

# Erosie op Ameland Noordwest

*Modelstudie: simulaties met Delft3D en XBeach*

Kees Nederhoff  
Edwin Elias  
Tommer Vermaas



**Titel**

Erosie op Ameland Noordwest

**Opdrachtgever**

Rijkswaterstaat - WV

**Kenmerk**

1503-0080

**Pagina's**

117

**Trefwoorden**

Ameland NW, Bornrif, Oostgat, sedimenttransport, morfologie, duinerosie, Sinterklaasstorm, Delft3D, XBeach

**Samenvatting**

Ameland NW kent al langere tijd problemen met structurele erosie van de eilandkop. Naast de structurele erosie met bijhorende BKL-overschrijdingen heeft meer recent de Sinterklaasstorm van 2013 in grote duinafslag geresulteerd tussen raai 300 en 400. In deze tweede deelrapportage wordt met behulp van modellen (i.e. Delft3D en XBeach) de reden voor deze morfologische ontwikkelingen van Ameland Noordwest geanalyseerd en wordt de kans op doorbraken van de eerste duinrij onderzocht. Het onderzoek gepresenteerd in deze deelrapportage is een vervolg van een eerdere studie (Van Rooijen en Oost, 2014) en vormt samen met een eerder uitgevoerde morfologische studie (Nederhoff et al., 2015) een geheel.

Met behulp van het Delft3D model worden de stromingen en sedimenttransporten in en nabij het Oostgat gelegen in het Amelander Zeegat in kaart gebracht en geanalyseerd. Hiervoor is niet de volledige morfologische respons van het systeem berekend, maar is het potentiële sedimenttransport bepaald. De modelresultaten laten zien dat de getijstroming door het Oostgat klein is. Op basis van de stromingspatronen lijkt het Oostgat geen 'klassieke' stroomvoerende geul te vormen en stroming in het Oostgat wordt vooral gedomineerd door versnelling rondom de kop van Ameland. Sediment transport in het Oostgat en de aangrenzende kust is eigenlijk heel klein t.o.v. de transporten in het zeegat en langs de ongestoorde eilandkust. Golfbreking op de voorliggende buitendelta zorgt ervoor dat hoge golven de kust niet bereiken. Tijdens dagelijkse condities kunnen kleinere golven (tot 2 m), vooral voor noordwestelijke golfrichtingen, echter nog steeds relatief ongestoord de kust bereiken en een brandingstransport aandrijven. De variatie in golfhoogtes langs dit stuk kust (2014 schematisatie) zorgt voor een divergentiepunt in de sedimenttransporten. Dit divergentiepunt ligt ongeveer in het midden van het Oostgat. Transport ten oosten hiervan, gaat ook naar oostelijke richting (naar de strandhaak Bornrif). Transport ten westen gaat richting Borndiep. In de 1989 schematisatie treedt eigenlijk een soortgelijk divergentiepunt op. Alleen ligt dit divergentie punt dan op de voorliggende strandhaak en wordt aangedreven door de bolle vorm van de strandhaak. De transporten (zowel in 1989 als 2014) zijn relatief klein, maar kunnen wel als gevolg van de optredende gradiënten een lange-termijn structurele erosie veroorzaken.

Met behulp van het XBeach model is de reden voor de lokaal-opgetreden duinerosie op Ameland Noordwest onderzocht en is kans en gevolgen op een doorbraak geanalyseerd. De modelresultaten laten zien dat het XBeach model in staat is de duinerosie opgetreden in 2013-2014 te reproduceren door een driedaagse simulatie van de Sinterklaas te draaien. Tijdens deze simulatie is er lokale hotspot van korte golfenergie als gevolg van de golfvalshoek en de oriëntatie van het Bornrif, welke een aannemelijke verklaring is voor de lokaliteit van de opgetreden duinerosie. Het duin is tussen raai 320 en 360 op dit moment (2015) inmiddels zover verzwakt dat er bij een 1/10 jaar storm een doorbraak wordt verwacht met een breedte van 350 meter. Een doorbraak van het duin zal waarschijnlijk resulteren in schade aan het NAM-platform. In scenario's met een sterker duin (bijvoorbeeld 2011 of 2013) treedt er pas een doorbraak op bij een storm met een terugkeerfrequentie van 1/100 jaar. Het model laat zien dat naar verwachting er een sluffer worden gevormd en wordt mogelijk door depositie van de sluffer het NAM-platform tegen erosie/beschadiging beschermd. Zonder de eerste zeereep erodeert de kop van de duinvallei en ontstaan er afvoergeulen in de vallei. Er wordt

**Titel**

Erosie op Ameland Noordwest

**Opdrachtgever**

Rijkswaterstaat - WVL






**Kenmerk**

1503-0080

**Pagina's**

85

geen overstroming van het achterland (achter de primaire waterkering) verwacht. In simulaties met de 1989 bodem vindt zeereep-gemiddeld 25% minder duinerosie plaats en vindt de erosie veel minder lokaal plaats dan in de huidige situatie (2015). De reden hiervoor is de oriëntatie van het Bornrif. Daarnaast wordt het geërodeerde materiaal afgezet als washover fans in plaats van afgevoerd te worden via de geulen naar elders.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
v1.0	juli 2016	Kees Nederhoff		Robert McCall		Frank Hoozemans	
		Edwin Elias					
		Tommer Vermaas					

**Status**

definitief

## Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1	Aanleiding	1
1.2	Probleemstelling	1
1.3	Doel van deze studie	1
1.4	Deelvragen bij deelrapportage 2	2
1.4.1	Dagelijkse condities: Delft3D modelering	2
1.4.2	Stormcondities: XBeach modelering	2
1.5	Leeswijzer	3
<b>2</b>	<b>Gebiedsbeschrijving</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Invloed dagelijkse condities: Delft3D modelering</b>	<b>11</b>
3.1	Omschrijving model	11
3.2	Model opzet	12
3.2.1	Bodem en sedimenttransport	12
3.2.2	Model schematisatie van getij en golven	13
3.3	Stromingen	15
3.4	Golven	20
3.5	Sediment transport	23
3.5.1	Patronen in sediment transport	23
3.5.2	Gradiënten in sedimenttransport langs het Bornrif	30
3.6	Conclusies	36
<b>4</b>	<b>Invloed stormcondities: XBeach modelering</b>	<b>37</b>
4.1	Omschrijving model	37
4.2	Overzicht simulaties	37
4.3	Modelopzet	38
4.4	Reproductie Sinterklaasstorm	43
4.4.1	Hydrodynamische data	43
4.4.2	Morfologische data	44
4.4.3	XBeach simulatie: 5 snap shots	49
4.4.4	Vergelijking met meetdata Sinterklaasstorm	55
4.5	Analyse Sinterklaasstorm	61
4.6	Impact variërende stormcondities op verschillende bodems	64
4.6.1	Inleiding	64
4.6.2	Scenario 1: huidige situatie (jaar: 2015)	66
4.6.3	Scenario 2: meer duinvolume in probleemgebied (jaar: 2011)	74
4.6.4	Scenario 3: substantieel meer duinvolume in probleemgebied (jaar: 2013)	81
4.6.5	Scenario 4: zonder eerste zeereep (jaar: 2035)	88
4.6.6	Scenario 5: vlak voor aanlanding 'oude' Bornrif (jaar: 1989)	96
4.7	Conclusies	103
<b>5</b>	<b>Conclusies</b>	<b>105</b>
5.1	Deelvragen voor de Delft3D modelering	106
5.2	Deelvragen voor de XBeach modelering	107
<b>6</b>	<b>Referenties</b>	<b>109</b>

## Bijlage(n)

<b>A</b>	<b>Aanvullende figuren synthetische stormen</b>	<b>A-1</b>
A.1	Scenario 1: huidige situatie	A-1
A.2	Scenario 2: meer duinvolume in probleemgebied (jaar: 2011)	A-5
A.3	Scenario 3: substantieel meer duinvolume in probleemgebied (jaar: 2013)	A-7
A.4	Scenario 4: zonder eerste zeereep (jaar: 2035)	A-9
A.5	Scenario 5: vlak voor aanlanding 'oude' Bornrif (jaar: 1989)	A-11

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

Ameland Noordwest kent een lange historie van aanlanden en verspreiden van grote zandvolumes vanuit de buitendelta. In dit gebied treedt afwisselend afslag en aangroei op. Na de meest recente aanlanding van een zandplaat (het Bornrif rond 1990) is het gebied met 20 miljoen m<sup>3</sup> geërodeerd (Van Rooijen & Oost, 2014), deze erosie treedt op ondanks uitgevoerde suppleties van Rijkswaterstaat. In dezelfde periode vormde de geul 'het Oostgat'.

Naast deze lange termijn trend van erosie van het strand heeft de Sinterklaasstorm in de nacht van 5 op 6 december 2013 een groot effect gehad op de eerste duinenrij aan de noordwestelijke zijde van Ameland (tussen raai 300 en 400). Lokaal is hier het duin nog maar enkele meters breed.

## 1.2 Probleemstelling

Historisch gezien vertoont het zeegat een cyclisch gedrag waarin enkele en dubbele geulconfiguraties elkaar afwisselen (Israël & Dunsbergen, 1999). De tijd- en ruimteschaal varieert echter sterk per cyclus. Voor de kustbeheerders (i.e., Ministerie van Infrastructuur en Milieu, RWS WVL en RWS Noord Nederland) is het van belang een goed beeld van de ontwikkelingen te hebben, om zo een afweging te kunnen maken welke beheeroptie het meest optimaal is. Op het moment van schrijven is de kennis over toekomstige configuratie onvoldoende om adequaat beheeropties af te wegen.

Daarnaast heeft Rijkswaterstaat Noord-Nederland haar zorgen geuit over de huidige toestand van de eerste duinenrij na de Sinterklaasstorm. De vrees is dat bij een volgende storm de duinen kunnen doorbreken wat gevolgen kan hebben voor de aanwezige functies. Functies van het gebied zijn onder andere de natuur- en recreatiewaarden voor de bewoners van Ameland, gaswinning van de NAM en de drinkwaterwinning bij Hollumer. Het is onbekend wat de kans en impact van een eventueel doorbreken van de eerste duinrij zal zijn.

## 1.3 Doel van deze studie

Rijkswaterstaat WVL heeft Deltares gevraagd een studie uit te voeren waarin inzicht wordt verkregen in de ontwikkeling van de duinen, strand en buitendelta bij Ameland Noordwest, zowel op lange termijn (de afgelopen twintig jaar) als specifiek recent tijdens en na de Sinterklaasstorm. Centrale vraag van de studie is:

*Wat is de reden voor de morfologische ontwikkeling van Ameland Noordwest van de afgelopen 20 jaar en specifiek recent tijdens de Sinterklaasstorm en wat zijn hiervan de mogelijke consequenties voor het beheer?*

In de studie worden zowel de morfologische ontwikkelingen beschreven en verklaard, als mede wordt er een voorspelling gedaan naar het gedrag in de komende twintig jaar. De studie is een vervolg op Van Rooijen en Oost (2014) dat een globaal overzicht gaf van de status van de kuststrook van Noordwest Ameland en wordt uitgevoerd in een tweetal deelrapportages, waarvan dit rapport de tweede deel betreft.

De eerste deelrapportage betreft een data-analyse. Morfologische ontwikkelingen op lange (structurele stranderosie) en korte termijn (incidentele duinerosie) worden beschreven en waar mogelijk verklaard op basis van meetdata (e.g., JARKUS en Vaklodingen). Daarnaast

worden enkele beheersscenario's geëvalueerd. Deze analyse is uitgewerkt in de eerste deelrapportage (Nederhoff et al., 2015).

De tweede deelrapportage is een modelstudie. Ontwikkelingen op lange (structurele stranderosie) en korte termijn (incidentele duinerosie) worden verklaard met modelsimulaties (i.e., Delft3D en XBeach). Daarnaast wordt er een voorspelling gedaan naar de kans en gevolgen van doorbreken van de eerste duinenrij. Dit rapport betreft deze tweede deelrapportage.

## 1.4 Deelvragen bij deelrapportage 2

De deelvragen die in deze rapportage worden uitgewerkt zijn vastgesteld tijdens een bijeenkomst tussen Deltares en Rijkswaterstaat (Utrecht, december 2015) na het opleveren van de eerste deelrapportage. De vragen zijn daarom zowel gebaseerd op de aanbevelingen vanuit eerste deelrapportage, maar aanvullende vragen van Rijkswaterstaat WVL en Rijkswaterstaat Noord-Nederland zullen ook worden behandeld.

### 1.4.1 Dagelijkse condities: Delft3D modelering

De focus van dit deel is het in kaart te brengen van de stromingen en sedimenttransporten in en nabij het Oostgat. Dit inzicht helpt ons de structurele erosie die hier plaatsvindt verder te verklaren. Hierbij proberen we de volgende deelvragen te beantwoorden:

1. Wat is de stromingskarakteristiek van het Oostgat en is dit een (belangrijke) stroomvoerende geul?
2. Wat is het transportpotentieel langs de aanliggende kust en zijn er redenen aanwijsbaar voor structurele erosie?
3. Is er een verandering zichtbaar in de stroming en het transportpotentieel als we de huidige (2014) bodem vergelijken met een bodem voor de aanlanding van Bornrif (1989).

Ter beantwoording van deze vragen gebruiken we het Delft3D model voor de berekening van de stroming, golven en sedimenttransporten. Hierbij lossen we niet de volledige morfologische respons van het systeem op, maar wordt het potentiële sedimenttransport bepaald (zie Elias et al. 2012 voor een uitleg en een voorbeeld van deze methode). De gebruikte modelschematisaties zijn gebaseerd op de onderzoeken van de Fockert (2008) en Teske (2012). De analyse van de resultaten heeft een focus op de 2014 resultaten en voor de belangrijkste figuren worden ook de resultaten voor de 1989 bodem (zie Figuur 2.3) getoond om het effect van de verschillende bodemliggingen (deelvraag 3) in kaart te brengen. Het gaat hierbij vooral om het verschil in configuratie van de buitendelta.

### 1.4.2 Stormcondities: XBeach modelering

De focus van dit deel is het in kaart te brengen van de belangrijkste processen die de waargenomen (duin)erosie veroorzaken. Het model helpt ook om inzicht te krijgen in welke gebieden extra gevoelig voor erosie zijn en wat er kan gebeuren bij een zware storm. Hierbij proberen we de volgende deelvragen te beantwoorden:

1. Wat is de reden voor de lokaal-opgetreden duinerosie op Ameland Noordwest tijdens de Sinterklaasstorm en kan XBeach de waargenomen duinerosie reproduceren (i.e., modelvalidatie)?
2. Onder welke stormcondities zou een doorbraak plaats kunnen vinden, welk stuk kust is het meest gevoelig voor een mogelijke doorbraak en wat zijn de gevolgen voor het gebied achter de duinen indien een doorbraak optreedt (e.g., lokale waterdiepte, sedimentatie in vallei)?
3. Is er een verandering zichtbaar in de morfologie tijdens stormcondities als we de modelresultaten met de huidige (2015) bodem vergelijken met modelresultaten met een bodem: (a) met een sterkere eerste zeereep (bijvoorbeeld na een suppletie), (b) zonder eerste zeereep, of (c) van voor de aanlanding van Bornrif (1989).



Ter beantwoording van deze vragen gebruiken we het XBeach model voor de berekening van de stroming, korte en lange golven en sedimenttransporten tijdens stormen. Hierbij lossen we wel de morfologische stormrespons van het systeem op, in plaats van alleen het potentiaal sediment transport. De analyse van de resultaten heeft een focus op de 2015 bodemsituatie en hier worden 4 andere bodemscenario's mee vergeleken om het effect van de verschillende bodemliggingen (deelvraag 3) in kaart te brengen. We gebruiken XBeach voor het berekenen van duinerosie omdat dit model de relevante processen nabij de duinvoet nauwkeuriger oplost dan Delft3D (e.g., lange golven, droog-nat interactie)

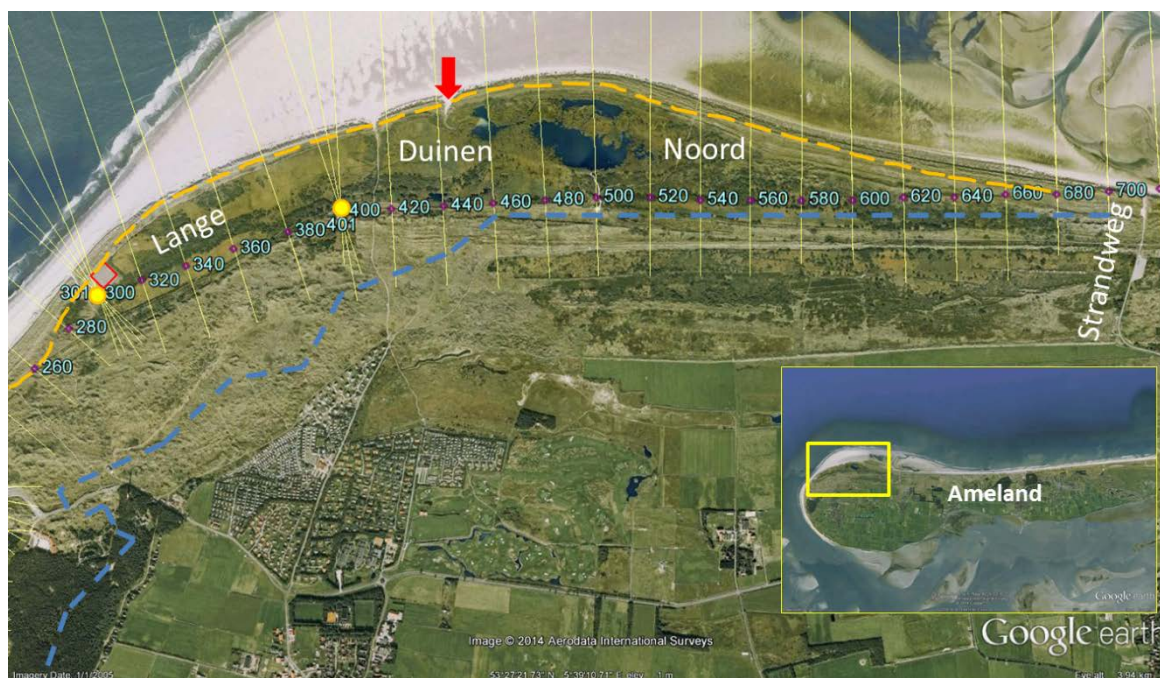
## 1.5 Leeswijzer

Na de inleiding van dit rapport (Hoofdstuk 1) en een beschrijving van het gebied (Hoofdstuk 2) valt het rapport uiteen in twee grote blokken. Delft3D simulaties (Hoofdstuk 3) zullen worden gebruikt om stromingen en sedimenttransporten in kaart te brengen (lange termijn trends). XBeach simulaties (Hoofdstuk 4) zullen worden gebruikt om de lokaal optredende duinerosie beter te begrijpen en een voorspelling te doen naar de kwetsbaarheid van het duin tijdens stormcondities (korte termijn). Ten slotte wordt in Hoofdstuk 5 een conclusie gegeven op basis van de gestelde vragen in de inleiding.



## 2 Gebiedsbeschrijving

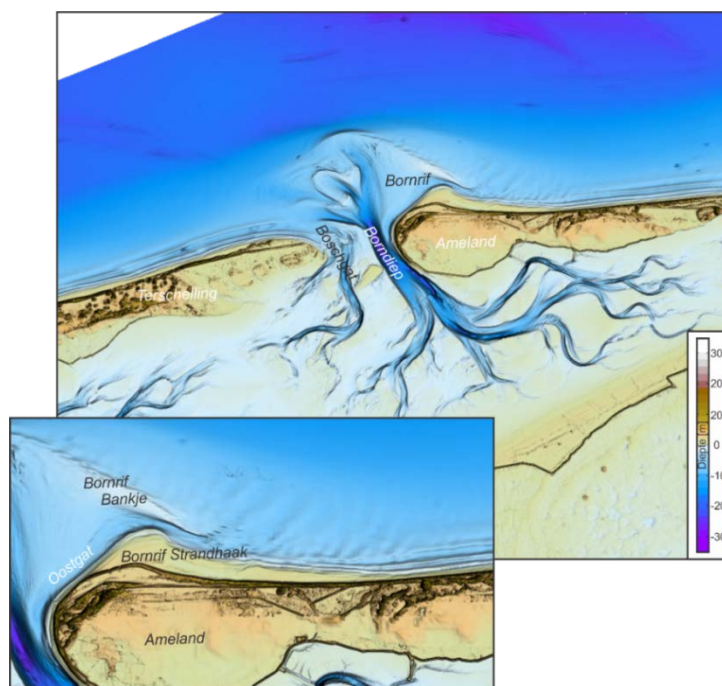
Noordwest Ameland bestaat uit het Noordzee deel van de eilandkop (Figuur 2.1). Vanaf de zee worden in landwaartse richting twee rijen duinen doorkruist. De buitenste duinenrij vervult geen waterkerende functie. De officiële primaire waterkering is de binnenste duinenrij, die verder landinwaarts ligt. De buitenste duinen zijn momenteel aan afslag onderhevig. De laagste duintop lag in 2014 op ongeveer NAP +6,5 m (alle bodem- en waterniveaus zijn ten opzichte NAP in dit rapport. De binnenste duinen zijn deels natuurlijk en deels stuifdijken. De hoogte varieert sterk, vooral in het westelijke deel. De aaneengesloten duintoppen liggen minstens rond +7 m, terwijl de hoogste duinen tot +25 m reiken. Oostelijk van raai 400 gaan de duinen over in een stuifdijk. Deze stuifdijk ligt vrijwel overal op +7 m. De enige uitzondering vormt de Strandweg overgang bij Ballum, welke rond +6,4 m ligt (zie Figuur 2.1). Tussen hoofdstrandpaal 3 en de Strandweg ligt het gebied Lange Duinen Noord. Dit is een uitgestrekte moerassige duinvallei tussen de gemeenten Hollum en Ballum met een totaal oppervlak van 294 ha. De oriëntatie van de vallei is voornamelijk oost-west, maar aan de westkant is een deel zuidwest-noordoost georiënteerd. In dit deel van de vallei ligt een stuk grond van de Nederlandse Aardolie Maatschappij BV (NAM). Dit stuk is kunstmatig opgehoogd t.o.v. het omringende terrein, en ligt tussen +4,8 en +5,4 m. In het gebied ligt verder een fietspad en diverse wandelwegen parallel (Frettepad) De noord-zuid georiënteerde wandelwegen vormen een verbinding naar zee.



Figuur 2.1 Overzicht van het gebied Lange Duinen Noord, het NAM-platform (rood omlijnd) en de Slufter (rode pijl). Hoofdstrandpalen van raai 3 en 4 zijn ook weergegeven (geeloranje cirkel), de stuifdijk is weergegeven met de gestreepte oranje lijn en de primaire waterkering is weergegeven met de gestreepte blauwe lijn. Satellietbeeld 2005 Google. Bron: Van Rooijen & Oost (2014).

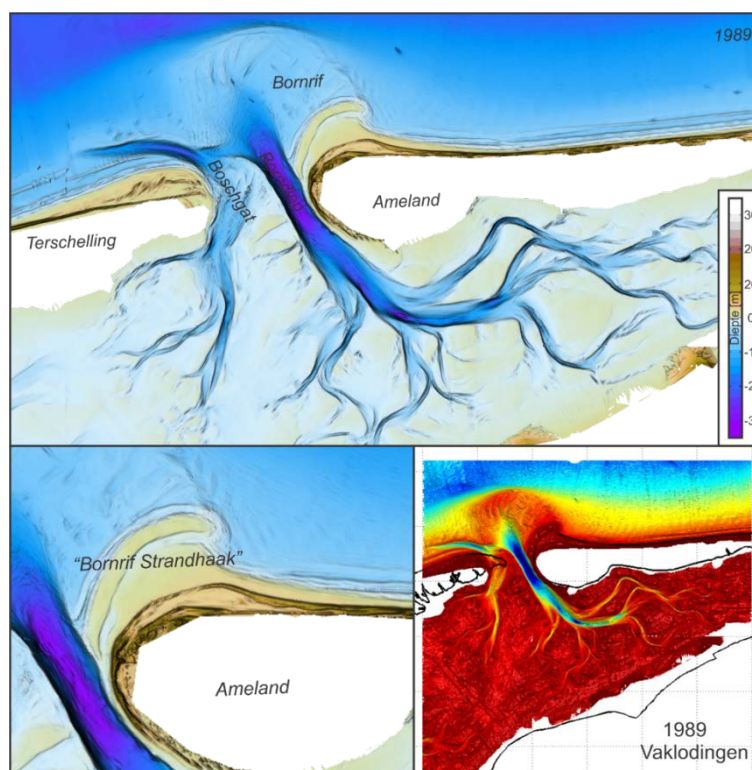
Figuur 2.2 geeft een overzicht van de belangrijkste geulen en platen in het Amelander Zeegat. Deze recente (2014) bodem vertoont een duidelijke hoofdgeul aan de oostzijde, langs de westkust van Ameland (het Borndiep) en kleinere nevengeulen (Boschgat<sup>1</sup>) aan de westzijde van het zeegat. Het grootste plaatoppervlakte op de buitendelta ligt ten noorden van de hoofdgeul; het Bornrif. Periodiek is er door het aanlanden van zandbanken sprake van (veel) zanduitwisseling met de kust van Ameland. Een voorbeeld hiervan is de vorming en aanlanding van het Bornrif. De uitstulping van de kust waar het 'oude' Bornrif is aangeland is nog duidelijk te zien langs de kust van Ameland (de Bornrif strandhaak). De aanlanding en vervolgens het uitspreiden en vervorming van de Bornrif strandhaak heeft de achterliggende kustontwikkeling van Ameland over de laatste decennia in grote mate gestuurd (Elias en Bruens, 2013). Een toekomstige, nieuwe aanlanding zal op termijn wel weer plaatsvinden. Op de rand van de buitendelta ligt al een nieuwe bank te wachten (aangeduid in Figuur 2.2 als Bornrif bankje). Tussen de aangelande 'strandhaak Bornrif' en het huidige Bornrif is een verdieping te zien. Deze verdieping wordt ook wel het Oostgat genoemd. Tussen de strandhaak en het Borndiep ligt het Oostgat dicht op de kust en vertoont het ondiepe kustprofiel een structurele terugtrekking.

Figuur 2.3 geeft een overzicht van de belangrijkste geulen en platen in het Amelander Zeegat voor 1989. Daarnaast is een overzichtskaart (Figuur 2.5) samengevoegd die de ontwikkeling van Ameland Noordwest voor de periode 1989-2011 laat zien waarin de vorming van het 'nieuwe' Bornrif (specifiek Bornrif bankje) en Oostgat te zien is. Naast deze lange termijn ontwikkeling hebben Van Rooijen & Oost (2014) in een studie aangetoond dat de buitenste duinrij tussen raai 300-400 de afgelopen 10 jaar dunner is geworden. De significante duinerosie (erosie boven de 3 meter+NAP) die tussen 2013 en 2014 is opgetreden kan volgens Van Rooijen & Oost (2014) 'zeer waarschijnlijk' (grotendeels) worden toegekend aan de Sinterklaasstorm (Figuur 2.4).



Figuur 2.2 Ligging van de belangrijkste geulen en platen in het Amelander Zeegat op basis van de 2014 bodem.

<sup>1</sup> We gebruiken hier de naamgeving Borndiep voor de gehele geul bestaand uit het Akkepollegat en Borndiep, en Boschgat voor de geulen Westgat en Boschgat.

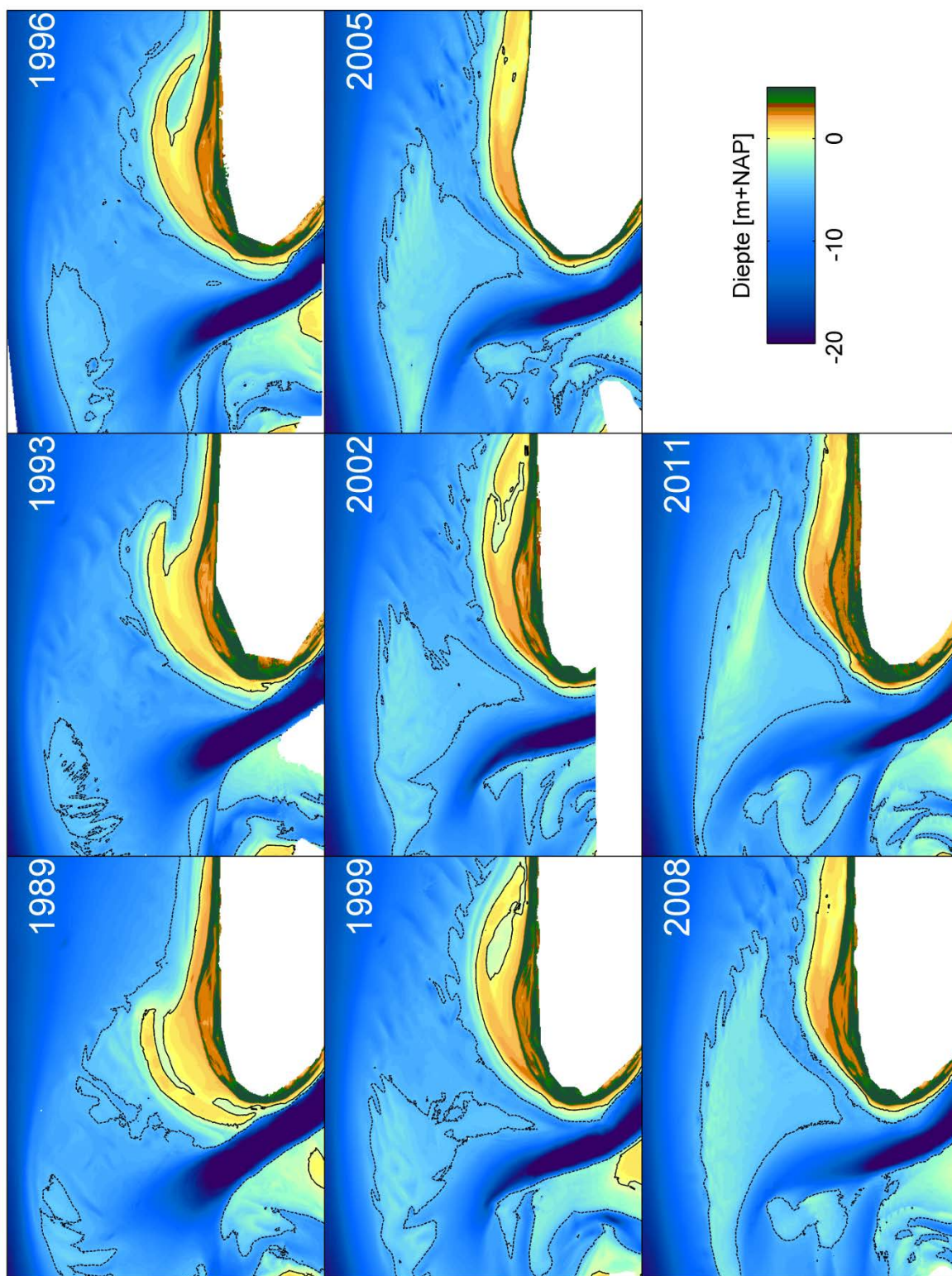


Figuur 2.3 Ligging van de belangrijkste geulen en platen in het Amelanders Zeegat op basis van de 1989 bodem en dekking van de bodemmetingen in 1989 (rechtsonder).



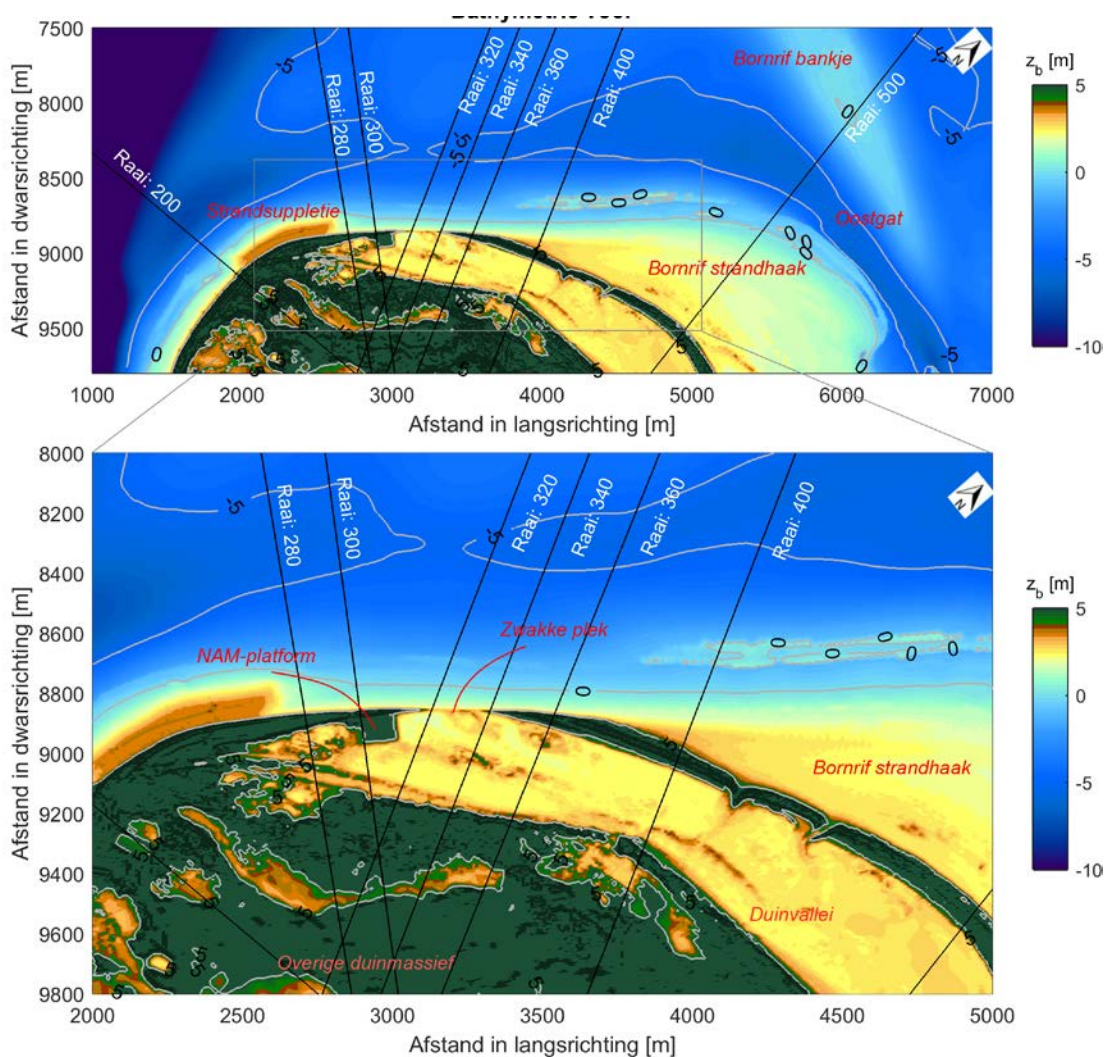
Figuur 2.4 Afslag aan de westkop van Ameland na de Sinterklaasstorm van 5-6 december 2013 (exacte locatie onbekend)<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Bron: <http://home.planet.nl/~kuhlm026/nieuws/nieuws%202013.htm#2e>



Figuur 2.5 Overzichtskaart op basis van Vaklodgingen van Ameland Noordwest voor de periode 1989-2011 waar vaklodgingen van beschikbaar zijn. De dieptecontourlijnen -5 m (gestippelde lijn) en 0 m (doorgetrokken lijn) zijn aangegeven. Het gebied tussen Ameland en het Bornrif wordt het Oostgat genoemd. Bron: Nederhoff et al. (2015)

Figuur 2.6 geeft een overzicht rondom het probleemgebied op Ameland Noordwest van de rangnummers en belangrijkste plaatsen. Deze recente (2015) bodem laat duidelijk het opkomen van het Bornrif (bankje) met als gevolg de vorming van het Oostgat zien. Het vorige Bornrif, dat in 1971 de eerste verbinding maakt met de kust van Ameland, resulteerde in een grote puls sediment die inmiddels richting het oosten is uitgesmeerd (Bornrif strandhaak). Naast deze natuurlijke dynamiek is de menselijk hand ook zichtbaar. Hoewel er in het verleden (2011, 2007, 2004) en recent (2015) grote strandsuppleties (250 tot 300 m<sup>3</sup>/m) zijn uitgevoerd zijn suppleties hier volgens Nederhoff et al. (2015) niet voldoende geweest om de erosie te stabiliseren. Tussen raai 320-380 is het duin lokaal erg smal geworden. Achter de eerste duinenrij (eerste zeereep) is er een duinvallei en het 'overige duinmassief'. In dit rapport zullen we geïntroduceerde benamingen consistent blijven gebruiken om zo de leesbaarheid van de rapportage te vergroten. Dit zal soms leiden tot een discrepantie tussen de eigenlijke en werkelijke benamingen, bijvoorbeeld de Bornrif strandhaak is eigenlijk nog niet de juiste benaming in de 1989 bodem. Hetzelfde geldt voor de duinvallei in de situatie zonder eerste zeereep.



Figuur 2.6 Ligging van de raaien en belangrijkste locaties van Ameland Noordwest op basis van de 2015 bodem. Er is gebruik gemaakt van een lokaal coördinatensysteem.





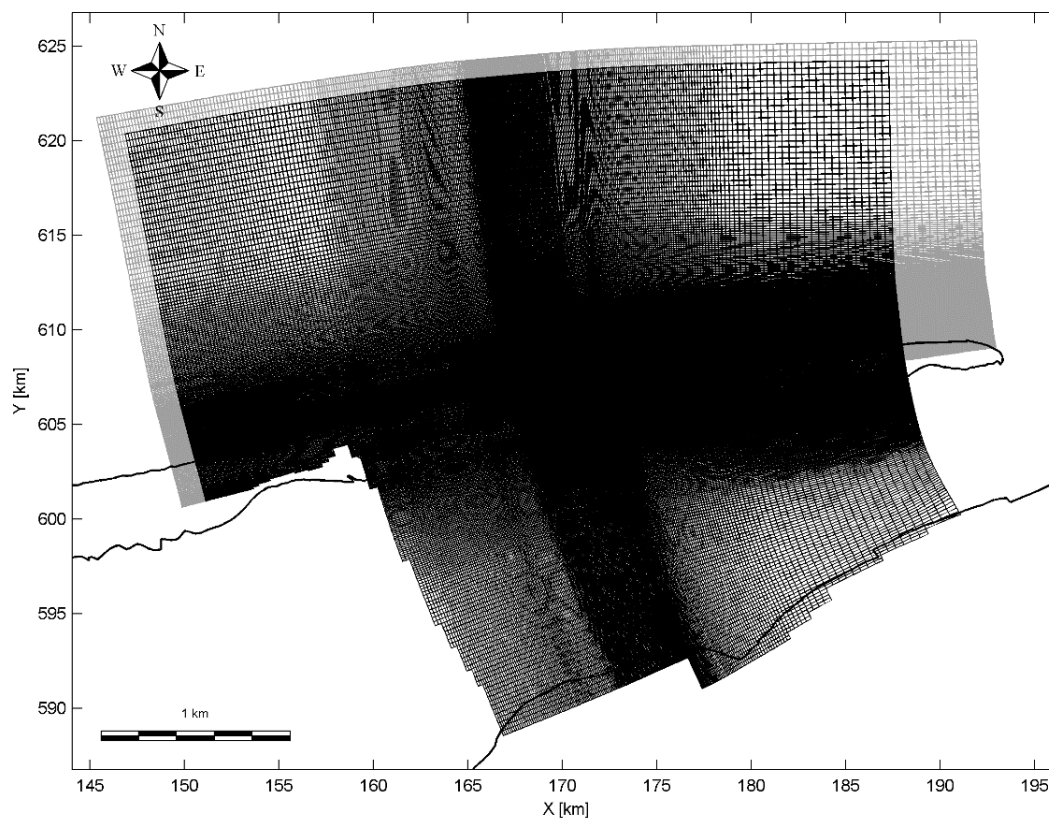
### 3 Invloed dagelijkse condities: Delft3D modelering

#### 3.1 Omschrijving model

De basis van de simulaties wordt gevormd door het stromings- en golvenmodel van het Amelanders Zeegat zoals beschreven in de Fockert (2008). Delft3D-Flow vormt de kern van het model en berekent de waterbeweging ten gevolge van getij en meteorologische forcering door de ondiepwatervergelijkingen op te lossen (zie Lesser et al., 2004). De opgelegde bodemruwheid wordt berekend aan de hand van de in het model geïmplementeerde Van-Rijn2007 ruwheidsvoorspeller. Hierin is alleen de bijdrage van kleine- en grote bodemvormen meegenomen (zie Elias et al. 2015 en Teske 2012 voor details).

Het stromingsmodel beslaat het Zeegat van Ameland, het achterliggende bekken en de aanliggende eilanden (zie Figuur 3.1). Het rekenrooster is zodanig gekozen dat zowel de ondiepe zone langs de kust (brandingszone) en de ligging van de hoofdgeul in het zeegat in hoge resolutie worden weergegeven, terwijl de resolutie naar de randen toe lager is. Dit rekenrooster geeft ons een hoge resolutie en tevens efficiënte modelsimulaties. De resolutie van 30 – 40 m in het zeegat en langs de aanliggende kust wordt gezien als toereikend om de maatgevende stromingen en transporten weer te geven. De open (zee) randen worden geforceerd door een morfologisch getij, dat is afgeleid door nesting van het model in een grootschalig Waddenzee model (zie Hoofdstuk 3.2.1 voor details). Uitwisseling tussen het achterliggende Amelanders bekken en de Noordzee wordt in detail berekend, maar uitwisseling tussen de bekkens in de Waddenzee wordt in dit model niet meegenomen. Dit laatste proces is vooral belangrijk om vragen van sedimentimport (of export) van het bekken te beantwoorden, maar waarschijnlijk minder van belang voor het sedimenttransportpotentieel langs de Amelanders kust grenzend aan het Bornrif.

Golven worden berekend met het gekoppelde spectrale golfmodel SWAN (versie 40.72ABCDE). Het onderliggende golfrooster is vrijwel identiek aan het rooster van het stromingsmodel alleen is het model aan de zeeranden iets uitgebreid. Dit zorgt ervoor dat verstoringen door randeffecten zijn uitgedempt voordat het stromingsmodel wordt bereikt. Golfgedreven stromingen zijn vooral van belang langs de aanliggende eilandkusten en op de ondieptes van de buitendelta waar golven breken. Voor een nauwkeurige weergave van de golfstroominteractie wordt het golvenmodel elke 30 minuten opnieuw berekend. Elke 30 minuten is er dus een uitwisseling tussen het golf- en stromingsmodel waarbij het stromingsmodel de waterstanden, stromingen etc. doorgeeft aan SWAN. SWAN berekent vervolgens het bijbehorende golfveld (stationair). De golfinformatie wordt weer teruggegeven aan FLOW en meegenomen in de volgende 30 minuten van de stromingsberekening. De golfcondities zelf zijn gebaseerd op een afleiding van het morfologische golfklimaat (zie Hoofdstuk 3.2.2).



Figuur 3.1 Modelrooster voor stroming (zwart) en golven (grijs)

## 3.2 Model opzet

### 3.2.1 Bodem en sedimenttransport

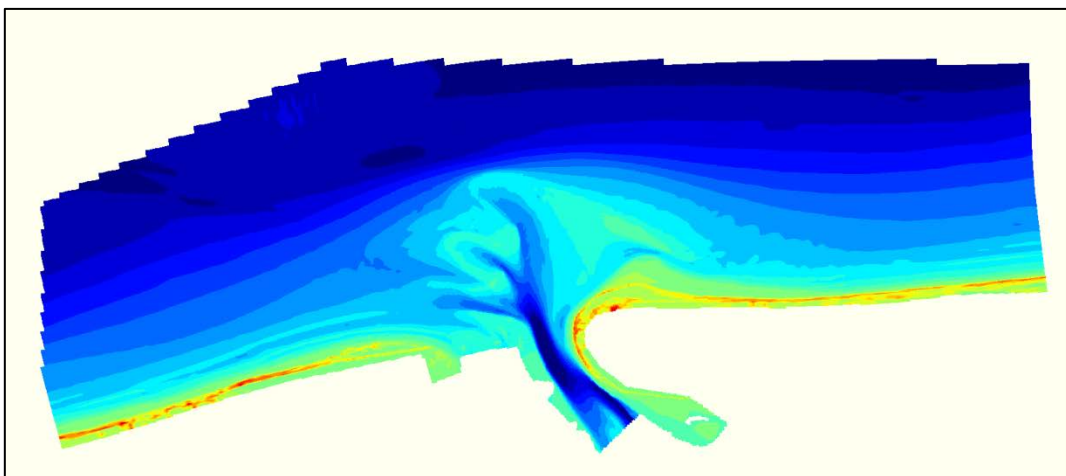
De "Online Morphology" toevoeging aan Delft3D is gebruikt om de sedimenttransporten te berekenen (zie Lesser et al., 2004). De transporten zijn gebaseerd op de Van Rijn 2007 formuleringen (Van Rijn, 2007a, b, c). Van Rijn maakt onderscheid tussen het suspensief sedimenttransport en het bodemtransport. Het suspensieftransport wordt berekend door de advection-diffusie vergelijking welke het effect van sediment op de dichtheid en de valsnelheid van het sediment meeneemt. Het bodemtransport is representatief voor het sediment transport dat in direct contact met de bodem staat. Een extra term wordt hierbij toegevoegd om de bijdrage van golven, zoals golfasymmetrie, correct mee te nemen. Gedurende de simulatie wordt de hoogte van de modelbodem niet aangepast (geen morfologische verandering). Doordat we de bodem constant houden, kunnen we juist de verandering in sedimenttransport onder verschillende hydrodynamische forcering (de verschillende golfcondities) in kaart brengen. Onnauwkeurigheden door verschillen in bodemaanpassing door de verschillende golfcondities worden hierdoor voorkomen. Dit maakt het ook mogelijk om de resultaten van de verschillende golfcondities gewogen bij elkaar op te tellen om zo een schatting van de lange-termijn transporten te verkrijgen. Een nauwkeurige berekening van de volledige morfologische veranderingen kan alleen na uitgebreide kalibratie en validatie van het model. Dit ligt echter niet binnen de doelstelling en scope van het huidige project.

De gebruikte modelbodems van het zeegat zijn representatief voor de 1989 en 2014 bodem (zie Figuur 2.2 en Figuur 2.3). De 2014 bodemdata zijn waar mogelijk gebruikt. Dit geeft een

goede dekking van de kust en de buitendelta (zie Figuur 3.2) De missende gedeelten zoals het bekken zijn daarna aangevuld met de daarvoor meest recente (2011) data. De 1989 Vaklodingen hebben een dekking over vrijwel het gehele zeegat (Figuur 3.2, rechtsonder). De omliggende data zijn gebaseerd op de 1991-1995 metingen. In deze 1989 is de "Bornrif Strandhaak" nog niet aangeland, maar strekt zich als een langgerekte (ondiepe) bank parallel langs de kust uit. Dit geeft een belangrijk verschil tussen de 2014 en 1989 bodem. Het Bornrif Bankje in de 2014 bodem staat onder een hoek met de kust, volgt de oriëntatie van de buitendelta, en strekt zich veel verder zeewaarts uit.

De bodemsamenstelling gaat uit van een onbeperkte hoeveelheid sediment met een mediaan ( $D_{50}$ ) korreldiameter van 250  $\mu\text{m}$ . Deze korreldiameter is representatief voor het zeegat, maar op het Bornrif ligt de korreldiameter waarschijnlijk wel iets lager (100-240  $\mu\text{m}$ ); zie sedimentatlas op [www.waddenzee.nl](http://www.waddenzee.nl). Dit verschil in diameter zal wel een invloed hebben op de grootte van de transporten, maar de invloed op de transportpatronen is waarschijnlijk beperkt.

Voornamelijk default instellingen (Deltares, 2014) zijn gebruikt voor de berekening van sediment transporten. Alleen de golf-gerelateerde bijdrage aan de bodem- en suspensietransporten is gereduceerd naar 0.2. Deze waarde wordt vaak gebruikt in diepte-gemiddelde simulaties waarin de bijdrage van undertow en massa flux (3D processen) aan de dwarstransporten in de surfzone in een diepte-gemiddelde schematisatie niet wordt berekend. Dit geeft met default instellingen een mogelijke overschatting van de dwarstransporten.



Figuur 3.2 Dekking van de bodemmetingen in 2014.

### 3.2.2 Model schematisatie van getij en golven

Het volledig berekenen van transportpatronen, representatief voor de lange-termijn trends vereist zeer lange modelsimulaties. De modelsimulaties moeten immers een grote en representatieve spreiding van getij, wind en golfcondities doorrekenen. Met proces-gebaseerde modellen zoals Delft3D zijn dergelijke simulaties eigenlijk niet mogelijk gezien de benodigde rekeninspanning. Een benadering van representatieve transportpatronen kan echter wel gemaakt worden door gebruik te maken van model schematisaties (zie De Vriend et al., 1991 voor de basis). De schematisatietechnieken zoals beschreven in Lesser (2009) zijn in deze studie gebruikt om een morfologisch getij- en golfklimaat af te leiden.

Het getij is geschematiseerd door een volledig, maandelijks, springtij – doortij cyclus weer te geven door de morfologische equivalent (Latteux, 1995). Dit morfologische getij geeft een vrijwel identiek netto transportpatroon als de volledige tijdserie. Het morfologisch representatieve golfklimaat is gebaseerd op de data van de golfboei SON (net ten oosten van Ameland).

De ruwe golfdata over de periode 1989-1999 is daarbij eerst opgedeeld in 126 verschillende condities. Deze 126 golfcondities worden allen gedurende 1 getijperiode doorgerekend en de resulterende morfologische verandering bepaald. Het morfologische golfklimaat wordt vervolgens bepaald door de 12 golfcondities te kiezen die de totale morfologische verandering het meest optimaal representeren. Dit resulteert in de set golfcondities weergegeven in Tabel 3.1. In de studie van de Fockert (2008) staan de schematisaties in detail beschreven.

Iedere golfconditie wordt hierbij over het representatieve getij gesimuleerd en de sedimenttransporten worden bepaald. Het voordeel van deze methode is dat we alle golfcondities afzonderlijk voor slechts 1 representatief getij door te hoeven rekenen. Omdat we maar beperkt in de tijd moeten doorrekenen, betekent dit dat we roosters met hoge resolutie in de ruimte kunnen inzetten. Dit geeft gedetailleerde berekeningen van de transporten in de brandingszone en over de complexe banken van de buitendelta. Daarnaast kunnen we de berekeningen verder versnellen door met meerdere computers tegelijk te rekenen. Het model geeft dus voor ieder golfconditie een schatting van het sediment transport over de ingevoerde bodem: het sediment transport potentieel. De resultaten worden gewogen (met de kans van voorkomen) bij elkaar opgeteld en dit geeft dan een benadering van het sedimenttransport over langere termijn. Analyse van het sedimenttransportpotentieel is een belangrijke eerste stap in het begrijpen van het morfologische gedrag.

Tabel 3.1: Geschematiseerd golfklimaat (gebaseerd op De Fockert, 2008)

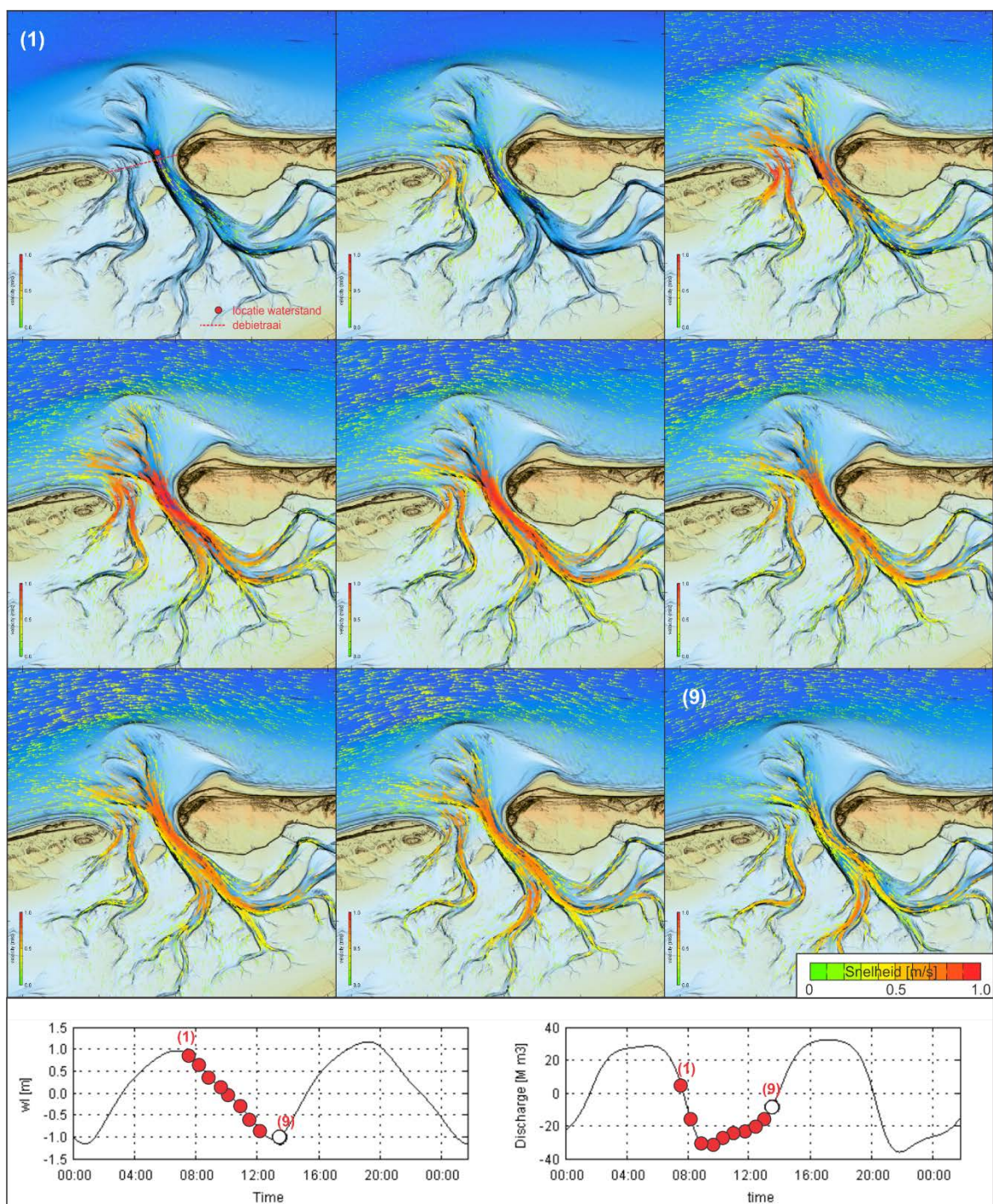
Golf conditie	Hs [m]	T <sub>p</sub> [s]	Dir <sub>golf</sub> [°N]	Setup [m]	U <sub>wind</sub> [m/s]	Dir <sub>wind</sub> [°N]	Gewicht [%]
002	0.49	4.84	22.77	-0.13	4.65	88.04	17.58
009	0.52	4.87	292.97	0.03	5.08	224.09	11.35
020	0.99	5.06	264.07	0.10	9.17	215.45	13.21
024	0.99	6.29	322.68	-0.01	4.88	267.05	24.50
030	1.49	5.73	53.63	-0.38	9.60	80.80	8.22
051	1.98	7.13	338.01	0.03	6.99	332.86	6.67
052	1.98	6.98	351.21	-0.05	7.52	5.99	4.35
060	2.47	6.94	278.78	0.57	13.81	252.61	2.37
061	2.47	7.26	293.40	0.48	11.14	262.90	7.35
087	3.45	8.59	336.61	0.33	11.10	336.12	2.02
102	4.47	9.44	307.05	1.06	15.00	284.07	0.99
118	5.88	11.26	324.6	1.35	14.60	315.92	0.23

### 3.3 Stromingen

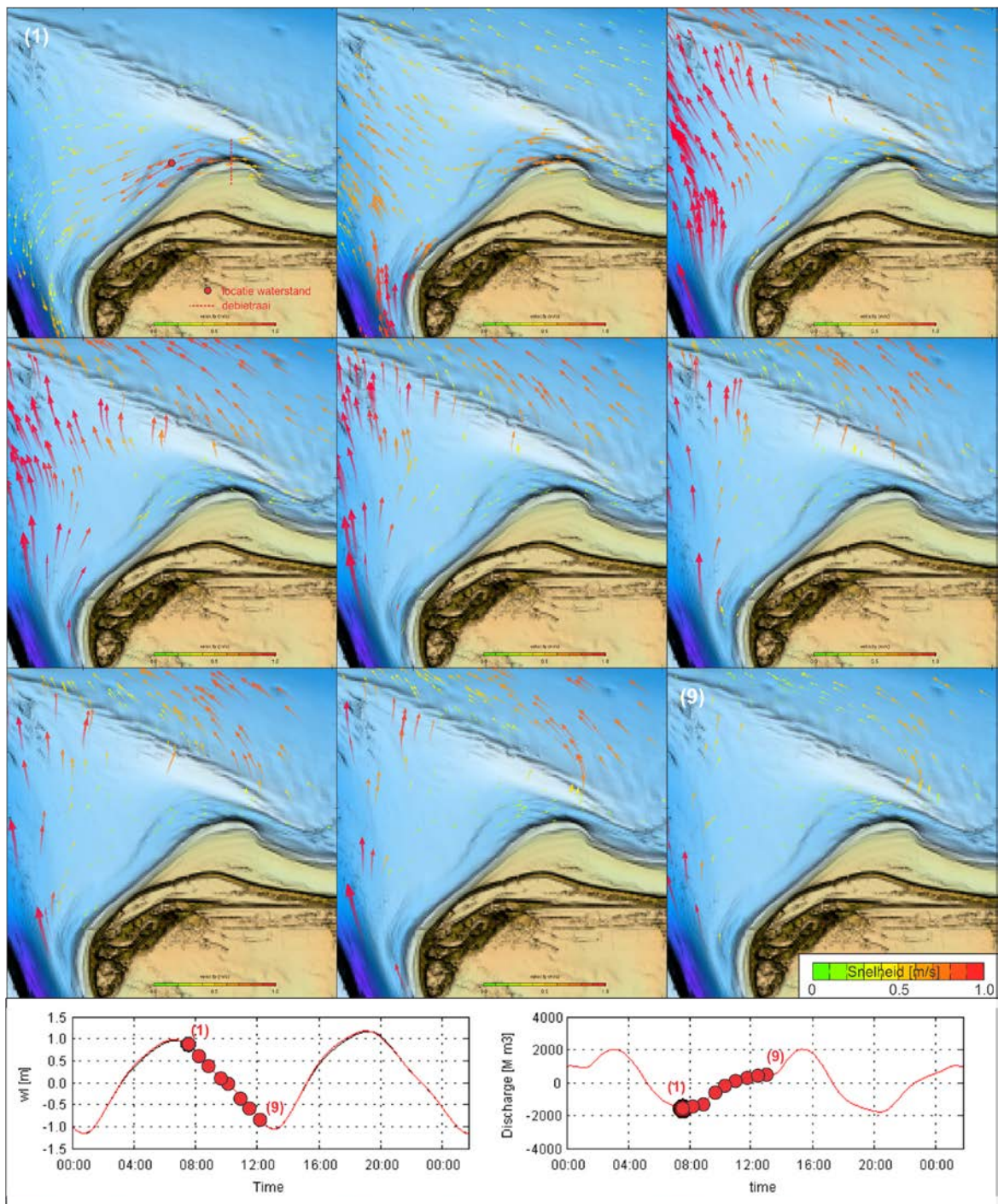
De getijstrooming in en direct rond het zeegat is complex door de uitwisseling van het kust-langse getij op zee, het kustdwarse getij door het zeegat en de complexe onderliggende bodem met zijn geulen en platen. Figuur 3.3 t/m Figuur 3.6 geven een representatief beeld van de getijbeweging op basis van het morfologische getij en de 2014 bodemschematisatie. Het morfologische getij ligt in amplitude zo'n 10% boven het gemiddelde getij. Tijdens hoogwater (7:30) is de getijstrooming op zee vrijwel nul. In het zeegat (Borndiep) is er dan nog een kleine vloedstrooming aanwezig. Aanvankelijk treden de grootste stroomsnelheden op in het westelijke gedeelte van het zeegat (Boschgat). Gedurende een periode van 2 uur zijn de stroomsnelheden in het Boschgat duidelijk hoger dan in het Borndiep. Het maximale debiet in het Borndiep treedt op 2 uur na hoogwater (9:30), tot laagwater (12:00) nemen de debieten dan geleidelijk af. De stroomsneden blijven gedurende de hele periode hoog (tot 1.2 m/s).

De verstoring van het westelijk gerichte Noordzeegetij door de kustdwarse stroming vanuit het zeegat is duidelijk zichtbaar op de buitendelta (Figuur 3.3). Op zee is de stroming van oost naar west, deze stroming wordt dan langs het Bornrif zeewaarts geduwd door interactie met de bodem en uitstroming uit het zeegat. Op het Bornrif staat de stroming zeewaarts (kustdwars), gedreven door de hoge stroomsnelheden in Borndiep (Figuur 3.3). In het Oostgat is er geen duidelijk geulgedreven stroming zichtbaar. De stromingen zijn aanvankelijk klein en tegenovergesteld gericht aan de oost en westzijde van het Oostgat. Aan de westzijde is de stroming oostwaarts gericht. Hier wordt de stroming gedreven door de stroming in het Borndiep. Aan de oostzijde (Bornrif strandhaak) is de stroming juist westwaarts. Het Noordzee getij wordt hier tussen het Bornrif bankje en de strandhaak geduwd en vertoont lokaal een versnelling. Naarmate de eb vordert, gaat de oostwaarts gerichte stroming wel langzaam het Oostgat domineren. Rond 10:00 is de stroming tussen het Borndiep en de strandhaak Bornrif nog westelijk gericht. Om 11:20 is de stroming in het gehele Oostgat, inclusief de strandhaak, oostwaarts gericht. De maximale stromingen zijn klein (< 0.5 m/s) t.o.v. de stromingen in Borndiep.

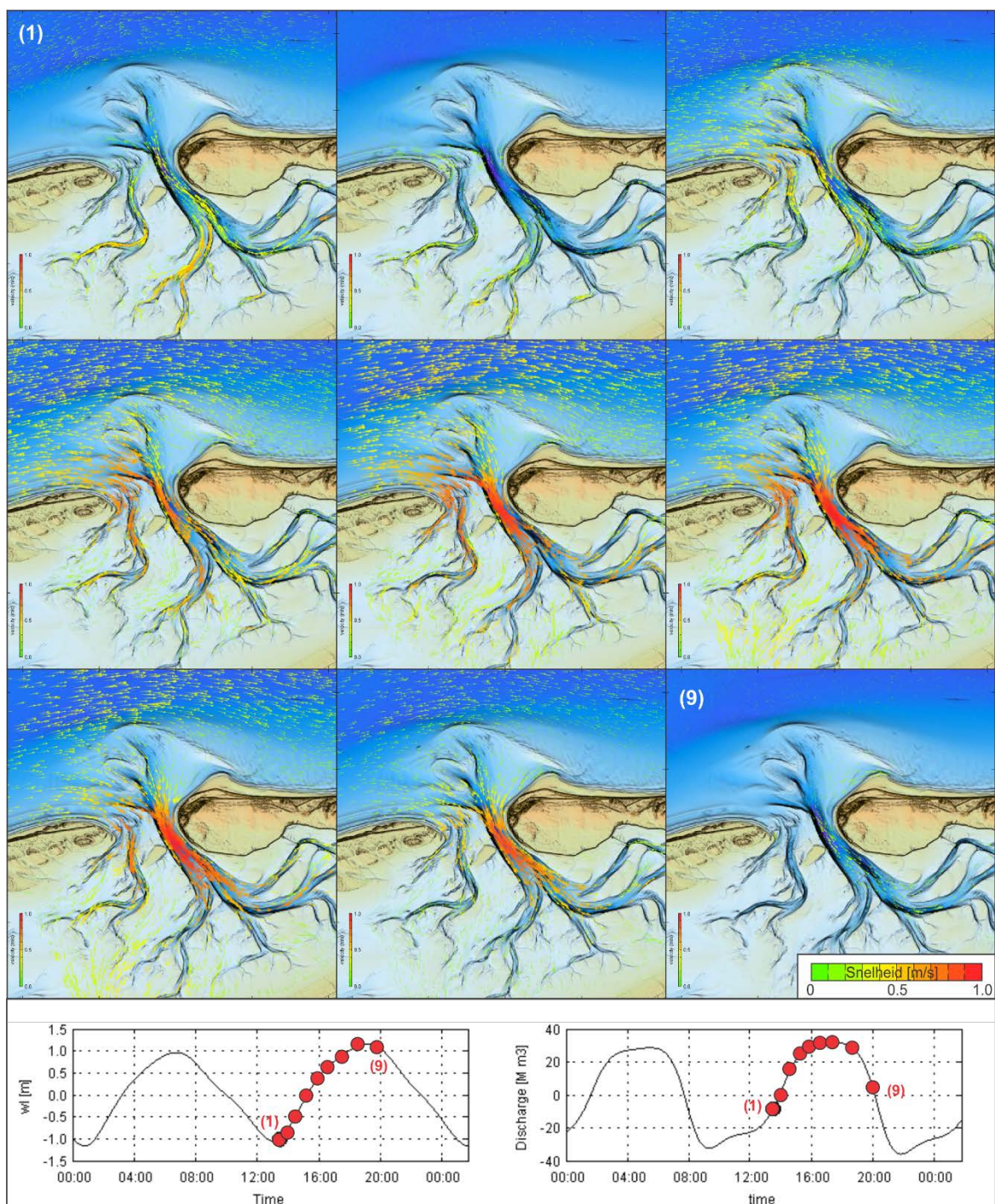
Rond 13:30 vindt op zee de kentering van eb- naar vloedstrooming plaats (Figuur 3.5). In het zeegat is er dan nog steeds een uitstroming aanwezig. Kentering in het Borndiep vindt pas plaats rond 14:10, meer dan een half uur later dan op zee. De vloedstrooming dringt vanuit het westen, langs het eiland Terschelling, het zeegat binnen. De hoogste snelheden worden initieel dan ook in het Boschgat waargenomen. Rond 16:00 zijn de stromingen in het Borndiep dan duidelijk hoger dan in het Boschgat. Stromingen over het Bornrif zijn tijdens het begin van de vloedperiode nog voornamelijk naar het oosten gericht (Figuur 3.5) het Noordzeegetij domineert over de zeegat-gedreven stromingen. Het Oostgat vormt dan nog geen stroomvoerende geul. Tot 15:20 blijft er een duidelijke tweedeling in de stroming van het Oostgat zichtbaar met in het westelijke deel, een stroming die naar het Borndiep toe is gericht en versnelt rond de kop van Ameland. In het oostelijke deel versnelt de stroming juist rond de strandhaak Bornrif en is oostelijk gericht. Pas om 17:20 is het gehele Oostgat vloedgedomineerd (naar het zeegat toe). De langsstroming door het Noordzeegetij is dan al sterk gereduceerd en over het gehele Bornrif staat een stroming naar het zeegat toe. Het Oostgat springt hier niet uit als een duidelijke geul (de stromingen zijn niet hoger dan op de naastliggende plaat). Rond 20:00 vindt er dan weer kentering van het getij op zee plaats en herhaalt het patroon zich.



Figuur 3.3 Berekende getijstromingen representatief voor uitstroming (eb) door het zeegeat. Tijdsreeksen geven een indicatie van de waterstand en debiet in het Borndiep (locatie in deelfiguur 1). Zie bijbehorende animaties voor details.

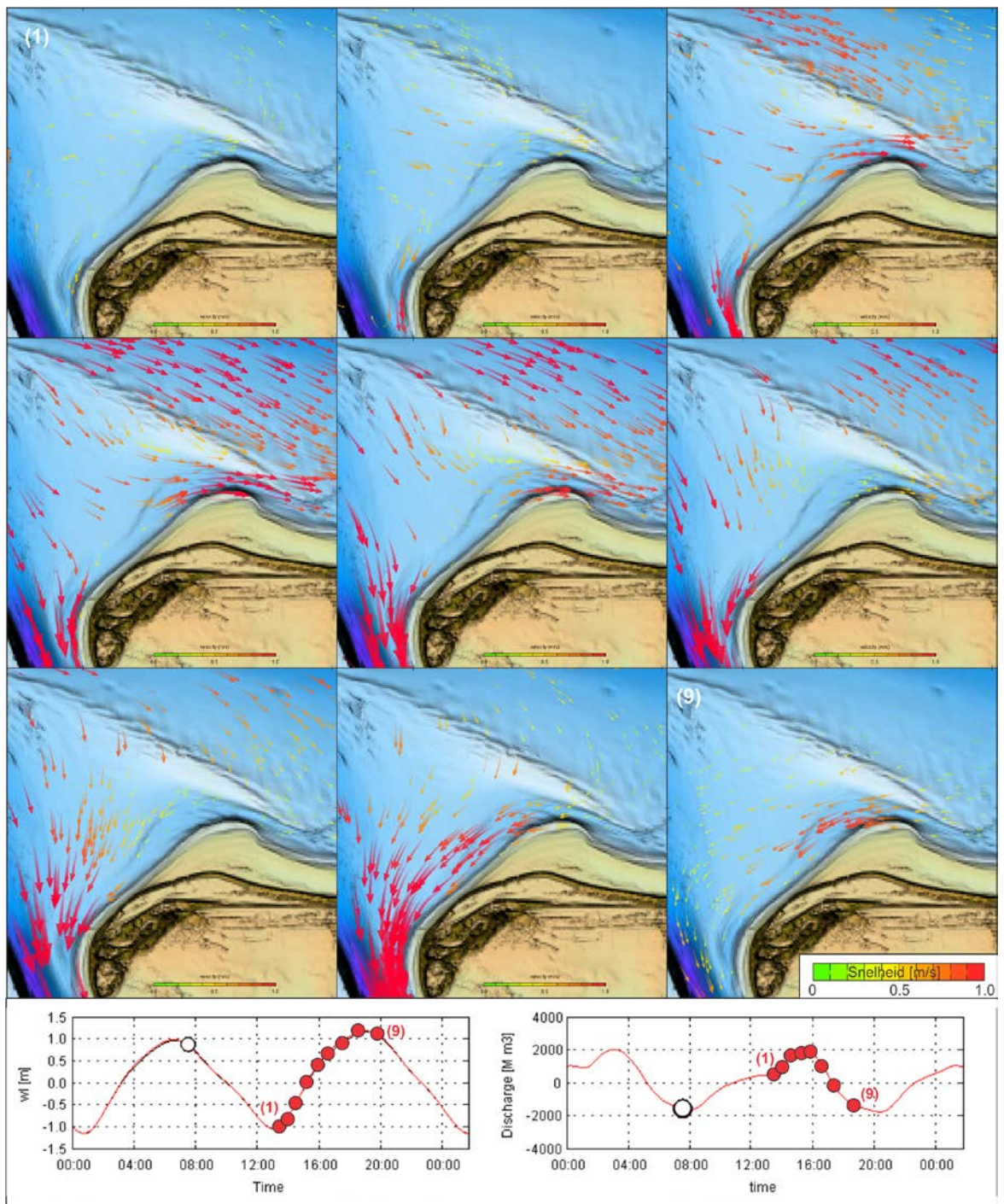


Figuur 3.4 Berekende getijstromingen over het Bornrif, representatief voor uitstroming (eb) door het zeegat. Tijdsreeksen geven een indicatie van de waterstand en debiet in het Oostgat (zie Figuur 3.3, deelfiguur 1 voor locatie).



Figuur 3.5 Berekende getijstromingen representatief voor instroming (vloed) door het zeegat. Tijdsreeksen geven een indicatie van de waterstand en debiet in het Borndiep (zie Figuur 3.3, deelfiguur 1 voor locatie). Zie bijbehorende animaties voor details.





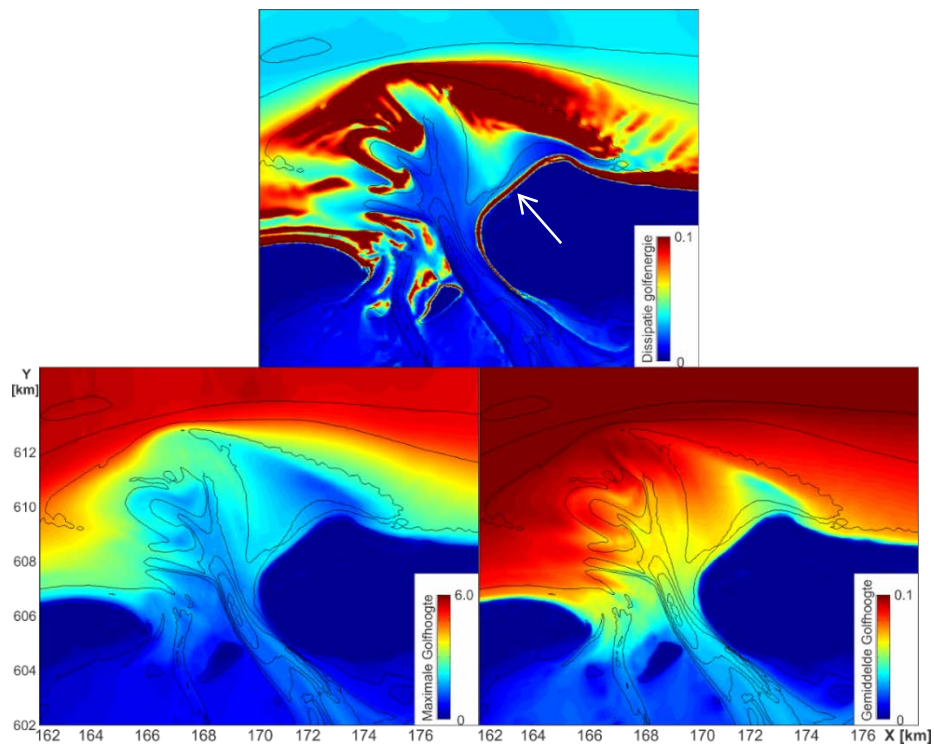
Figuur 3.6 Berekende getijstromingen op het Bornrif, representatief voor instroming (vloed) door het zee-gat. Tijdseries geven een indicatie van de waterstand en debiet in het Oostgat (zie Figuur 3.31, deelfiguur 1 voor locatie).

### 3.4 Golven

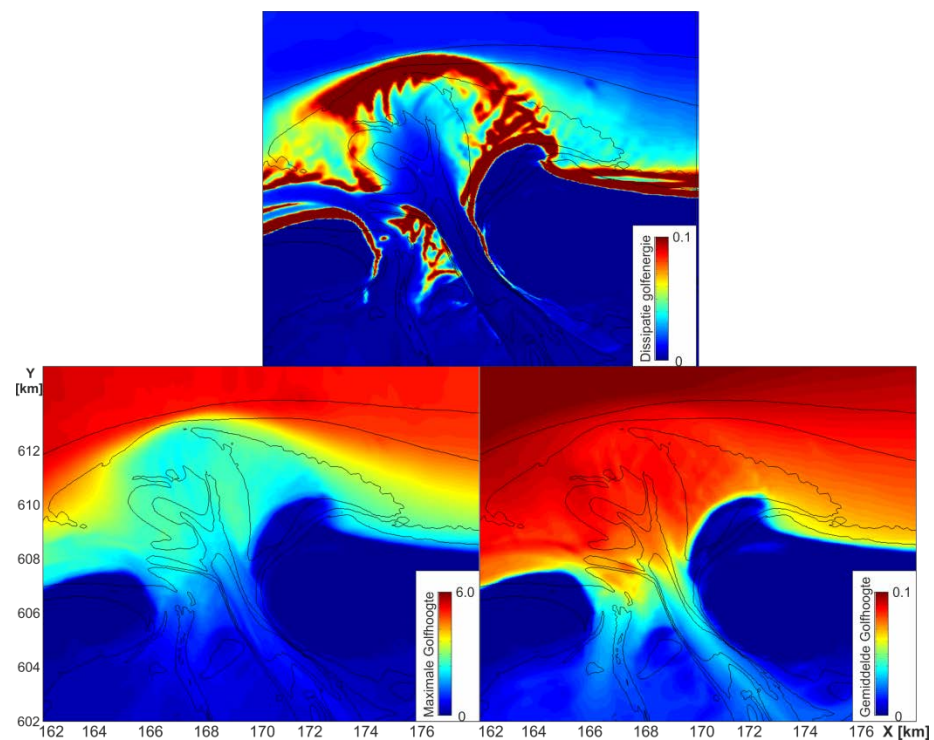
Golven en golfdissipatie spelen vooral een rol op de (platen van de) buitendelta en langs de aanliggende eilandkusten (Figuur 3.7 en Figuur 3.8). De buitendelta schermt het achterliggende bekken en de kust zeer effectief af van golfdoordringing. Dit geldt zowel voor de 2014 en de 1989 bodem. Landwaarts van de keel zijn de golfhoogten sterk gereduceerd en is er slechts een geringe golfdissipatie op de wat hogere banken in de keel. De maximale golfhoogte op de Noordzee ligt in deze berekeningen op bijna 6 m. Deze golven bereiken de achterliggende kust niet. De kust van Ameland grenzend aan het Bornrif heeft golfhoogtes van maximaal 2 m in de brandingszone (de rode strook langs de kust van Ameland, zie witte pijl in Figuur 3.7). Dit wil echter niet zeggen dat golven hier niet van belang zijn. De golfdissipatie langs de aanliggende kust is kleiner dan op het buitendelta front, maar er is nog steeds een duidelijke brandingszone, met geconcentreerde golfdissipatie, aanwezig.

Langs de kust is wel een duidelijk verschil te onderscheiden tussen de twee bodems. De golfhoogte voor de 2014 bodem laat zien dat er duidelijke verschillen in golfdoordringing en dus in gradiënten langs de kust aanwezig zijn. Gradiënten in golfhoogte geven vaak ook gradiënten in het sedimenttransport. De golfdissipatie achter het Bornrif bankje is maximaal. Tussen het Borndiep en het bankje is de golfhoogte juist iets hoger. Dit komt vooral doordat het centrale gedeelte van het Bornrif gewoon iets dieper is waardoor er voor vrijwel alle golfcondities meer golfenergie de kust kan bereiken (Figuur 3.9). Dit effect is vooral zichtbaar voor golfcondities 024, 051 en 052. Kleine of gemiddelde golven vanuit een noordwestelijke richting kunnen dan vrijwel ongestoorde over de kust bereiken. Hogere golven uit deze richting verliezen wel een significant deel van de golfenergie door breking op het Bornrif.

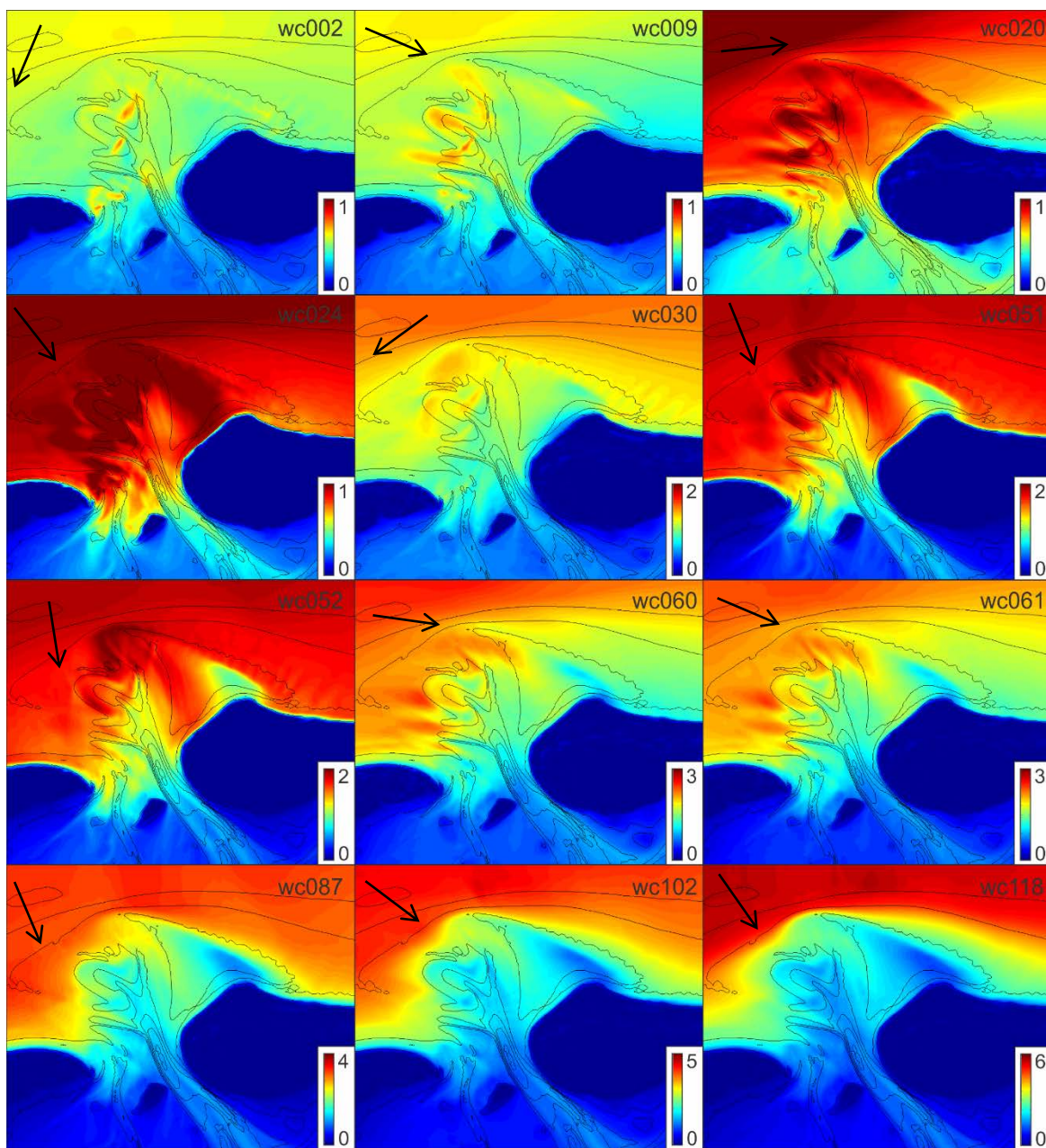
In de 1989 bodem zien we dat de Bornrif strandhaak (gekromd) voor de kust ligt. Deze ondiepe strandhaak schermt dan ook vrijwel de gehele achterliggende kust van Ameland af van de golfenergie. Zeewaarts is de buitendelta dan iets dieper en veel uniformer in hoogte. Zowel de gemiddelde als de maximale golfhoogte blijft hier dan ook veel uniformer (tussen de 2 en 3 m). De allerhoogste golven breken nog steeds zeewaarts op de rand van de buitendelta, maar grote variaties in golfhoogte over de buitendelta zijn eigenlijk niet aanwezig. De golfhoogte langs de strandhaak is wel hoger dan in de 2014 bodem, maar direct op de kust, landwaarts van de strandhaak, zijn de golven zeer klein.



Figuur 3.7 Berekende golfdissipatie op de 2014 buitendelta gemiddeld over alle golfcondities (boven), maximale significante golfhoogte over alle golfcondities (linksonder) en gemiddeld significante golfhoogte over alle golfcondities (rechtsonder). De witte pijl geeft de brandingszone (rode strook) van Ameland Noordwest aan.



Figuur 3.8 Berekende golfdissipatie op de 1989 buitendelta gemiddeld over alle golfcondities (boven), maximale significante golfhoogte over alle golfcondities (linksonder) en gemiddeld significante golfhoogte over alle golfcondities (rechtsonder).



Figuur 3.9 Berekende significante (gemiddelde) golfhoogten voor de afzonderlijke golfsimulaties voor 2014. Zwarte pijlen geven de golfrichting op diep water aan. Voor de randvoorwaarden zie Tabel 3.1.

### 3.5 Sediment transport

#### 3.5.1 Patronen in sediment transport

Residuele sedimenttransporten representatief voor getij en voor het lange-termijn totaal (getij en het morfologische golfklimaat) worden weergegeven in Figuur 3.10. Het getijgemiddelde transport is berekend over het morfologische getij. Een totaal gemiddeld transport is berekend door per golfconditie het getijgemiddelde transport te berekenen. Dit is dan met de kans van voorkomen bij elkaar opgeteld. Dit totale transport geeft een representatief beeld van het potentiële sedimenttransport in het zeegat.

In de getij-gedreven simulatie (Figuur 3.10, links) overheerst een eb-gedomineerde transport in de hoofdgeulen Borndiep en Boschgat. Transporten op de platen van de buitendelta, in het bekken en langs de aanliggende kusten zijn eigenlijk verwaarloosbaar klein t.o.v. de transporten in het zeegat. De toevoeging van golven (Figuur 3.10, rechts) geeft (1) een verhoging van de residuele transporten, (2) zichtbare transporten langs de eilandkusten en (3) transporten op de buitendelta banken. De geulen Boschgat en Borndiep blijven ook met toevoeging van golven eb-gedomineerd, maar de grootte van de transporten neemt wel toe. Door golven is er gewoon meer sediment beschikbaar dat door het getij (in de geulen) kan worden getransporteerd. Langs de eilandkusten overheerst het transport in een oostelijke richting. Deze richting is in overeenstemming met de dominante golfrichtingen. Langs de kust van Terschelling geeft dit kustlangse transport een aanvoer van sediment richting het Boschgat en het bekken in. De gradiënten in deze transporten verklaren mogelijk de erosie van de Boschplaat. De Amelandse kust wordt gedomineerd door een oostwaarts transport. Dit transport neemt vanaf de strandhaak in grootte toe, maar is langs de centrale eilandkust vrijwel constant.

Op de buitendelta bevindt zich met name aan de westzijde een complex patroon (afwisseling) van eb- en vloed-gedomineerde transporten. De eb-transporten overheersen in de geulen en de schaaftjes die zich langs de geul hebben gevormd. Deze eb-transporten nemen sterk af op de voorliggende eb-schilden van de schaaftjes. Tussen de eb-schilden is het transport dan weer naar de geul toe gericht (vloeddinant). De variaties in sedimenttransportpatronen en de onderliggende morfologische structuren zijn hier goed met elkaar in overeenstemming

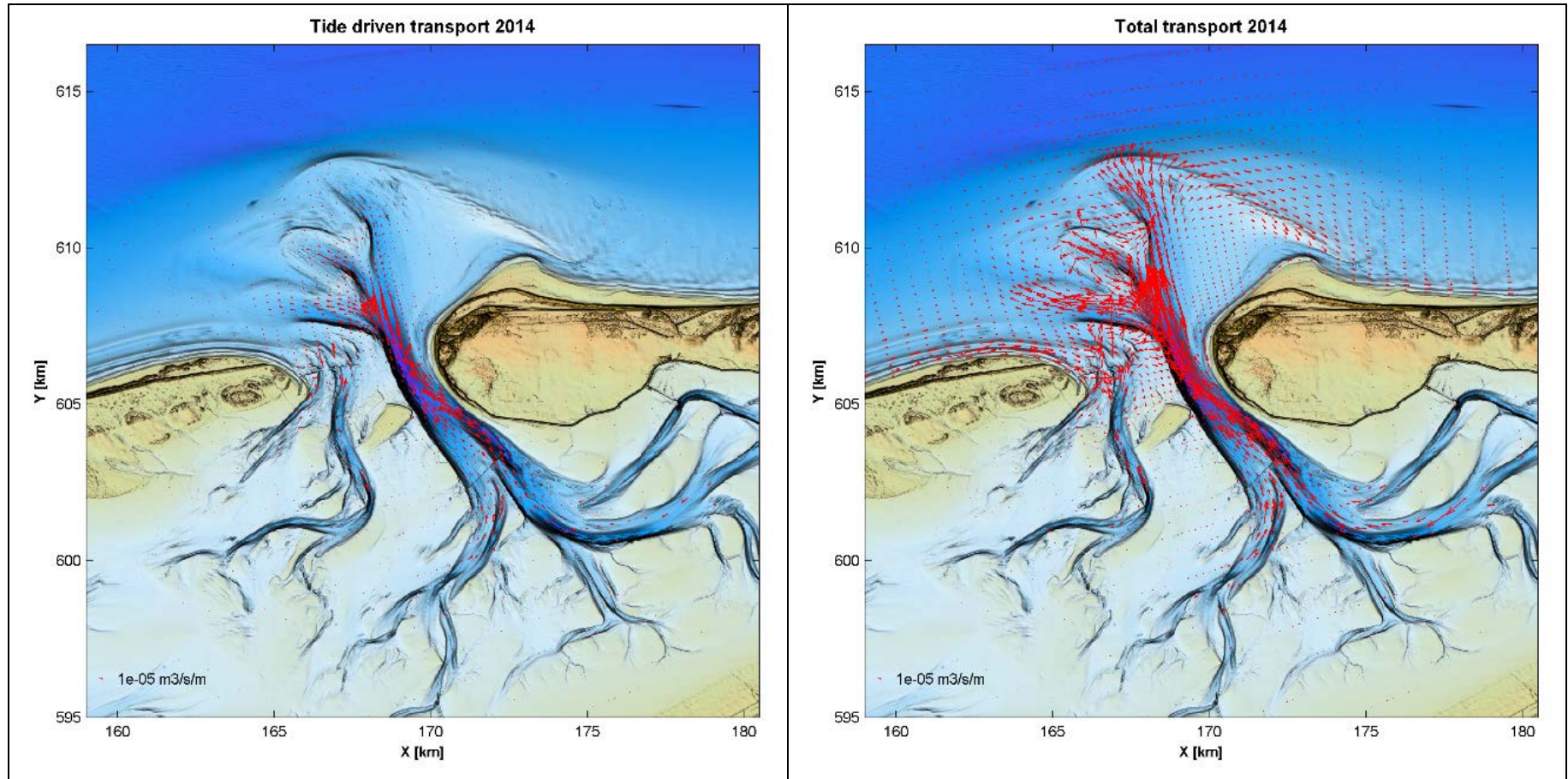
Transporten op het Bornrif en in het Oostgat zijn klein ten opzichte van de grote transporten in de geulen. De transporten op het Bornrif zijn zeer klein ten opzichte van de grote transporten in het naastliggende Borndiep. In het Borndiep, strekken de transporten zich over de gehele geul uit en nemen slechts op het front van de buitendelta duidelijk in grootte af. Langs het buitendeltafront, aan de noordzijde van het Bornrif, staat een oostwaarts en landwaarts gericht transport, richting de kust van Ameland. De transportvectoren worden daarbij sterk beïnvloed door het Bornrif bankje. Op het Bankje staan de transporten duidelijk meer landwaarts gericht, wat de verplaatsing van dit bankje verklaart. In het Oostgat zijn de netto transporten klein. Richting de strandhaak zijn deze transporten oostwaarts gericht. Richting Borndiep zijn de transporten naar het bekken gericht. Er is ook hier geen duidelijke doorgaande geul in de transporten te onderscheiden.

Het transportpatroon op basis van de 1989 bodem vertoont voor de getijforcering de zelfde kenmerken als de 2014 bodem (Figuur 3.11). De grootste transporten (eb-dominant) domineren in de getijgeulen. Het Borndiep is daarbij dominant. De toevoeging van golven doet ook hier de transporten toenemen. De diepere buitendelta zorgt er wel voor dat de residuele transporten wat kleiner zijn en vrij uniform over de buitendelta uitwaaiëren. De eb-gedomineerde transporten vanuit het Borndiep waaiëren vooral uit over de westelijke zijde van de buitendelta en het buitendelta front. De complexe patronen geobserveerd in de 2014 resultaten zijn hier niet te zien. Grote verschillen in transport patronen treden ook op langs de oostelijke rand van de buitendelta. In de 2014 bodem treedt er vanaf het buitendeltafront een relatief groot transport op langs het Bornrif Bankje richting Ameland. In de 1989 is dit veel

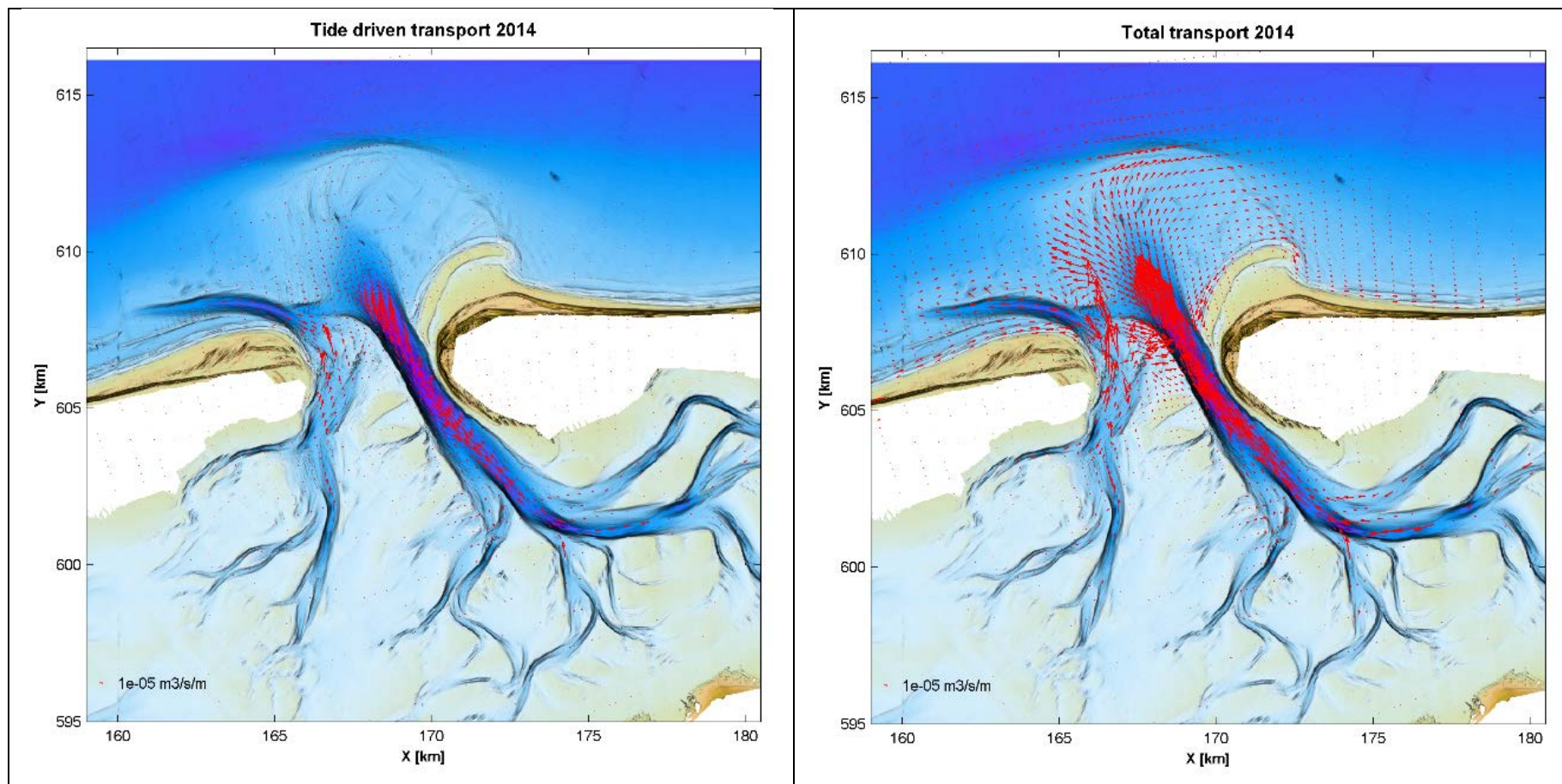
minder sterk ontwikkeld. De strandhaak wordt gedomineerd door eb-dominant transport richting het Borndiep. Dit transport is groter dan in de 2014 bodem.

Het residuele transportpatroon is opgebouwd uit de geschaalde individuele bijdragen van de 12 golfcondities. Analyse van de individuele bijdrage per golfconditie geeft meer inzicht in de residuele transportpatronen. Resultaten voor de 2014 bodem worden hiervoor weergegeven in Figuur 2.8 – 2.10. Het mag duidelijk zijn dat met toenemende golfhoogte ook de transporten toenemen. Alleen voor golven hoger dan 2 m zien we eigenlijk een duidelijk transport langs de Ameland kust aanliggend aan het Bornrif (Figuur 2.9). Golven uit het noordwesten tot noorden (330 tot 360 graden) geven hier een transport naar het zeegat toe, golven uit de andere richtingen geven een transport naar het oosten (van het zeegat af).

De sediment transporten geschaald met de kans van voorkomen (Figuur 2.10) laat de dominante golfcondities zien voor de lange-termijn transporten. Het zijn duidelijk niet alleen de grootste golven die de lange-termijn trend domineren. De relatief lage golfconditie (024) met een  $H_s = 0.99\text{m}$  uit het NW en (061) een milde stormconditie ( $H_s = 2.47\text{m}$  uit NWW) geven juist de grootste relatieve bijdragen aan de transporten rond het zeegat. Voor de transporten in het Oostgat (en aanliggende kust) zijn met name golfconditie 060, 061 en 102 van belang (i.e.,  $H_s$  van 2.5, 2.5 en 5.9 m met gewicht van 2.4, 7.4 en 0.2% vanuit noordwesten).

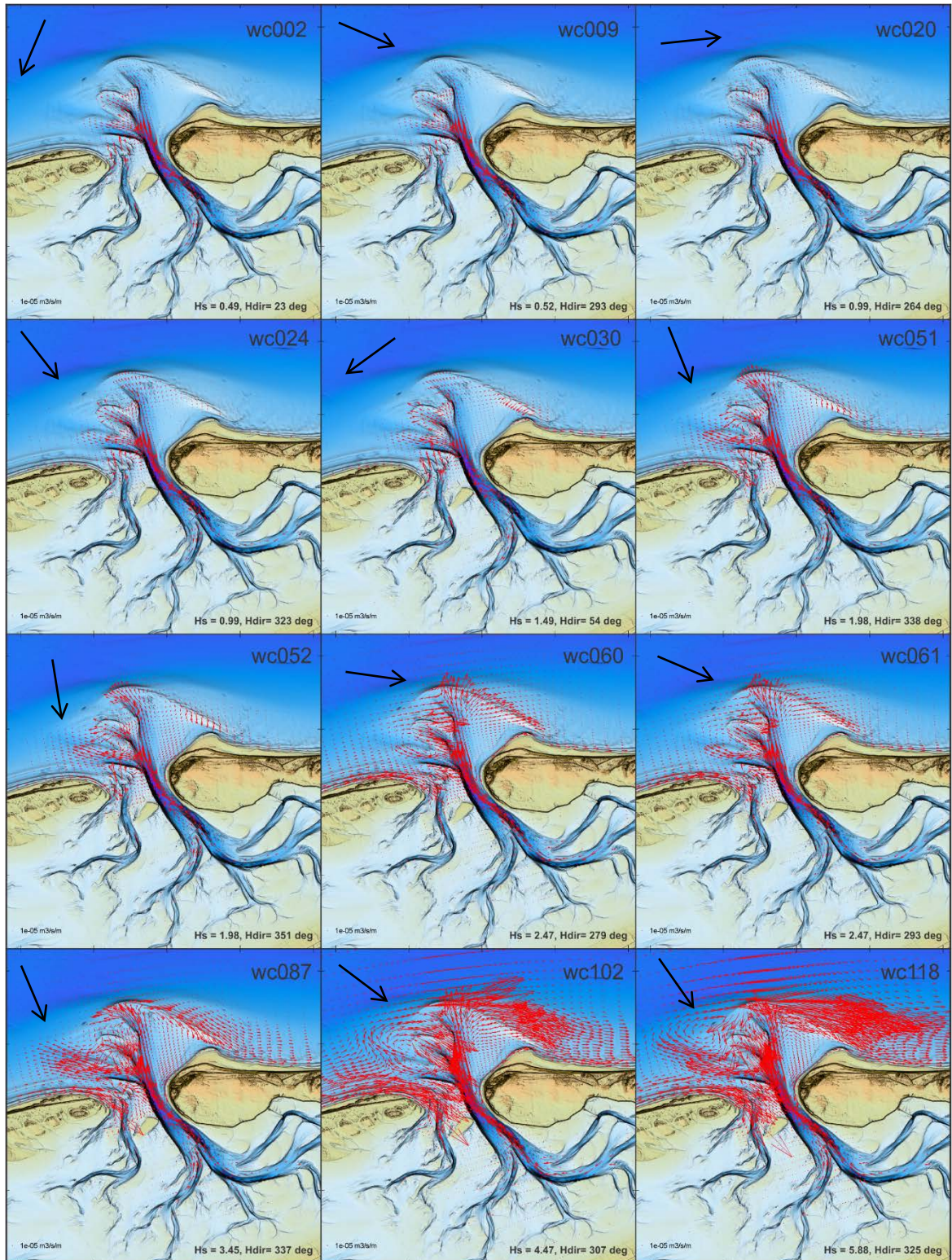


Figuur 3.10 Getijgemiddeld sedimenttransport representatief voor alleen (morfologische) getijforcering (links) en getij + morfologische golfklimaat (rechts) voor de 2014 bodemschematisatie.

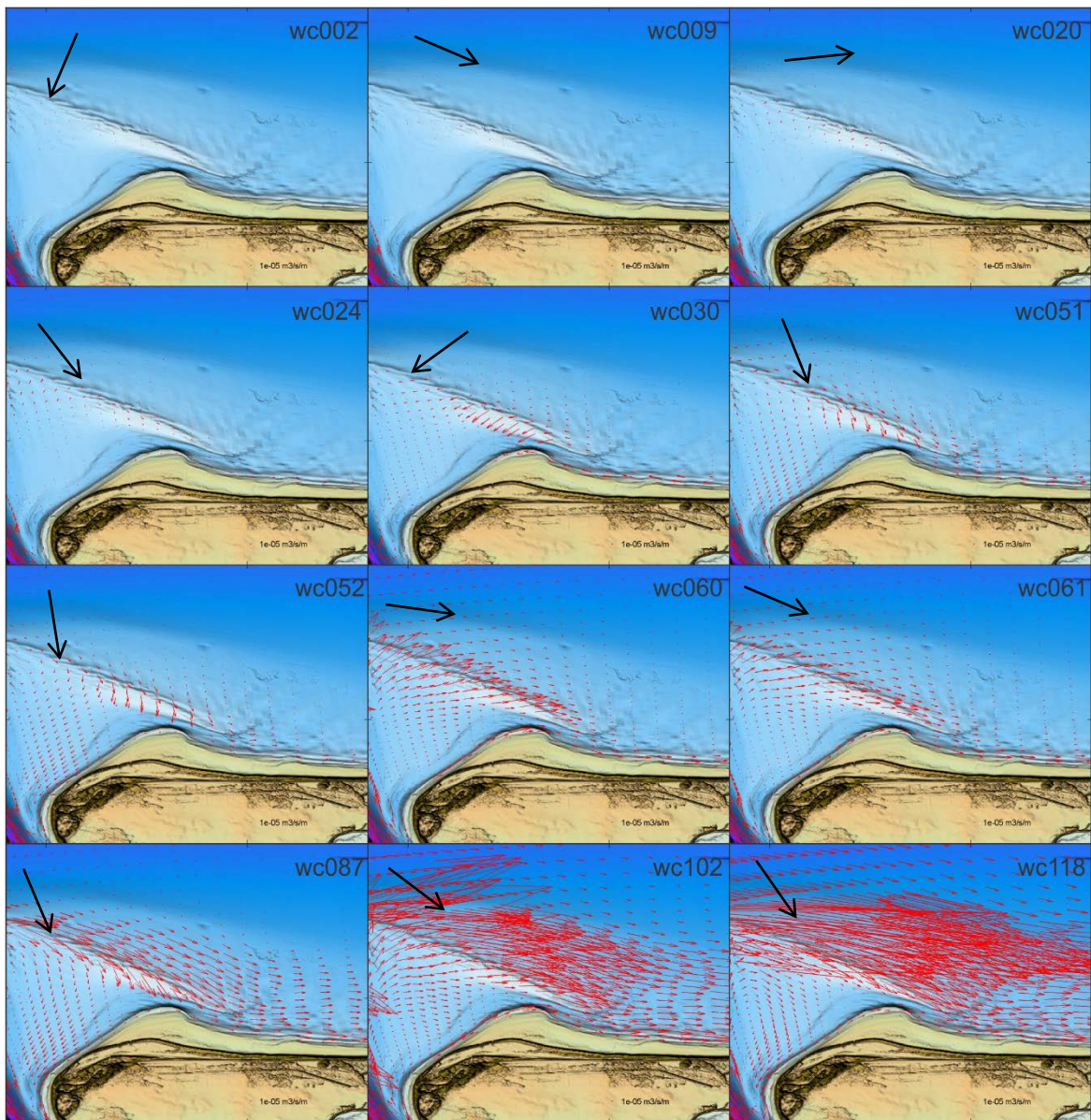


Figuur 3.11 Getijgemiddeld sedimenttransport representatief voor alleen (morfologische) getijforcering (links) en getij + morfologische golfklimaat (rechts) voor de 1989 bodemschematisatie.

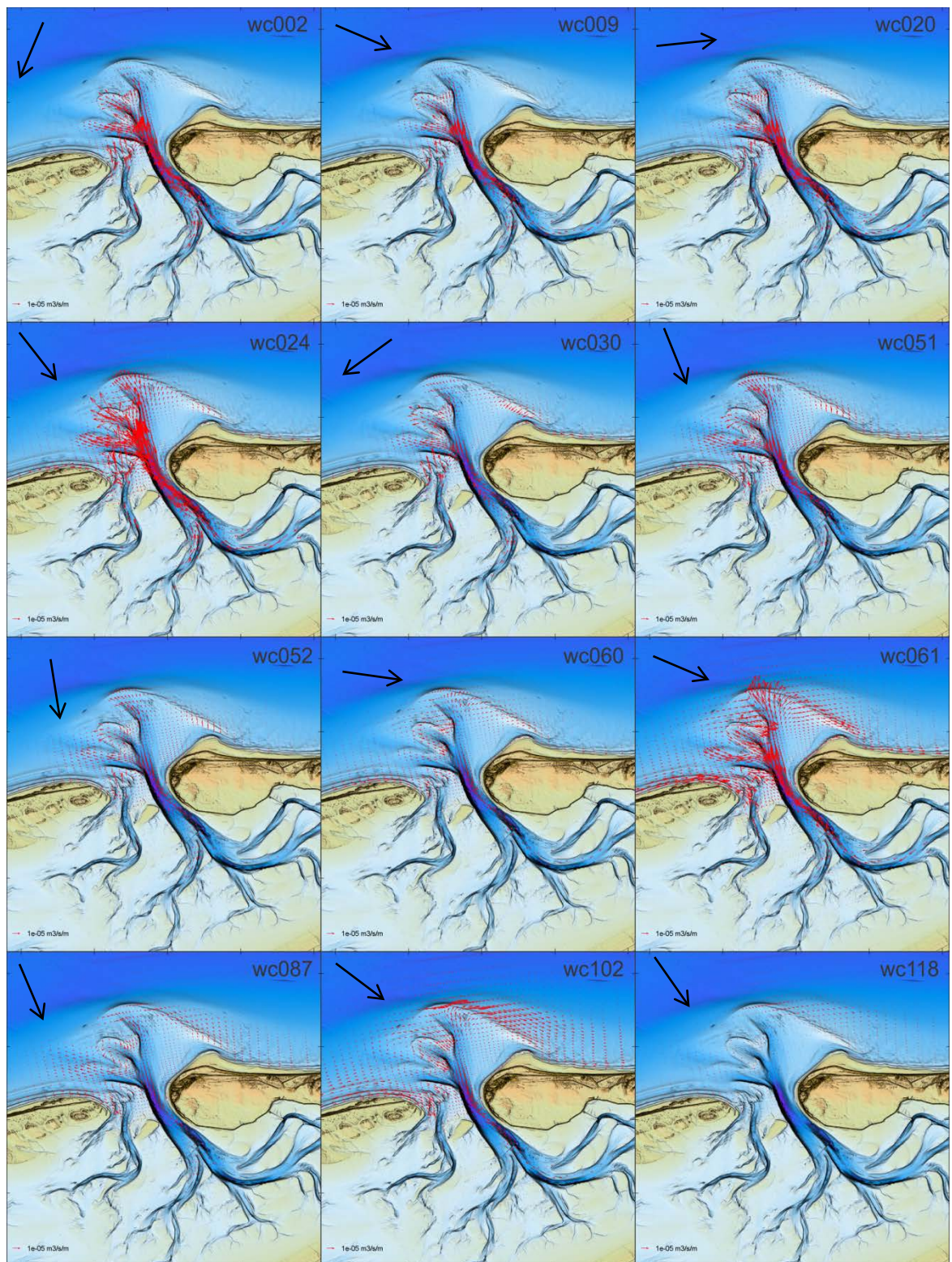




Figuur 3.12 Getijgemiddeld sedimenttransport voor de 12 morfologische golfhoogten (niet geschaald met kans van voorkomen) voor de 2014 bodem.



Figuur 3.13 Getijgemiddeld sedimenttransport voor de 12 morfologische golfhoogten ingezoomd op het Bornrif (niet geschaald met de kans van voorkomen) voor de 2014 bodem.



Figuur 3.14 Sedimenttransport voor de 12 morfologische golfhoogten, geschaald met de kans van voorkomen voor de 2014 bodem.

### 3.5.2 Gradiënten in sedimenttransport langs het Bornrif

Voor sedimentatie of erosie van de kust zijn het niet direct de sedimenttransporten, maar de gradiënten in het sedimenttransport die van belang zijn. De vectorfiguren (Figuur 3.10 tot en met Figuur 3.14) geven een goed beeld van de patronen, maar de transportgradiënten zijn hierin moeilijk terug te zien. Inzicht in de transportgradiënten kan worden verkregen door de transporten te berekenen over geselecteerde dwarsdoorsneden (zie Figuur 3.15 en Figuur 3.16). Deze figuur geeft een gedetailleerd beeld van (het verloop van) de transportgrootte over het Bornrif en aanliggende kustzone voor de 2014 en 1989 bodem. Identieke figuren zijn niet te maken door het verschil in bodemligging. De raaien zijn zo gekozen dat ze de bodem representeren. De raaien voor de 2014 bodem zijn niet geschikt voor de 1989 bodem.

In Figuur 3.17, Figuur 3.18 en Figuur 3.19 zijn de transporten over de 2014 bodem in meer detail weergegeven voor de deelgebieden: kustzone (-5 m tot +3 m), Oostgat (tussen -5 m en -5 m), Bornrif (omsloten door de -5 m contour).

In de 2014 modelresultaten geven de raagemiddelde transporten een goed inzicht in het verschil in grootte tussen de transporten aan de zeezijde van het Bornrif t.o.v. de kleine transporten op het Bornrif en met name in en nabij het Oostgat (het Oostgat is hier gekarakteriseerd door het gebied tussen de zeewaartse en landwaartse -5m dieptelijn). Het Oostgat zelf is vloedgedomineerd tussen de strandhaak Bornrif en het Borndiep. Deze transporten nemen iets in grootte toe richting het Borndiep, maar deze toename is vrijwel gelijk aan de invoer van sediment vanaf het Bornrif door de dwarstransporten. Vanaf de strandhaak oostwaarts, is het transport gedomineerd door een oostelijk gericht transport (zie ook Figuur 3.18).

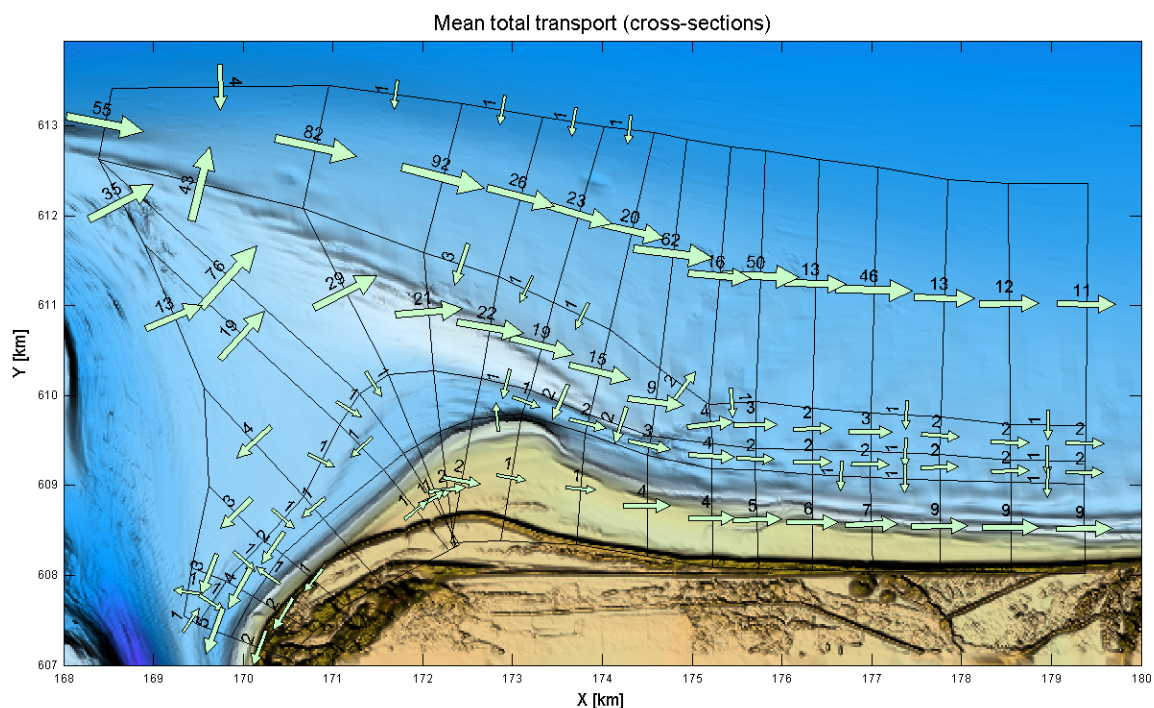
In de ondiepe kustzone / strand (het gebied landwaarts van de -5m contour) vindt er juist een divergentie van de transporten plaats in het midden van het Oostgat (Figuur 3.17). Ten westen van km. 171.5 zijn de transporten naar het zeegat toe gericht en ten oosten hiervan weg van het zeegat. Deze transporten zijn klein (i.e. minder dan 100.000 m<sup>3</sup>/jaar) t.o.v. de transporten op het Bornrif, maar ook bijna een orde kleiner dan de transporten langs de centrale eilandkust van Ameland.

Hoewel de transporten relatief klein zijn, kan dit door de aanwezigheid van een divergentie punt wel een oorzaak zijn van de geobserveerde lange-termijn erosieve trend van dit stukje kust. In de onderste 4 deelfiguren van Figuur 3.18 is de divergentie van de transporten duidelijk zien. Rond km 171.5 vindt hier een omslag plaats in transport richting. Tussen km 170-171 worden de transporten gedomineerd door de westelijk gerichte component met als belangrijkste bijdrage de golfcondities: 024, 051 en 052 (golven uit NNW-richting) Tussen km 171.5 en km 173 worden de transporten gedomineerd door de westelijke component. Hier overheersen condities 051, 061 en 102 (golven uit NW-richting). De vervorming van het golfklimaat door de voorliggende buitendelta speelt hier dus wel duidelijk een rol.

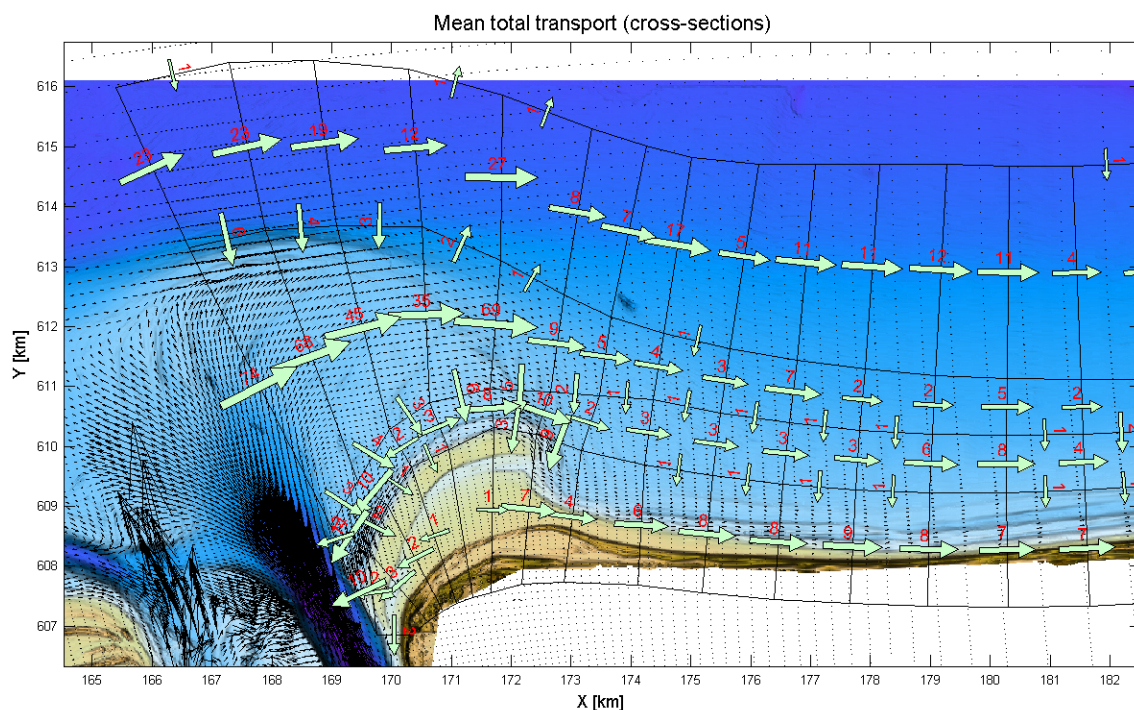
Het bankje Bornrif vertoont een interessant transport patroon. Op het bankje overheerst een grote transportgradiënt in oostelijke richting; de richting van het bankje. De landwaartse component is klein en van een zelfde orde grootte als de transporten langs de kust. Dit patroon verklaart waarom het bankje voornamelijk oostwaarts en maar beperk landwaarts migreert. Er is geen duidelijke, overheersende, landwaartse forcering. Dit verklaart ook waarom het relatief kleine geultje tussen het bankje en de strandhaak kan blijven bestaan zonder veel verandering en verdieping.

Door de vrij uniforme diepte van de buitendelta in 1989 is het lastig om een goede (representatieve) indeling in transportdoorsneden te maken. Hierdoor kunnen de transporten voor de 2 bodems niet direct met elkaar vergeleken worden. Het is wel duidelijk dat de transport gradiënten in de 1989 en 2015 bodem overeenkomstige elementen vertonen (zie Figuur 3.16 en

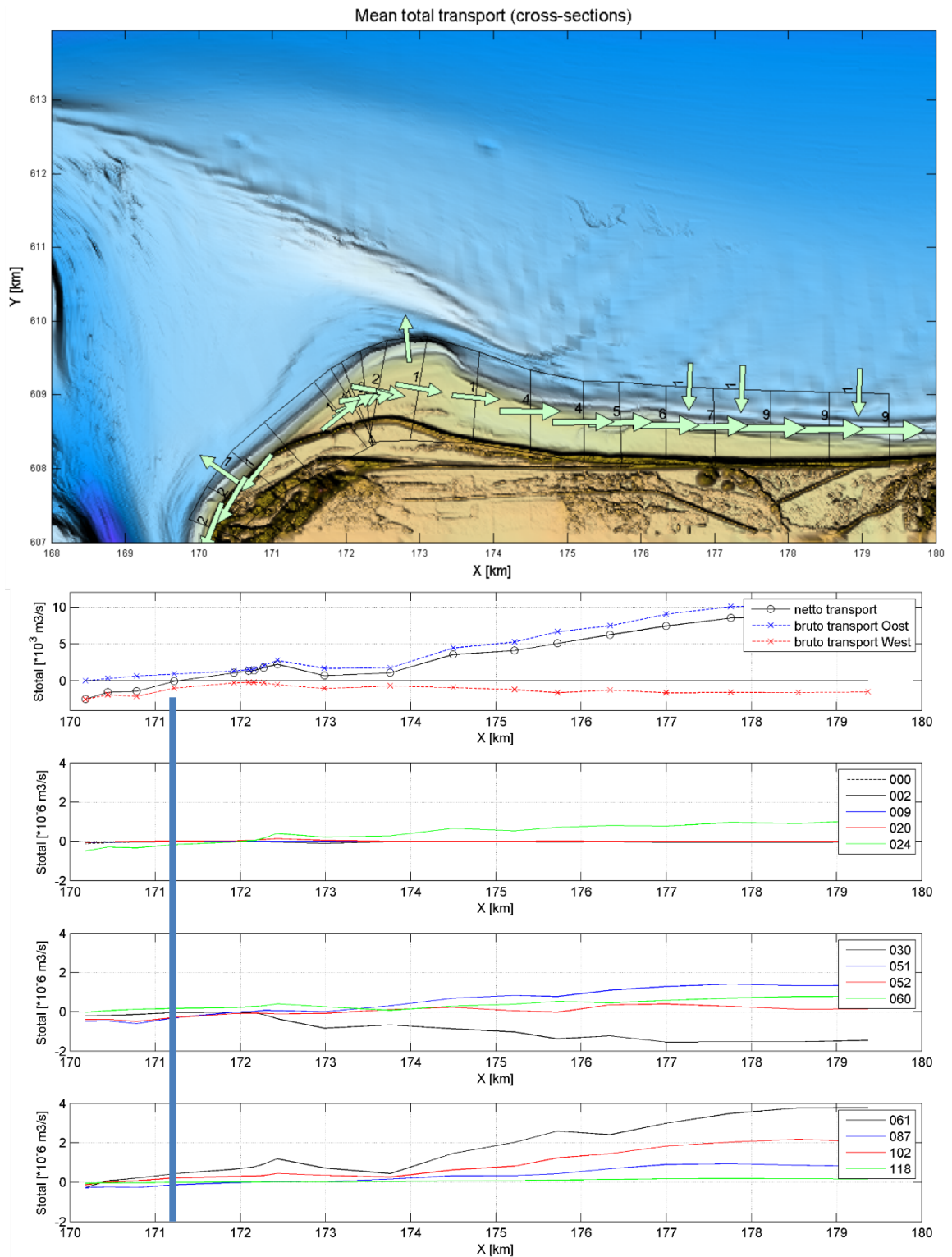
Figuur 3.15). De transporten op de buitendelta zijn veel groter dan aan de kust. Langs de ongestoorde kust van Ameland zijn de transporten ongeveer gelijk. Rond x-km. 179 is het oostwaarts (getijgemiddeld) transport  $24 \text{ m}^3$  in 2014 en rond de  $30 \text{ m}^3$  in 1989 (deze raai strekt zich echter wat verder zeewaarts uit). Ook in de 1989 bodem is er een divergentie van de transporten te zien langs de aangrenzende kust. De transporten direct langs de kust (achter de strandhaak) zijn klein. Aan de zeewaartse zijde zijn de transporten juist groot. Er is een transport naar het Borndiep toe aan de westzijde ( $x = 171 \text{ km}$ ) en een oostelijk transport aan de oostkant. Dit laatste is vooral duidelijk bij de punt van de strandhaak. Hier versnelt de stroming en nemen de transporten duidelijk toe. Aan de westzijde van de strandhaak zien we een soortgelijke versnelling maar richting het Borndiep. Hier zijn de residuele transporten direct langs de strandhaak groot. De transportpatronen laten duidelijk zien dat de strandhaak (initieel) zowel oostelijk als westelijk wordt uitgesmeerd. De transporten naar het oosten 'verdwijnen' echter in het Borndiep waar de sterke getijstrooming deze over een groot gebied verspreidt en een duidelijke morfologische respons veel minder zichtbaar is.



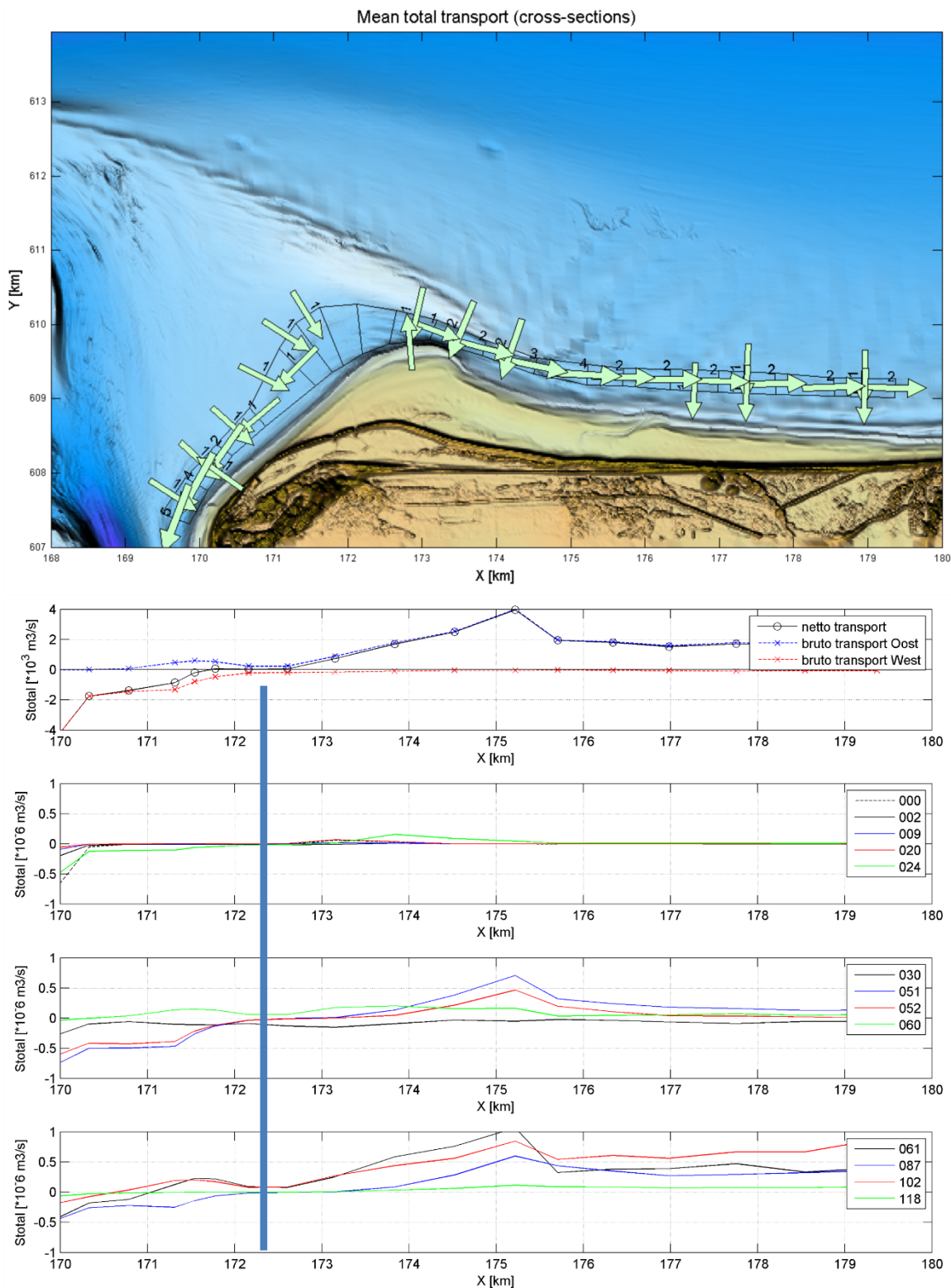
Figuur 3.15 Overzicht van de totale transporten gemiddeld over de doorsnedes voor 2014 (zie Figuur 3.17, Figuur 3.18 en Figuur 3.19 voor details).



Figuur 3.16 Totaal overzicht van de totale transporten gemiddeld over de doorsnedes voor 1989

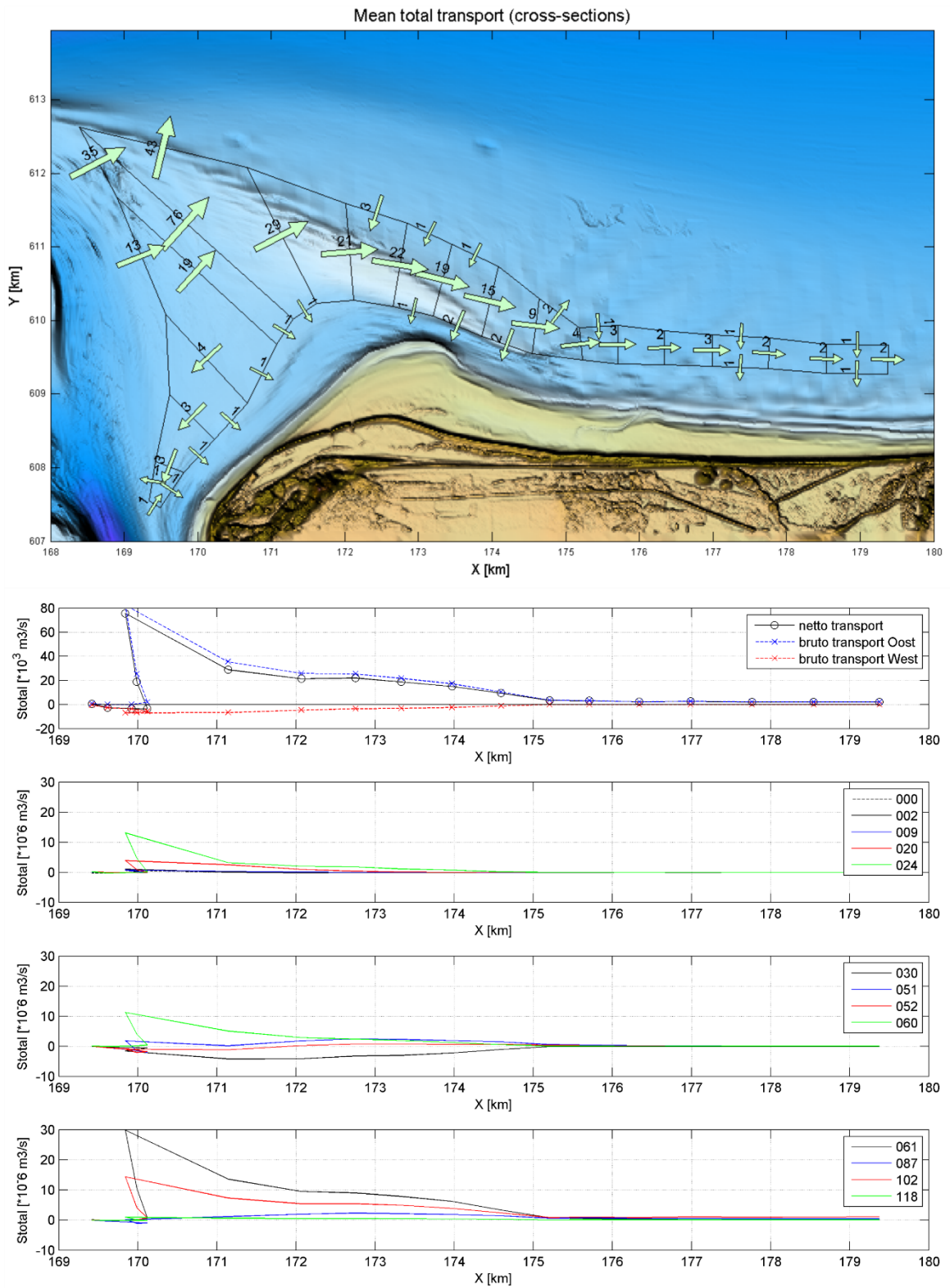


Figuur 3.17 Langtransporten in de brandingszone (-5 m tot duinvoet). Boven totaal over alle golfcondities en bijdrage van de afzonderlijke golfcondities (onderste 3 figuren). Lijnen in onderste 3 figuren zijn individuele golfcondities, zie Tabel 3.1. Op de x-as staat de locatie en op de y-as het sediment transport. Positieve waarden zijn transport van west-oost en negatieve waarden van oost-west. Waarden zijn gebaseerd op de vectoren van de dwarsraaien zoals geplot boven. Eenheid is  $10^3 \text{ m}^3/\text{s}$  tenzij anders aangegeven. Divergentiepunt is aangegeven met de blauwe lijn.



Figuur 3.18 Langtransporten in het Oostgat (-5 m tot +5 m). Boven totaal over alle golfcondities en bijdrage van de afzonderlijke golfcondities (onderste 3 figuren). Lijnen in onderste 3 figuren zijn individuele golfcondities, zie Tabel 3.1. Op de x-as staat de locatie en op de y-as het sediment transport. Positieve waarden zijn transport van west-oost en negatieve waarden van oost-west. Waarden zijn gebaseerd op de vectoren van de dwarsraaien zoals geplot boven. Eenheid is  $10^3 \text{ m}^3/\text{s}$  tenzij anders aangegeven. Divergentiepunt is aangegeven met de blauwe lijn.





Figuur 3.19 Langtransporten op het Bornrif. Boven totaal over alle golfcondities en bijdrage van de afzonderlijke golfcondities (onderste 3 figuren). Lijnen in onderste 3 figuren zijn individuele golfcondities, zie Tabel 3.1. Op de x-as staat de locatie en op de y-as het sediment transport. Positieve waarden zijn transport van west-oost en negatieve waarden van oost-west. Waarden zijn gebaseerd op de vectoren van de dwarsraaien zoals geplote boven. Eenheid is  $10^3 \text{ m}^3/\text{s}$  tenzij anders aangegeven.

### 3.6 Conclusies

De focus van dit deel van de rapportage was het in kaart te brengen van de stromingen en sedimenttransporten in en nabij het Oostgat met behulp van modelberekeningen. Dit inzicht helpt ons de structurele erosie die hier plaatsvindt beter te begrijpen. Hierbij hebben we drie deelvragen beantwoord.

1. Wat is de stromingskarakteristiek van het Oostgat en is dit een (belangrijke) stroomvoerende geul?

Getijstroming door het Oostgat is klein. Op basis van de stromingspatronen lijkt het Oostgat geen 'klassieke' stroomvoerende geul te vormen waarbij een duidelijke vloed en ebstroming aanwezig is. Stroming in het Oostgat wordt vooral gedomineerd door de twee ophangpunten aan de west- en oostzijde (i.e. versnelling rondom de kop van Ameland). Aan de Oostzijde is het de versnelling van de stroming tussen de strandhaak Bornrif en het Bornrif Bankje dat lokaal de stromingen domineert. Richting het Borndiep is het juist de versnelling rond de kop van Ameland die lokaal de stroming laat toenemen. Een duidelijk doorgaande eb- of vloedstroming over het gehele Oostgat vindt slechts gedurende een klein gedeelte van het getij plaats. In deze periode vertoont dan niet alleen het Oostgat, maar eigenlijk de gehele naastliggende buitendelta een uniforme stroming. Op basis van de gemodelleerde hydrodynamica kan dus niet worden geconcludeerd dat het Oostgat een stroomvoerende geul is.

2. Wat is het transportpotentieel langs de aanliggende kust en zijn er redenen aanwijsbaar voor structurele erosie?

Sediment transport in het Oostgat en de aangrenzende kust is eigenlijk heel klein t.o.v. de transporten in het zeegat en langs de ongestoorde eilandkust. Golfbreking op de voorliggende buitendelta zorgt ervoor dat hoge golven de kust niet bereiken. Kleinere golven (tot 2 m), vooral voor noordwestelijke golfrichtingen, kunnen echter nog steeds relatief ongestoord de kust bereiken en een brandingstransport aandrijven. De variatie in golfhoogtes langs dit stukje kust zorgt voor een divergentiepunt in de sedimenttransporten. Dit divergentiepunt ligt ongeveer in het midden van het Oostgat. Transport ten oosten hiervan, gaat ook naar oostelijke richting (naar de strandhaak Bornrif). Transport ten westen gaat richting Borndiep. De transporten zijn relatief klein, maar kunnen wel een lange-termijn structurele erosie veroorzaken.

3. Is er een verandering zichtbaar in de stroming en het transportpotentieel als we de huidige (2014) bodem vergelijken met een bodem voor de aanlanding van Bornrif (1989)?

De verschillen in bodemligging tussen de 1989 en 2014 bodem geven eigenlijk geen echt andere sedimenttransportpatronen langs de kust. In beide schematisaties is er een divergentie van de transporten zichtbaar midden op het Bornrif (ruwweg x-km 171). Transporten ten westen gaan richting het Borndiep en ten oosten richting de centrale eilandkust van Ameland. De forcering achter dit patroon is wel anders. In 2014 zien we duidelijke gradiënten in de golfhoogte. Deze gradiënten zijn mede verantwoordelijk voor de geobserveerde patronen. In 1989 zijn de gradiënten minder sterk, echter de kust vertoont een veel grotere kromming (bolle kust). Deze bolling geeft een vergelijkbare gradiënt in de transporten en daardoor een divergentie van de sediment transporten.

Een belangrijk verschil tussen de 2 bodemschematisaties is dat in 2014 de erosie direct op de kust optreedt. In 1989 treedt er waarschijnlijk een vergelijkbare erosie op, alleen vindt deze plaats op de nog niet aangelande strandhaak. Deze erosie is dus niet zichtbaar of wordt niet aangemerkt als kusterosie.

## 4 Invloed stormcondities: XBeach modelering

### 4.1 Omschrijving model

Om een indruk te krijgen van de impact van stormen op het huidige kustprofiel in noordwest-Ameland is gebruik gemaakt van het morfologische stormimpact model XBeach (Roelvink et al., 2009). Het model is oorspronkelijk ontwikkeld in opdracht van het Army Corps of Engineers naar aanleiding van de verwoestende effecten van een aantal orkanen op de kust van de Verenigde Staten in 2004 en 2005. In de afgelopen jaren is XBeach in diverse Rijkswaterstaat-projecten (e.g., SBW duinen, WTI) verder ontwikkeld tot een geavanceerd duintoetsinstrument dat in de toekomst gebruikt kan worden voor de toetsing van duinen, met name in complexere situaties (bijv. in geval van een niet-uniforme kust in kustlans richting). De belangrijkste kenmerken van XBeach zijn:

- Het model is tijdsafhankelijk; het model gaat bijvoorbeeld niet uit van een evenwichtssituatie, maar berekent de effecten van golven en stroming op de bodemligging in de tijd.
- Het model biedt de mogelijkheid om de kustlangse richting mee te nemen; hierdoor is het mogelijk om een gebied (2D) in plaats van alleen een profiel (1D) te onderzoeken. Daarmee wordt voor dit specifieke geval bijvoorbeeld de kromming van Ameland Noordwest meegenomen.
- Dicht bij de duinvoet worden de relevante fysische processen nauwkeurig opgelost (door gebruik te maken van het zogenoemde surfbeat model)

XBeach bevat state-of-the-art software en wordt continue verder ontwikkeld. