

Stormgedreven morfodynamiek van De Slufter, Texel

**Modelstudie naar het effect van het loslaten van de monding
op de kustveiligheid en morfodynamiek**



Stormgedreven morfodynamiek van De Slufter, Texel

**Modelstudie naar het effect van het loslaten van de monding
op de kustveiligheid en morfodynamiek**

ir. A.A. van Rooijen
dr.ir. J.S.M. van Thiel de Vries

1207993-000

Titel

Stormgedreven morfodynamiek van De Slufter, Texel

Opdrachtgever

Hoogheemraadschap
Hollands Noorderkwartier

Project

1207993-000

Kenmerk

1207993-000-ZKS-0010

Pagina's

60

Trefwoorden

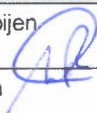
Slufter, Texel, XBeach, gebiedsmodel, kustveiligheid, morfodynamiek.

Samenvatting

De Slufter op Texel heeft een hoge landschappelijke en natuurlijke waarde. Hoewel de Slufter relatief oud is, en meer dan een eeuw bestaat, is het een dynamisch gebied dat constant verandert. Voor kustveiligheidsredenen wordt regelmatig ingegrepen in de natuurlijke dynamiek door middel van het verleggen van de Sluftermond. Momenteel wordt overwogen om deze ingrepen te stoppen, en daarmee de natuurlijke dynamiek te herstellen.

In deze studie is, in opdracht van het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, een (tweedimensionaal) gebiedsmodel voor de Slufter opgezet om inzicht te krijgen in het effect van het loslaten van de Sluftermond. Hierbij spelen twee aspecten een rol. Enerzijds is dit de waterveiligheid in relatie tot de achterliggende zanddijk, en anderzijds de bodemveranderingen in de Sluftervallei zelf, welke een belangrijke randvoorwaarde vormen voor de ontwikkeling van de natuurwaarde in het gebied. De huidige studie is een aanvulling op een eerdere studie (Van Thiel de Vries, 2011) waarin verkennende berekeningen met een (eendimensionaal) profielmodel gemaakt zijn.

Modelsimulaties zijn uitgevoerd voor de huidige situatie en voor een aantal hypothetische situaties met een andere geometrie (locatie en breedte) van de Sluftermond. De resultaten laten zien dat de zanddijk voor alle berekende scenario's voldoende volume bevat om een normatieve storm te kunnen weerstaan. Er kan dan ook geconcludeerd worden dat in geen van de doorgekende scenario's een ander beheer en onderhoud van de Sluftermond lijkt te leiden tot een groter waterveiligheidsprobleem voor de zanddijk in vergelijking met de huidige situatie. Daarnaast zijn enkele simulaties met verschillende overschrijdingsfrequenties (1/4000, 1/10 en 1/1) en een springvloedscenario uitgevoerd om inzicht te krijgen in de drijvende processen voor de ontwikkeling van de Slufter. De resultaten van deze berekeningen laten zien dat stormen die relatief vaker voorkomen (i.e. met een kans van voorkomen van 1/10 en 1/1 per jaar) het relatief grootste effect hebben op de algehele morfologie van de Slufter.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	jan. 2014	ir. A.A. van Rooijen		dr.ir. A.R. van Dongeren		drs. F.M.J. Hoozemans	
		dr.ir. J.S.M. van Thiel de Vries					

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Context	1
1.2 Kustveiligheid vs. natuurlijke dynamiek	1
1.3 Eerdere studie	2
1.4 Doel en aanpak	2
1.5 Leeswijzer	3
2 Modelopzet	5
2.1 Inleiding	5
2.2 Rekengrid en modelbodem	5
2.3 Hydraulische randvoorwaarden	8
2.4 Modelinstellingen	9
2.5 Scenario's	10
2.5.1 Scenario's met betrekking tot kustveiligheid	10
2.5.2 Scenario's met betrekking tot de morfodynamiek van de Slufter	12
3 Kustveiligheid	13
3.1 Huidige situatie (referentiescenario)	13
3.2 Scenario: brede Sluftermonding	19
3.3 Scenario: noordelijker gelegen Sluftermonding	21
3.4 Effect van de golfrichting	22
3.5 Situatie zonder duinen	24
3.6 Grensprofiel	26
4 Morfodynamiek van de Slufter	31
4.1 Inleiding	31
4.2 Morfodynamiek van de Sluftervallei	31
4.3 Morfodynamiek van de Sluftermonding	33
4.4 Sedimentflux door de Sluftermonding	39
5 Conclusies en reflectie	43
5.1 Kustveiligheid	43
5.2 Morfodynamiek en ecologie	44
5.3 Modelleren met XBeach	45
Bijlage(n)	
Referenties	47
A Bepaling van hydraulische randvoorwaarden	A-1
A.1 Maatgevende (normatieve) condities	A-1
A.2 Overige stormscenario's	A-1
A.3 Springtijscenario	A-4
B Inundatiekaarten per modelscenario	B-1
B.1 1/4000 per jaar stormscenario's	B-1

B.2 Overige condities

B-3

C Bodemschuifspanningskaarten

C-1

C.1 1/4000 per jaar stormscenario's

C-1

C.2 Overige condities

C-2

1 Inleiding

1.1 Context

Een sluffer is een duinvallei die in verbinding staat met zee en die regelmatig (bijv. een aantal keer per jaar) door de zee overspoeld wordt. De Slufter op Texel is een van de weinige sluffers in Nederland; naast o.a. Het Zwin in Zeeuws-Vlaanderen (Eysink et al., 1992), en heeft een hoge landschappelijke en natuurlijke waarde. De oppervlakte van de Texelse sluffervallei is circa 400 ha waarvan het grootste gedeelte (circa 270 ha) een bodemniveau tussen NAP +0,8 m en +1,0 m heeft. Dit gebied loopt regelmatig (tijdens storm- of springvloed) onder water. Ongeveer 50 ha van de sluffervallei heeft een niveau van NAP +2,0 m of hoger, en bestaat uit kleine duinen en duinvalleien. De sluffervallei staat in verbinding met de zee via een geulenstelsel dat een totale oppervlakte heeft van circa 80 ha.

Hoewel de Slufter relatief oud is en meer dan een eeuw bestaat, is het een dynamisch gebied dat continue verandert. Zo heeft de monding van de Sluftergeul de neiging zich in noordwaartse richting te verplaatsen (gemiddeld ongeveer 100 meter per jaar tussen 1991 en 1998; Durieux, 2003). Sinds 1973 wordt het meest zeewaartse deel van de Sluftergeul regelmatig in zuidelijke richting verlegd zodat de monding op een vaste plek blijft (rond kilometerpaal 25), en een constante breedte van 300 à 400 meter behoudt. De reden hiervoor is dat men verwacht dat, in geval van een bredere en/of meer noordelijk gelegen monding, de golfbelasting op de achterliggende zanddijk tijdens een maatgevende storm mogelijk te groot kan worden. Tot op heden is deze teruglegging van de geul in 1973, 1978, 1983, 1987, 1991, 1998, 2005, 2009 en 2013 uitgevoerd. Voordat men begon met deze ingrepen, kon de Sluftergeul zich vrij bewegen en was de breedte van de Sluftermondung variabel. De natuur zorgde ervoor dat de Sluftergeul in noordelijke richting migreerde totdat de geul een kortere verbinding kon maken met zee, en de gevormde spit ten zuiden van de monding doorbrak. Dit laatste gebeurde voornamelijk tijdens stormcondities. De breedte van de Sluftermondung bedroeg in deze periode regelmatig meer dan 400 meter (Durieux, 2003).

1.2 Kustveiligheid vs. natuurlijke dynamiek

De voornaamste reden voor het kunstmatig handhaven van de locatie en breedte van de Sluftermondung is dat de golfbelasting op de achterliggende (oostelijk gelegen) waterkering, een zanddijk, te groot kan worden. Hierdoor kan mogelijk niet worden voldaan aan de wettelijke veiligheidsnorm tegen overstroming. Tegelijkertijd is de Slufter een dynamisch natuurgebied, en leeft de wens om de natuurlijke dynamiek zo min mogelijk te verstoren.

Het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK) is verantwoordelijk voor het beheer, onderhoud en de wettelijke toetsing van de waterkeringen op Texel. De duinen en oostelijk gelegen zanddijk die samen de Slufter omsluiten zijn onderdeel van de primaire waterkering (Dijkkring 5). In de derde wettelijke toetsingsronde voor duinwaterkeringen (Koster Engineering, 2010), is de toetsing voor het Sluftergebied uitgevoerd met de meest recente versie van WINKUST (2007) dat het eendimensionale (profiel-) model DUROS+ als rekenhart heeft (Van Gent et al., 2008). Het resultaat van de laatste toetsingsronde is dat de beschouwde raaien ter plaatse van de Slufter over het algemeen de beoordeling "goed" hebben gekregen. Echter, voor een aantal raaien kon geen beoordeling worden gegeven, omdat de aannamen in WINKUST met betrekking tot het kustprofiel daar niet golden. Om die reden is voor die raaien een geavanceerde toetsing toegepast, en zijn enkele eendimensionale simulaties uitgevoerd met het morfodynamische model XBeach (Van Thiel de Vries, 2011). Uit deze berekeningen bleek dat de waterkering voldoende veilig is.

Echter, zowel in de toetsing met WINKUST als in de XBeach berekeningen is in essentie uitgegaan van een lange rechte kust, terwijl het gebied in werkelijkheid ruimtelijk sterk varieert.

Momenteel overweegt het Hoogheemraadschap om de natuurlijke dynamiek in locatie en breedte van de Sluftermonding te herstellen door te stoppen met de ingrepen. Deze (mogelijke) beleidsverandering kan niet alleen invloed hebben op de veiligheid tegen overstromen, maar ook op de morfodynamiek van het gebied. Dit laatste is een belangrijke randvoorwaarde voor de ontwikkeling van de landschaps- en natuurwaarde in de Slufter zelf, aangezien de Sluftervallei door het 'loslaten' van de monding in theorie volledig onderwater zou kunnen lopen, dan wel zou kunnen verzanden. Het effect van de veranderde morfodynamiek op de ecologie valt echter buiten deze studie, en is onderwerp van een parallelle studie (Balke & Arentz, 2013).

1.3 Eerdere studie

In een eerste verkennende studie (Van Thiel de Vries, 2011) is het effect van een dynamische Sluftermonding op de waterveiligheid onderzocht met behulp van (eendimensionale) profielberekeningen met het proces-gebaseerde stormimpactmodel XBeach (Roelvink et al., 2009). De aanleiding voor deze studie was de in paragraaf 1.2 genoemde toetsing voor waterkeringen, waaruit bleek dat een aantal kustraden niet beoordeeld kon worden. Op basis van de modelberekeningen lijkt een bredere Sluftermonding en/of een andere Slufterlocatie niet direct een probleem op te leveren voor de waterveiligheid. De berekende afslagvolumes met het 1D XBeach-model zijn minimaal een factor twee lager dan de beschikbare hoeveelheid zand in de zanddijk boven de maximale stormopzet. De verwachting is dat een vergelijkbaar resultaat wordt gevonden op basis van WINKUST-berekeningen al zijn deze voor een complex gebied als de Slufter minder betrouwbaar.

Gegeven de complexe geometrie van de Slufter is er behoefte om mogelijke effecten van een bredere dan wel andere locatie van de monding nader te onderzoeken. Het uitgangspunt hierbij is om een (tweedimensionaal) gebiedsmodel van de Slufter te maken, waarin de locatie en breedte van de Sluftermonding gevarieerd kunnen worden. Een tweedimensionale aanpak is beter in overeenstemming met de verwachte fysica in het complexe gebied.

1.4 Doel en aanpak

Het doel van deze studie is om inzicht te krijgen in de doorwerking van een ander beleid met betrekking tot beheer en onderhoud van de Sluftermonding (i.e. het loslaten van de monding) op:

- De te verwachten stormimpact op de achterliggende zanddijk (kustveiligheid),
- De te verwachten bodemveranderingen in de Sluftervallei zelf (morfodynamiek).

Hierbij vormen de te verwachten bodemveranderingen een belangrijke randvoorwaarde voor de ontwikkeling van de landschaps- en natuurwaarde in het gebied.

De morfologische impact van een ander beheer- en onderhoudsbeleid voor de Sluftermonding wordt onderzocht door een (tweedimensionaal) gebiedsmodel op te zetten van de Slufter (kustvak 6 tussen raai 2340 en raai 3041). Vervolgens zijn een aantal (storm-) scenario's en bodemconfiguraties opgezet die inzicht geven in de waterveiligheid en de morfodynamiek van de Slufter.

In de modellering wordt gebruik gemaakt van de XBeach modelsoftware die ontwikkeld is om de impact van stormen op zandige kusten door te rekenen (Roelvink et al., 2009).

In deze studie geldt als uitgangspunt dat de morfodynamiek van het Sluftergebied stormgedreven is. Dit wordt beschouwd als een valide uitgangspunt, aangezien de Slufter niet elk getij onderwater loopt, maar alleen tijdens springtij en stormvloeden.

1.5 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 wordt de opzet van het gebiedsmodel beschreven, en wordt een overzicht gegeven van de verschillende modelscenario's. Deze scenario's zijn in een werksessie met HHNK (Petra Goessen) vastgesteld en zijn uit te splitsen naar berekeningen die inzicht geven in het effect van een andere geometrie (locatie en breedte) van de Sluftermonding op de waterveiligheid (Hoofdstuk 3), en naar berekeningen die inzicht geven in de morfodynamiek van de Sluftervallei (Hoofdstuk 4). Het rapport eindigt met conclusies (Hoofdstuk 5).

2 Modelopzet

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de opzet van het XBeach gebiedsmodel voor de Slufter beschreven. Achtereenvolgens worden het rekengrid, de modelbodem, de hydraulische randvoorwaarden en de modelinstellingen besproken. Ten slotte worden de modelscenario's beschreven.

XBeach is een morfologisch (numeriek) computermodel dat is ontwikkeld om de impact van stormen op zandige kusten (inclusief harde elementen) te berekenen. De software is oorspronkelijk ontwikkeld in opdracht van het United States Army Corps of Engineers naar aanleiding van de verwoestende effecten van orkanen op de kust van de Verenigde Staten in 2004 en 2005. In de afgelopen jaren is de software binnen SBW¹ Duinen later WT² verder ontwikkeld met als doel tot een geavanceerd duintoetsinstrument te komen dat in complexe situaties (zoals bij de Slufter) toegepast kan worden. De belangrijkste modelkenmerken zijn:

- Het model is tijdsafhankelijk tot op de tijdschaal van golfgroepen: getij, stormopzet en lange golven die opgewekt worden door de golfgroepen worden expliciet beschreven;
- Het model heeft de mogelijkheid om de kustlangsrichting mee te nemen (hierdoor wordt het mogelijk om een gebied in plaats van een enkel profiel te onderzoeken);
- Dicht bij het duin worden de waterbeweging en de daaraan gekoppelde fysische processen van sediment transport, duinafslag en bodemverandering nauwkeurig opgelost (door gebruik te maken van het zogenaamde surfbeat-concept).

Voor de huidige studie is gebruikt gemaakt van de meest recente release-versie van XBeach (revisie 3376, 2012). Deze versie is eerst uitvoerig getest voor een groot aantal testcases in een automatisch testbed. Voor een meer gedetailleerde beschrijving over de modelfilosofie en -formuleringen wordt verwezen naar Roelvink et al. (2009).

2.2 Rekengrid en modelbodem

Het modeldomein voor de studie bestaat ongeveer 11 km in kustlangs- en 7 km in kustdwarsrichting (zie Figuur 2.1). Dit is een relatief groot modeldomein (in relatie tot de meeste XBeach toepassingen), wat resulteert in veel rekenpunten. Het rekengrid is in verband met de rekentijd zo grof mogelijk gehouden waarbij het geoptimaliseerd is aan de hand van de volgende eisen:

- In het natte domein moet voldoende resolutie zijn om de lange-golfbeweging nauwkeurig op te kunnen lossen.
- Aan de kustzijde moet de resolutie voldoende zijn om de duinen en de erosie ervan nauwkeurig weer te kunnen geven.
- In de Sluftervallei moet de resolutie voldoende zijn om de geometrie, inclusief geulen, goed weer te kunnen geven.
- In kustlangsrichting moet voldoende resolutie zijn om variaties in topografie goed mee te kunnen nemen.

Het uiteindelijke rekengrid bestaat uit 538 bij 548 rekenpunten (resp. in kustdwars- en kustlangsrichting). De gridresolutie in kustlangsrichting varieert van 10 m in de Sluftervallei tot 50 m nabij de laterale modelranden. In kustdwarsrichting varieert de gridresolutie van 5 m ter plaatse van de duinen tot ongeveer 35 m bij de buitengaatse modelrand.

¹ Sterkte & Belasting Waterkeringen

² Wettelijk Toetsinstrumentarium

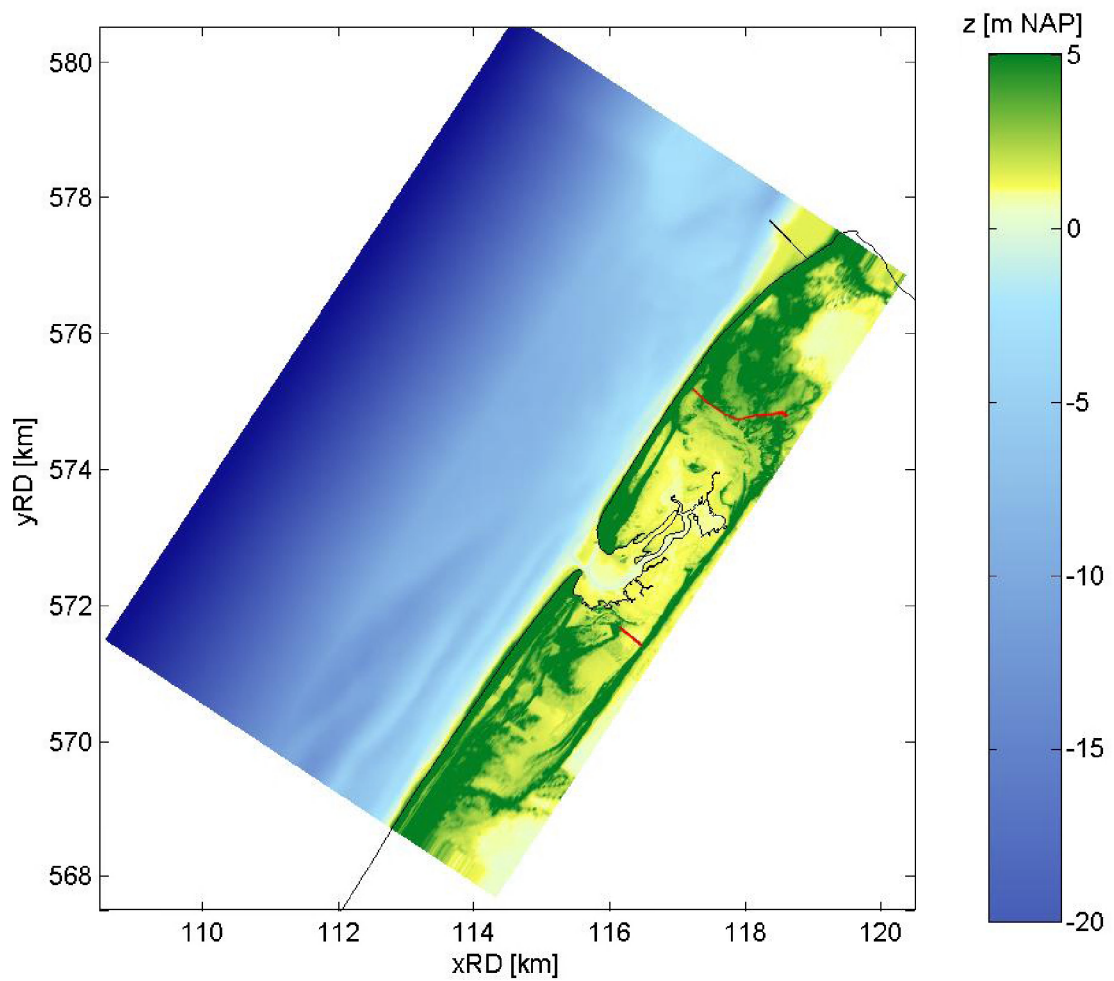
De modelbodem is gebaseerd op een gecombineerde dataset bestaande uit het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN; 5 m resolutie), jaarlijkse kustprofielmetingen (JarKus) en vaklodingen. Voor elk gridpunt is de meest recent beschikbare data gebruikt. Omdat de drie datasets niet noodzakelijk op het zelfde tijdstip (jaar) zijn ingewonnen kunnen er (kleine) discontinuïteiten in de modelbodem ontstaan. Om dit te verhelpen is de bodem op deze locaties in beperkte mate geïnterpoleerd met behulp van het softwareprogramma QUICKIN (Deltares, 2013). De uiteindelijke modelbodem is weergegeven in Figuur 2.1. Een belangrijke kanttekening hierbij is dat het AHN alleen de droge delen van de Slufter nauwkeurig weergeeft. Hierdoor vindt er mogelijke en onderschatting van de geuldiepte plaats (in de huidige modelbodem varieert de geulbodem van NAP -0.5 m tot NAP 0 m). Naar verwachting levert deze onderschatting echter geen problemen op voor de modelsimulaties, aangezien gerekend zal worden met een relatief hoge waterstand en golfhoogte (zie paragraaf 2.3).

XBeach heeft de mogelijkheid om niet erodeerbare (harde) elementen te specificeren. Op basis van informatie van de lokale beheerders en een veldbezoek is besloten om twee niet-erodeerbare elementen in de modelbodem op te nemen. Het betreft de volgende twee elementen (met rood weergegeven in Figuur 2.1):

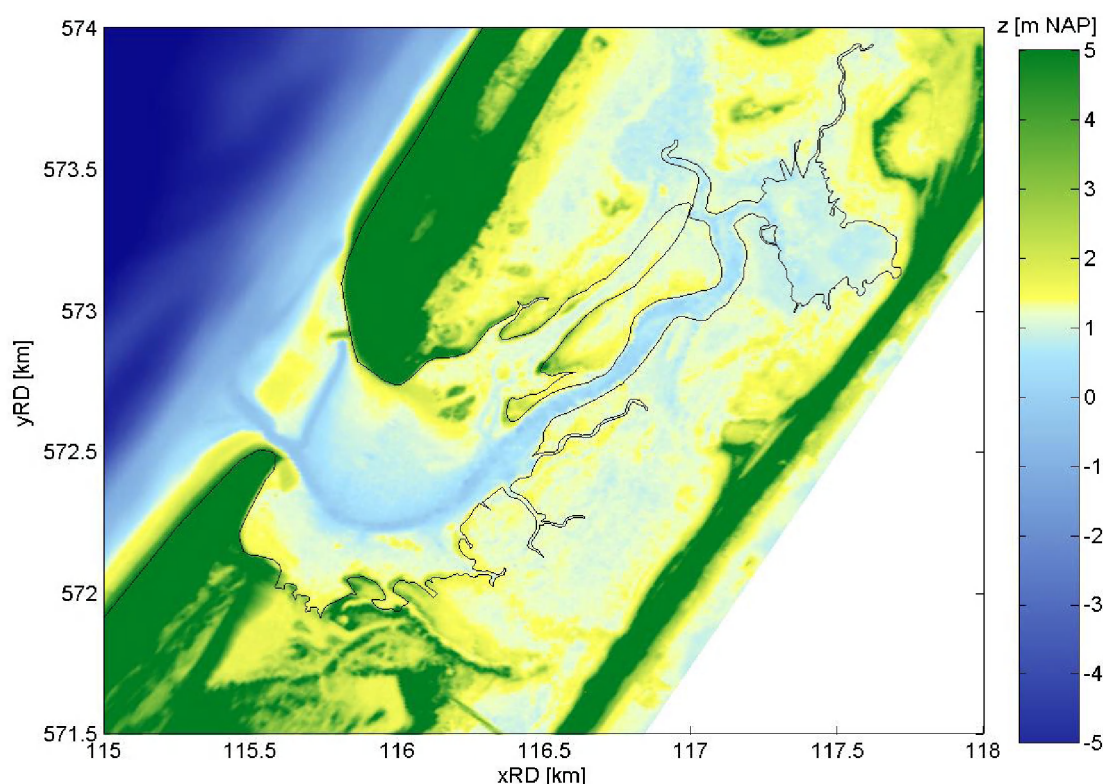
- Een kleine dijk van ongeveer 400 m lang net ten zuiden van de Sluftermond. De dijk loopt dwars op de zanddijk tot aan de duinen en de kruin ligt op ongeveer NAP +4 m.
- Een asfaltweg (Krimweg) ongeveer 3 km ten noorden van de Sluftermond. De weg loopt van De Cocksdorp door het duin tot aan het strand. De hoogteligging van de weg varieert van NAP +3 tot +6 m.

Door de dijk en de weg mee te nemen als harde elementen kunnen deze niet eroderen en kan er geen doorbraak (bres) ontstaan. Wanneer de waterstand hoog genoeg is kunnen de elementen echter wel overstromen en kan er sediment op worden afgezet.

In Figuur 2.2 is de bodemligging weergegeven, maar nu ingezoomd op de Slufter. Ook is de kleurenschaal aangepast t.o.v. Figuur 2.1, zodat de geulen beter zichtbaar zijn (het onderscheid tussen nat en droog ligt op ongeveer springtijniveau, i.e. NAP +0.9 m). Bij de monding van de Slufter is duidelijk te zien dat deze bodemligging van net na een geulverlegging is. Dit betreft hoogstwaarschijnlijk de ingreep in 2005, aangezien het Actueel Hoogtebestand Nederland in dat jaar is uitgegeven. De oorspronkelijke geul, die langs de noordelijke duinkop loopt, is afgedamd met zand en een nieuwe geul is langs de zuidelijke duinkop aangelegd. Deze bodemconfiguratie komt sterk overeen met de (huidige) situatie bij de Sluftermonding, na de meest recente teruglegging in juni 2013.



Figuur 2.1 Bodemligging gebruikt in het model voor de huidige studie (in meter t.o.v. NAP), gebaseerd op een combinatie van vaklodingen-, JarKus- en AHN-data. In rood zijn de twee harde (niet-erodeerbare) elementen weergegeven. De zwarte contourlijn is de kustlijn gebaseerd op de meest recente satellietfoto beschikbaar in Google Earth (jaar van opname: 2005).



Figuur 2.2 Bodemligging zoals gebruikt in het model, ingezoomd op de Slufter. Merk op dat de kleurschaal niet gelijk is aan Figuur 2.1 (uitleg in hoofdstuk). De zwarte contourlijn is de kustlijn gebaseerd op de meest recente satellietfoto beschikbaar in Google Earth (jaar van opname: 2005).

2.3 Hydraulische randvoorwaarden

De hydraulische randvoorwaarden worden opgelegd aan de zeewaartse modelrand, zijn tijdsafhankelijk en bestaan uit twee delen: waterstand (getij en stormopzet) en golven.

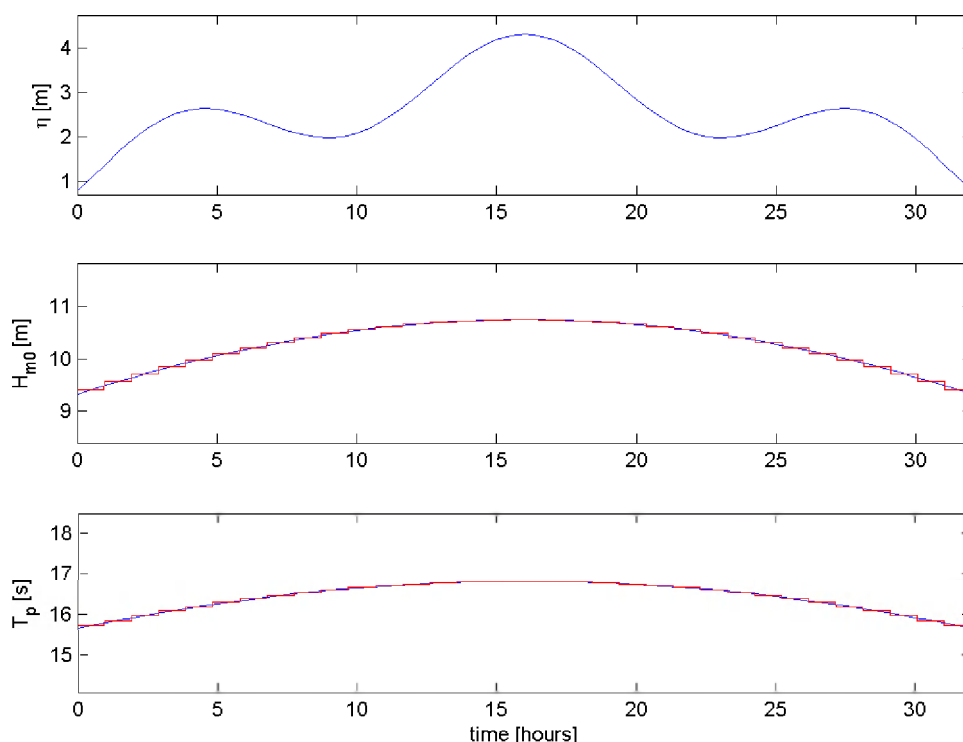
De maximale (piek) waterstanden en golfcondities voor de normatieve berekeningen (waarbij wordt uitgegaan van een waterstand met overschrijdingsfrequentie van 1/4000 jaar, in overeenstemming met de wettelijke norm voor deze dijkkring) zijn verkregen uit het Hydraulisch Randvoorwaardenboek (HR, 2006; Rijkswaterstaat, 2007). De maximale waterstanden en golfcondities voor hoger frequente stormen (1/10 per jaar, 1/1 per jaar en springtij) zijn bepaald met behulp van extreme-waarden-analyse (peak-over-threshold methode), waarbij gebruik gemaakt is van 34 jaar aan golfdata gemeten in station Eierlandse Gat (1979-2013), dat ongeveer 17 km ten NW van de Slufter ligt. Deze analyse is uitgewerkt in Bijlage A. De resulterende maximale waterstand, golfhoogte en golfpiekperiode voor de verschillende overschrijdingsfrequenties zijn weergegeven in Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Hydraulische randvoorwaarden behorende bij verschillende stormscenario's.

