van modelparameters (e.g., bodemruwheid) op berekende overslagdebieten.

5 Conclusies

Het doel van de studie is te onderzoeken wat het gedrag van XBeach met betrekking tot zowel duinafslag en golfoverslag ten opzichte van bestaande modellen is. Op deze manier wordt het vertrouwen in het XBeach-model vergroot en kan ook richting gegeven worden aan de planvorming om van XBeach een volwaardig in WBI opgenomen instrument te maken voor beoordeling en ontwerp van primair zandige waterkeringen. Deze studie bestaat uit drie taken waarvan de conclusies in de bovenstaande hoofdstukken zijn beschreven en die hier kort worden samengevat.

5.1 Hoofdconclusies

De hoofdconclusie is dat XBeach dezelfde trends laat zien als DurosTA met een paar uitzonderingen (zie hieronder) die nader onderzocht moeten worden maar de doorontwikkeling tot een volwaardig instrument niet in de weg staan. Te meer omdat XBeach fysica beschrijft (met name de lange golfdynamica) die niet in eerdere modellen opgenomen was maar essentieel blijkt op de resultaten van afslagberekeningen, en daarmee ook op de beoordeling van duinwaterkeringen en hybride constructies.

Om het vertrouwen in de (bredere) toepasbaarheid van XBeach te vergroten, en de verschillen met het vigerende modelinstrumentarium te kunnen onderbouwen, is het van belang om XBeach en met name het lange golfgedrag verder te calibreren en valideren voor verschillende situaties en omstandigheden. Deze calibratie moet leiden tot een model met een afgeregelde set instellingen zodat de toepasbaarheid van het model en de eenduidige interpretatie van de resultaten gewaarborgd zijn.

Het verdient de aanbeveling om op korte termijn een Plan van Aanpak uit te werken waarin de stappen worden uitgewerkt om XBeach tot een volwaardig beoordelings- en ontwerpinstrument door te ontwikkelen.

5.2 Conclusies per Taak

1 Analyse gedrag XBeach t.o.v. huidige modellen.

Op laboratoriumschaal reproduceert XBeach de gemeten duinerosie in de Deltagoot met de specifiek voor deze proef afgeregelde “van Thiel de Vries” instellingen. De set met standaard parameter instellingen (‘default settings’) geeft een vergelijkbaar goed resultaat wat betreft het berekende afslagprofiel en het afslagvolume. De default waarden zijn afgeleid op basis van een bredere verzameling veld- en laboratoriummetingen. De verdere analyses in deze studie zijn uitgevoerd met deze standaard instellingen.

De gevoeligheid van XBeach en DurosTA zijn op laboratorium en prototypeschaal onderzocht voor een variatie van de hydraulische randvoorwaarden: waterstand, golfhoogte, golfperiode, offshore waterdiepte, en de korreldiameter. Hierbij is de prototypeschaal geometrisch opgeschaald vanuit de laboratoriumschaal waarbij de zanddiameter hetzelfde is gehouden. Voor de variatie van de waterstand laten XBeach en DurosTA dezelfde trend zien, maar op de prototypeschaal is de gradiënt voor XBeach vlakker. Dit komt door de ongevoeligheid van XBeach voor de korreldiameter en door het gebruik van niet-dimensieloze parametersettings.

Voor de golfhoogte laten DurosTA en XBeach dezelfde positieve trend zien op beide schalen. Dit is ook het geval voor de golfperiode.

Opvallend is wel dat de laboratoriummetingen een veel gematigder trend laten zien bij variaties in de golfperiode. Dit verschil blijkt te komen door de toegepaste type randvoorwaarde: als aangestuurd wordt met de gemeten tijdseries in plaats van de Pierson-Moskowitz spectra worden de gemeten afslaghoeveelheden gereproduceerd. Het verschil geeft aanleiding tot het nader analyseren van de laboratoriumdata om te onderzoeken of er een beperking in de slag van het schot is opgetreden. Als dat zo is, betekent dit dat het effect van de variatie in de golfperiode op de duinerosie in de metingen kleiner is dan in werkelijkheid. Omdat deze metingen zijn gebruikt om het toetsmodel Duros+ af te leiden, zou dit betekenen dat het effect van de golfperiode op de duinerosie met het huidige instrumentarium wellicht wordt onderschat. Aanbevolen wordt dan ook om dit nader te analyseren.

Voor de variatie van de offshore waterdiepte laten de resultaten zien dat de afslag niet noemenswaardig verandert als de waterdiepte aan de rand van het model groter wordt. Dit betekent dat in het schaalmodel de rand van het model niet in te diep water lag. Als de rand echter ondieper wordt gelegd neemt de afslag toe omdat de randvoorwaarde niet in ondiep water gelegd kan worden vanwege de toegepaste theorie die uitgaat van "intermediate depth" (tussen diep en ondiep water in).

XBeach blijkt nauwelijks gevoelig voor de grootte van de korreldiameter. Het DurosTA model kent deze gevoeligheid wel via een ingebouwde factor F_d . Als deze factor in Xbeach toegevoegd wordt, laat ook XBeach dezelfde trend zien als DurosTA. Deze implementatie is niet bedoeld als een "quick-fix" om het model het juiste gedrag te laten vertonen maar geeft aanleiding tot nader onderzoek naar de kleine gevoeligheid voor de korreldiameter in de sedimenttransport-formules.

De verschillen tussen de trends op prototype en laboratoriumschaal geven aanleiding voor bepalen van een robuuste set dimensieloze parameters op basis van zowel veld- als laboratoriumproeven, en het reduceren van het aantal parameters dat door een gebruiker veranderd kan worden.

2 Analyse fysische betekenis golf enveloppe in XBeach 1D;

In een eerder studie (Deltares, 2013) zijn berekeningen gemaakt om de hydraulische condities ter plaatse van een strandpaviljoen te bepalen. Als indicator hiervoor is gebruik gemaakt van een golfenveloppe, gedefinieerd als het laagste en het hoogste niveau van het wateroppervlak tijdens een berekening als een optelling van de maximale golfamplitude en de minimale/maximale waterstand gedurende een bepaalde periode (bijv. 1 uur). In die studie is geen nadere aandacht gegeven aan de condities op de waterkering waar ogenschijnlijk overslag leek plaats te vinden, wat nadere interpretatie noodzakelijk maakte.

Ten opzichte van de in Deltares (2013) berekende waarde, wordt de waterstandsomhullende verkleind als de offshore diepte op de juiste plaats (NAP -20 m) wordt gekozen en er een voor de 1D raai modus een consistente randvoorwaarde van "geen richtingsverspreiding" wordt toegepast. Als het model uitgebreid wordt naar 2D, zijn richtingsgespreide golven wel mogelijk, treedt er minder overdracht naar de lange golven op, wat resulteert in een verdere reductie van de waterstandsomhullende. Deze resultaten sluiten beter aan bij het beeld van het al dan niet daadwerkelijk optreden van overslag over de waterkering.

Als XBeach-NH, een andere model modus waarin de korte golven expliciet zijn beschreven wordt toegepast, dan wordt de maximale waterstand verder verlaagd. Vooral de gemiddelde waterstand ter plaatse van de berm waar de strandpaviljoens is lager als XBeach-NH wordt gebruikt.

De waterstandsomhullende is niet hetzelfde als de rms- of significante golfhoogte die over het algemeen lager is. De berekende significante lange golfhoogten bij het duin komen overeen met gemeten verhoudingen ten opzichte van de offshore golfhoogte van ongeveer 15-20% zoals gemeten op koraalriffen (die een vergelijkbaar bermprofiel hebben), Noordzeestranden, een Atlantisch Frans en Engels strand met hoge golfcondities. De door Xbeach berekende waarden zijn daarom aannemelijk maar zouden in het vervolg nader vergeleken moeten worden met gemeten data.

Aanbevelingen op basis van de uitwerkingen in deze Taak zijn het duiden van de verschillen tussen een 1D en 2D aanpak en het het verdisconteren van 2D richtings spreiding in een 1D raamodel, het nader analyseren van de golfdynamica, en met name de lange golfopwekking en golfopzet op flauwe voorlanden en –bermen. Deze analyse kan gebruik maken van wereldwijd beschikbare velddata waarvoor XBeach nog niet gevalideerd is.

3 Verkenning effect van duinafslag op golfoverslag.

Aan de hand van simulaties met DurosTA en PC-Overslag, XBSB en XBNH zijn verschillen en gevoeligheden onderzocht voor overslag berekeningen op een case-study duin-in-dijk oplossing in een geschematiseerd profiel. De grootste verschillen in het berekende overslagdebiet zijn tussen de resultaten van de combinatie van DurosTA en PC-overslag, ten opzichte van de resultaten van XBSB en XBNH. In het specifieke geval van deze case-study lijkt het overslagdebiet van DurosTA–PC–Overslag laag uit te vallen ten opzichte van andere schattingen van overslag op basis van empirische formules. De berekende overslagdebieten van XBSB en XBNH komen in dit geval daarentegen kwalitatief goed overeen met deze empirische schattingen.

Het verschil in berekend maximum overslagdebiet tussen DurosTA–PC–Overslag en de XBeach modellen wordt voor het grootste deel bepaald door het ontbreken van het laag-frequente (infragravity) deel van het golfspectrum in het in DurosTA gehanteerde golfvoorplantingsmodel, wat een onderschatting geeft van de totale golfhoogte en de spectrale golfperiode $T_{m-1,0}$ als invoer voor PC–Overslag. Deze gevoeligheid voor het niet-meenemen van het laag-frequente deel van het golfspectrum ($O(400-7000\%)$) is groter dan de gevoeligheid voor verschillen in morfologische ontwikkeling ($O(10-50\%)$) en de gevoeligheid voor de keuze van hydrodynamisch en overslag model (PC–Overslag, XBSB, XBNH; $O(50-200\%)$).

Daarnaast is een belangrijk verschil in relatie tot de duur van overslag over de dijk dat in de combinatie DurosTA–PC–Overslag, PC–Overslag pas overslag berekent op het moment dat er in DurosTA voldoende erosie heeft plaatsgevonden dat het dijktalud rechtstreeks wordt belast. In de XBeach modellen vindt overslag al over het zandige profiel plaats (welke doorloopt over de dijk) voordat de erosie de teen van de dijk bereikt heeft.

Ten opzichte van de vigerende ontwerpmethodiek voor hybride constructies (aansturing PC-overslagmodel met uitvoer DurosTA-model nabij de teen van de dijk) moet er zeker voor

dergelijke lage constructies rekening worden gehouden met een toename van de hoeveelheid overslag en dus een overschrijding van de oorspronkelijk gehanteerde ontwerpnorm (veelal 1 l/s/m^1).

De studie heeft kwalitatief laten zien dat XBSB en XBNH in staat zijn om overslag over een dijk-in-duin profiel te berekenen. Vergelijking met veld- en labdata van hydrodynamica, morfologische veranderingen en overslagdebieten op echte hybride keringen is echter nodig om deze modellen verder te valideren, en verdere gevoeligheidsanalyses zijn nodig om inzicht te krijgen in het effect van modelparameters (e.g., bodemruwheid) op berekende overslagdebieten.

5.3 Aanbevelingen

De aanbevelingen uit deze studie zijn:

- Stel een Plan van Aanpak op waarin de stappen om van XBeach een volwaardig instrument voor duinwaterkeringtoetsing te maken worden uitgewerkt.
- Analyseer de Deltagoot laboratoriumproeven van Van Gent et al. (2008) om te onderzoeken waarom de data een veel kleiner dan theoretisch verwacht verband tussen de gemeten lange golfhoogte en de opgelegde periode laat zien. Dit komt mogelijk omdat er een beperking in de slag van het schot is opgetreden. Dit kan consequentie hebben voor de toetsregel Duros+ waarin op basis van de metingen het effect van de golfperiode op de duinafslag is verwerkt die wellicht wordt onderschat.
- Doe nader onderzoek naar de kleine gevoeligheid voor de korreldiameter in de sedimenttransportformules in XBeach. De eerste numerieke resultaten uit het XBeach-JIP project kunnen hiervoor als basis worden gebruikt maar zullen ook laboratoriumproeven vergen, met name om het gedrag van de onderwateroever en het duinerosievolume als functie van de korreldiameter te onderzoeken.
- Doe onderzoek naar de toepasbaarheid van de schalingsrelaties en de verschillen tussen de theoretische relaties achterliggend aan de schaalproeven en de numerieke relaties volgend uit de modellen.
- De verschillen tussen de trends op prototype en laboratoriumschaal geven aanleiding voor het bepalen van een robuuste set dimensie-loze parameters op basis van zowel veld- als laboratoriumproeven, en het reduceren van het aantal parameters dat door een gebruiker veranderd kan worden.
- Onderzoek en duidt de verschillen tussen 1D en 2D toepassingen met XBeach.
- Verdisconteert waar mogelijk 2D effecten in 1D toepassingen, zoals het effect van richtingsspreiding en langsstroming.
- Geef aanbevelingen voor de correcte toepassing van randvoorwaarden door gebruikers.
- Maak XBeach geschikt voor een efficiënte toepassing in complexe kustsystemen zoals zeegaten met buitendelta. Hierbij dient onderzocht te worden hoe lange en korte golftrandvoorwaarden het best opgelegd kunnen worden.
- Doe verdere analyse van de golfdynamica, met name naar de lange golfopwekking en de golfopzetover flauwe voorlanden en bermen.
- Valideer XBeach aan de hand van wereldwijd beschikbare velddata waarvoor XBeach niet gevalideerd is.
- Valideer XBeach op basis van veld- en labdata van hydrodynamica, morfologische veranderingen en overslagdebieten op hybride keringen .
- Doe verdere gevoeligheidsanalyses om inzicht te krijgen in het effect van modelparameters (e.g., bodemruwheid) op berekende overslagdebieten.

6 Referenties

- Arcadis, 2012. Ontwerp-projectplan kustverdediging Katwijk. Technisch rapport 076520391: A.4 - Definitief
- Arcadis. 2013. Review advies strandpaviljoens. Memo C03041.003101.0100 met kenmerk /077234238:0.1 d.d. 7 augustus 2103.
- Arcadis, Deltares, HKV. (2017). POV Waddenzeedijken - Effectiviteit voorlanden HR; Onderzoeksrapportage Fase B. Eindrapportage d.d. 31 maart 2017.
- Arcadis, Deltares, HKV. (2018). POV Waddenzeedijken - Effectiviteit voorlanden HR; Onderzoeksrapportage Fase C. Eindrapportage d.d. 26 maart 2018.
- Beetham Edward, Paul Kench, Joanne O'Callaghan, Stephane Popinet. Wave transformation and shoreline water level on Funafuti Atoll, Tuvalu. *Journal of Geophysical Research. Oceans*, Wiley-Blackwell, 2016, 121 (1), pp.311-326
- De Bakker, A., 2016. Infragravity wave dynamics in shallow water. Ph.D. Thesis, U. Utrecht.
- Deltares. 2008. *Bepaling Beschermingscontouren Kustplaatsen; Resultaten voor de zeven Hollandse kustplaatsen*. Deltares (H5016). Kennisalliantie met TU Delft en Alkyon.
- Deltares, 2008, SBW Duinen2-Ontwikkeltraject. Eerste aanzet tot de ontwikkeling van het 2011 Duintoetsinstrumentarium. Rapport H5019.20
- Deltares. 2013. *Afslag- en golfploopberekeningen RSP 10125*. Deltares memo 1208147-000-HYE-0002, 20 maart 2013.
- Deltares, 2015. XBeach 1D-Probabilistic model: ADIS, Settings, Model uncertainty and Graphical User Interface. Tec. Rep: 1209436-002.
- Deltares, 2018, XBeach User Manual.
- Hedges, T.S. & Reis, M.T. (1998). Random Wave Overtopping Of Simple Seawalls: a New Regression Model, *Proc. ICE Water, Maritime & Energy*, Vol. 130, pp. 1-10.
- Inch, K., M. Davidson, G. Masselink, P. Russell, 2017, Observations of nearshore infragravity wave dynamics under high energy swell and wind-wave conditions, *Continental Shelf Research*, Volume 138, Pages 19-31, ISSN 0278-4343, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2017.02.010>.
- Lashley, C. H., 2018. Roelvink, D., van Dongeren, A., Buckley, M. L., Lowe, R. J. *Nonhydrostatic and surfbeat model predictions of extreme wave run-up in fringing reef environments*. *Coastal Engineering* 137 (2018) 11–27
- Longuet-Higgins, M. S., and R.W. Stewart, Radiation stress and mass transport in gravity waves with application to "surf-beats," *J. Fluid Mech.*, 8, 565– 583, 1962.

Longuet-Higgins, M. S., and R. W. Stewart, Radiation stress in water waves, a physical discussion with applications, *Deep Sea Res.*, 11, 529–563, 1964.

Matias, A., Williams, J., Masselink, G. and Ferreira, Ó., 2012. Overwash threshold for gravel barriers. *Coastal Engineering*, 63, 48-61.

Pomeroy, A., Lowe, R., Symonds, G., Van Dongeren, A., Moore, C., 2012. The dynamics of infragravity wave transformation over a fringing reef. *J. Geophys. Res.* 117, C11022. doi:10.1029/2012JC008310.

Roelvink, D., McCall, R., Mehvar, S., Nederhoff, K., Dastgheib, A., 2018. Improving predictions of swash dynamics in XBeach: The role of groupiness and incident-band runup. *Coastal Engineering*, 134, 103–123, doi: 10.1016/j.coastaleng.2017.07.004.

Ruessink, B.G., 2010. Observations of turbulence within a natural surf zone. *J. of Phys. Oc.*, Vol. 40, doi: 10.1175/2010JPO4466.1.

Steezel, H.J., 1993. Cross-shore transport during storm surges. Ph.D. Thesis Delft University of Technology, ISBN 9090063455.

Stockdon, H. F., Holman, R. A., Howd, P. A., and Junior, A. H. S. (2005). Empirical parameterization of setup, swash and runup. *Coastal Engineering*, 53:573–588.

Tanaka, H., Suntoyo, and Nagasawa, T., 2002. Sediment intrusion into Gamo Lagoon by wave overtopping. In: *Proceedings 28th Coastal Engineering Conference (Cardiff, Wales, ASCE)*, pp. 823–835.

TAW, 2002. Technisch rapport golfoploop en golfoverslag bij dijken.

Van de Graaff (1976). Van de Graaff, J. (1976). Scale series dune erosion. Technical Report M1263 part I, Delft Hydraulics

Van Gent, M.R.A., Van Thiel de Vries, J.S.M., Coeveld, E.M., De Vroeg, J.H., Van de Graaff, J., 2008. Large-scale dune erosion tests to study the effect of wave periods. *Coastal Engineering*. doi:10.1016/j.coastaleng.2008.04.003.

Van Thiel de Vries, J. S. M. (2009). Dune erosion during storm surges. PhD thesis, Delft University of Technology

Vellinga, P., (1986), Beach and dune erosion during storm surges. Ph.D. Thesis, Delft University of Technology; also: WL | Delft Hydraulics report no. 372, December 1986.

Vellinga, P. (1981). Schaalserie Duinafslag. Tekst en tabellen en Figuren. Verslag Modelonderzoek. Delft Hydraulics M1263. Deel IIA.

Vetter, O., J. M. Becker, and M. A. Merrifield (2010), *Wave setup over a Pacific Island fringing reef*, *J. Geophys. Res.*, 115, C12066, doi:10.1029/2010JC006455