Hydraul. RVW	η [m NAP]	H_{sig} [m]	T_{piek} [s]
1/4000 p.j. storm	4,3	10,75	16,7
1/10 p.j. storm	2,7	7,73	10,15
1/1 p.j. storm	2,05	5,94	8,76
springtijscenario	0,9	2	5,72

De resulterende condities (maximale waterstand, golfhoogte en golfperiode) zijn vervolgens gebruikt om een stormscenario van 32 uur op te zetten op basis van de methode beschreven in COW (1982) en Steetzel (1993). Hierbij bestaat de opgelegde waterstand uit een combinatie van getij en stormopzet, en is ook een variatie in de tijd aangebracht voor de golfcondities. Voor bijvoorbeeld de 1/4000 per jaar stormconditie bestaat de in het model opgelegde waterstand uit een getijcomponent met een amplitude van 0,86 m en een stormopzet welke varieert van NAP +0,97 m (begin van de simulatie) tot maximaal NAP +3,44 m (piek van de storm, na 16 uur). De onderverdeling tussen getij en stormopzet is zo gekozen dat het getij een springtijconditie representeert. De uiteindelijke waterstand bevat iets minder dan drie getijcycli (totaal 32 uur), en varieert van NAP +0,97 m en NAP +4,3 m (= 3,44 + 0,86), zie Figuur 2.3.

Voor de golfcondities (golfhoogte en golfperiode) is een verloop in de tijd als functie van de stormopzet gedefinieerd. Hierbij nemen de golfhoogte en golfperiode geleidelijk toe, waarbij de piek van de golfintensiteit samenvalt met de waterstandpiek (piek van de storm). De combinatie van de in de tijd variërende waterstand en golfcondities zorgt voor een realistische ontwikkeling gedurende de storm. Een voorbeeld van de resulterende hydraulische randvoorwaarden (voor normfrequentie 1/4000 per jaar) is weergegeven in Figuur 2.3.



Figuur 2.3 Verloop van de waterstand (boven), significante golfhoogte (midden) en golfpiekperiode (onder) voor een 1/4000 per jaar storm ter plaatse van de Slufter, Texel.

2.4 Modelinstellingen

Voor de modelberekeningen is zoveel mogelijk gebruik gemaakt van default instellingen behorende bij de meest recente release-versie van XBeach (revisie 3376). Een aantal parameterinstellingen worden hieronder kort toegelicht:

- In de berekeningen is niet gebruik gemaakt van een morfologische versnellingsfactor (Roelvink, 2005); In principe is dit ook de standaardinstelling, maar in veel gevallen wordt een morfologische versnellingsfactor toch toegepast, meestal met als doel het

reduceren van de simulatietijd. In dit geval is dit echter niet toegestaan, om de interactie tussen de stormopzet en het getij met de Sluftervallei correct te kunnen modelleren.

- De maximale erosiesnelheid van het duin is opgeschaald van (default) laboratoriuminstelling naar instellingen die passen bij de Slufter ($dz_{\max} = 0.16 \text{ m/s/m}$).

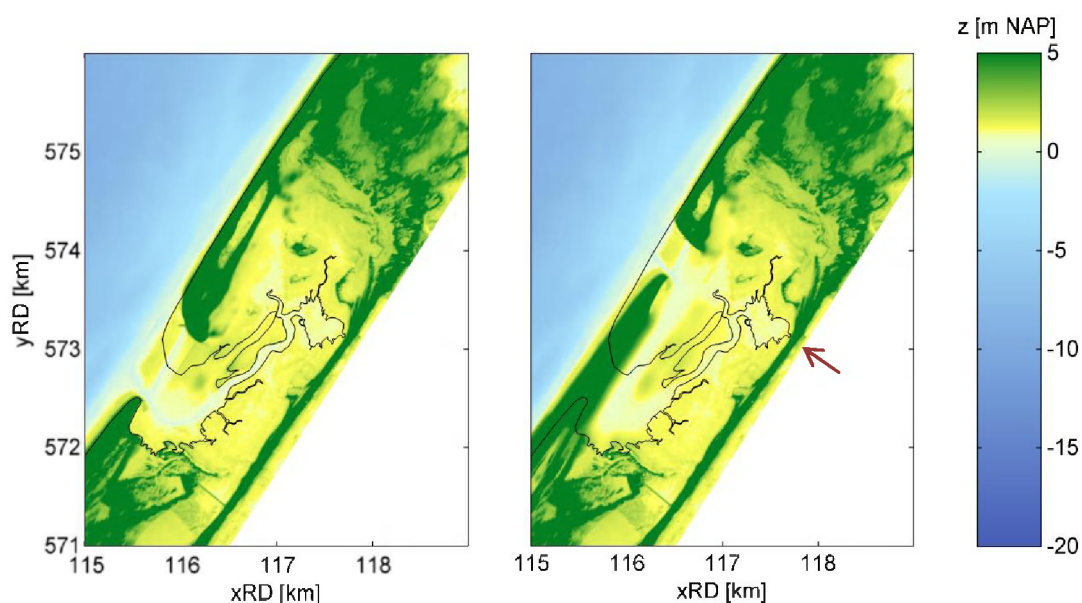
2.5 Scenario's

De berekeningen met het gebiedsmodel van de Slufter dienen inzicht te geven in het effect van de breedte en locatie van de Sluftermonding op de stormimpact op de zanddijk (kustveiligheid), en daarnaast de morfodynamiek van de Slufter (zowel monding als vallei). Hiertoe zijn een aantal modelscenario's opgezet die onderling verschillen in respectievelijk bodemconfiguratie (i.e. locatie en/of breedte van de monding) en stormintensiteit (hydraulische randvoorwaarden). Deze scenario's worden hieronder beschreven.

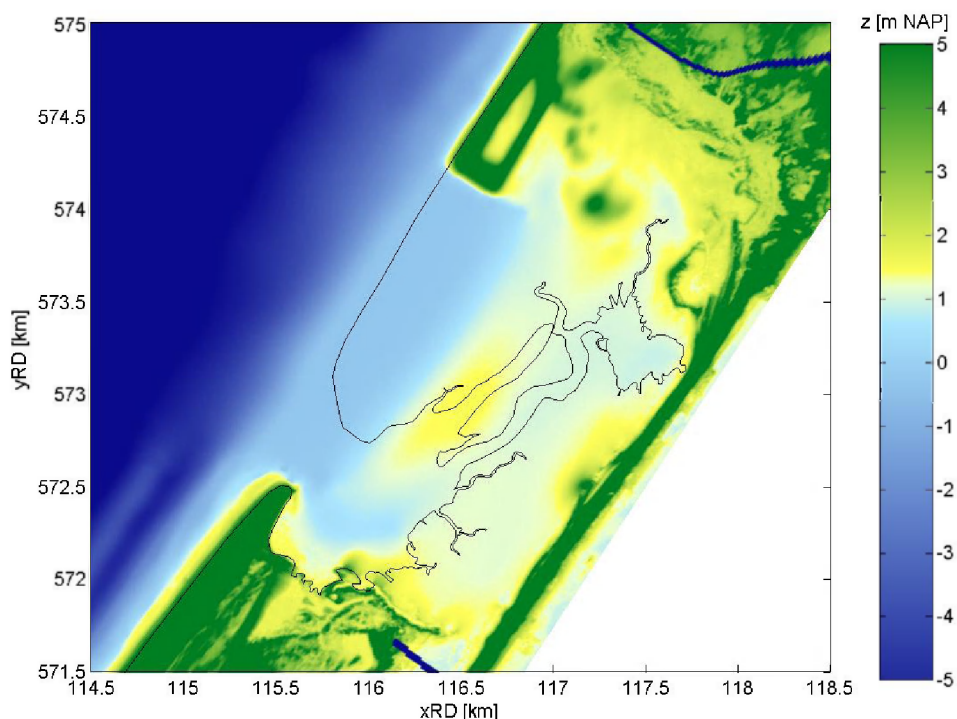
2.5.1 Scenario's met betrekking tot kustveiligheid

Voor de kustveiligheid zijn drie verschillende bodemconfiguraties doorgerekend (zie ook Figuur 2.1, Figuur 2.4 en Figuur 2.5):

- 1 De meest recente bodemligging, zoals beschreven in paragraaf 2.2 (referentiescenario).
- 2 Een bodemconfiguratie waarbij de Sluftermonding aanzienlijk breder is (op basis van historische gegevens is, in overleg met HHNK, een breedte van ongeveer 800 meter gekozen), maar zijn huidige locatie behoudt. Deze verbreding is gerealiseerd door de duinenrij ten noorden van de monding kunstmatig in elkaar te drukken. De afstand tussen opeenvolgende gridpunten in kustlangsrichting (Δy) is verkleind terwijl de bijbehorende bodemhoogte gelijk is gebleven. De nieuw verkregen bodem is vervolgens terug-geïnterpoleerd naar het oorspronkelijk modelgrid (zie Figuur 2.4). Hierdoor wordt de (afgesloten) oorspronkelijke geulmonding (die min of meer parallel aan de kust loopt) aanzienlijk verlengd, maar dit levert naar verwachting geen significant effect bij de berekeningen voor een 1/4000 per jaar storm.
- 3 Een bodemconfiguratie waarbij de Sluftermond ongeveer 1,5 km noordelijker ligt, maar de huidige breedte heeft, zie Figuur 2.4, rechter paneel. Deze verplaatsing is gerealiseerd door de duinenrij ten zuiden van de monding op te rekken en de duinenrij ten noorden van de monding in elkaar te drukken.
- 4 Een bodemconfiguratie waarbij het duin ten noorden van de monding over een afstand van 1,5 km kunstmatig is 'afgegraven'. Hierdoor ontstaat een extreme situatie waarbij de stormimpact op de zanddijk naar verwachting vele malen groter zal zijn. Om een realistischer situatie te creëren is de Sluftervallei in een aantal stappen gladgestreken, zodat de oorspronkelijke geul en kleinere duinruggen iets minder nadrukkelijk aanwezig zijn. Er dient echter opgemerkt te worden dat voor deze extreme situatie de bodemligging in realiteit zal mee-evolueren, en dus significant anders kan zijn dan weergegeven in de figuur (en meegenomen in de modelberekeningen).



Figuur 2.4 Aangepaste modelbodems (2 en 3): bredere Sluftermonding (links) en een noordelijker gelegen monding (rechts). De originele Sluftercontour, gebaseerd op satellietfoto's uit 2005 (Google Earth), is weergegeven met de zwarte lijn. De pijl geeft de locatie aan waar de teen van de zanddijk de neiging heeft om te eroderen, en waar de lokale beheerders regelmatig onderhoud plegen.



Figuur 2.5 Aangepast modelbodem (4): situatie zonder duinen waarbij de stormimpact direct op de zanddijk plaatsvindt. De harde modelementen (kleine dijk en weg) zijn weergegeven in donkerblauw.

Voor de alternatieve bodemconfiguraties (2 t/m 4) geldt dat deze zijn gebaseerd op de verwachting dat de Sluftermond zich langzaam in noordelijke richting zal verplaatsen als in de komende decennia geen ingrepen (i.e. teruglegging van geul) worden uitgevoerd.

De locatie van de Sluftermonding voor het derde scenario is zo gekozen dat de monding voor een sectie van de zanddijk komt te liggen die de afgelopen jaren door de beheerders van de waterkering extra is versterkt (met een combinatie van geotextiel en klei, zie ook Annink et al., 2010) en daardoor mogelijk een zwakke schakel in de waterkering is.

Om inzicht te krijgen in de waterveiligheid zijn alle berekeningen uitgevoerd met normatieve hydraulische condities (overschrijdingsfrequentie van de waterstand: 1/4000 per jaar). Daarnaast is het effect van de golfrichting onderzocht door naast loodrecht inkomende golven ook twee berekeningen te maken met een meer westelijke golfrichting. De richting is zo gekozen dat de golven in potentie het grootste effect hebben op de sectie van de zanddijk waar in de afgelopen jaren onderhoud is gepleegd. Dit extra scenario is niet uitgevoerd in combinatie met bodemconfiguratie 3, aangezien de meest ongunstige golfrichting voor dat scenario noordwest (loodrecht op de kust) is. In Tabel 2.3 is een overzicht gegeven van de scenario's die betrekking hebben op kustveiligheid.

Tabel 2.2 Overzicht van modelscenario's voor kustveiligheid met bijbehorende bodemconfiguraties en hydraulische randvoorwaarden.

Scen Nr	Scen ID	Bodemconf.	Hydr. RVW	Golfrichting
1	S1Ap	Huidige bodem	1/4000 p.j.	Noordwest
2	S1Aw	Huidige bodem	1/4000 p.j.	West
3	S2Ap	Bredere mond	1/4000 p.j.	Noordwest
4	S2Aw	Bredere mond	1/4000 p.j.	West
5	S4Ap	Mond noordelijker	1/4000 p.j.	Noordwest
6	S5Ap	Geen duin	1/4000 p.j.	Noordwest

2.5.2 Scenario's met betrekking tot de morfodynamiek van de Slufter

Aangezien de Slufter alleen tijdens hoogwater inundeert, wordt aangenomen dat de morfodynamiek van de Sluftervallei voornamelijk door stormen wordt gedreven. Om deze hypothese verder te onderzoeken zijn een aantal aanvullende stormscenario's met een hogere overschrijdingsfrequentie opgesteld. Daarnaast hebben deze scenario's tot doel om meer inzicht te krijgen in de hydraulische condities die de morfodynamiek van de Sluftervallei sturen. In overleg met HHNK is besloten om naast de normatieve stormen (1/4000 per jaar) het effect van een 1/10 per jaar en een 1/1 per jaar storm op de morfologie te onderzoeken. Daarnaast wordt een relatief hoog frequente conditie doorgerekend (springtijscenario). De bijbehorende hydraulische condities zijn beschreven in paragraaf 2.3. Een overzicht van de betreffende scenario's is gegeven in Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Overzicht van modelscenario's gebruikt in de huidige studie met bijbehorende bodemconfiguraties en hydraulische randvoorwaarden.

Scen Nr	Scen ID	Bodemconf.	Hydr. RVW	Golfrichting
1	S1Ap	Huidige bodem	1/4000 p.j.	Noordwest
2	S1Aw	Huidige bodem	1/4000 p.j.	West
7	S1Bp	Huidige bodem	1/10 p.j.	Noordwest
8	S1Bw	Huidige bodem	1/10 p.j.	West
9	S1Cp	Huidige bodem	1/1 p.j.	Noordwest
10	S1Cw	Huidige bodem	1/1 p.j.	West
11	S1Dp	Huidige bodem	Springtij	Noordwest
12	S1Dw	Huidige bodem	Springtij	West

3 Kustveiligheid

In dit hoofdstuk wordt het effect van het loslaten van de Sluftermonding op de kustveiligheid onderzocht. De nadruk ligt hierbij op de achterliggende zanddijk die onderdeel is van de primaire waterkering. Achtereenvolgens wordt gekeken naar de huidige situatie (referentiescenario), en drie scenario's waarin de Sluftermonding varieert in breedte en/of locatie.

3.1 Huidige situatie (referentiescenario)

Voor de referentieberekening wordt gebruik gemaakt van de meest recente beschikbare bodemligging in combinatie met normatieve stormcondities en een stormduur van 32 uur (voor meer details zie Hoofdstuk 2, scenario-nr. 1). Hierbij wordt in eerste instantie aangenomen dat de golven loodrecht op de kust binnenkomen, omdat dit naar verwachting de zwaarste golfbelasting zal opleveren. De hydrodynamische en morfodynamische resultaten van het referentiescenario worden in deze paragraaf belicht.

In Figuur 3.1 is de gemiddelde waterstand tijdens de piek van de storm (gemiddeld over een uur) weergegeven. Op de buitengaats modelrand wordt een maximale waterstand van NAP + 4,3 m opgelegd, maar door golfopzet (als gevolg van de kracht die de brekende golven op het water uitoefenen) is de waterstand in met name de Sluftervallei beduidend hoger (circa NAP +5,3 m). Een relatief groot gebied van de Slufter inundeert (zie ook Figuur B.1), en de maximale waterstand in de Sluftervallei is redelijk ruimtelijk uniform.

In Figuur 3.2 is de golfhoogte (H_{rms}) van de (korte) windgolven³ op de piek van de storm weergegeven. De golfhoogte neemt af in kustwaartse richting doordat het ondieper wordt en er golfbreken optreedt. Omdat de golfrichting loodrecht op de kust staat, lopen de golven ook voornamelijk loodrecht de Sluftervallei binnen. Het abrupte wijder worden van de Sluftervallei direct na de monding, in combinatie met de ondiepe bodemligging, zorgt er voor dat de golfhoogte verder afneemt door refractie (het bijdraaien van de golfkammen). Aan de voet van de zanddijk bereikt de golfhoogte waarden van maximaal ongeveer 0.8 m. Deze golfbelasting treedt alleen op ter hoogte van de dijksectie die direct achter de Sluftermonding ligt. In kustlangse richting neemt de belasting in de Sluftervallei sterk af.

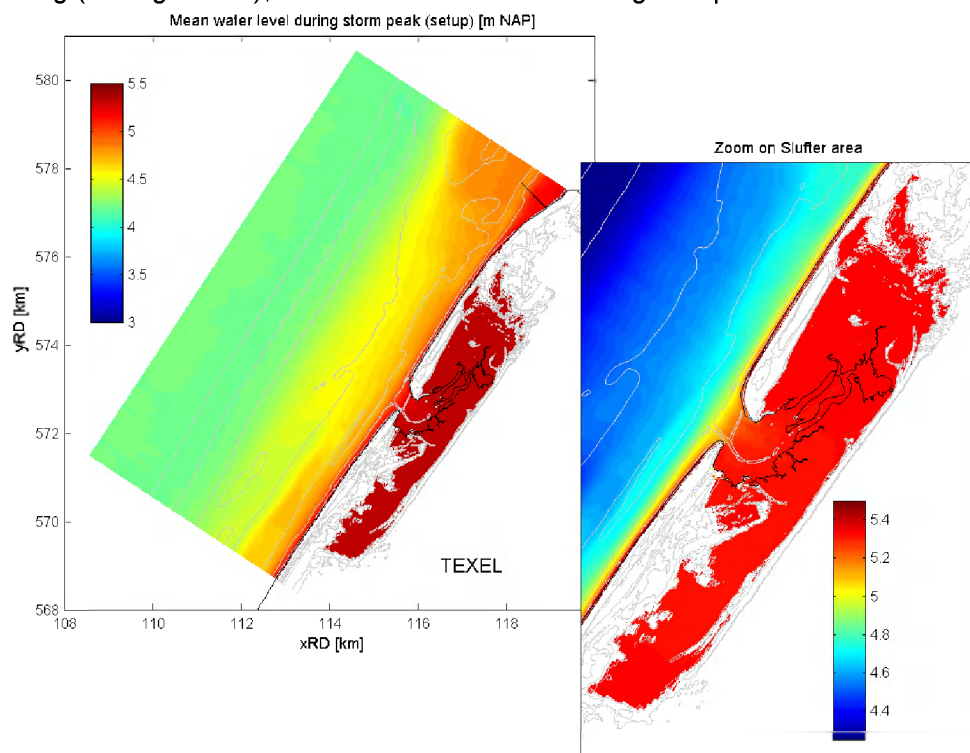
In Figuur 3.3 is de golfhoogte (H_{rms}) voor de lange golven weergegeven. Lange golven ontstaan als gevolg van de gegroeptheid waarmee de korte windgolven zich in open zee voortplanten. Hoge windgolven in de groep drukken het zeeniveau iets naar beneden, terwijl onder lagere windgolven het niveau hoger is dan gemiddeld. Het zeeniveau onder de windgolven is dan zelf een (lange) golf met een top en een dal. Tijdens het breken van de korte golven wordt energie overgedragen naar de lange golf. Deze kan daardoor een hoogte van enkele decimeters bereiken. Eerder onderzoek heeft aangetoond dat lange golven een significant effect kunnen hebben op de waterstand nabij de kustlijn, en daardoor (onder andere) van belang zijn voor duinerosie (Van Thiel de Vries, 2009). De figuur laat een meer vlekkelig beeld zien dan voor de korte-golfhoogte. Dit is te wijten aan de verhouding tussen de golfperiode en de middelingsperiode welke gebruikt is in de berekening van de golfhoogte. Aangezien de lange-golfperiode een stuk groter is dan de korte-golfperiode (orde factor 4), levert dit een kleinere hoeveelheid golven per middelingsperiode (= 1 uur) op, wat een minder

³ Merk op dat dit H_{rms} (root-mean-square golfhoogte) betreft, en niet de significante golfhoogte H_{sig} ($= \sqrt{2} \cdot H_{rms}$) zoals bijv. in Tabel 2.1.

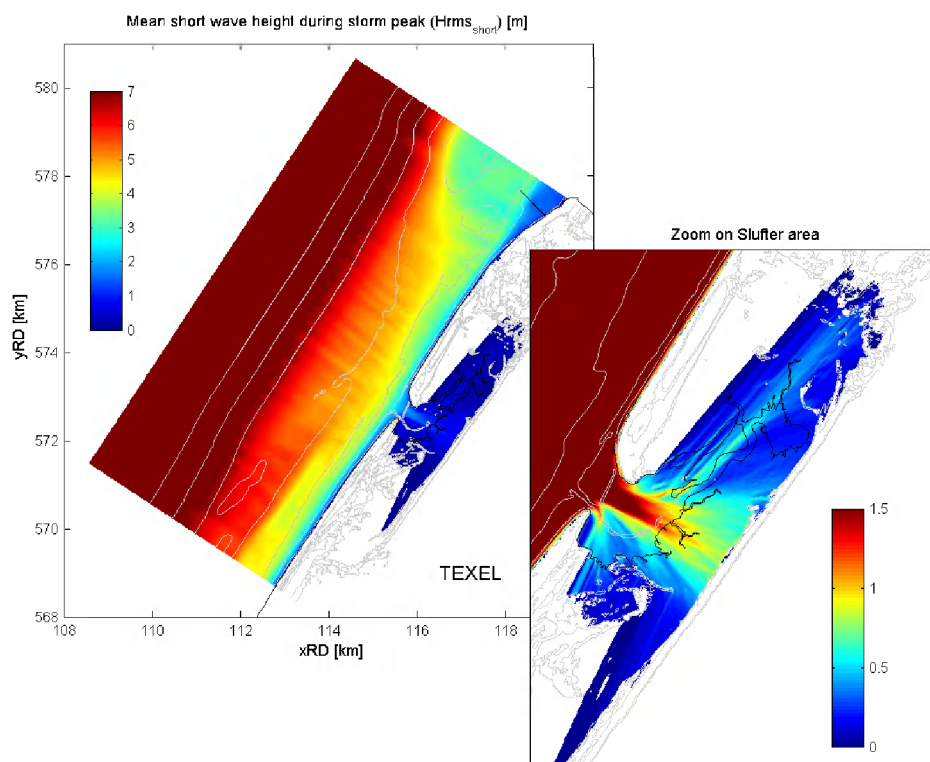
uniform beeld tot gevolg heeft. De relatief hoge waarden aan de laterale modelranden zijn het gevolg van randeffecten in de waterstand. Door de manier waarop de lange-golfhoogte wordt berekend (als functie van de waterstandsvariantie), worden deze effecten versterkt afgebeeld. Ze hebben echter verder geen invloed op de hydrodynamica in en nabij de Slufter.

Buiten bovengenoemde verschijnselen laat Figuur 3.3 zien hoe de lange-golfhoogte nabij de buitengaats modelrand nog relatief klein is maar snel toeneemt tot ongeveer 1 à 1,5 m. Bij het binnengaan van de Slufter vertoont de lange-golfhoogte een vergelijkbaar patroon als de korte-golfhoogte waar door de abrupte verwijding net voorbij de monding de golfenergie zich in alle richtingen verspreidt. Nabij de monding bedraagt de lange-golfhoogte 1 à 1,2 m, terwijl dit in landwaartse richting afneemt tot ongeveer 0,4 m. Lokaal bij de zanddijk nemen de lange-golfhoogten weer iets toe tot maximaal 0,6 m door de dieptebeperking (shoaling). De relatieve bijdrage van de lange golven in de totale golfenergie is dus een stuk groter nabij de zanddijk dan op diep water, en speelt hier dan ook een belangrijke rol met het oog op de morfologie.

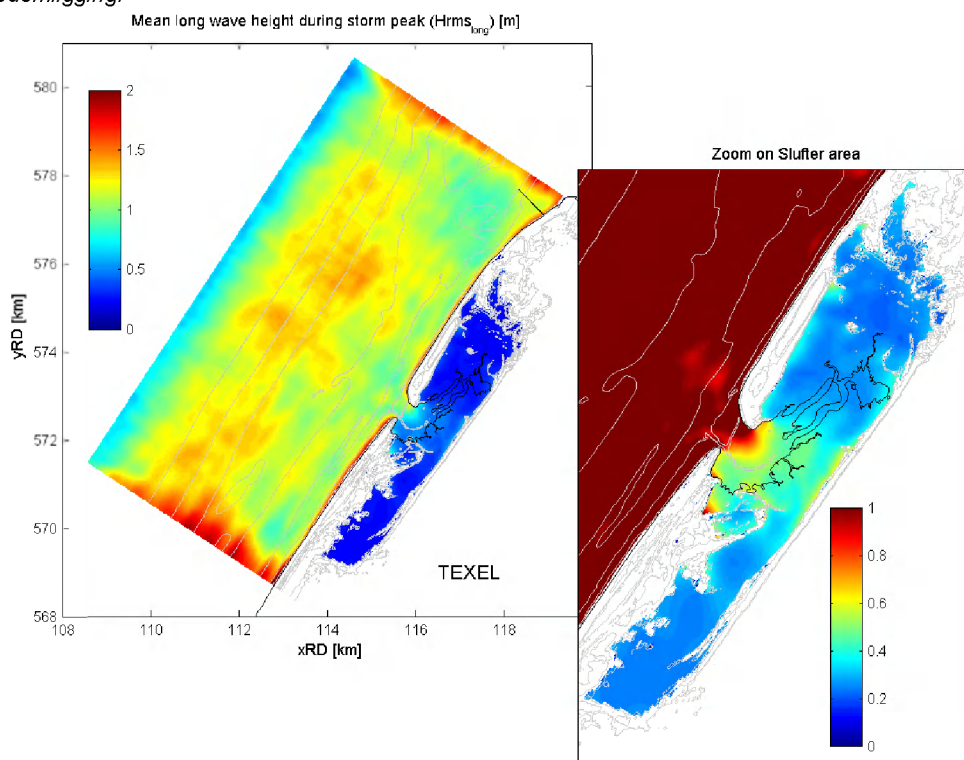
De grootste stroomsnelheden op de piek van de 1/4000 per jaar storm treden op bij de monding van de Slufter, aan de randen van beide duinkoppen, en bedragen op de piek van de storm ongeveer 1,5 tot 2 m/s (zie Figuur 3.4). Verder zijn de stroomsnelheden relatief hoog op locaties waar op de piek van de storm een (kleine) bres is ontstaan, en het water voor een korte periode met grote snelheid een droog deel instroomt. Dit is bijvoorbeeld te zien aan de oranje/rode westwaarts gerichte pijl ± 500 m ten zuiden van de monding. Met uitzondering van het gebied rond de monding zijn de snelheden in de rest van de Sluftervallei relatief laag (0 – 0,25 m/s). Merk op dat de snelheden in de Noordzee ten noorden van de Sluftermonding voornamelijk zuidwaarts georiënteerd zijn. Dit komt door het relatieve ondiepe deel ter hoogte van de Eierlandse Dam. Dit heeft een lokaal hogere waterstandsopzet tot gevolg (zie Figuur 3.1), wat resulteert in een stromingscomponent in zuidwaartse richting.



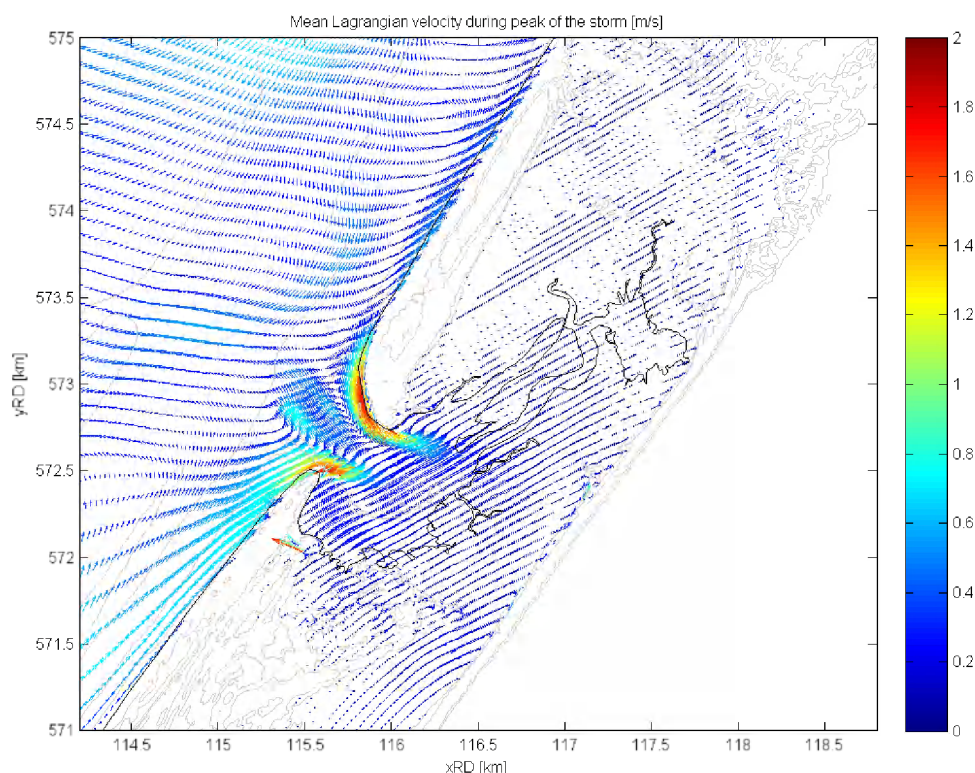
Figuur 3.1 Gemiddelde waterstand tijdens de piek van een 1/4000 per jaar storm voor de huidige bodemligging.



Figuur 3.2 Gemiddelde korte-golfhoogte (H_{rms}) tijdens de piek van een 1/4000 per jaar storm voor de huidige bodemligging.



Figuur 3.3 Gemiddelde lange-golfhoogte (H_{rms}) tijdens de piek van een 1/4000 per jaar storm voor de huidige bodemligging.



Figuur 3.4 Gemiddelde stroomsnelheid tijdens de piek van een 1/4000 per jaar storm voor de huidige bodemligging.

De bovenbeschreven waterstanden, golven en snelheden hebben een grote morfologische response tot gevolg. Vanuit een kustveiligheidsperspectief is het vooral belangrijk dat de erosie van de duinen en de zanddijk niet dermate groot is dat de waterkering faalt. In Figuur 3.5 is de cumulatieve erosie en sedimentatie (verschil tussen begin- en eindbodem) voor het referentiescenario weergegeven. Om de figuur inzichtelijk te houden zijn de kleurschaalgrenzen gesteld op 3 en 5 m. Echter, de maximale erosie loopt voor sommige plekken langs het duin op tot ongeveer 6 à 7 m (voornamelijk op enkele locaties net ten noorden van de monding).

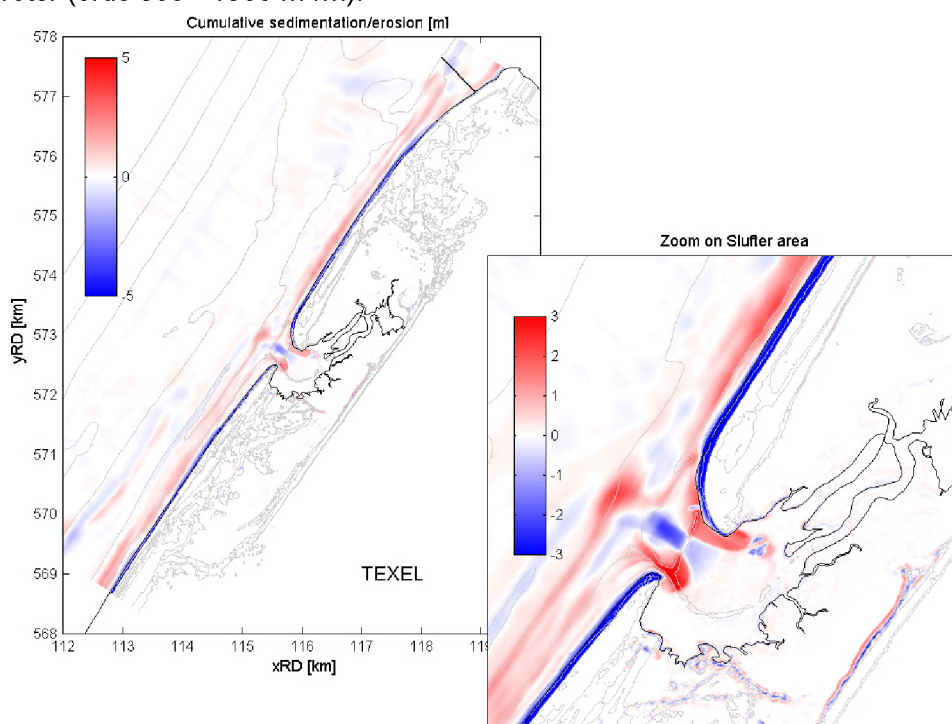
De figuur laat zien dat de duinen ten noorden en ten zuiden van de monding sterk eroderen, en dat het afgeslagen zand voor de kust tot aanzanding leidt, conform het proces dat voor lange rechte duinkusten geldt. Ter plaatse van de monding eroderen de duinkoppen, terwijl aan de randen van de monding en geul sedimentatie plaatsvindt. In het midden van de mond vindt sterke erosie plaats, wat resulteert in een relatief brede geul loodrecht op de kust. Voor de monding ontwikkelt zich een ondiepte die lijkt op een buitendelta. Deze ondiepte ontstaat aan het einde van de storm wanneer de waterstand in de Sluftervallei snel afneemt en het Slufterbassin leegstroomt. Tijdens dit proces zijn de zeewaartse snelheden groot genoeg om een deel van het zand, dat zich tijdens de storm in de Slufter ophoopt, naar buiten te stuwen, waar het – als de stroomsnelheden afnemen – bezinkt.

Wat betreft de zanddijk lijkt de erosie zich vooral te focussen op het deel direct achter de monding, maar vergeleken met de zeewaartse duinenrij is de erosie zeer beperkt. Om erosie van het duin en de zanddijk te kunnen kwantificeren is gekeken naar de erosie (in meter) boven de initieel opgelegde piekwaterstand (NAP + 4,3 m) dat als gevolg van de storm is geërodeerd. Vervolgens is de duin- en zanddijkerosie als functie van de kustlangslocatie bepaald door de erosie te integreren over het kustdwarsprofiel van het duin en de zanddijk.

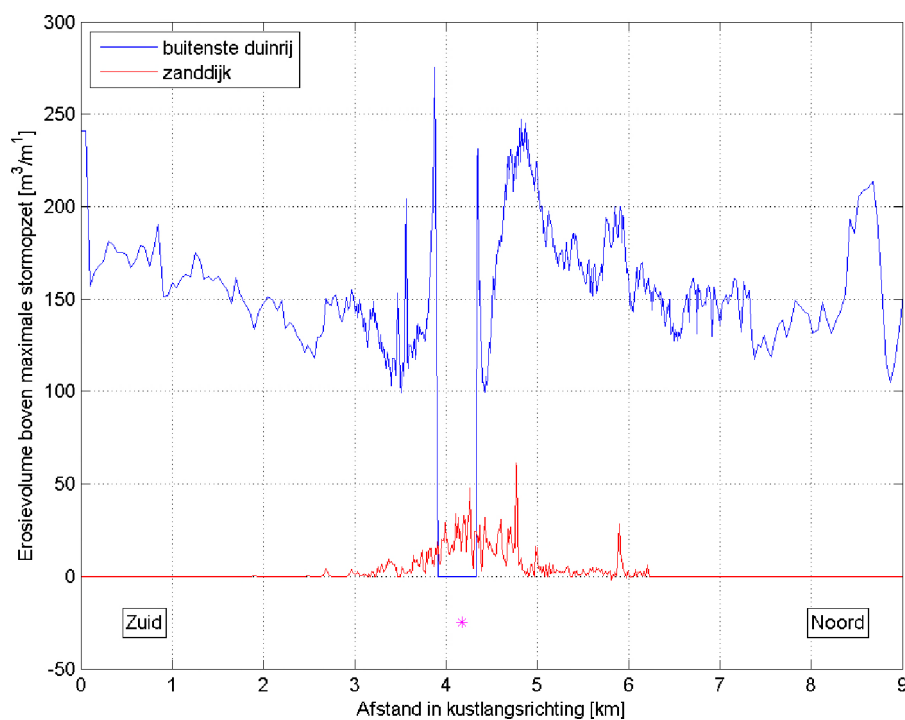
Het resultaat is weergegeven in Figuur 3.6 waar de erosievolumes van de zanddijk vergeleken worden met de erosievolumes voor de duinen langs de kust.

De duinerosie langs de kust is ongeveer 150 à 250 m³ per strekkende meter. Dicht bij de monding van de Slufter (rond 4 km van de zuidelijke modelrand) is het erosievolume hoger. Dit komt door de sterke stroming langs de duinkoppen wat resulteert in extra afkalving. Het erosievolume van de zanddijk direct achter de Sluftermond is ongeveer 30 - 50 m³/m¹. Dit is lager dan de resultaten van, Van Thiel de Vries (2011), die een erosie volume van orde 100 m³/m¹ vond. Dit komt waarschijnlijk door het meenemen van richtingsspreiding van de golven in de Sluftervallei. In het huidige gebiedsmodel komen de golven via de monding de Sluftervallei binnen, waarna de golfenergie zich verspreidt in meerdere richtingen (zie Figuur 3.2). In het (eendimensionale) profielmodel lopen de golven per definitie loodrecht naar de zanddijk, waardoor meer golfenergie de zanddijk bereikt en er een grotere lokale morfologische respons is. De verschillen in resultaten tussen de (1D) profielsimulaties en de (2D) gebiedssimulaties bevestigen hiermee dat een tweedimensionale benadering voor de Slufter noodzakelijk is om de relevante fysische processen goed mee te kunnen nemen.

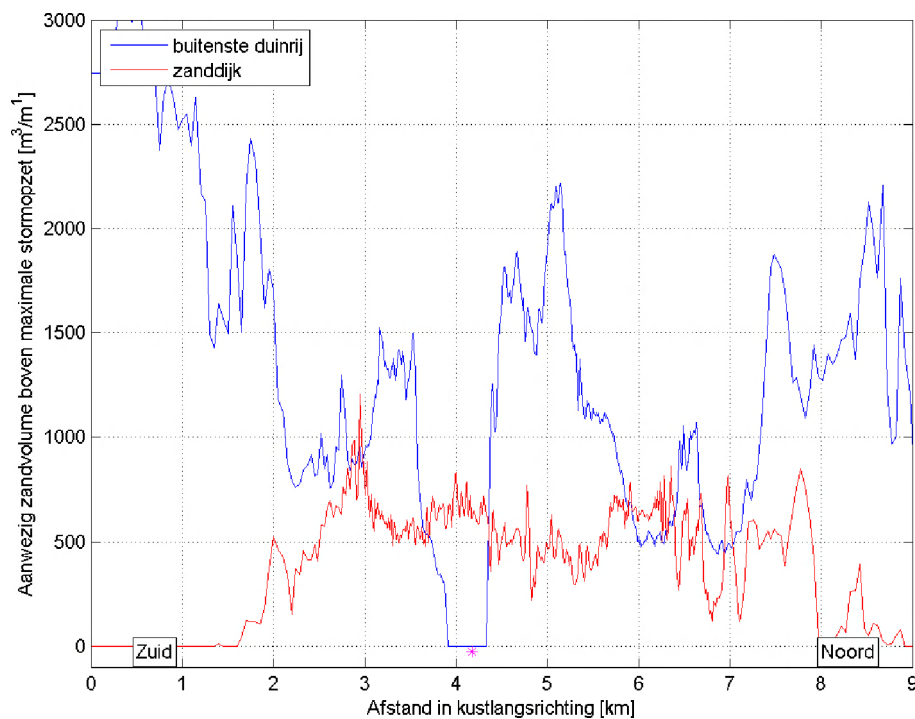
Het potentieel aanwezige zandvolume in de zanddijk en het duin als functie van de kustlangslocatie is op een vergelijkbare manier bepaald door het volume boven de initieel opgelegde waterstand (NAP +4,3 m) over het dwarsprofiel te integreren. Hierbij wordt aangenomen dat zowel de zeewaartse duinrij als de zanddijk volledig uit zand bestaan. Het resultaat hiervan is weergegeven in Figuur 3.7. Op basis van de huidige resultaten alsmede de resultaten van Van Thiel de Vries (2011) lijkt er geen veiligheidsprobleem aanwezig voor de zanddijk; het erosievolume ligt tussen 5 en 10% van het aanwezige volume zand in de dijk. In beide studies is de hoeveelheid duinerosie namelijk substantieel kleiner dan het aanwezige zandvolume in de zanddijk boven de maximale stormopzet (ongeveer 300-700 m³/m). Voor de zeewaartse duinenrij geldt hetzelfde, en is het aanwezige volume zand zelfs nog groter (orde 500 - 1500 m³/m).



Figuur 3.5 Cumulatieve erosie (blauw) en sedimentatie (rood) als gevolg van een 1/4000 per jaar storm voor de huidige bodemligging (verschil tussen begin- en eindbodem, in meter).



Figuur 3.6 Totaal erosievolume boven maximale stormopzet (NAP + 4,3 m) langs de kust (ter hoogte van strandpaal 31 tot strandpaal 20,11) voor de zeewaartse duinenrij en de zanddijk. De roze stip geeft de locatie van de monding weer.

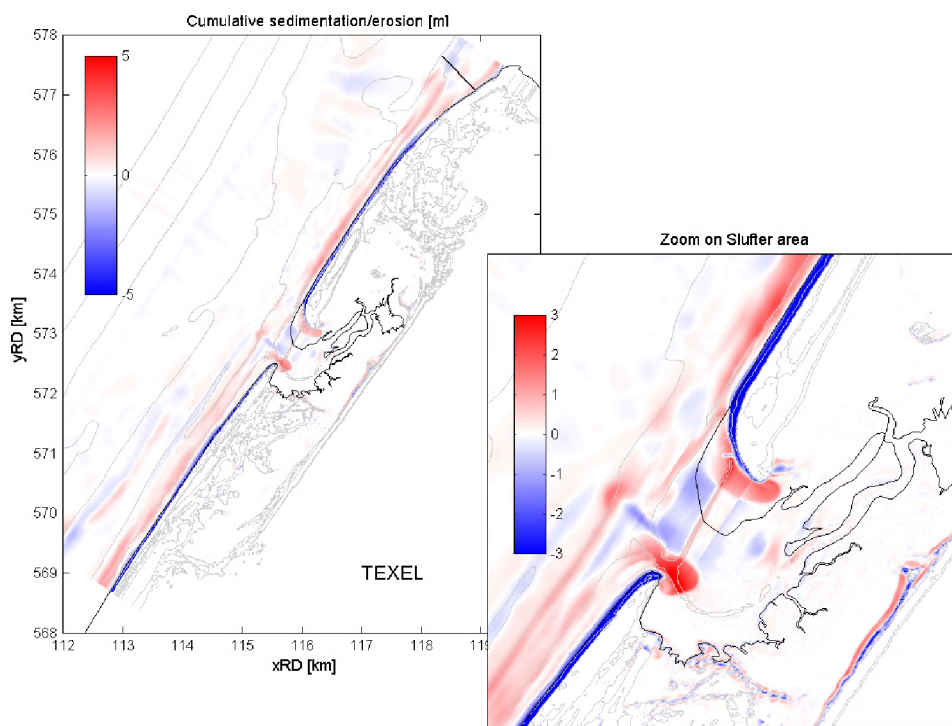


Figuur 3.7 Totaal beschikbaar zandvolume boven maximale stormopzet (NAP + 4,3 m) in kustlangsrichting (ter hoogte van strandpaal 31 tot strandpaal 20,11) voor de zeewaartse duinenrij en de zanddijk. De roze stip geeft de locatie van de monding weer.

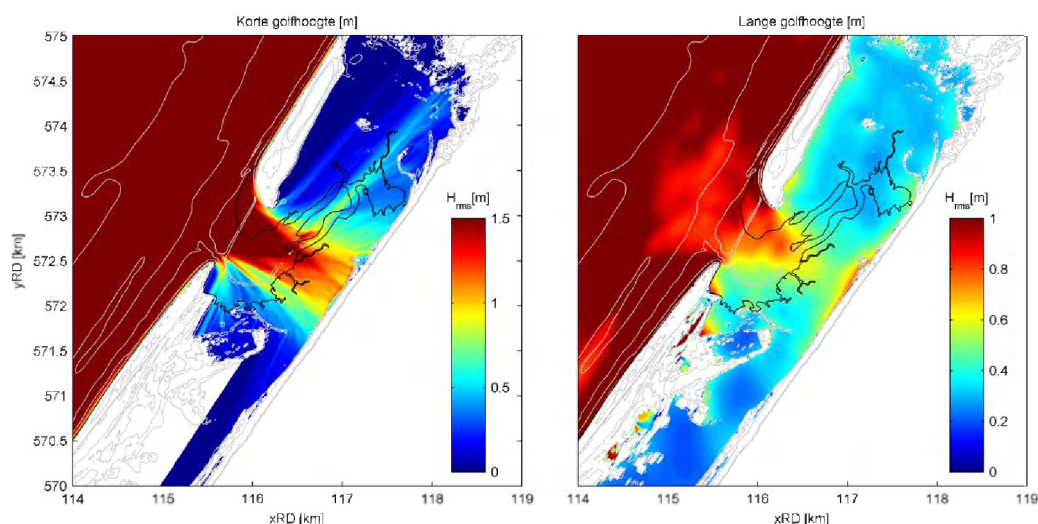
3.2 Scenario: brede Sluftermonding

Bij het niet langer ingrijpen in de dynamiek van de Sluftermonding is een van de mogelijke gevolgen dat de monding breder wordt. Het effect van een bredere monding op de erosie van de zanddijk tijdens normatieve omstandigheden wordt in deze paragraaf onderzocht. Hierbij wordt aangenomen dat de monding ongeveer twee maal zo breed wordt (ongeveer 800 m). Voor meer details zie Hoofdstuk 2, scenario-nr. 3.

De cumulatieve sedimentatie en erosie als gevolg van normatieve stormcondities in combinatie met een bredere Sluftermonding is weergegeven in Figuur 3.8. De sedimentatie-erosie patronen zijn vergelijkbaar met de referentie berekening (zie Figuur 3.5), al zijn de bodemveranderingen in de monding minder groot. De reden hiervoor is dat door de bredere monding de optredende snelheden lager zijn. Echter, de morfologische respons bij de zanddijk, is duidelijk toegenomen. In Figuur 3.9 is te zien dat door de bredere monding de korte-golfhoogte voor de zanddijk toeneemt tot ongeveer 1,3 m. Daarnaast blijkt dat ook de lange golven belangrijk zijn (maximaal ongeveer 1 m golfhoogte). De toename in golfbelasting voor de zanddijk zorgt lokaal voor een grotere transportcapaciteit, en dat is terug te zien in de resulterende cumulatieve sedimentatie en erosie direct voor de zanddijk (Figuur 3.8).



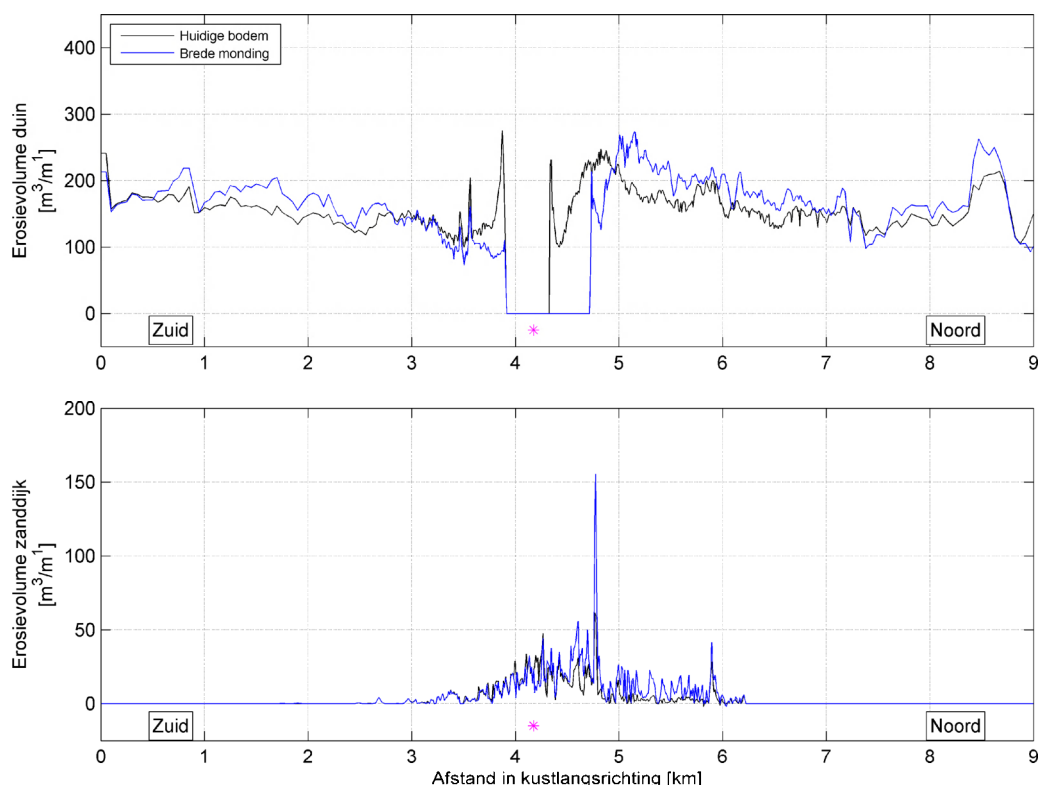
Figuur 3.8 Cumulatieve erosie (blauw) en sedimentatie (rood) als gevolg van een 1/4000 per jaar storm bij een bredere monding (in meter). De zwarte lijn geeft de oorspronkelijke Sluftercontour aan.



Figuur 3.9 Gemiddelde korte- (links) en lange-golfhoogte (rechts) op de piek van een 1/4000 per jaar storm voor een brede monding. De zwarte lijn geeft de oorspronkelijke (huidige bodem) Sluftercontour aan (gebaseerd op Google Earth satellietfoto's uit 2005).

Het effect van een bredere Sluftermonding op het erosievolume boven de maximale stormopzet is weergegeven in Figuur 3.10. Het is duidelijk te zien dat een bredere monding de erosie van de zanddijk beïnvloedt, terwijl er nauwelijks een effect bij de duinen is te zien. Het erosievolume boven de maximale stormopzet kan circa 50 tot 100% hoger zijn voor een bredere monding dan voor de huidige monding, maar is nog steeds maximaal ongeveer 10% van het aanwezige volume in de zanddijk. Dit lijkt vooral het gevolg van de toename in zowel korte- als lange-golfenergie. De breedte van de afslagzone langs de dijk lijkt echter niet significant toe te nemen. Dit komt vooral door de lokale geometrie direct achter de monding. Hier bevindt zich namelijk een relatief diep gedeelte (zie Figuur 2.2), terwijl de bodem in noordoostelijke richting een stuk hoger ligt (dit is goed te zien in Figuur 2.4, linkerpaneel). Bij een bredere monding komt dit hogere stuk bloot te liggen, waardoor de golven wel vrij naar binnen kunnen propageren, maar er minder richtingspreiding van de golven plaatsvindt. Dit zorgt ervoor dat de grootste impact op de zanddijk nog steeds direct achter de huidige monding plaatsvindt. Tot slot valt een erosiepiek van ongeveer $150 \text{ m}^3/\text{m}^1$ op. Deze piek is het gevolg van een klein duintje net voor de zanddijk dat erodeert (zie ook Figuur 3.8).

Samenvattend lijkt een bredere monding geen veiligheidsprobleem op te leveren voor de zanddijk aangezien het beschikbare zandvolume in de dijk (orde $300\text{-}700 \text{ m}^3/\text{m}$, zie Figuur 3.7) ruim voldoende is.



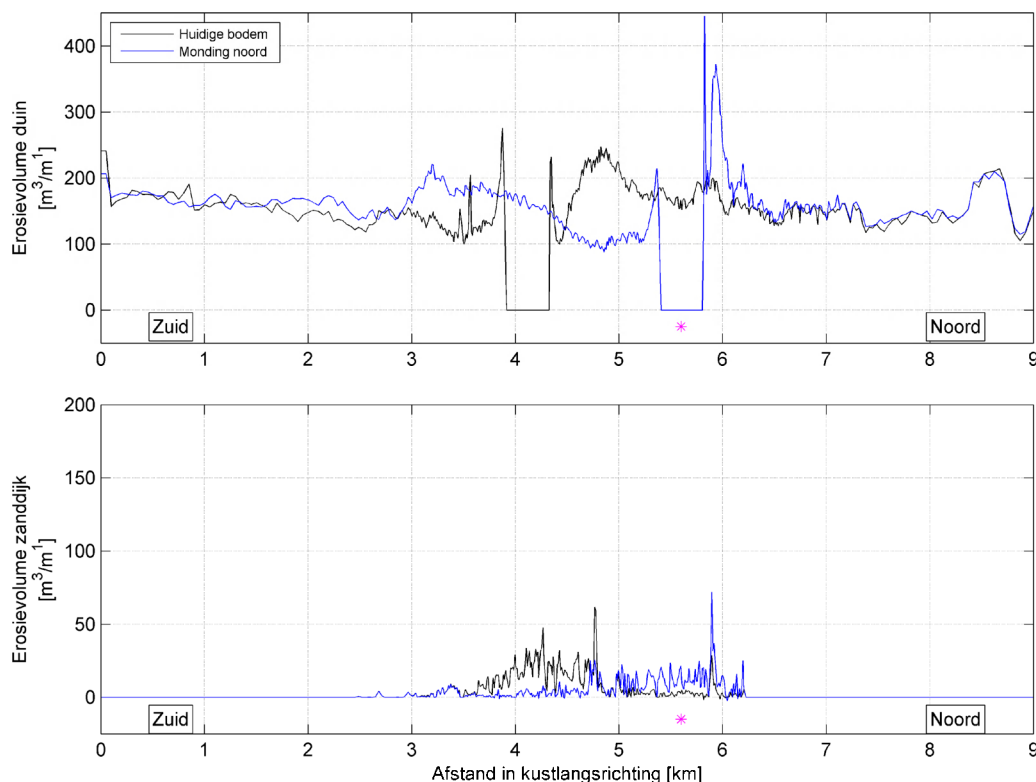
Figuur 3.10 Totaal erosievolume boven maximale stormopzet (NAP + 4,3 m) in kustlansrichting (ter hoogte van strandpaal 31 tot strandpaal 20,11) voor de zeewaartse duinrij (boven) en de zanddijk (onder) in combinatie met de huidige bodem (zwart) en een bredere monding (blauw). De roze ster geeft de locatie van de originele Sluftermonding weer.

3.3 Scenario: noordelijker gelegen Sluftermonding

Naast het breder worden van de Sluftermonding is de verwachting dat deze zich in zijn geheel in noordelijke richting kan bewegen. Eerdere berekeningen hebben laten zien dat de te verwachten erosie van de zanddijk voornamelijk direct achter de monding plaatsvindt (zie paragraaf 3.1). Daarnaast is in paragraaf 2.5 een specifiek deel van de zanddijk aangemerkt als aandachtspunt, aangezien daar in het verleden herstelwerkzaamheden zijn uitgevoerd. Voor dit scenario is de locatie van de monding daarom zo gekozen dat het betreffende dijkdeel direct achter de monding ligt. Hierbij wordt aangenomen dat alleen de locatie van de monding verandert, en dat de huidige dimensies (bijvoorbeeld geulbreedte en -diepte) gelijk blijven. Voor meer details zie Hoofdstuk 2, scenario-nr. 5.

In Figuur 3.11 is het totale erosievolume boven de maximale stormopzet voor een noordelijke monding vergeleken met de referentiesituatie. Wat betreft de duinen aan de zeezijde geven beide scenario's een vergelijkbaar beeld, al is de erosie van de noordelijke duinkop beduidend hoger. Dit heeft waarschijnlijk te maken met het feit dat het duin hier een stuk steiler is geworden als gevolg van het samendrukken in kustlansrichting. Hierdoor slaat het zand makkelijker af, en vindt meer afschuiving plaats. Het erosievolume voor de zanddijk is het hoogst direct achter de monding, wat overeenkomt met de eerdere berekeningen, maar is over het algemeen iets lager. Een mogelijke verklaring hiervoor is het verschil in bodemligging in het gebied direct achter de monding. Merk op dat dat de bodemconfiguratie van de Sluftervallei voor het huidige scenario kunstmatig is verkregen en daardoor wellicht niet realistisch is (in tegenstelling tot het referentiescenario).

Wanneer de monding op de langere termijn naar het noorden verplaatst zal de geometrie van de Sluftervallei (inclusief geuloriëntatie) zich aan gaan passen, en zal de uiteindelijke response mogelijk meer lijken op het referentiescenario. In elk geval lijkt een verplaatsing van de monding in noordwaartse richting op basis van deze berekeningen geen veiligheidsprobleem te veroorzaken t.a.v. de zanddijk. Het erosievolume blijft ver onder het beschikbare zanddijkvolume (orde 5%), wat lokaal ongeveer $400 \text{ m}^3/\text{m}^1$ is, zie Figuur 3.7).



Figuur 3.11 Totaal erosievolume boven maximale stormopzet (NAP + 4,3 m) in kustlangsrichting (ter hoogte van strandpaal 31 tot strandpaal 20,11) voor de zeewaartse duinrij (boven) en de zanddijk (onder) in combinatie met de huidige bodem (zwart) en een noordelijker gelegen monding (blauw). De roze ster geeft de locatie aan waar de lokale kustbeheerders regelmatig onderhoud aan de teen van de zanddijk moeten uitvoeren.

3.4 Effect van de golfrichting

Voor studies naar kustveiligheid worden de waterstand, golfhoogte en golfperiode meegenomen, zoals voorgeschreven in de normatieve hydraulische randvoorwaarden (HR 2006; Rijkswaterstaat, 2007). Echter, het effect van golfrichting wordt niet expliciet voorgeschreven, en als conservatieve aanname wordt deze als kustloodrecht opgelegd. Echter, recente inzichten in duinafslag mechanismen laten zien dat juist scheef invallende golven kunnen leiden extra erosie (Den Heijer, 2013). In het geval van de Slufter zou als gevolg van scheef invallende golven een andere (meer kwetsbare) sectie van de zanddijk onderhevig kunnen zijn aan erosie. Dit scenario is onderzocht door te rekenen met golven komend uit het westen. De golfrichting is zo gekozen dat een sectie van de zanddijk waar lokale beheerders regelmatig herstelwerkzaamheden uitvoeren mogelijk kwetsbaarder voor erosie wordt (zie ook paragraaf 2.5).

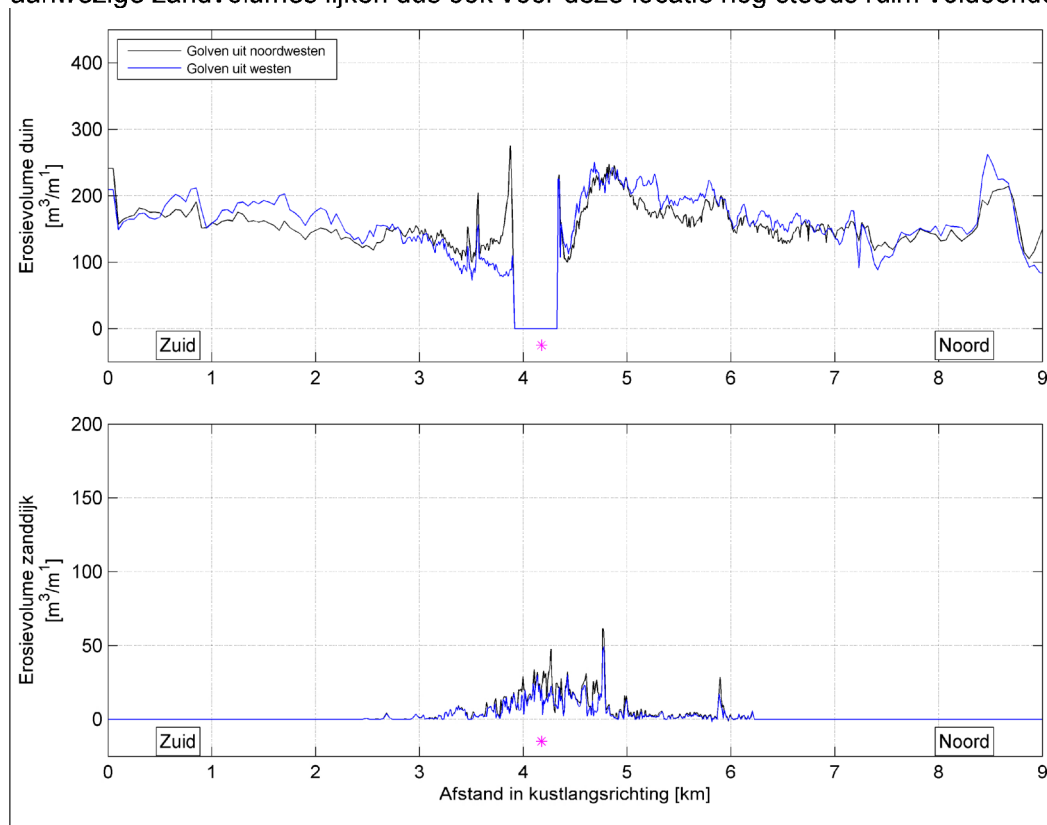
Het effect van de golfrichting (west in plaats van noordwest) op het erosievolume boven de maximale stormopzet is weergegeven in Figuur 3.12. Uit de figuur blijkt dat golven uit het westen voor de Slufter nauwelijks effect hebben op de erosievolumes. De zuidelijke duinkop ervaart een relatief sterke afname in erosievolume, maar verder komen de resultaten voor de

duinen in kustlangsrichting sterk overeen. Wat betreft de zanddijk zijn de verschillen zelfs kleiner, en neemt het erosievolume licht af. Ook voor het deel van de zanddijk dat geldt als aandachtspunt (tussen 5 en 6 km in kustlangsafstand) is op basis van deze modelsimulatie geen significante (toename in) erosie te zien. De verklaring hiervoor is dat de westelijke golven refracteren (=veranderen van golfrichting als gevolg van de afname in waterdiepte), en uiteindelijk min of meer onder een vergelijkbare hoek de Sluftermonding bereiken.

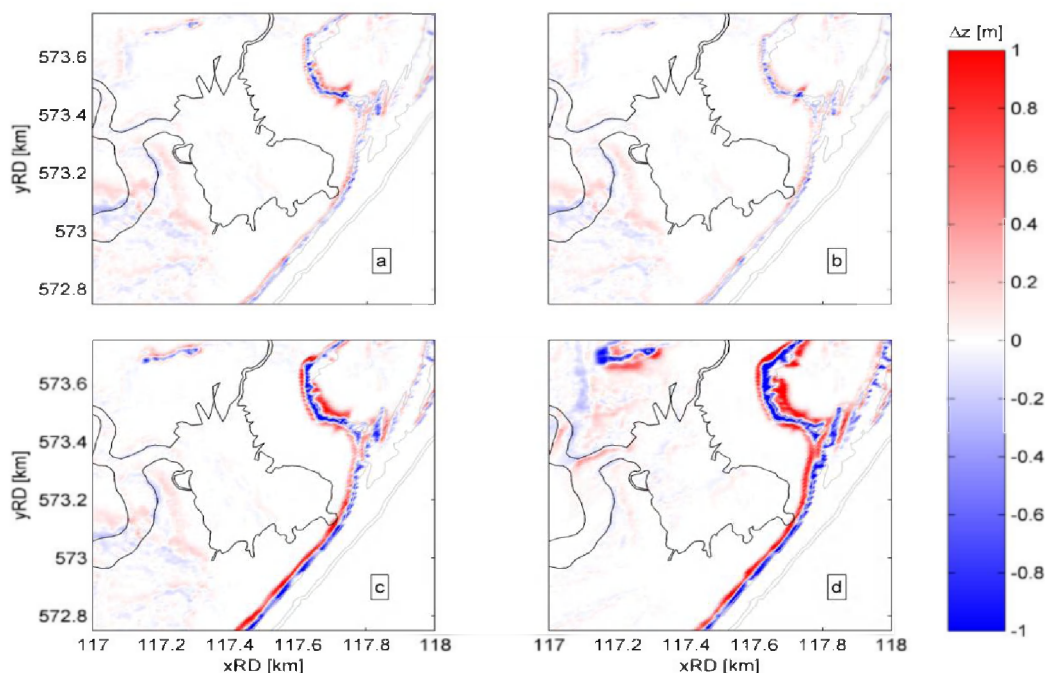
In Figuur 3.13 is de cumulatieve sedimentatie/erosie geplot (ingezoomd op de aandachtslocatie) voor een 1/4000 per jaar storm in combinatie met verschillende bodemconfiguraties en golfrichtingen:

- huidige bodem i.c.m. loodrecht inkomende golven (scenario-nr. 1),
- huidige bodem i.c.m. golven uit het westen (scenario-nr. 2),
- brede monding i.c.m. golven uit het westen (scenario-nr. 4), en
- noordelijke monding i.c.m. loodrecht inkomende golven (scenario-nr. 5).

De modelresultaten voor combinatie a. en b. laten zien dat de erosie van de zanddijk ter hoogte van deze sectie beperkt is. Voor een bredere en/of noordelijker gelegen monding neemt de erosie van de zanddijk duidelijk toe, maar niet meer dan op andere locaties. De aanwezige zandvolumes lijken dus ook voor deze locatie nog steeds ruim voldoende.



Figuur 3.12 Totaal erosievolume boven maximale stormopzet (NAP + 4,3 m) in kustlangsrichting (ter hoogte van strandpaal 31 tot strandpaal 20,11) voor de zeewaartse duinrij (boven) en de zanddijk (onder) in combinatie met de huidige bodem in combinatie met loodrecht invallende golven (ong. noordwest, zwarte lijn) en golven uit het westen (blauw). De roze ster geeft de locatie van de monding weer.

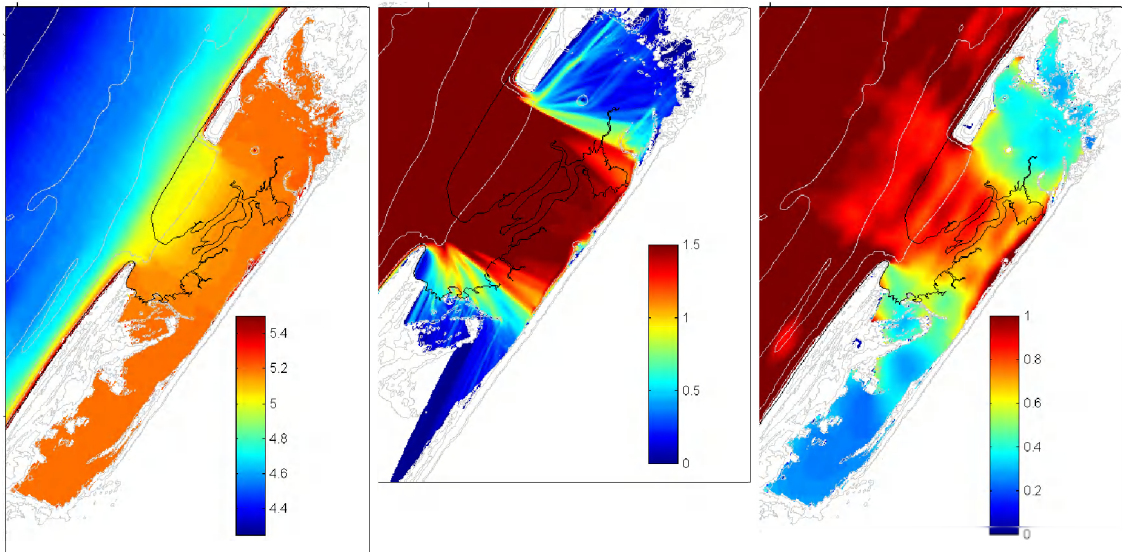


Figuur 3.13 Cumulatieve erosie (blauw) en sedimentatie (rood) voor een 1/4000 per jaar storm bij de huidige bodem en loodrecht invallende golven (a), de huidige bodem en golven uit het westen (b), een bredere monding en golven uit het westen (c), en bij een noordelijke monding en loodrecht invallende golven (d). Er is ingezoomd op de locatie waar lokale beheerders regelmatig herstelwerkzaamheden uitvoeren aan de teen van de zanddijk.

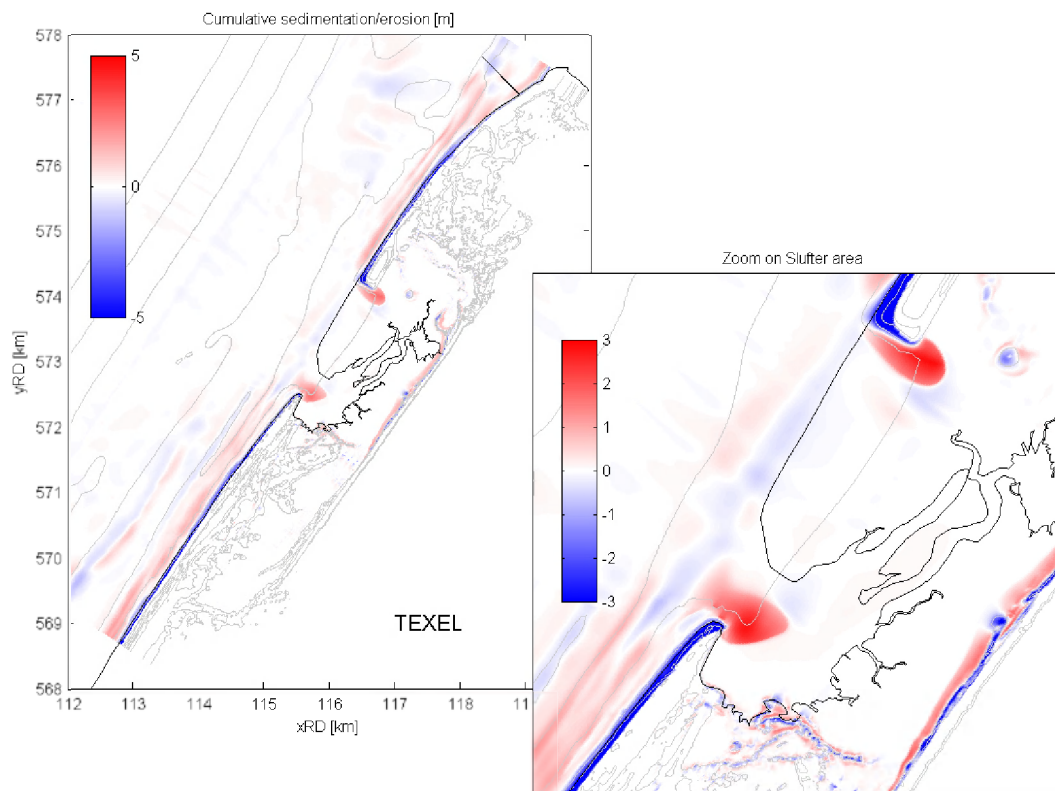
3.5 Situatie zonder duinen

Uit de modelresultaten van de voorgaande paragrafen blijkt dat de zanddijk voldoende volume heeft om de impact van een normatieve (1/4000 per jaar) storm te kunnen weerstaan (voor zowel loodrecht- als schuin invallende golven), zelfs als de monding twee maal zo breed zou zijn, of op een noordelijker locatie zou liggen. Echter, in alle gevallen wordt de zanddijk nog voor een groot deel beschermd door de voorliggende duinenrij. Een interessante vraag is wat er zou gebeuren als deze duinenrij in zijn geheel zou verdwijnen, en of de zanddijk dan nog steeds sterk genoeg is om het achterland te beschermen tegen een normatieve storm.

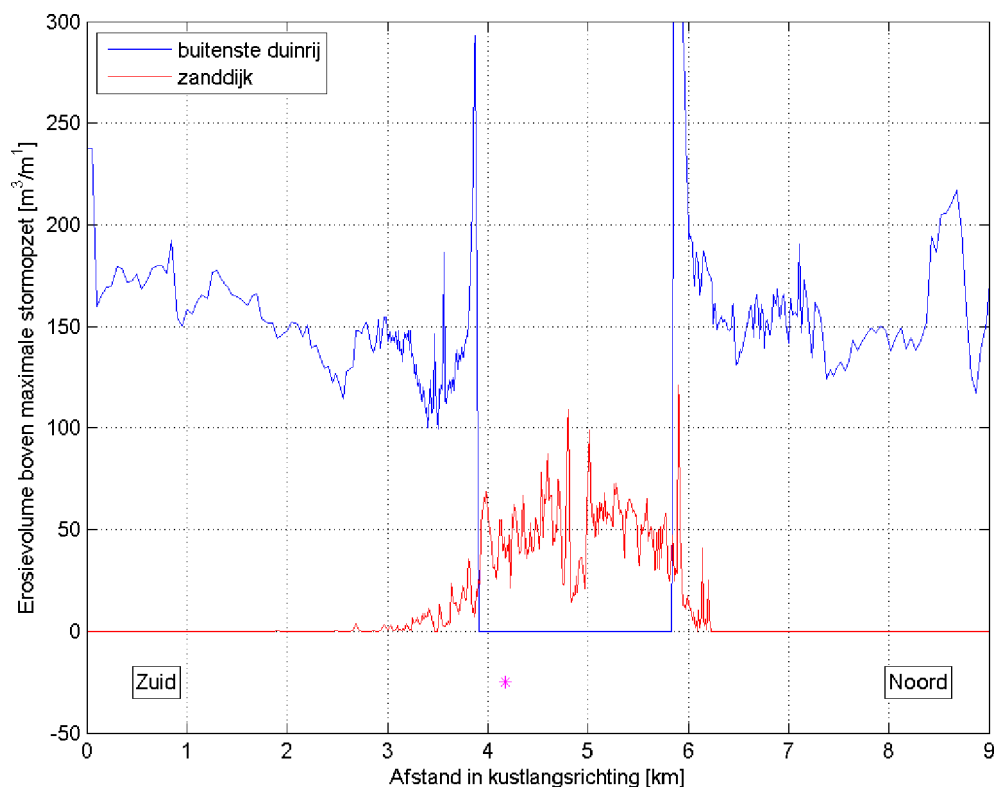
Dit is onderzocht door de duinen over een lengte van bijna 2 km te verwijderen en vervolgens de (oorspronkelijke) Sluftervallei in een aantal stappen glad te strijken zodat een min of meer realistische situatie ontstaat (zie Figuur 2.5). Vervolgens is een berekening met het 1/4000 per jaar stormscenario (NW golven) uitgevoerd. Figuur 3.14 laat zien dat de gemiddelde waterstand lager is in vergelijking met de huidige bodemligging, maar dat de golfimpact op de zanddijk (zoals verwacht) vele malen groter is. Voor zowel de korte als lange golven geldt dat de golfhoogte nabij de zanddijk meer dan 1 meter bedraagt. Dit heeft uiteraard relatief grote morfologische veranderingen nabij de zanddijk tot gevolg (Figuur 3.15), maar de belangrijkste vraag blijft of de zanddijk de storm kan weerstaan. Figuur 3.16 laat zien dat het erosievolume van de zanddijk in vergelijking met de huidige situatie is toegenomen, en tussen de 50 en 120 m³/m¹ bedraagt. Dit is echter nog steeds ruim minder dan het 500 m³/m¹ aanwezige volume zand (Figuur 3.7), en de zanddijk heeft dus genoeg volume om de storm te weerstaan (het erosievolume bedraagt ongeveer 20 tot 25 % van het aanwezige zandvolume). Dit wordt bevestigd door een kaart van de maximale inundatie (Figuur B.4).



Figuur 3.14 Gemiddelde waterstand (links), korte-golfhoogte (midden) en lange-golfhoogte (rechts) voor een 1/4000 per jaar storm in combinatie met geen duinen voor de Sluftervallei (in meter).



Figuur 3.15 Cumulatieve sedimentatie (rood) en erosie (blauw) als gevolg van een 1/4000 per jaar storm in combinatie met geen duinen voor de Slufter. De zwarte contourlijn is de kustlijn gebaseerd op de meest recente satellietfoto beschikbaar in Google Earth (jaar van opname: 2005).



Figuur 3.16 Totaal erosievolume boven maximale stormopzet (NAP + 4,3 m) in kustlangsrichting (ter hoogte van strandpaal 31 tot strandpaal 20,11) voor de zeewaartse duinenrij en de zanddijk als gevolg van de 1/4000 per jaar storm i.c.m. geen duinen voor de Slufter. De roze stip geeft de locatie van de huidige monding weer.

3.6 Grensprofiel

In de voorgaande paragrafen is gekeken naar de gevolgen van normatieve stormcondities voor de kustveiligheid ter plaatse van de Slufter voor een aantal scenario's. Hierbij is gefocust op de morfologie en bleek dat in geen van de scenario's een doorbraak van de zanddijk optrad, zelfs niet wanneer de zeewaartse duinenrij niet aanwezig zou zijn.

Echter, bij het toetsen van de veiligheid van primaire waterkeringen wordt niet alleen gekeken naar het wel of niet optreden van een doorbraak, maar dient na een storm ook nog een minimaal profiel aanwezig te zijn. Dit zogenaamde grensprofiel vertegenwoordigt de minimale afmetingen waarmee de waterkering de laatste golf in een storm nog net zou moeten kunnen weerstaan.

De berekening van het grensprofiel staat beschreven in het Technisch Rapport Duinafslag (Van de Graaff et al., 2007). Het heeft een prismavorm met een zeewaartse helling van 1:1 en een landwaartse helling van 1:2. De zeewaartse teen van het grensprofiel ligt op rekenpeil (RP) niveau en de horizontale locatie is afhankelijk van het afslagpunt (plus een veiligheidsmarge), terwijl de landwaartse teen op NAP niveau ligt. De breedte van de kruin is 3 meter en de vereiste hoogte wordt berekend aan de hand van de volgende formule:

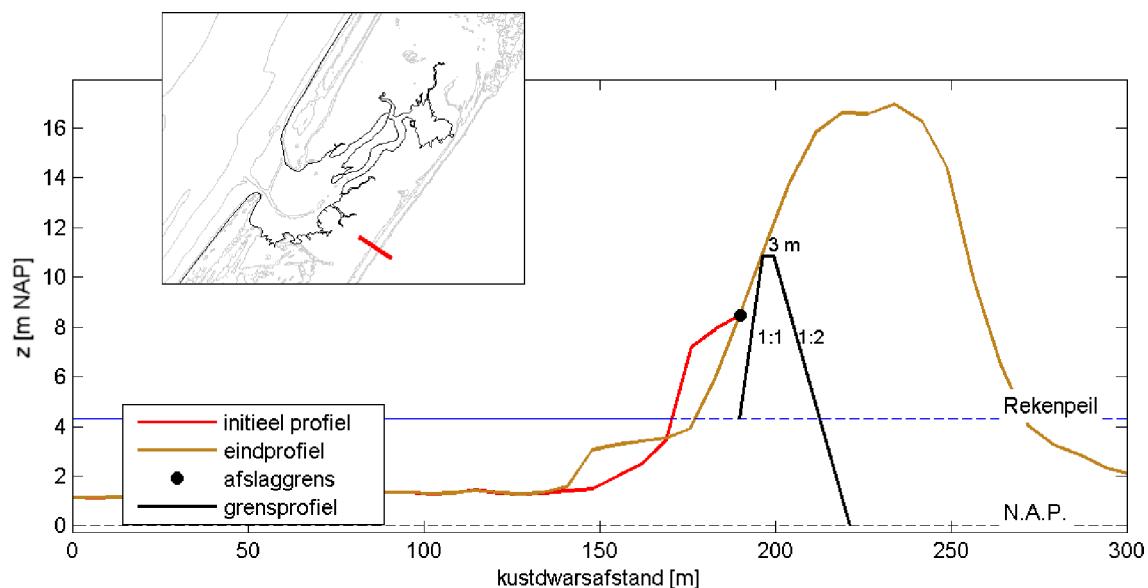
$$h_0 = RP + 0,12 \cdot T_p \cdot \sqrt{H_{0s}}$$

waarbij RP het rekenpeil t.o.v. NAP is, T_p is de buitengaatse golfperiode en H_{0s} is de buitengaatse significante golfhoogte. De bijbehorende waarden worden overgenomen uit het Hydraulisch Randvoorwaardenboek (HR, 2006; Rijkswaterstaat, 2007) en zijn gelijk aan de opgelegde modelrandvoorwaarden ($RP = \text{NAP} + 4,3 \text{ m}$, $T_p = 16,7 \text{ seconden}$ en $H_{0s} = 10,75 \text{ m}$; zie ook Hoofdstuk 2). Dit levert ter plaatse van de Slufter een grensprofielhoogte van $\text{NAP} + 10,87 \text{ m}$ op. Een waterkering wordt als veilig beschouwd als het grensprofiel binnen het dijklichaam past, en/of als het beschikbare volume zand boven het rekenpeil groter is dan het volume van het grensprofiel.

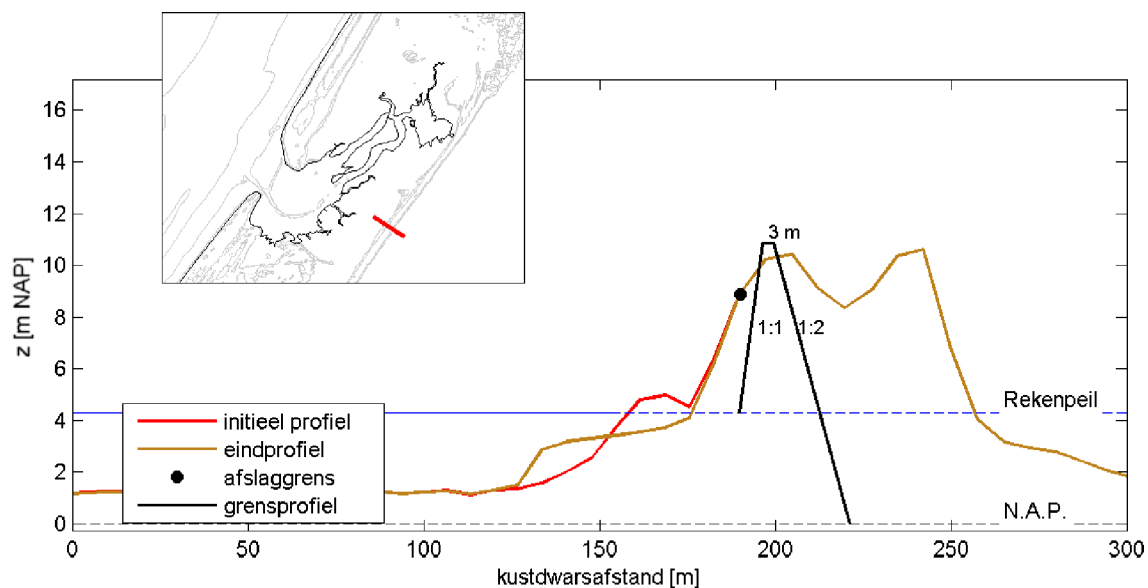
In Figuur 3.17 is een doorsnede van de zanddijk weergegeven inclusief het initiële profiel, het eindprofiel (na een 1/4000 per jaar storm van 32 uur) en het grensprofiel. De raai is zo gekozen dat deze als representatief kan worden beschouwd voor het deel van de zanddijk waar de impact het grootst is (i.e. direct achter de monding). Zoals uit de figuur blijkt past het grensprofiel ruim binnen de zanddijk. Merk op dat strikt genomen ook nog een veiligheidsmarge dient te worden meegenomen (Van de Graaff et al., 2007). Deze marge wordt uitgedrukt in een landwaartse verschuiving van 0,25 maal de afslagafstand en wordt meegenomen om de duur van de stormvloed en de modelonnauwkeurigheid mee te nemen. Voor de XBeach berekeningen is de afslagafstand echter niet triviaal te berekenen, maar uit de figuur blijkt duidelijk dat er nog ruim voldoende ruimte is om het grensprofiel in landwaartse richting te kunnen verschuiven.

In Figuur 3.18 is een doorsnede weergegeven voor een locatie waar de kruin van de zanddijk relatief laag ligt. Het grensprofiel past hier niet binnen de dijkcontour. Wanneer echter wordt gekeken naar het volume van het dijklichaam blijkt dat het grensprofiel met gemak binnen de dijk getekend zou kunnen worden.

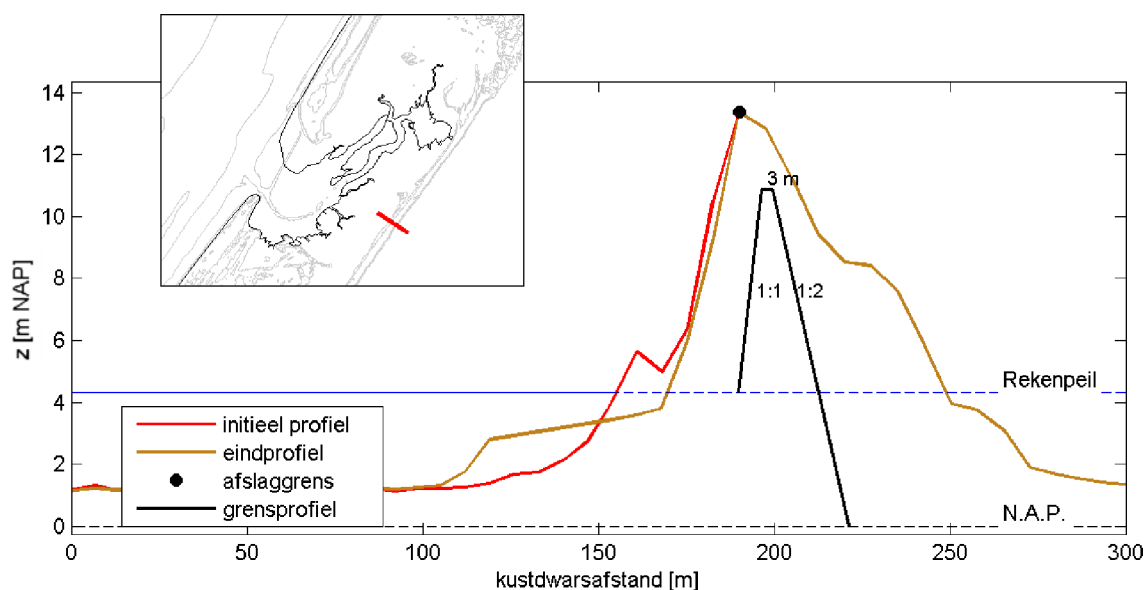
In Figuur 3.19 is de doorsnede van de zanddijk weergegeven met de relatief grootste impact als gevolg van de 1/4000 per jaar storm in combinatie met een bredere monding. De afslag reikt tot de top van de zanddijk, maar het dijklichaam herbergt nog meer dan voldoende volume om het grensprofiel te kunnen passen. Voor het scenario met de meer noordelijk gelegen Sluftermonding blijkt eveneens dat op de locaties met de grootste impact de zanddijk voldoende volume bevat om het grensprofiel te kunnen passen (Figuur 3.20).



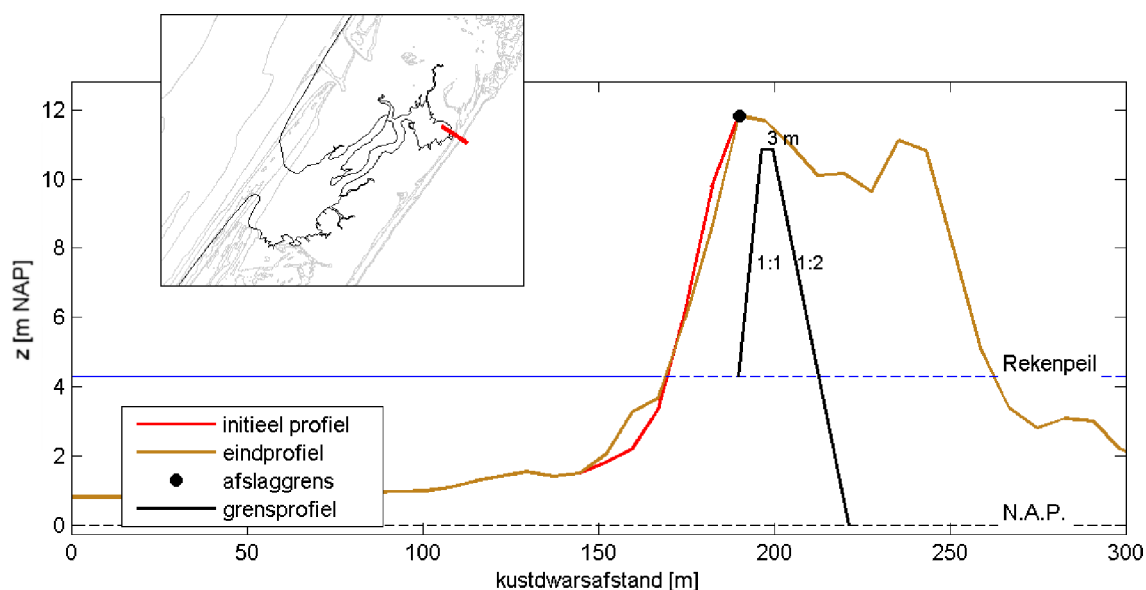
Figuur 3.17 Doorsnede van de zanddijk voor een 1/4000 per jaar storm voor de huidige bodemligging (referentiesituatie), inclusief grensprofiel. Linksboven: locatie van doorsnede.



Figuur 3.18 Doorsnede van de zanddijk voor een 1/4000 per jaar storm voor de huidige bodemligging (referentiesituatie), inclusief grensprofiel. Linksboven: locatie van doorsnede.



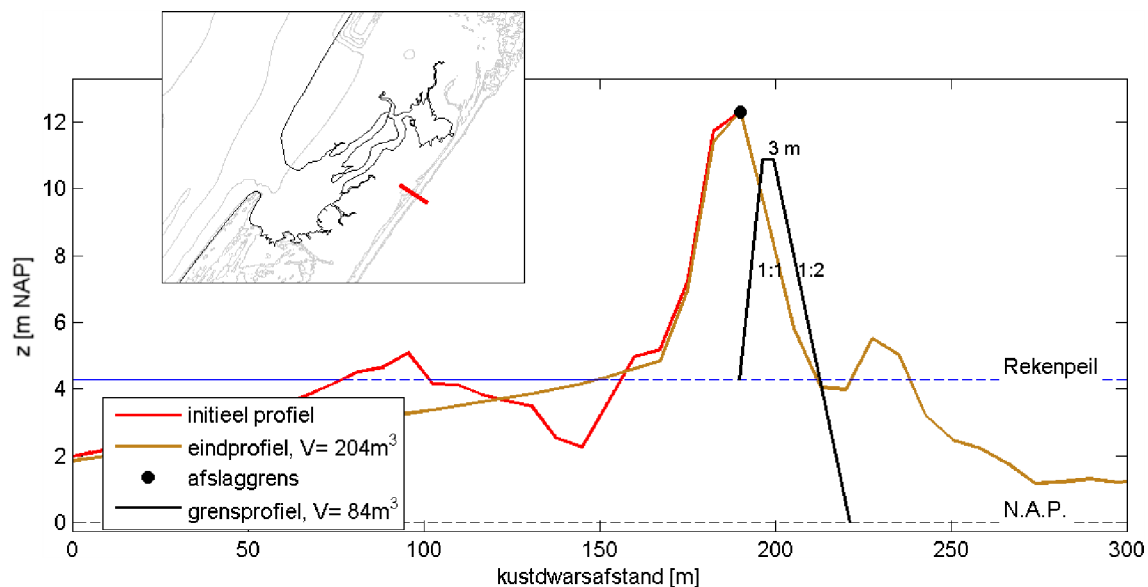
Figuur 3.19 Doorsnede van de zanddijk voor een 1/4000 per jaar storm voor de situatie met een bredere monding, inclusief grensprofiel. Linksboven: locatie van doorsnede.



Figuur 3.20 Doorsnede van de zanddijk voor een 1/4000 per jaar storm voor de situatie met een noordelijker gelegen monding, inclusief grensprofiel. Linksboven: locatie van doorsnede.

In sectie 3.5 bleek dat zelfs wanneer de zeewaarts gelegen duinenrij er niet zou zijn, er geen doorbraak van de zanddijk plaatsvindt. Uit een analyse van de doorsneden van de zanddijk blijkt dat een groot aantal raaien meer dan voldoende volume hebben om een grensprofiel in te kunnen passen. Er zijn echter een aantal raaien waar de dijk relatief smal is en waar de afslag tot aan de top van de zanddijk plaatsvindt. Een voorbeeld hiervan is gegeven in Figuur 3.21. Deze raai zou strikt genomen niet meer goedgekeurd mogen worden aangezien er niet voldoende volume aanwezig in landwaartse richting van het afslagpunt. Echter, hierbij moet wel opgemerkt worden dat het initiële profiel al niet volgens de richtlijnen voldoet. Daarnaast vertegenwoordigt het 'geen duin'-scenario een zeer extreme situatie. Mocht de Sluftermonding zich op lange termijn op deze manier gaan ontwikkelen, dan zal het beleid van de overheid daar op worden aangepast.

Samenvattend kan worden gesteld dat de berekende afslag van de zanddijk tijdens een normatieve storm relatief klein is. De dijk herbergt dan ook voldoende volume op de locaties waar de stormimpact plaatsvindt. Het effect van een bredere of noordelijker gelegen Sluftermonding op de veiligheid van de waterkering lijkt in vergelijking met de huidige situatie minimaal. Echter, voor het scenario waarbij de zeewaarts gelegen duinen zijn weggehaald, blijken enkele raaien op voorhand al niet te voldoen aan de eisen met betrekking tot het grensprofiel.



Figuur 3.21 Doorsnede van de zanddijk voor een 1/4000 per jaar storm voor de situatie zonder zeewaartse duinenrij, inclusief grensprofiel. Linksboven: locatie van doorsnede.

4 Morfodynamiek van de Slufter

4.1 Inleiding

In Hoofdstuk 3 is ingegaan op mogelijke effecten voor de kustveiligheid als gevolg van een ander beheer- en onderhoudsbeleid met betrekking tot de Sluftermonding (i.e. het niet fixeren van de monding). Naast de kustveiligheid kan het stoppen met ingrijpen in de natuurlijke dynamiek van de monding invloed hebben op de morfodynamiek van de gehele Slufter. Dit zou verstrekende gevolgen kunnen hebben voor de ecologie en bodemligging van de Slufter.

In dit hoofdstuk wordt getracht om meer inzicht te krijgen in de drijvende krachten achter de morfologische ontwikkeling van de Sluftermonding en –vallei. Uitgangspunt hierbij is dat deze gedreven wordt door stormen. Voor de vallei lijkt dit een valide aanname aangezien deze alleen inundeert gedurende springtij- en/of stormvloedcondities. Voor de monding is dit iets minder evident en spelen mogelijk ook langere termijn processen, zoals zandtransport langs de kust, een rol. Deze worden in deze studie echter niet meegenomen.

Er wordt in dit hoofdstuk onderscheid gemaakt op basis van de intensiteit van bepaalde hydraulische condities, en de keuze is gemaakt om de volgende stormscenario's mee te nemen in de analyse (zie ook paragraaf 2.5):

- 1/4000 per jaar storm (scenario-nr. 1 en 2),
- 1/10 per jaar storm (scenario-nr. 7 en 8),
- 1/1 per jaar storm (scenario-nr. 9 en 10),
- Springtijscenario (scenario-nr. 11 en 12).

Hierbij wordt de huidige bodemconfiguratie als uitgangspunt genomen (zie ook Hoofdstuk 2). De modelresultaten dienen inzicht te geven in de ruimtelijke response als gevolg van bovengenoemde (storm)condities. Bij de analyse wordt hierbij een onderscheid gemaakt tussen de morfologische ontwikkeling van de Sluftervallei en van de monding zelf. Ten slotte wordt voor dezelfde scenario's ingezoomd op de sedimentflux door de monding. Dit laatste is van belang met het oog op zeespiegelstijging.

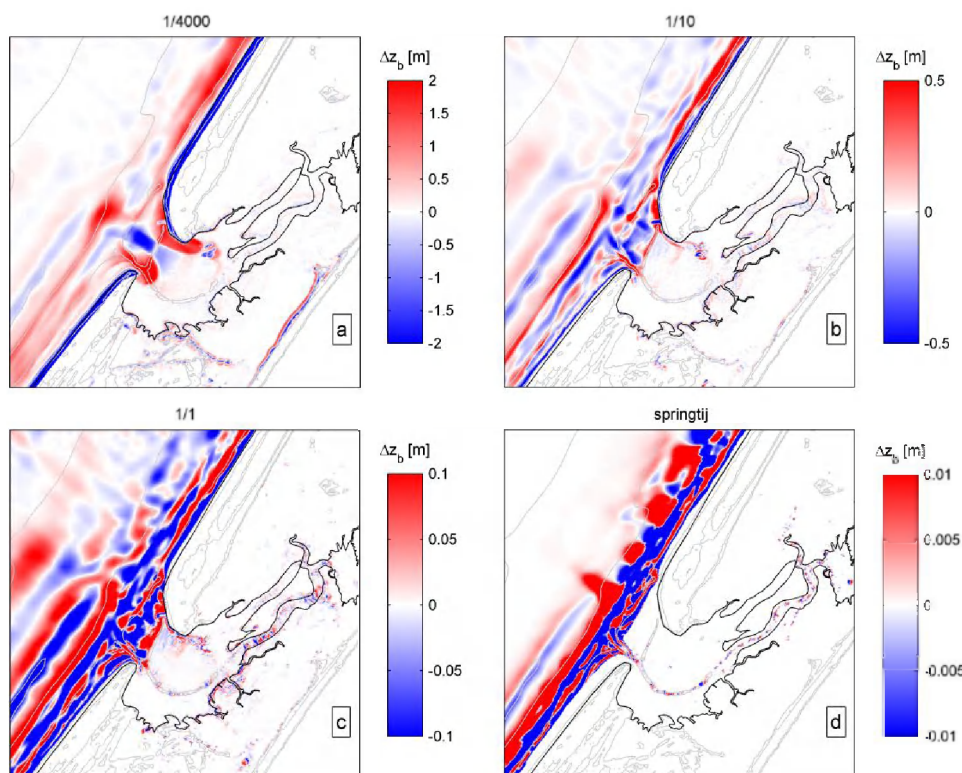
4.2 Morfodynamiek van de Sluftervallei

In Figuur 4.1 is de cumulatieve sedimentatie en erosie (verschil tussen begin- en eindbodem) voor de vier verschillende stormscenario's weergegeven (merk op dat de kleurenschaal per paneel verschilt), waarbij de golven in alle vier gevallen uit het noordwesten komen. De figuur laat zien dat de morfologische veranderingen significant groter zijn voor normatieve condities in vergelijking met bijvoorbeeld een springtij-event, zoals te verwachten is. Voor de 1/4000 per jaar storm bedragen de bodemveranderingen enkele meters, voor de 1/10 per jaar storm enkele decimeters, voor de 1/1 per jaar storm enkele centimeters, en voor het springtijscenario enkele millimeters.

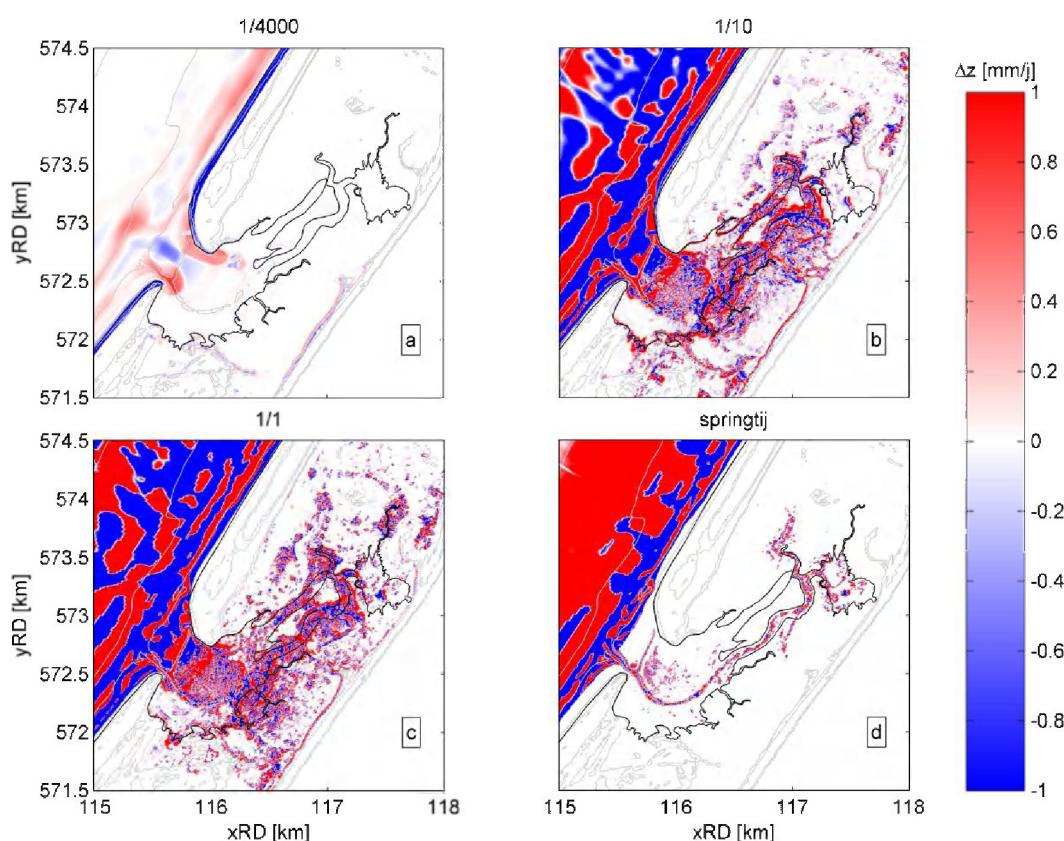
Ook al levert het springtijscenario in vergelijking met de 1/4000 per jaar storm nauwelijks sedimentatie en erosie op, de kans van voorkomen is vele malen groter. Dit betekent dat over een periode van bijvoorbeeld 4000 jaar, de 1/4000 per jaar storm een keer zal zijn opgetreden, terwijl het springtijscenario tienduizenden keren heeft plaatsgevonden. Om de relatieve bijdrage (per jaar) van elk type storm op de morfologie in de vallei onderling te kunnen vergelijken, dient rekening te worden gehouden met deze kans van voorkomen.

Om die reden zijn de bodemveranderingen in het gehele modeldomein vermenigvuldigd met de kans van voorkomen per jaar (respectievelijk 1/4000, 1/10, 1/1 en 26). Het resultaat van deze berekening is weergegeven in Figuur 4.2, waarbij een aantal zaken opvallen. Allereerst valt op dat de relatieve bijdrage van een normatieve storm (1/4000 per jaar) aan de verwachte jaarlijkse morfodynamiek van de Sluftervallei relatief beperkt is, en dat de 1/10 en 1/1 per jaar stormevents de grootste morfologische response hebben. Ten tweede valt op dat de normatieve storm en de springtijconditie in een relatief beperkt gebied van de Sluftervallei een effect hebben. Voor de normatieve storm is er vooral een morfologische response in de nabijheid van de duinen en de monding, terwijl voor een springtij-event de morfologische response zich concentreert rond het geulenstelsel. De 1/10 en 1/1 per jaar storm veroorzaken bodemveranderingen in een groot deel van de vallei waarbij de grootste veranderingen nabij het geulenstelsel plaatsvinden.

Deze resultaten laten zien dat de ontwikkeling van de Sluftergeul in de vallei wordt gedomineerd door relatief kleine, maar hoger frequente stormevents (1/10, 1/1 en springtij). Voor de vallei lijkt vanwege de bodemhoogteligging ten opzichte van de stormopzet een soort minimum stormintensiteit te gelden, waarboven deze pas morfologisch actief wordt. Hier geldt eveneens dat een laagfrequente storm met een hoge intensiteit (i.e. 1/4000 per jaar storm) een relatief beperkte invloed heeft op de lokale morfologie. De jaarlijkse storm lijkt op basis van de figuur het grootste relatieve effect te hebben op de algehele morfodynamiek van de Sluftervallei. Uiteraard betreft de huidige set aan stormcondities slechts een selectie, en zou het interessant kunnen zijn om dezelfde analyse toe te passen op stormen met een andere kans van voorkomen rondom de frequenties die het grootste effect lijken te hebben (bijv. 1/100 per jaar, 1/5 per jaar, 1/2 per jaar).



Figuur 4.1 Cumulatieve sedimentatie (rood) en erosie (blauw) voor (a) een 1/4000 per jaar, (b) een 1/10 per jaar, (c) een 1/1 per jaar storm, en (d) een springtijconditie.

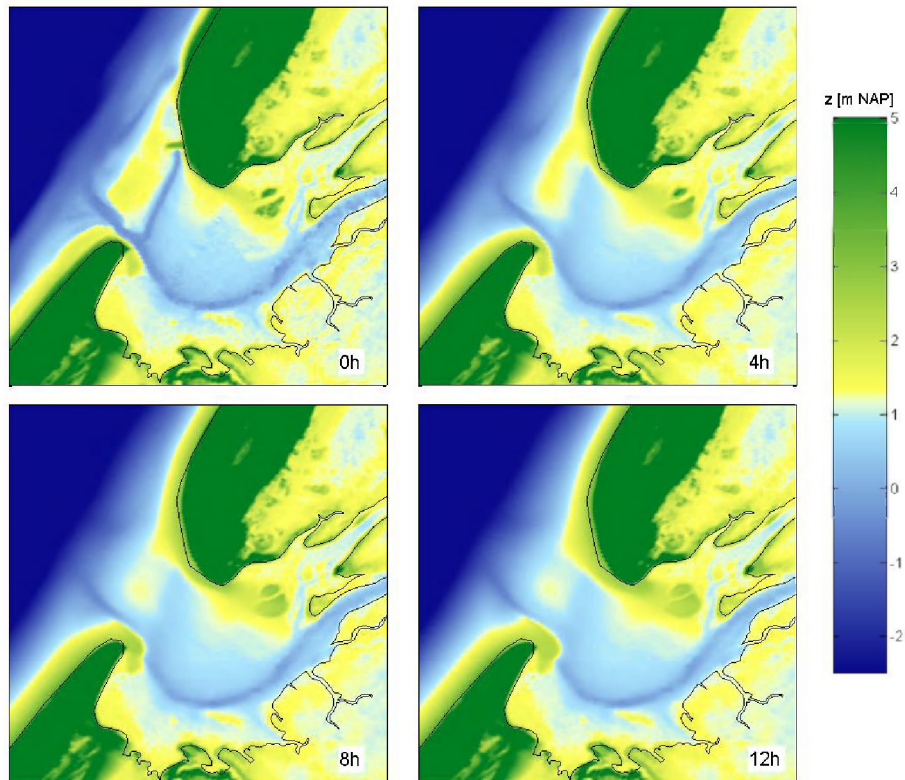


Figuur 4.2 Verwachte jaarlijkse sedimentatie (rood) en erosie (blauw) voor (a) een 1/4000 per jaar, (b) een 1/10 per jaar, (c) een 1/1 per jaar storm, en (d) een springtijconditie.

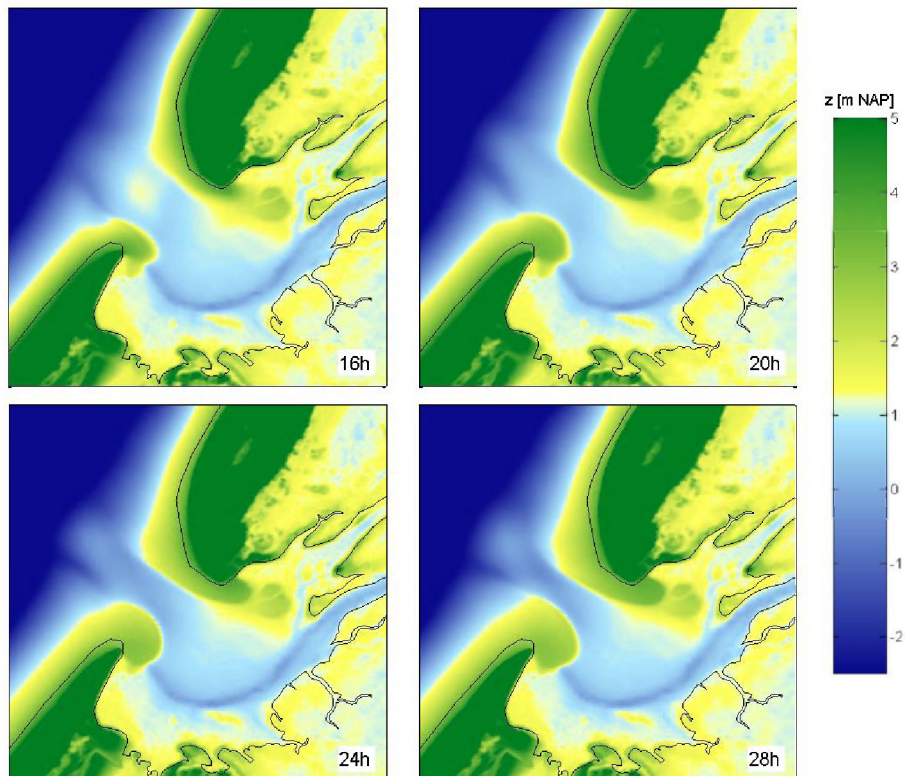
4.3 Morfodynamiek van de Sluftermondning

In de voorgaande paragraaf zijn de morfologische veranderingen in de Sluftervallei besproken. Echter, de grootste impact tijdens een storm vindt plaats in de omgeving van de monding. Hier is de golfenergie dermate hoog dat zand relatief makkelijk wordt opgewoeld en wordt het water met grote snelheid de Slufter in geperst zodat het zand kan worden meegevoerd. In deze paragraaf wordt gekeken naar de verandering van de monding als gevolg van de verschillende stormscenario's. Een belangrijke vraag hierbij is of de monding tijdens een storm verder uitschuurt en breder wordt, of dat de monding juist verzand. Dit laatste zou er in theorie voor kunnen zorgen dat er op termijn geen water meer de Slufter in kan stromen bij springtij met verstrekende gevolgen voor de ecologie in de Slufter.

In Figuur 4.3 en Figuur 4.4 is de ontwikkeling van de monding tijdens een 1/4000 per jaar storm (NW golven, buitengaats waterstand van NAP + 4,3 m en significante golfhoogte 10,75 m) weergegeven door middel van een serie momentopnamen van de bodemligging met een tijdsinterval van 4 uur. Het verloop in de tijd van de oplegde waterstand en golfcondities is gegeven in Figuur 2.3. De momentopnamen laten zien dat de zandbank tussen de geul en de noordelijke duinkop naar binnen wordt gedrukt tijdens het eerste deel van de storm (0 tot 16 uur). In het tweede deel van de storm wordt een grote hoeveelheid zand door de monding naar buiten getransporteerd en wordt tegelijkertijd een relatief brede geul gecreëerd. In de laatste 4 uur van de storm (28 tot 32 uur) zijn de bodemveranderingen relatief klein (niet weergegeven in figuur). Wanneer de eindsituatie (in dit geval na 28 uur) wordt vergeleken met de beginsituatie valt op dat de geul in noordoostelijke (kustlangs) richting is verplaatst en loodrecht op de kustlijn staat. De geul ook een stuk breder geworden.

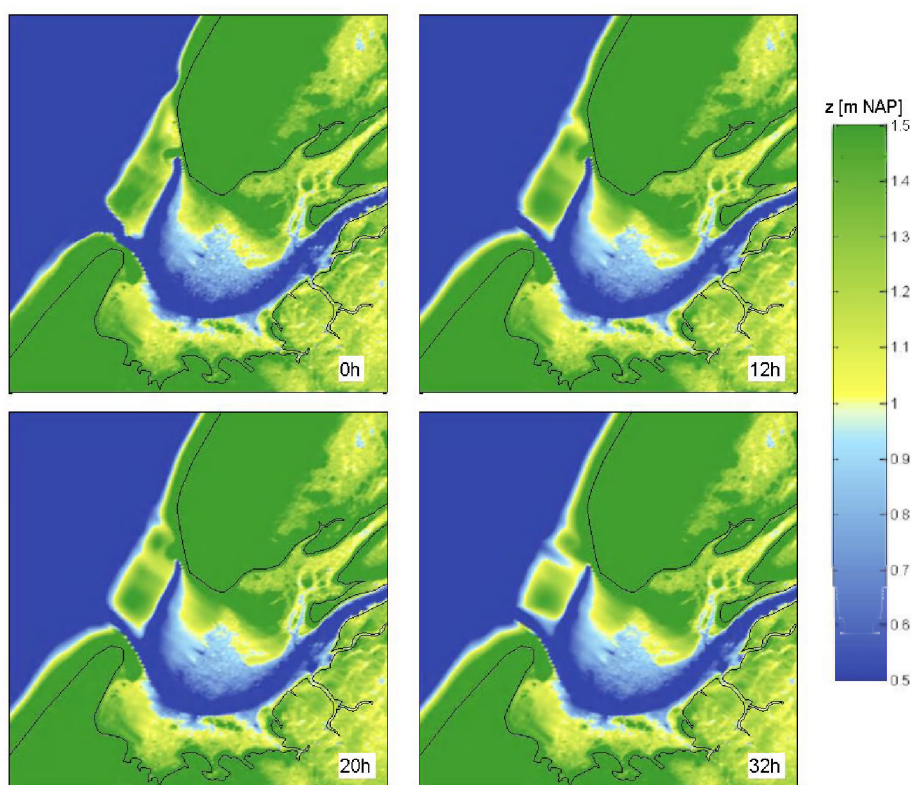


Figuur 4.3 Momentopnamen van de Sluftermonding tijdens een 1/4000 per jaar storm (NW golven), beginsituatie, na 4 uur, na 8 uur en na 12 uur.

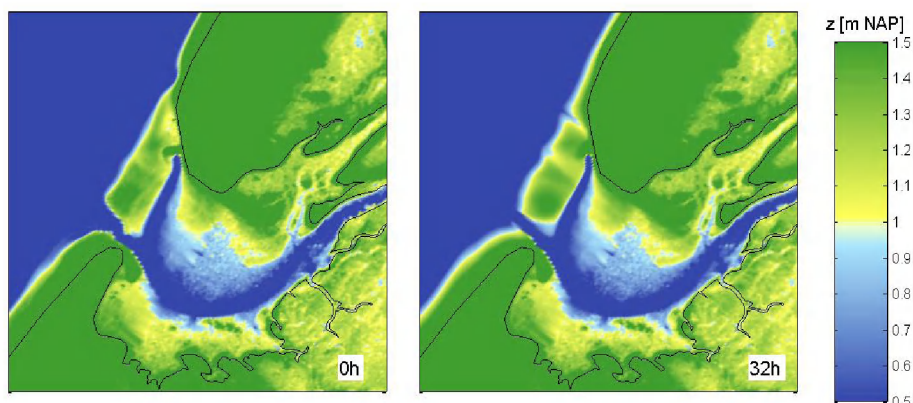


Figuur 4.4 Momentopnamen van de Sluftermonding tijdens een 1/4000 per jaar storm (NW golven), na 16 uur, 20 uur, 24 uur en 28 uur.

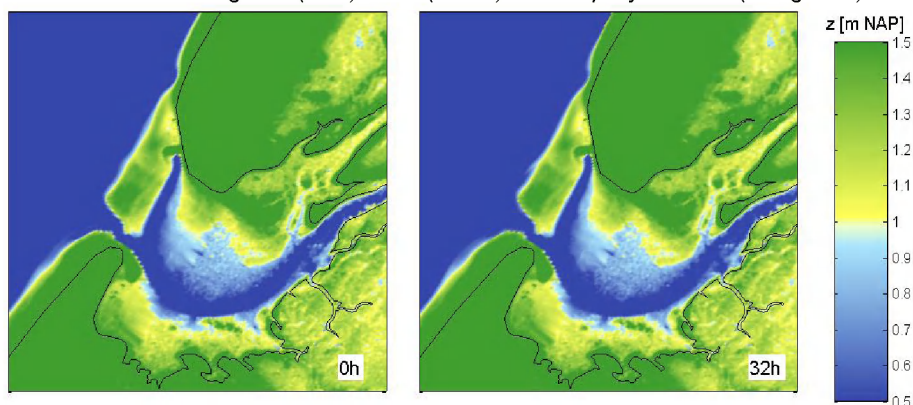
In Figuur 4.5 zijn enkele momentopnamen weergegeven van de Sluftermonding tijdens de 1/10 per jaar storm (NW golven, maximale buitengaatsse waterstand van NAP +2,7 m, significante golfhoogte van 7,7 m). De figuur laat zien dat de monding tijdens deze minder hevige storm redelijk stabiel blijft (vergelijk met Figuur 4.4, merk op dat de kleurenschalen verschillen). In het eerste deel van de storm vindt wat herverdeling van zand plaats op de zandbank voor de monding, maar dit is relatief beperkt. Tijdens de zwaarste periode van de storm (12 tot 20 uur) is de monding relatief stabiel, terwijl na de piek, tijdens het afnemen van de stormintensiteit (20 tot 32 uur), een kleine nevengeul lijkt te ontstaan in de buurt van de oorspronkelijke, afgesloten geul. De 1/10 per jaar storm heeft dus relatief weinig morfologische impact op de monding. Voor de 1/1 per jaar storm en het springtijscenario geldt dit nog veel sterker, en zorgt de 1/1 per jaar storm voor minimale bodemveranderingen ter plaatse van de zandbank voor de monding (Figuur 4.6), terwijl de springvloed geen of nauwelijks effect lijkt te hebben op de monding (Figuur 4.7).



Figuur 4.5 Momentopnamen van de Sluftermonding tijdens een 1/10 per jaar storm (NW golven), beginsituatie, na 12 uur, 20 uur, en 32 uur.



Figuur 4.6 De Sluftermonding voor (links) en na (rechts) een 1/1 per jaar storm (NW golven).



Figuur 4.7 De Sluftermonding voor (links) en na (rechts) een springvloed (NW golven).

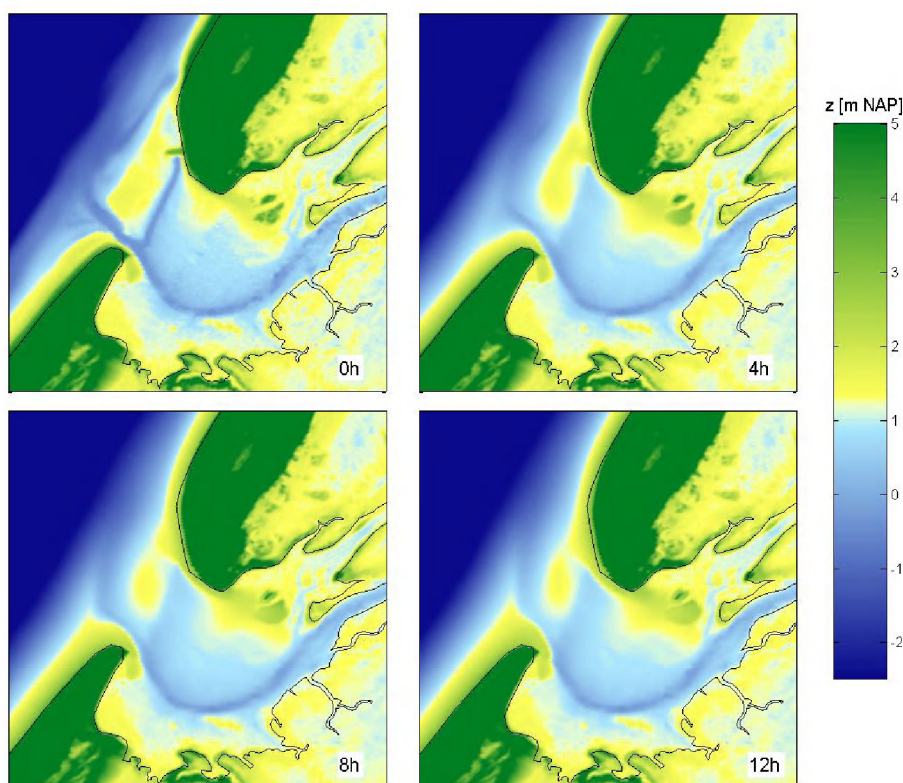
De resultaten suggereren dus dat de ontwikkeling van de Sluftermonding, zoals geobserveerd in de natuur (noordwaartse migratie), niet gestuurd wordt door deze gesimuleerde stormevents (i.e. 1/4000 per jaar, 1/10 per jaar en 1/1 per jaar storm i.c.m. loodrecht inkomende golven). Echter, de golfrichting zou hierbij nog een belangrijke rol kunnen spelen, aangezien in de hierboven beschreven scenario's de golfrichting loodrecht (noordwest) is aangenomen, terwijl de dominante windrichting in Nederland meer zuidwest is. Dit laatste kan tot gevolg hebben dat de golven een meer zuidwestelijke tot westelijke oorsprong hebben en onder een hoek bij de kust komen. Om het mogelijke effect van de golfrichting mee te nemen zijn de boven beschreven scenario's ook uitgevoerd met golven uit het westen.

In Figuur 4.8 en Figuur 4.9 zijn de momentopnamen voor de monding weergegeven voor een 1/4000 per jaar storm in combinatie met golven uit het westen. Over het eerste deel van de storm (van 0 tot 12 uur) is de ontwikkeling van de monding vergelijkbaar met het scenario met golven uit het noordwesten (vergelijk Figuur 4.3 en Figuur 4.8). Er blijft wel duidelijk meer zand in de opening liggen wanneer de golven uit het westen komen, en daarnaast lijkt het meest zeewaartse deel van de monding iets in noordelijke (kustlangs) richting te zijn verplaatst. Op de piek van de storm (tussen 12 en 20 uur) wordt het zand in de monding naar binnen gedrukt en ontstaat, net als bij het scenario met loodrecht invallende golven, een diepe en wijde monding (vergelijk Figuur 4.4 en Figuur 4.9). De oriëntatie van de monding is echter niet loodrecht op de kust, maar maakt een hoek van ongeveer 30 tot 45 graden met de kustnormaal. Wanneer de begin- en eindsituatie van de monding worden vergeleken lijkt dit sterk op het gedrag dat in de realiteit wordt geobserveerd; het meest zeewaartse deel van de monding migreert in noordelijke richting langs de kust, terwijl de geul steeds minder loodrecht

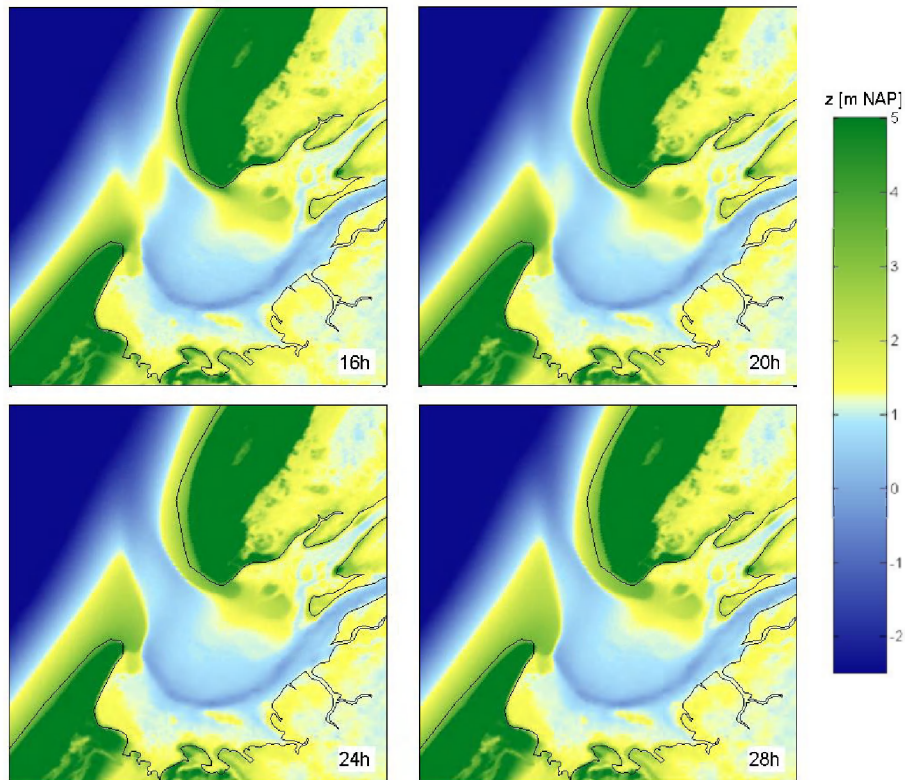
op de kust komt te liggen. Uiteraard dient hierbij wel in ogenschouw te worden genomen dat het hier een extreem scenario betreft en het morfologisch gedrag daardoor sterk is uitvergroot.

Voor de 1/10 per jaar storm geldt eveneens dat wanneer de golven uit het westen komen, het meest zeewaartse deel van de monding langs de kust in noordelijke richting beweegt, en de monding zelf minder loodrecht op de kust komt te liggen (vergelijk Figuur 4.5 en Figuur 4.10). Voor de 1/1 per jaar storm lijkt dit ook te gelden (Figuur 4.11), al zijn de bodemveranderingen dermate klein dat het onderscheid tussen een noordwestelijke en een westelijke storm nauwelijks zichtbaar. Hetzelfde geldt voor het springtijscenario (Figuur 4.12).

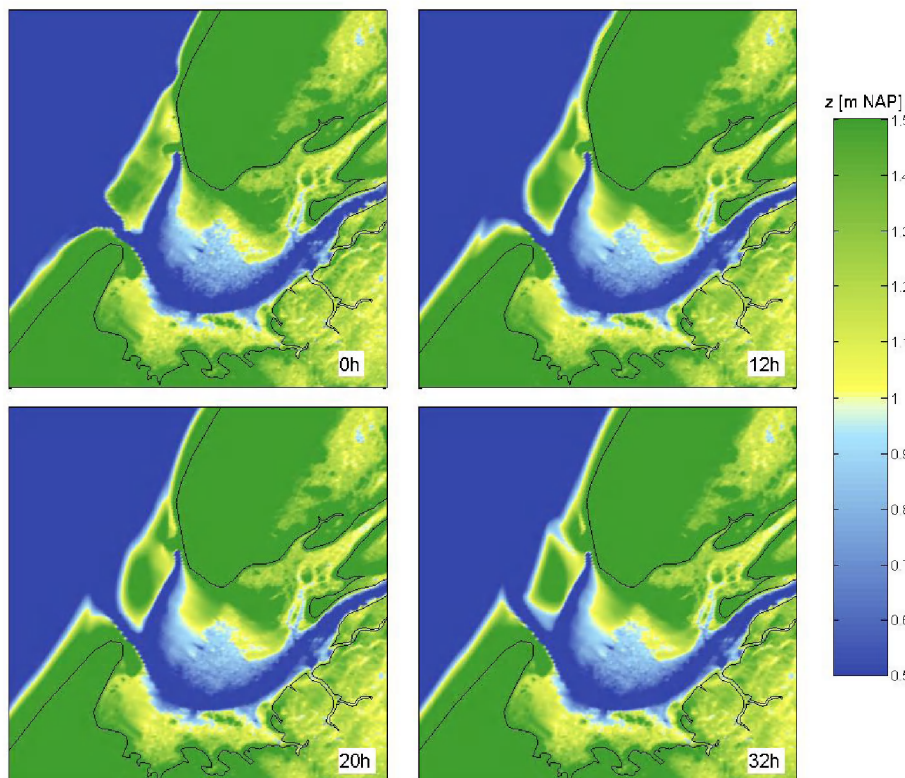
Op basis van deze resultaten lijkt de morfologische ontwikkeling van de Sluftermonding dus het meest gestuurd te worden door events met een relatief hoge intensiteit (bijvoorbeeld een 1/10 per jaar event), en waarbij de golfrichting een belangrijke rol speelt bij de migratie en uiteindelijke oriëntatie van de monding. Net als voor de morfodynamiek van de Sluftervallei (zie vorige paragraaf) geldt ook hier dat een minder extreem event (zoals een 1/1 per jaar storm of een springvloed) relatief vaak voorkomt en over een langere periode een grotere invloed zou kunnen hebben dan de extremere events. Om dit te kunnen verifiëren zijn meer modelsimulaties nodig waarbij bijvoorbeeld een serie van dezelfde of verschillende typen stormen wordt gesimuleerd. Naast de stormgedreven component is de monding ook sterk onderhevig aan lange termijn processen die continue werken. Hierbij valt te denken aan bijvoorbeeld kustlangstransport van zand. Het jaarlijks netto langstransport vindt in noordwaartse richting plaats en kan daarom ook een belangrijke component zijn in de noordwaartse migratie van de monding. Dit is echter in de huidige studie en bijbehorende modelopzet niet meegenomen



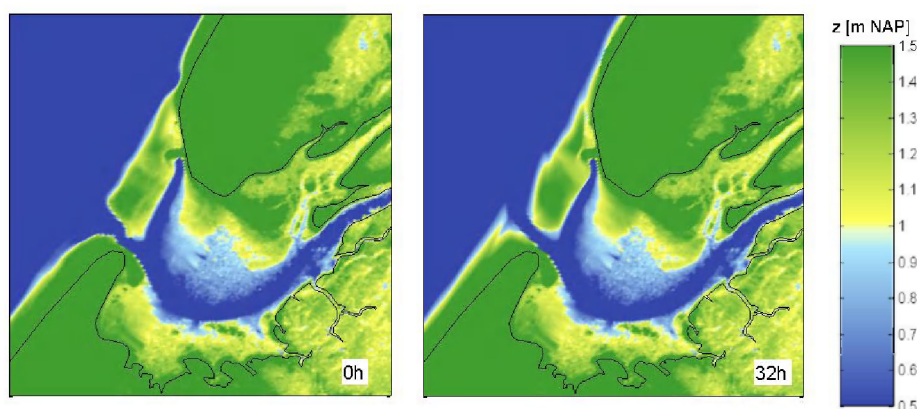
Figuur 4.8 Momentopnamen van de Sluftermonding tijdens een 1/4000 per jaar storm (W golven), beginsituatie, na 4 uur, na 8 uur en na 12 uur.



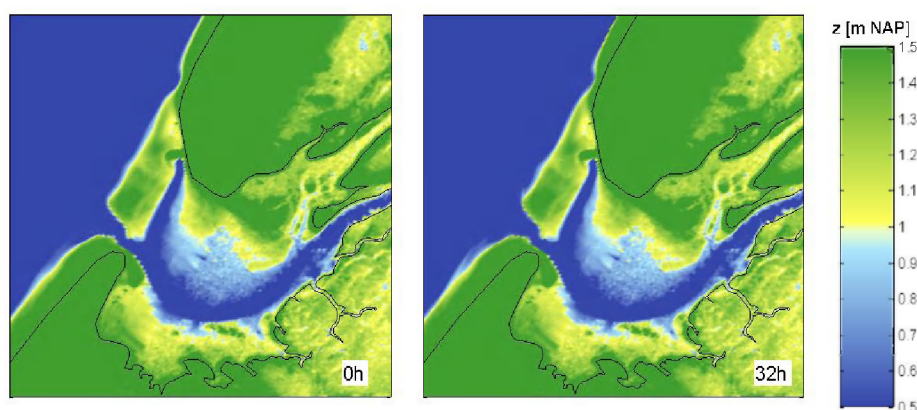
Figuur 4.9 Momentopnamen van de Sluftermonding tijdens een 1/4000 per jaar storm (W golven), na 16 uur, 20 uur, 24 uur en 28 uur.



Figuur 4.10 Momentopnamen van de Sluftermonding tijdens een 1/10 per jaar storm (W golven), beginsituatie, na 12 uur, 20 uur, en 32 uur.



Figuur 4.11 De Sluftermonding voor (links) en na (rechts) een 1/1 per jaar storm (W golven).

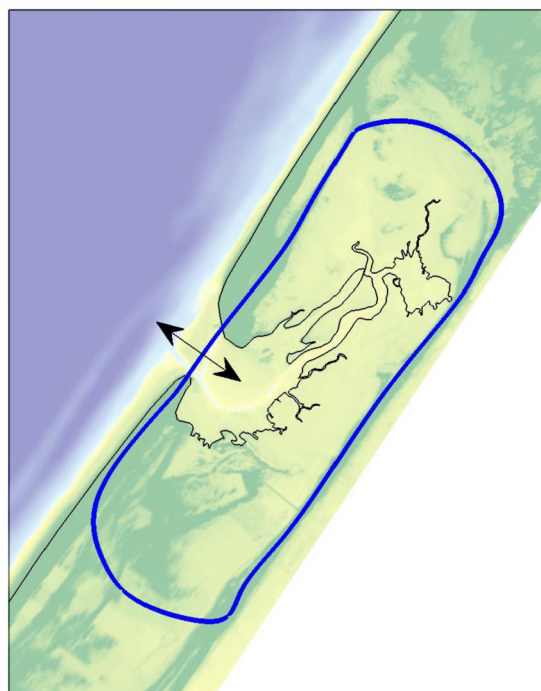


Figuur 4.12 De Sluftermonding voor (links) en na (rechts) een springvloed (W golven).

4.4 Sedimentflux door de Sluftermonding

Tot zover zijn de bodemveranderingen in de Sluftervallei en nabij de monding beschouwd, hieruit is echter nog niet geheel duidelijk of er tijdens een storm een netto sedimentimport of – export plaatsvindt. Toch kan dit een belangrijk gegeven zijn met het oog op zowel de kustveiligheid als op de ecologie. Wanneer de Slufter veel zand zou importeren, zou het gebied op termijn namelijk kunnen verzanden. In het geval de Slufter vooral zand zou exporteren, zou het gebied op termijn permanent onderwater kunnen staan. Een ander belangrijk aspect, sterk gerelateerd hieraan, is zeespiegelstijging. Als de natuurlijke morfologie de snelheid waarmee de zeespiegel stijgt niet kan bijhouden, kan het gebied uiteindelijk alsnog onderwater lopen, en komt mogelijk ook de kustveiligheid in het geding.

Om inzicht te krijgen in de sedimentflux tijdens de verschillende stormscenario's is gekeken naar de cumulatieve bodemveranderingen landinwaarts van de monding. De bodemveranderingen zijn vervolgens ruimtelijk geïntegreerd tot een zandvolume dat gelijk staat aan de flux door de monding (zie ook Figuur 4.13). Een positief zandvolume staat gelijk aan een netto sedimentimport, en een negatief zandvolume aan een netto sedimentexport. In Tabel 4.1 zijn de resultaten voor de 1/4000 per jaar, 1/10 per jaar, 1/1 per jaar en het springtijscenario weergegeven. Opvallend is dat in alle gevallen zand wordt geïmporteerd, en dat er steeds ongeveer een factor 10 à 20 tussen de opeenvolgende scenario's zit. De netto influx voor, met name, de 1/4000 per jaar storm (2500 m^3) lijkt vrij hoog, maar aangezien de Slufter een oppervlakte heeft van ongeveer 400 ha levert dit een gemiddelde toename in bodemhoogte op van nog geen millimeter.



Figuur 4.13 Methode voor bepaling van sedimentflux (zwarte pijlen). De blauwe omhullende lijn geeft het gebied aan waarbinnen de cumulatieve bodemveranderingen zijn geïntegreerd. Het uiteindelijke zandvolume (positief of negatief) dat volgt uit deze berekening is gelijk aan de netto sedimentflux.

Tabel 4.1 Netto sedimentflux door de monding als gevolg van een stormscenario.

Stormscenario	Netto sedimentflux [m ³]
1/4000 per jaar	+2500
1/10 per jaar	+115
1/1 per jaar	+13
springvloed	+0,3

In paragraaf 4.2 is de relatieve bijdrage van de vier scenario's op de morfologische veranderingen in de Sluftervallei onderzocht door de bodemveranderingen te vermenigvuldigen met de kans van voorkomen. Wanneer dezelfde methode wordt toegepast op de sedimentflux wordt duidelijk dat ook hier de 1/10 per jaar en de 1/1 per jaar storm de grootste relatieve bijdrage hebben (Figuur 4.14).

Een belangrijke vraag is of de Slufter de toekomstige zeespiegelstijging kan bijhouden. Om te kunnen meegroeien met de stijgende waterstand is (veel) zand nodig. In het volgende zal een eerste grove schatting worden gemaakt hoeveel zand de Slufter per jaar naar verwachting zal importeren, en hoe dit zich verhoudt tot de huidige snelheid waarmee de zeespiegel stijgt. In Figuur 4.15 zijn de veranderingen in sedimentvolumes weergegeven als functie van de kans van voorkomen van de scenario's. Door het berekenen van de oppervlakte onder de grafiek wordt een gemiddelde sedimentflux per jaar verkregen. Dit levert een gemiddelde sedimentimport van 354 m³/jaar. Dat komt neer op een gemiddelde bodemtoename in de Slufter van ongeveer 0,1 mm/jaar (10 mm per eeuw). Merk op dat hierbij is gedeeld door de totale oppervlakte van de Slufter (~ 400 ha), terwijl alleen de meest extreme stormen over deze gehele oppervlakte morfologisch actief zullen zijn. Relatief mildere stormen veroorzaken vooral bodemveranderingen in en nabij het geulenstelsel (zie paragraaf 4.2).

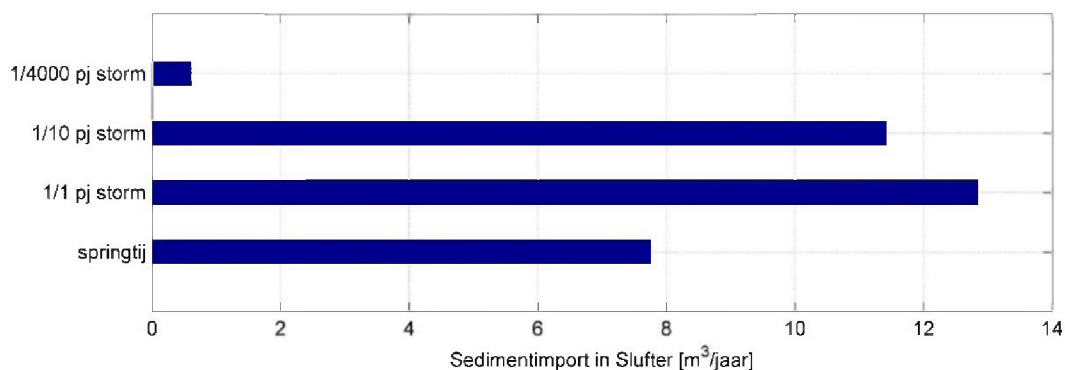
Echter, er wordt aangenomen dat al het sediment dat door de monding binnenkomt uiteindelijk over de gehele oppervlakte van de Slufter wordt verspreid (door golf-, stroming- en/of windgedreven transport).

De gemiddelde bodemtoename van 0,1 mm/jaar is onvoldoende om de huidige voorspelde zeespiegelstijging bij te houden (3,2 – 7,7 mm/jaar volgens KNMI⁴), en op basis van de modelresultaten lijkt het er dus niet op dat stormen er voor kunnen zorgen dat de Slufter mee zal groeien met de zeespiegelstijging. Echter, bij deze grove, initiële berekening dienen de volgende kanttekeningen te worden geplaatst:

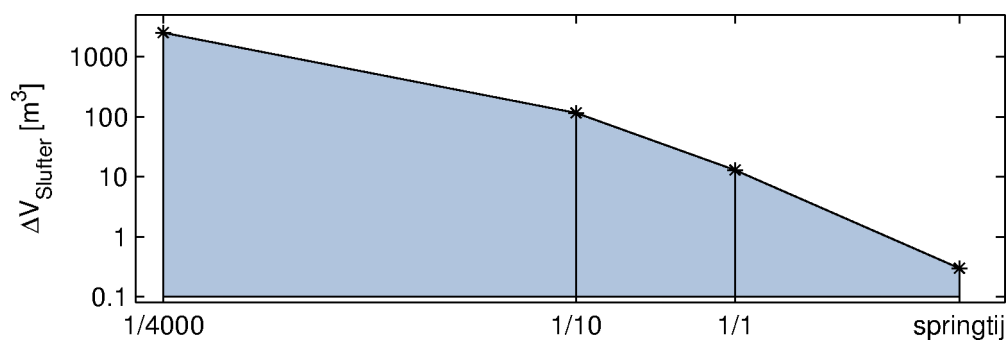
- Het betreft een beperkte selectie van stormscenario's (slechts vier verschillende frequenties van voorkomen van stormen zijn meegenomen),
- Voor de huidige methode heeft de 1/1 per jaar storm de grootste relatieve bijdrage, terwijl de oppervlakte tussen de 1/1 per jaar en het springtijscenario het grootst is (Figuur 4.15). Een storm met een iets grotere kans van voorkomen (bijv. 2/1 per jaar) zou daardoor een relatief groot effect kunnen hebben op de uiteindelijk berekende gemiddelde sedimentimport.
- Er is aangenomen dat een 1/4000 per jaar storm het meest extreme scenario is dat kan optreden; het effect van stormen met een kleinere kans van voorkomen is niet meegenomen.
- De zeespiegelstijging zelf is niet meegenomen in de simulaties; het is goed mogelijk dat deze langzaam genoeg is om de kust mee te laten groeien (mits er voldoende zand beschikbaar is).
- Kustlangstransport is niet meegenomen; zand zou niet alleen van zee kunnen komen (kustdwarsrichting), maar ook van andere delen van de Texelse kust (kustlangsrichting).
- Het volume aan beschikbaar zand zal naar verwachting een sleutelrol gaan spelen in de vraag of de Slufter mee kan groeien met zeespiegelstijging. Het kustsuppletiebeleid kan hier bijvoorbeeld een belangrijke rol in gaan spelen door er voor te zorgen dat er voldoende zand aanwezig is nabij de Slufter, dat vervolgens door kustlangs- en kustdwarsprocessen naar en in de Slufter kan worden getransporteerd.

Samenvattend kan op basis van de simulaties worden gesteld dat de Slufter tijdens stormen niet voldoende sediment importeert om zeespiegelstijging te kunnen bijhouden, maar dat hierbij een aantal belangrijke processen niet zijn beschouwd. De locatie en/of breedte van de Sluftermonding lijkt geen grote invloed hebben op het meegroeien van de Slufter, aangezien de gemiddelde sedimentimport per jaar ook bij een brede of noordelijke Sluftermonding relatief klein is (zie Figuur 4.16) ten opzichte van de voorspelde zeespiegelstijging. Naar verwachting zal de beschikbare hoeveelheid sediment de grootste rol gaan spelen in de vraag of de Slufter met de toekomstige zeespiegelstijging kan meegroeien.

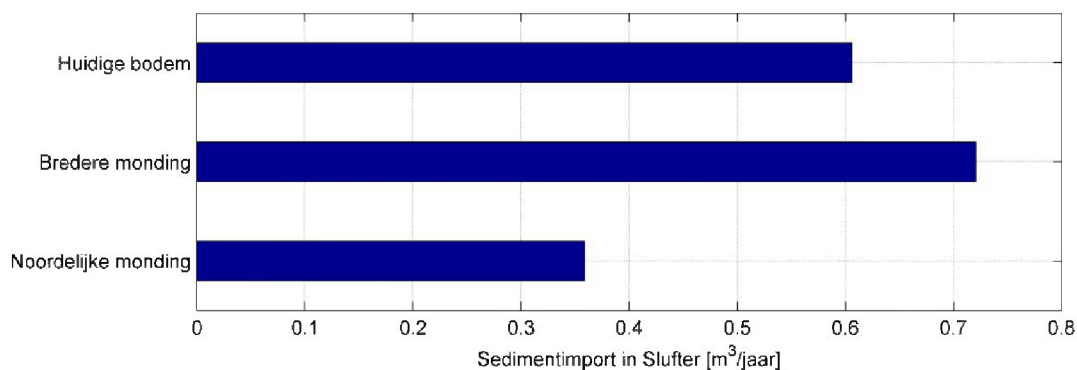
⁴ http://www.knmi.nl/cms/content/115877/zeespiegelveranderingen_in_de_toekomst



Figuur 4.14 Gemiddelde sedimentimport in Slufter per jaar (=sedimentflux x kans van voorkomen) voor de verschillende scenario's.



Figuur 4.15 Toename in zandvolume in de Slufter als functie van de kans op voorkomen per scenario. Wanneer de oppervlakte onder de grafiek wordt berekend (blauw), ontstaat een indicatie voor de gemiddelde jaarlijkse sedimentimport door stormen.



Figuur 4.16 Gemiddelde sedimentimport in Slufter per jaar (=sedimentflux x kans van voorkomen) voor de huidige bodem, bredere monding en noordelijke monding (1/4000 per jaar storm).

5 Conclusies en reflectie

5.1 Kustveiligheid

Als gevolg van een ander beheer en onderhoud van de monding van de Slufter (i.e. het loslaten van de monding) zou de bestaande Sluftermonding breder kunnen worden, dan wel in zijn geheel in noordwaartse richting kunnen verplaatsen. Dit zou gevolgen kunnen hebben voor de waterveiligheid van de achterliggende zanddijk, welke onderdeel is van de primaire waterkering. Om dit te onderzoeken zijn storms simulaties uitgevoerd met een XBeach gebiedsmodel waarbij normatieve condities (1/4000 per jaar) zijn doorgerekend. De simulaties bevatten verschillende scenario's waarin de Sluftermonding in noordelijke richting is gemigreerd, dan wel breder is geworden, en de resultaten zijn vergeleken met een referentiesimulatie waarin de huidige bodemligging is gebruikt.

De modelresultaten voorspellen een toename in zandafslag van de zanddijk wanneer de Sluftermonding breder wordt (50 – 100% toename), terwijl voor een noordelijk gelegen monding vergelijkbare afslag wordt gevonden. In relatie tot een eerdere studie (Van Thiel de Vries, 2011) waarin een eendimensionaal profielmodel is gebruikt, is de hier berekende afslag met een gebiedsmodel beduidend lager (orde 30-50%).

Verder is het effect van de golfrichting op de afslagvolumes onderzocht. Wat betreft de erosie van de zanddijk kan worden geconcludeerd dat deze ongevoelig is voor de golfrichting. Het verloop van de afslag langs de zanddijk is vergelijkbaar voor zowel loodrecht en schief inkomende golven, waarbij de maximale erosie direct achter de Sluftermonding optreedt en afneemt (tot minimale afslag) in noordelijke en zuidelijke richting.

Concluderend kan gesteld worden dat in geen van de doorgerekende scenario's een ander beheer en onderhoud van de Sluftermonding lijkt te leiden tot een waterveiligheidsprobleem voor de zanddijk. De beschikbare hoeveelheid zand in de dijk boven maximale stormopzet (300-700 m³/m) lijkt overal ruim voldoende om het afslagvolume van 50-100 m³/m¹ tijdens normatieve condities op te vangen. Ook wanneer gekeken wordt naar het vereiste grensprofiel blijkt dat de zanddijk voor alle scenario's voldoende volume bevat op de locaties waar de stormimpact het grootst is.

Er is daarnaast specifiek gekeken naar een sectie van de zanddijk waar beheerders de afgelopen jaren extra onderhoud hebben gepleegd (locatie weergegeven in Figuur 2.4). De modelresultaten geven echter geen duidelijke aanwijzing dat zich hier een mogelijke erosie-hotspot bevindt. Voor een bredere monding en of noordelijk gelegen monding neemt de erosie van de zanddijk hier toe, maar niet meer dan op andere locaties. Het aanwezige volume in de zanddijk is evenwel ruim voldoende om het afslagvolume tijdens normatieve condities op te vangen.

Ten slotte is een berekening uitgevoerd waarbij het duin over een grote afstand (ongeveer 2 km) kunstmatig is afgegraven. Dit (extreme) scenario geeft een beeld van de ultieme stormimpact op de zanddijk die kan worden verwacht in het geval het duin op termijn volledig erodeert. Tijdens de simulatie vindt ook in dit geval geen doorbraak van de zanddijk plaats, al blijken enkele raaien niet te voldoen aan de eisen met betrekking tot het grensprofiel.

5.2 Morfodynamiek en ecologie

Bodemveranderingen in de Sluftervallei vormen een belangrijke randvoorwaarde voor de ontwikkeling van de natuurwaarden. Om te onderzoeken hoe en welke events de morfologie van de Sluftervallei sturen zijn modelscenario's uitgevoerd corresponderend met een 1/4000 per jaar, 1/10 per jaar, 1/1 per jaar en een springtijconditie.

De morfologische response van scenario's met verschillende kans van voorkomen verschilt onderling sterk, waarbij de impact van een normatief event ordes groter is dan van een springtij event. Door de bodemveranderingen te vermenigvuldigen met de overschrijdingsfrequentie wordt een verwachte bodemverandering per jaar verkregen. Hieruit blijkt dat een 1/10 per jaar en 1/1 per jaar event vooral de Sluftervallei beïnvloeden terwijl een 1/4000 per jaar event vooral een morfologische response nabij de duinen laat zien en een springvloed alleen een response nabij de geulen laat zien.

Voor de 1/10 per jaar tot 1/1 per jaar events kunnen dus leiden tot substantiële bodemveranderingen in de vallei en kunnen daarmee mogelijk ook een grote impact hebben op de ontwikkeling van de habitat in de Sluftervallei. De verwachting is dat deze events mogelijk een relatief grote invloed kunnen hebben op het ecosysteem omdat zij in een groot deel van de Sluftervallei substantiële bodemveranderingen ($> 5 - 10$ cm) veroorzaken en relatief vaak voorkomen. Op dit moment is onduidelijk hoe de stormgedreven morfodynamiek in de Sluftervallei het ecosysteem precies beïnvloedt. Dit vereist aanvullend onderzoek.

Tijdens een storm is de dynamiek van de Sluftermonding groot. De modelberekeningen laten zien dat, afhankelijk van onder andere de golfrichting en de stormopzet, de geul die de Sluftervallei verbindt met zee eventueel afgesloten kan worden (door de vorming van een spit) dan wel kan worden rechtgetrokken (kortsluiting). In het eerste geval zou een drempel voor de monding kunnen vormen die er (wanneer deze voldoende hoog wordt) voor kan zorgen dat er geen water meer binnen kan komen tijdens springtij. Dit lijkt op basis van de modelresultaten echter niet voor de hand te liggen, aangezien tijdens de afname van de stormintensiteit de Sluftervallei relatief snel leegstroomt en de monding daarbij uitschuurt. De bodemveranderingen in de vallei zelf zijn dermate klein dat ook 'verdrinking' van de Slufter op basis van de modelsimulaties niet realistisch lijkt. Voor minder extreme events neemt de dynamiek van de monding af, en zijn de effecten kleiner.

Op basis van analyse van transporten door de monding lijkt de Slufter netto sediment te importeren, de hoeveelheden zijn echter beperkt. Een eerste grove berekening van de gemiddelde toename in bodemligging in de Slufter als gevolg van stormen leidt tot marginale veranderingen, zelfs op een tijdschaal van bijvoorbeeld 100 jaar. In deze berekening zijn echter een aantal belangrijke factoren (bijv. mogelijk meegroeien van de Slufter met zeespiegelstijging, kustlangstransport) niet meegewogen.

Naast de berekende bodemveranderingen zijn er andere factoren die de habitatontwikkeling in de Sluftervallei beïnvloeden. Allereerst is er de saliniteit, die afhankelijk van onder andere hoogteligging, per locatie zal verschillen. Over het algemeen geldt dat hogere locaties minder vaak zullen overstromen (minder saliniteit) en dat lager frequente events een groter oppervlak van de Sluftervallei zullen overstromen. Op basis van de modelberekeningen beschreven in dit rapport zijn een aantal inundatie-animaties gemaakt, welke door HHNK gebruikt kunnen worden voor communicatiedoeleinden (zie Bijlage B voor inundatiekaarten voor alle uitgevoerde berekeningen). Naast de saliniteit zullen geïnundeerde gebieden blootgesteld worden aan bodemschuifspanningen als gevolg van stromingen en golven. Habitats kunnen deze schuifspanningen maar tot zeker hoogte weerstaan.

Kaarten van de maximaal optredende bodemschuifspanning voor de in deze studie uitgevoerde berekeningen zijn toegevoegd in Bijlage C.

5.3 Modellerings met XBeach

De resultaten en conclusies gerapporteerd in deze studie zijn voornamelijk gebaseerd op modelberekeningen met een XBeach gebiedsmodel. Er zijn een paar aspecten aan deze berekeningen die nuttig zijn bij de verdere interpretatie van de resultaten:

- In de uitgevoerde berekeningen is geen lokale golfopwekking en waterstandsopzet als gevolg van wind meegenomen. In de ondiepe Sluftervallei zou dit lokaal kunnen leiden tot hogere golven en een iets hogere (of lagere) waterstand. Voor de dijksectie achter de monding van de Slufter is de verwachting dat dit effect beperkt is; golfhoogten zijn daar nu meestal gelimiteerd als gevolg van de lokale diepte en golfsteilheid. De relatieve bijdrage van extra waterstandsopzet t.o.v. golfopzet zal beperkt zijn. Op andere locaties in de Sluftervallei kan het effect groter zijn. Echter het lijkt een redelijk valide aanname dat de uiteindelijke impact op de zanddijk nooit groter zal zijn dan achter de monding van de Slufter.
- In vergelijking met eerdere uitgevoerde eendimensionale berekeningen met XBeach (Van Thiel de Vries, 2011) is de hier berekende impact van normatieve condities substantieel kleiner (orde 30-50%). Belangrijkste oorzaak hiervoor is dat nu de richtingsverspreiding van de golven en geometrie van de Sluftervallei meegenomen zijn. De eerder uitgevoerde eendimensionale berekeningen geven daarmee een conservatieve schatting van de waterveiligheid van de zanddijk.

Op basis van de huidige resultaten zijn een aantal aanbevelingen naar voren gekomen voor mogelijk volgende modelstudies van de Slufter:

- In deze studie is een beperkte selectie van verschillende stormen doorgerekend. Om de morfodynamiek van de monding en vallei beter te kunnen begrijpen zouden stormen met een andere kans van voorkomen (bijv. 1/100 per jaar, 1/5 per jaar) inzicht kunnen verschaffen.
- Daarnaast zijn alleen individuele (kortdurende) stormen gemodelleerd. Om de ontwikkeling van de Sluftermonding beter te begrijpen zouden lange termijn berekeningen met een serie van dezelfde of verschillende stormen inzicht kunnen geven in het cumulatieve effect van deze stormen.
- Ten slotte is zeespiegelstijging in de simulaties niet meegenomen. Met het oog op zowel kustveiligheid als ecologie kan het interessant zijn om een aantal modelscenario's uit te werken waarin een stijging van de zeespiegel wel wordt meegenomen (bijvoorbeeld aan de hand van de voorspellingen van het Intergovernmental Panel on Climate Change).

Referenties

- Annink, N., P. Cofie, L. Denekamp, W.F. Louwersheimer, J. Veer (2010). Derde Toetsronde Primaire Waterkeringen HHNK. Rapport Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier.
- Balke, T. & L. Arentz (2013). Opstellen monitoringsplan Slufter Texel. Plan van Aanpak, kenmerk: 1207993-000-ZKS-006
- Caires, S. & J. van Os (2012). ORCA; Analysis, classification and transformation of metocean data. Guidelines & Manual. Reference: 1201959-000-HYE-0001, Deltares.
- Centrum voor Onderzoek Waterkeringen (1982). Hydraulische randvoorwaarden ten behoeve van modelonderzoek naar duinafslag. Notitie S-81.015.
- Deltares (2013), QUICKIN User Manual, Generation and manipulation of grid-related parameters such as bathymetry, initial conditions and roughness. Version: 4.00.29919.
- Den Heijer, C. (2013), The role of bathymetry, wave obliquity and coastal curvature in dune erosion prediction, PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands. uuid: 824df068-8046-414c-a1cc-7d159718918e.
- Durieux, M.X. (2003). Stabiliteit van de Slufter op Texel, MSc thesis, Technische Universiteit Delft, Delft, Nederland. uuid: ac0b9379-169e-42b3-90f8-b1f111ca27d4.
- Eysink, W.D., A. Hoekstra, F.M.J. Hoozemans (1992). Nederlandse sluffers, verkennende inventarisatie naar abiotische parameters. Waterloopkundig Laboratorium. In opdracht van Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde.
- Holthuijsen, L. H. (2007). Waves in Oceanic and Coastal Waters: Cambridge University Press.
- Koster Engineering (2010). Toetsing veiligheid duinwaterkering Texel.
- Rijkswaterstaat (2007). Hydraulische randvoorwaarden primaire waterkeringen voor de derde toetsronde 2006-2011 (HR 2006).
- Roelvink, J.A. (2005), Coastal morphodynamic evolution techniques, Coastal Engineering, Volume 53, Issues 2–3, Pages 277-287, ISSN 0378-3839, <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.10.015>.
- Roelvink D., A. Reniers, A. van Dongeren, J. van Thiel de Vries, R. McCall, J. Lescinski (2009), Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands, Coastal Engineering, Volume 56, Issues 11–12, Pages 1133-1152, ISSN 0378-3839, <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.08.006>.
- Steetzel, H.J. (1993). Cross-shore transport during storm surges. PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- Van de Graaff, J, MRA van Gent, M. Boers, F.L.M. Diermanse, D.J.R. Walstra & H.J. Steetzel (2007). Technisch rapport duinafslag: beoordeling van de veiligheid van duinen als

waterkering ten behoeve van voorschrift toetsing op veiligheid 2006. Den Haag: Rijkswaterstaat, RIKZ.

Van Gent, M.R.A., J.S.M. van Thiel de Vries, E.M. Coeveld, J.H. de Vroeg, J. van de Graaff (2008), Large-scale dune erosion tests to study the influence of wave periods, Coastal Engineering, Volume 55, Issue 12, Pages 1041-1051, ISSN 0378-3839.

Van Thiel de Vries, J.S.M. (2009). Dune erosion during storm surges. Phd thesis, Technische Universiteit Delft, Nederland. uuid:885bf4b3-711e-41d4-98a4-67fc700461ff

Van Thiel de Vries, J.S.M. (2011), Regionale advisering Slufter Texel, Memo voor Rijkswaterstaat aan Gemma Ramaekers, kenmerk 1202349-000-ZKS-0003.

A Bepaling van hydraulische randvoorwaarden

A.1 Maatgevende (normatieve) condities

Voor de maatgevende condities wordt in deze studie uitgegaan van de hydraulische randvoorwaarden voor primaire waterkeringen zoals gedefinieerd in HR 2006 (Rijkswaterstaat, 2007). Voor Texel (dijkkringgebied 5) is de normfrequentie vastgesteld op 1/4000 per jaar. De bijbehorende maximale waterstand voor de Noordzeekust, ter hoogte van de Slufter, is vastgesteld op NAP +4,3 m. De maatgevende significante golfhoogte is 10,75 m en de bijbehorende golfpiekperiode is 16,7 s. Het handboek geeft geen informatie over de golfrichting. Daarom worden in de simulaties twee verschillende golfrichtingen meegenomen, loodrecht inkomende golven en golven dominant uit het westen.

A.2 Overige stormscenario's

Voor de overige stormscenario's (1/10 en 1/1 per jaar) is gebruik gemaakt van statistische waterstandsgegevens van Rijkswaterstaat⁵ en gemeten golfdata⁶ door een boei in het Eierlandse Gat voor de periode 1979 tot augustus 2013.

De volgende waterstandswaarden worden door Rijkswaterstaat gegeven voor de verschillende scenario's, en zijn gebruikt in deze studie:

- 1/10 per jaar: NAP +2,70 m;
- 1/1 per jaar: NAP +2,05 m.

Om bijbehorende golfcondities te verkrijgen is gebruik gemaakt van extreme-waarden-analyse door middel van een zogenaamde 'peak-over-threshold'-methode. Hierbij is een drempelwaarde voor de golfhoogte gedefinieerd. Alle pieken boven de drempelwaarden worden beschouwd als stormen, waarbij tussen elke individuele storm een periode van minimaal 72 uur aanwezig moet zijn. Is deze periode korter, dan worden de opeenvolgende stormen als een storm gezien. De reden voor deze aanname is dat de stormen statistisch onafhankelijk moeten zijn. In Figuur A.1 is het resultaat hiervan weergegeven; de blauwe lijn is de gemeten golfhoogte in de tijd, terwijl de groene sterren alle gemeten waarde boven de drempelwaarde weergegeven. De rode sterren zijn de golfpieken van de individuele stormen, en zijn meegenomen in de verdere analyse.

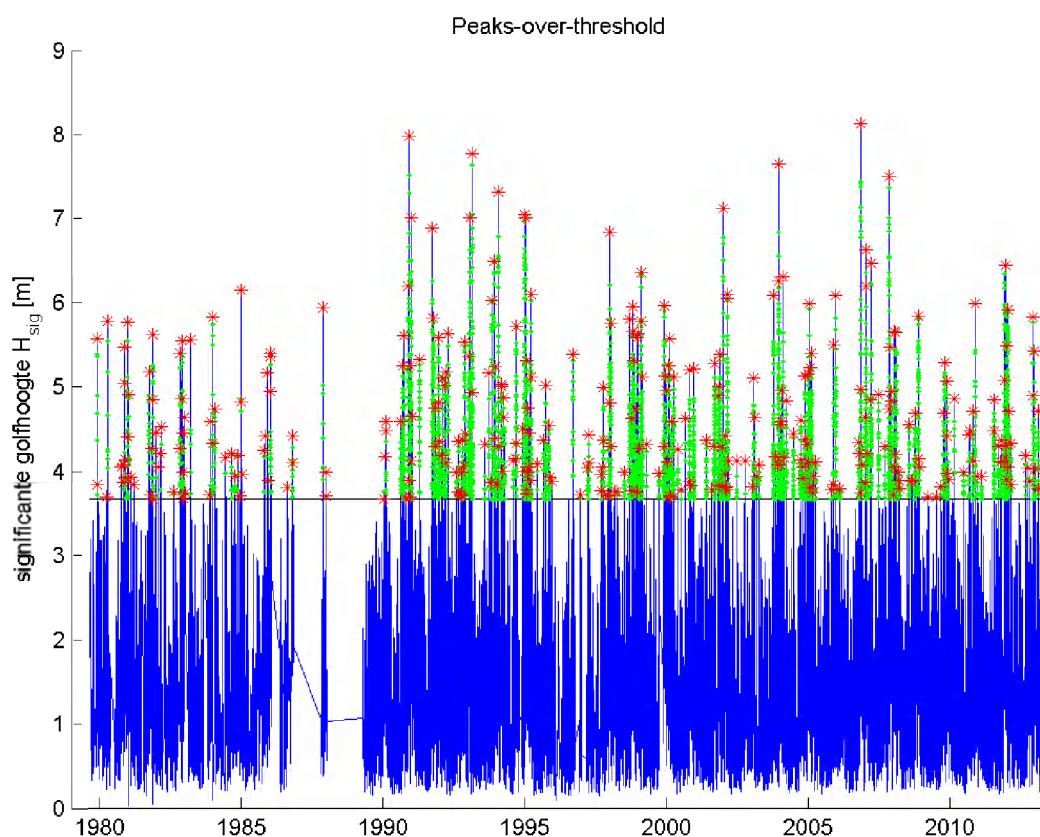
De volgende stap in de POT-methode is het koppelen van de storm-golfpieken aan een terugkeertijd. Met behulp van de Pareto-methode (Generalized Pareto Distribution) kan vervolgens een extreme-waarden-grafiek worden bepaald. Deze is weergegeven in Figuur A.2, inclusief het 95% betrouwbaarheidsinterval en de individuele storm-golfpieken. Met behulp van de grafiek is het mogelijk om de golfhoogte voor een bepaald terugkeertijd af te lezen. Voor de 1/1 per jaar storm is dit 5,94 m, en voor de 1/10 per jaar storm is dit 7,73 m. Merk op dat de waarde voor de 1/4000 per jaar (10,78 m) zeer weinig verscheelt van de waarde uit HR 2006.

De bepaling van de drempelwaarde ($H_{\text{thres}} = 3,67$ m) en de verdere verwerking is gedaan met behulp van het ORCA software pakket (Caires & Van Os, 2012). ORCA is een op MATLAB gebaseerd software pakket voor analyse, classificatie en transformatie van metocean data. De drempelwaarde heeft geen directe fysische betekenis, maar wordt slechts gebruikt om het

⁵ http://www.rijkswaterstaat.nl/water/waterdata_waterberichtgeving/statistieken_kengetallen/waternormalen/index.aspx

⁶ live.waterbase.nl

onderscheid te maken tussen wel of geen storm. De waarde wordt zo gesteld dat een realistisch aantal stormen per jaar wordt verkregen. De uitkomsten van deze methode zijn nauwelijks gevoelig voor de initiële keuze van de drempelwaarde.

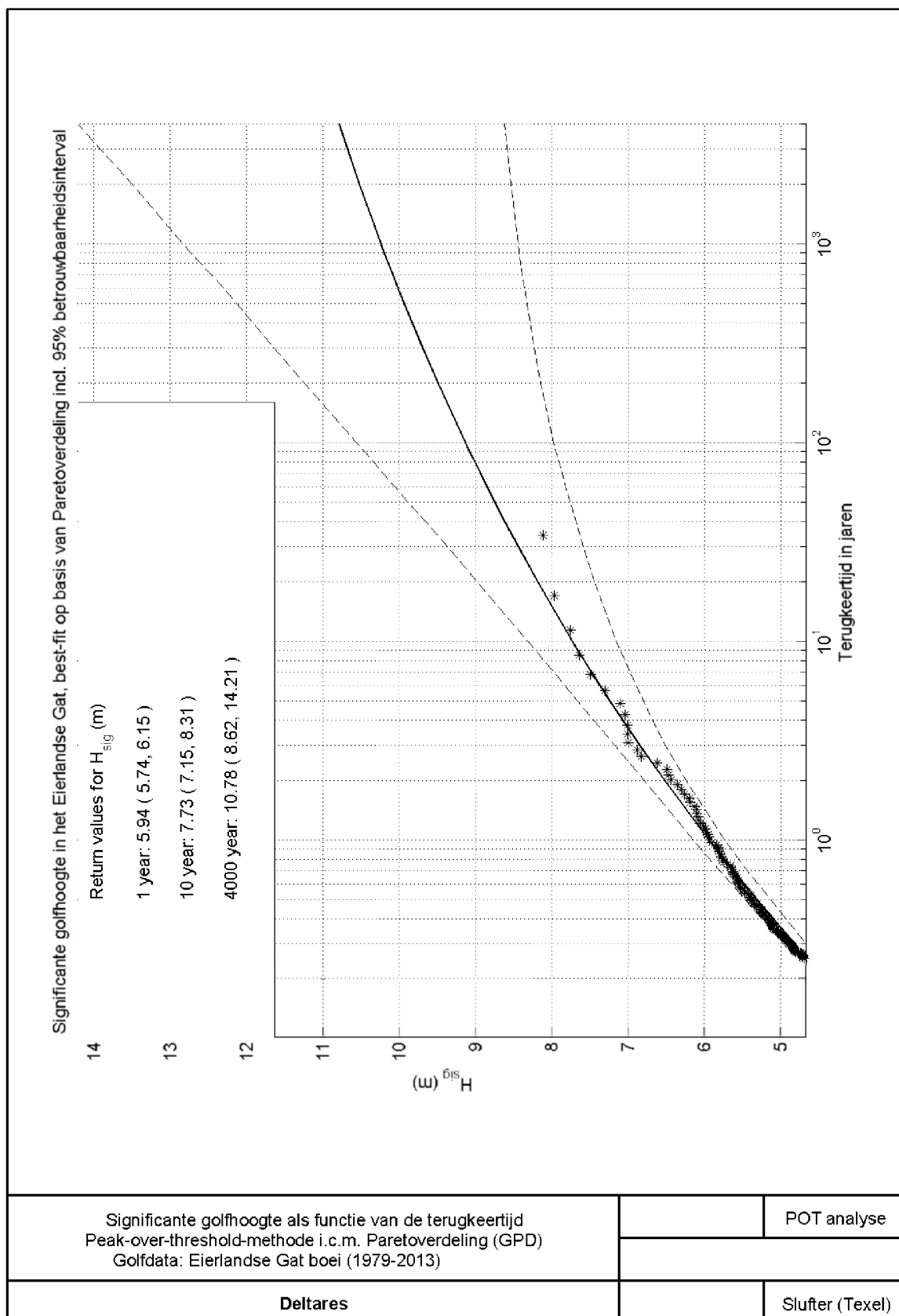


Figuur A.1 Gemeten golfdata (Eierlandse Gat boei) voor de periode 1979-2013 (in blauw). De horizontale zwarte lijn is de opgelegde drempelwaarde voor stormen. Verder zijn alle meetpunten boven de drempelwaarde (groen) en de individuele stormpieken (rood) weergegeven.

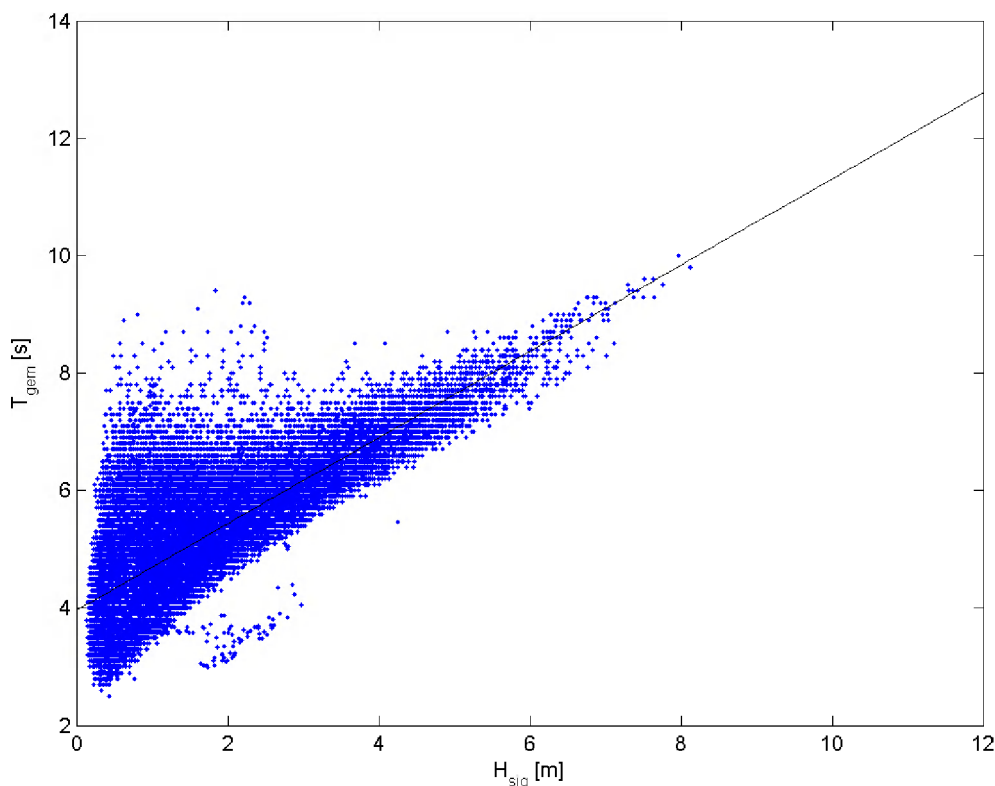
Voor de golfperiode is gebruikgemaakt van de gemeten gemiddelde golfperiode. In Figuur A.3 is de gemiddelde golfperiode als functie van de significante golfhoogte weergegeven. De relatie vertoont, met name voor grotere golfhoogten, een redelijk lineaire relatie. De beste lineaire fit is daarom gebruikt om de gemiddelde golfperiode behorende bij de bovengenoemde golfhoogten te vinden. Merk op dat de golfboeidata alleen de gemiddelde golfperiode bevat, terwijl het model de piekgolfperiode nodig heeft. Om dit mee te nemen is aangenomen dat de gemiddelde golfperiode 95% van de piekgolfperiode is (Holthuijsen, 2007). De gevonden waarden zijn weergegeven in Tabel A.1. Voor de golfrichting is, evenals voor de maatgevende conditie, gekozen voor loodrecht inkomende golven, en golven uit het westen.

Tabel A.1 Golfperioden behorende bij de verschillende stormscenario's.

Scenario	H_s [m]	T_{gem} [s]	T_{piek} [s]
1/10 per jaar storm	7,73	9,64	10,15
1/1 per jaar storm	5,94	8,32	8,76



Figuur A.2 Significante golfhoogte in het Eierlandse Gat als functie van de terugkeertijd.

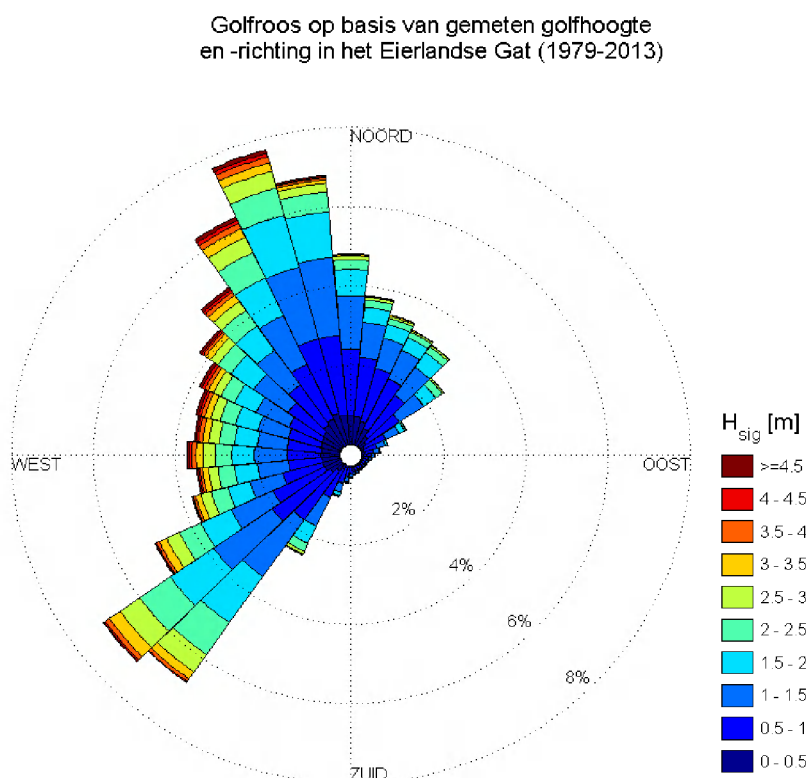


Figuur A.3 Gemeten gemiddelde golfperiode als functie van de significante golfhoogte bij de Eierlandse Gat golfboei (1979-2013). De zwarte lijn stelt de beste lineaire fit voor.

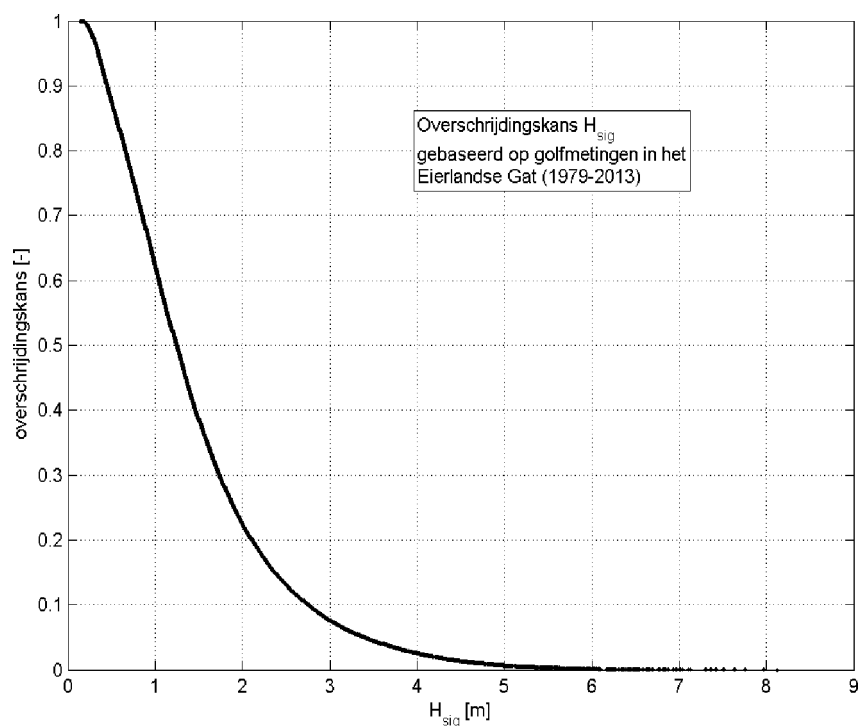
A.3 Springtijscenario

De waterstand voor het springtijscenario is, aan de hand van de statistische gegevens van Rijkswaterstaat¹, vastgesteld op NAP +0,9 m. Het springtijscenario kan echter niet zonder meer worden beschouwd als een stormscenario, want er vindt niet altijd een storm plaats tijdens springtij. De statistische methode beschreven in de voorgaande sectie gaat uit van extreme waarden, en kan hier dus niet worden toegepast. In Figuur A.4 is een golfroos op basis van de gemeten golfdata weergegeven. De golfroos laat een vrij grote spreiding in golfrichting zien. Hierdoor is het lastig om een representatieve golfhoogte af te leiden. Daarom is in Figuur A.5 de overschrijdingsfrequentie als functie van de golfhoogte weergegeven, waarbij alleen golven uit het noordwestelijke kwadrant zijn meegenomen. Op basis van deze figuur is een significante golfhoogte van 2 m gekozen voor het springtij scenario. Deze golfhoogte komt overeen met een overschrijdingsfrequentie van 0,2. Dit houdt in dat er elk jaar een kans van 20% is dat deze golfconditie optreedt, en is daarmee nog redelijk extreem, maar wel realistisch.

De bijbehorende golfperiode is bepaald aan de hand van Figuur A.3 en bedraagt 5,43 s (gemiddelde golfperiode) en 5,72 s (golfpiekperiode). Voor de golfrichting is eveneens gekozen voor loodrecht inkomende golven, en golven uit het westen.



Figuur A.4 Golfoors op basis van golfdata van de Eierlandse Gat boei (1979 – 2013).

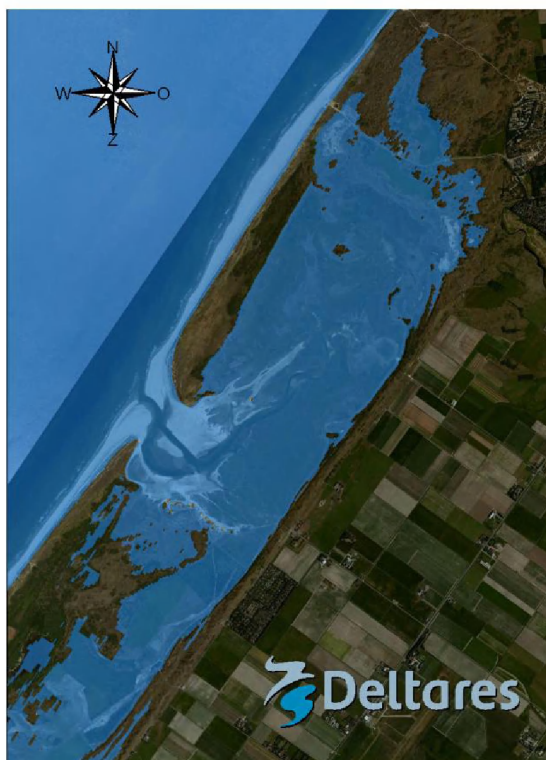
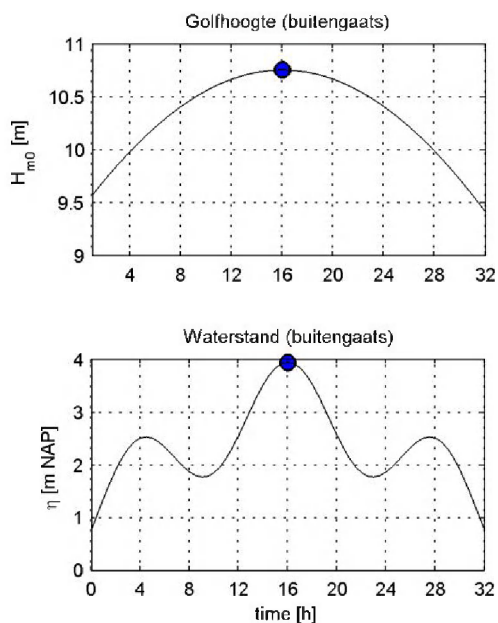


Figuur A.5 Overschrijdingskans per golfhoogte op basis van golfmetingen in het Eierlandse Gat (1979-2013), waarbij alleen golven uit het NW kwadrant zijn meegenomen.

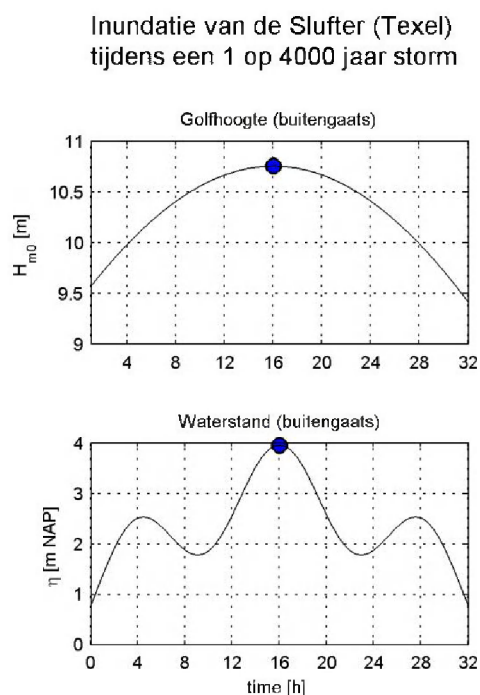
B Inundatiekaarten per modelscenario

B.1 1/4000 per jaar stormscenario's

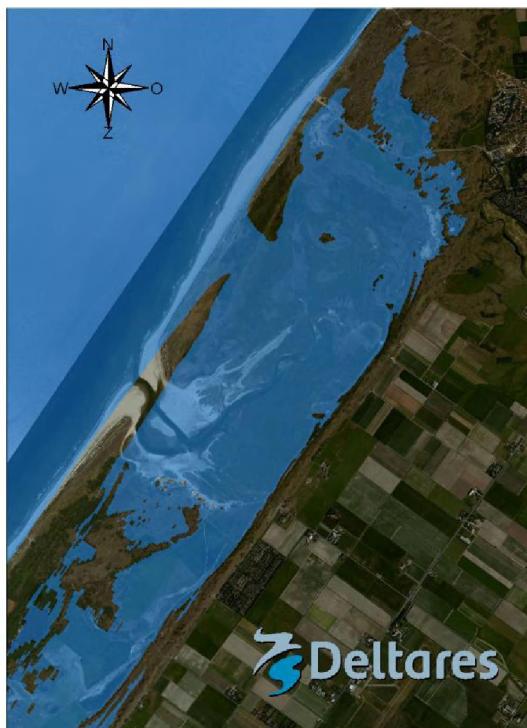
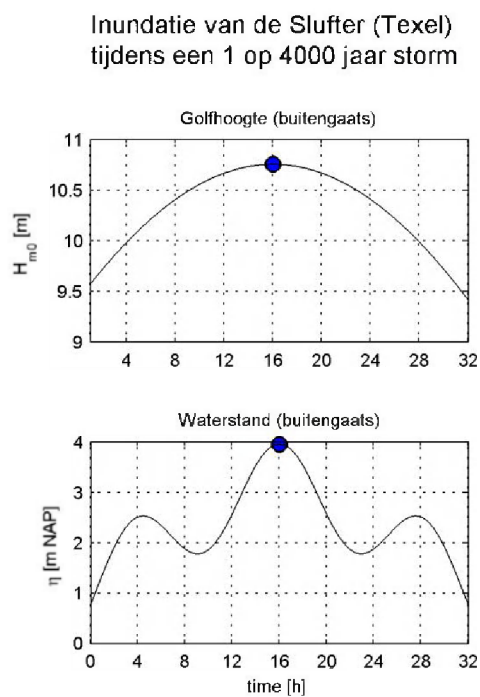
Inundatie van de Slufter (Texel)
tijdens een 1 op 4000 jaar storm



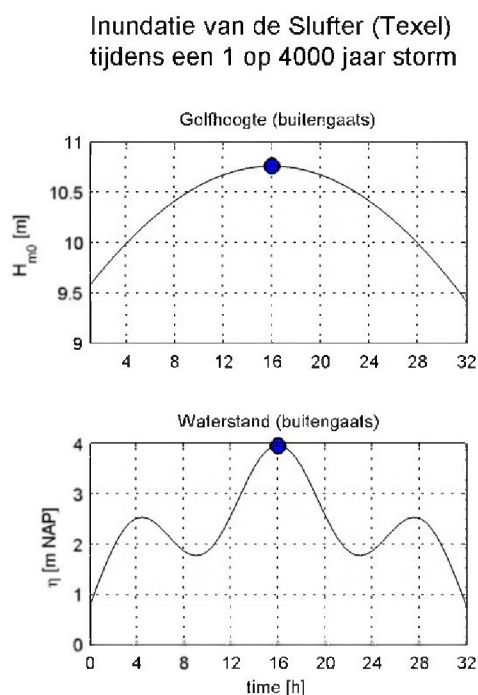
Figuur B.1 Maximale inundatie Slufter als gevolg van een 1/4000 per jaar storm (huidige bodemligging, NW golven).



Figuur B.2 Maximale inundatie Slufter als gevolg van een 1/4000 per jaar storm (brede Sluftermonding, NW golven).

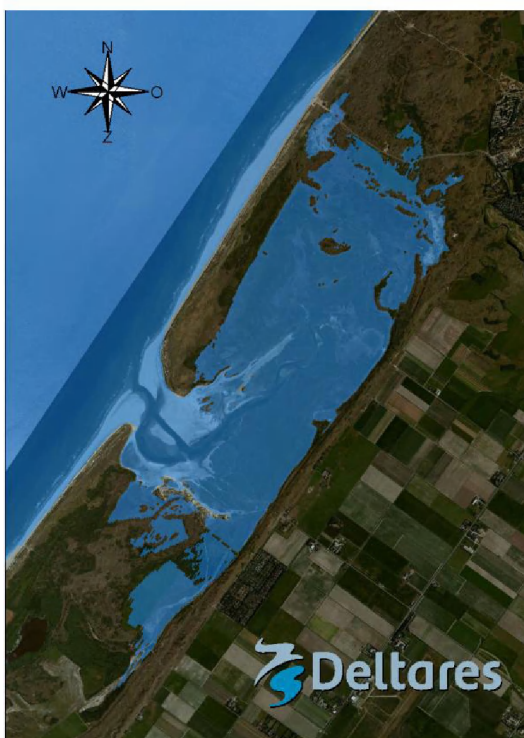
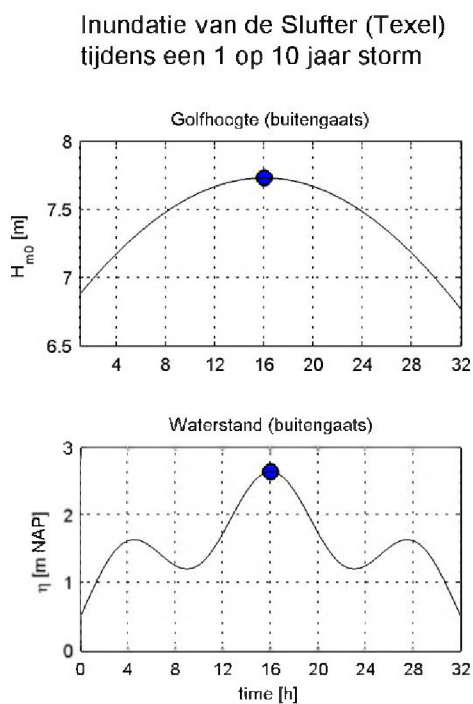


Figuur B.3 Maximale inundatie Slufter als gevolg van een 1/4000 per jaar storm (noordelijke Sluftermonding, NW golven).

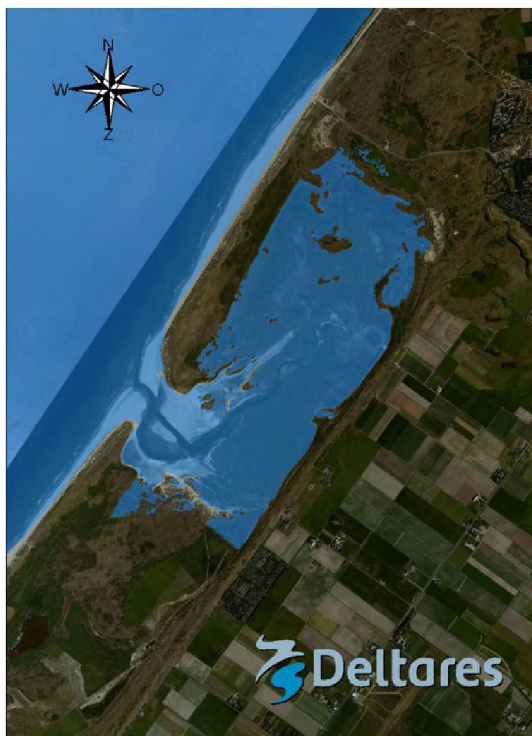
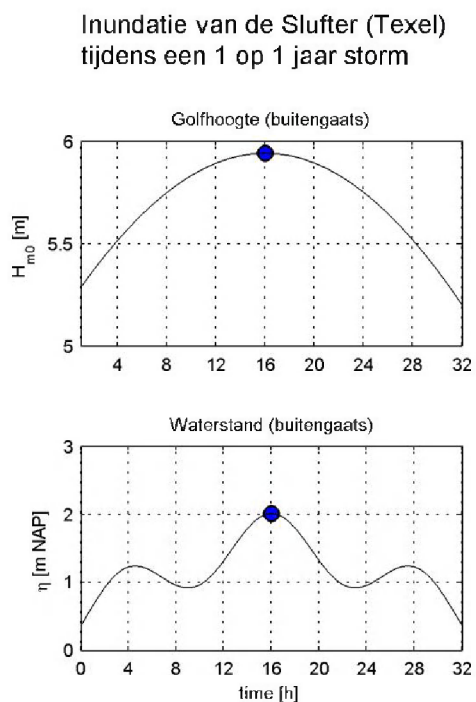


Figuur B.4 Maximale inundatie Slufter als gevolg van een 1/4000 per jaar storm (geen duinen voor de Slufter, NW golven).

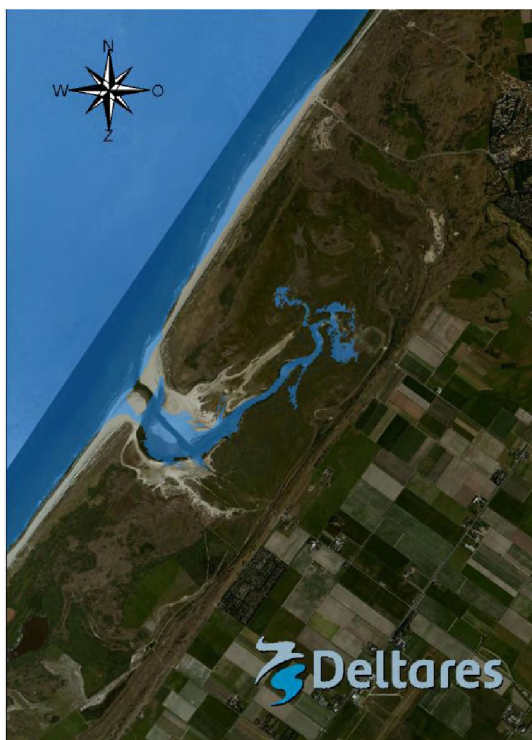
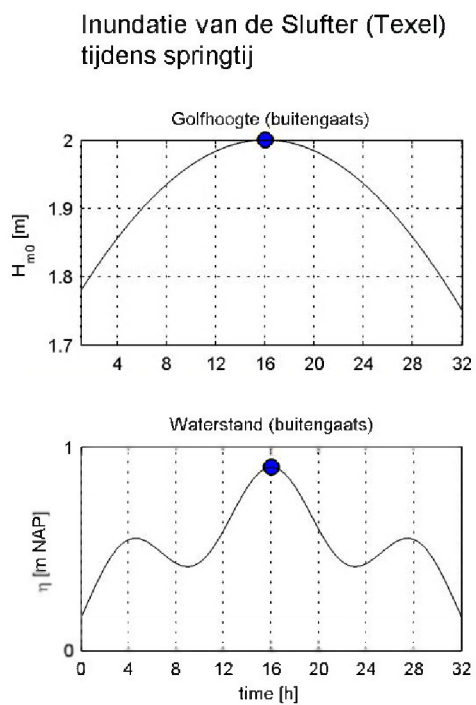
B.2 Overige condities



Figuur B.5 Maximale inundatie Slufter als gevolg van een 1/10 per jaar storm (huidige bodemligging, NW golven).



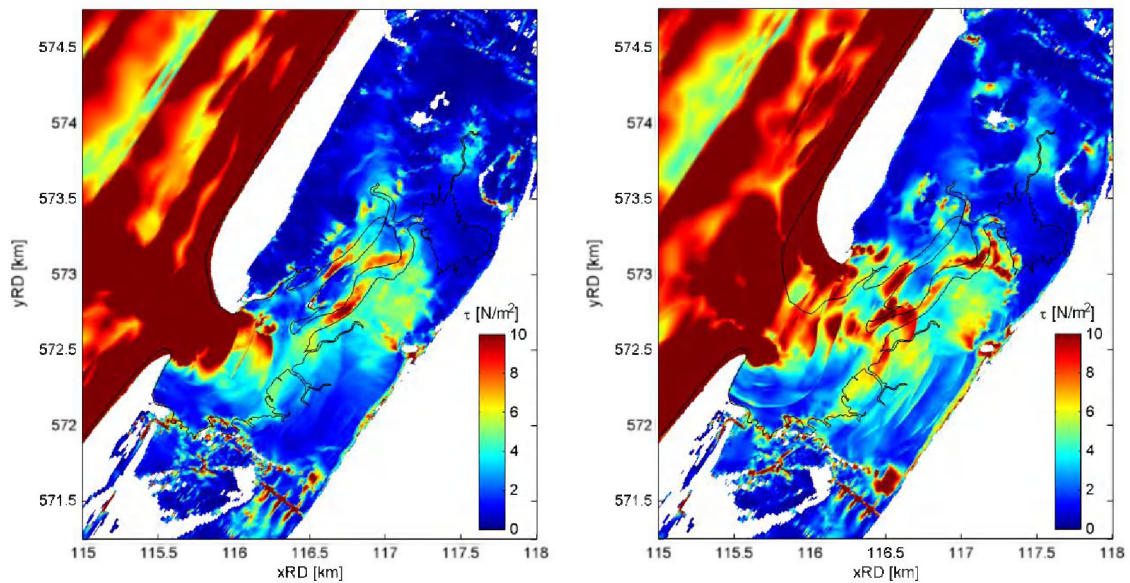
Figuur B.6 Maximale inundatie Slufter als gevolg van een 1/1 per jaar storm (huidige bodemligging, NW golven).



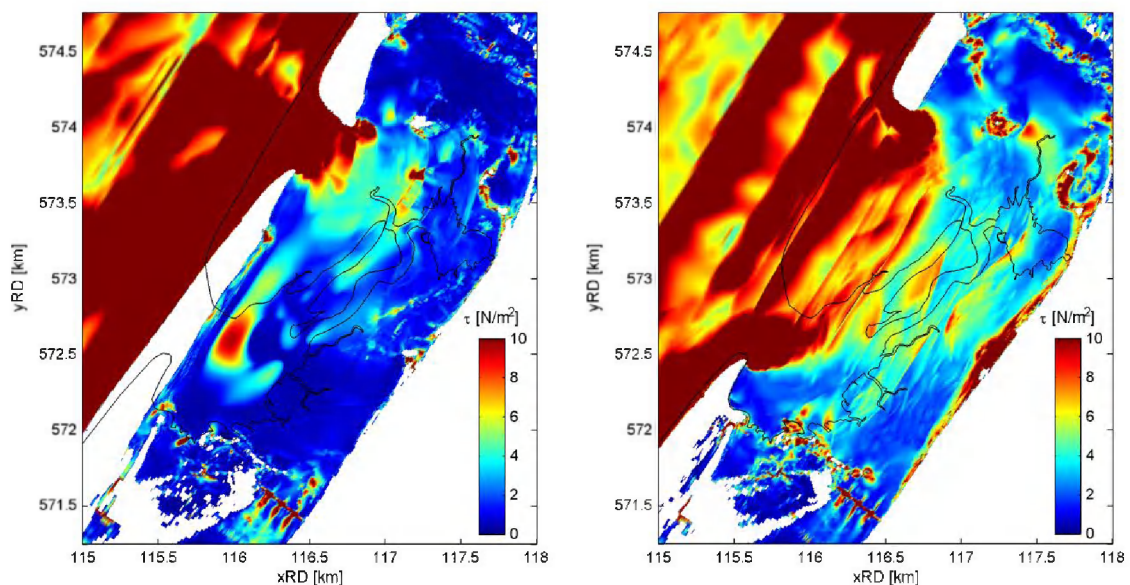
Figuur B.7 Maximale inundatie Slufter als gevolg van een springvloed (huidige bodemligging, NW golven).

C Bodemschuifspanningskaarten

C.1 1/4000 per jaar stormscenario's

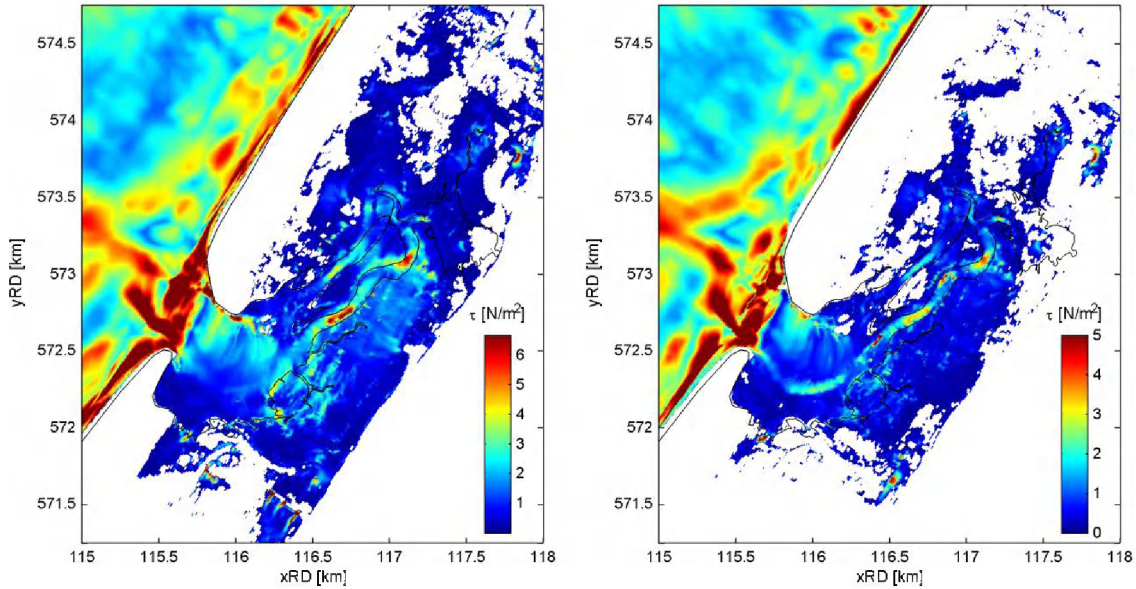


Figuur C.1 Maximale bodemschuifspanning als gevolg van een 1/4000 per jaar storm (NW golven), voor de huidige bodemligging (links) en een bredere Sluftermonding (rechts).

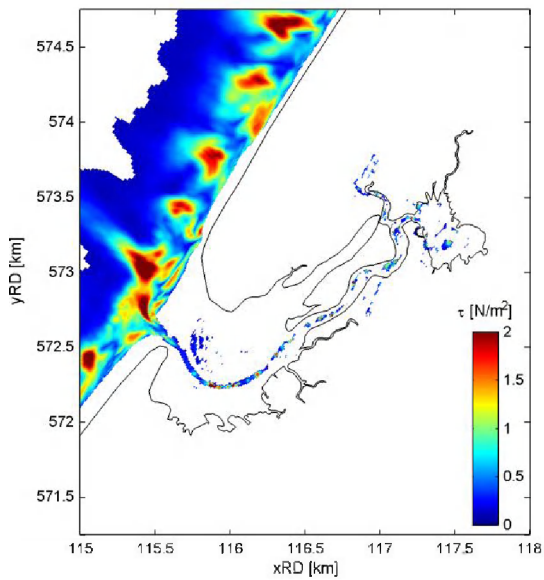


Figuur C.2 Maximale bodemschuifspanning als gevolg van een 1/4000 per jaar storm (NW golven), voor een noordelijke monding (links) en het scenario zonder dijk voor de Slufter (rechts).

C.2 Overige condities



Figuur C.3 Maximale bodemschuifspanning als gevolg van een 1/10 (links) en 1/1 (rechts) per jaar storm (NW golven, huidige bodemligging).



Figuur C.4 Maximale bodemschuifspanning als gevolg van een springvloedconditie (NW golven, huidige bodemligging).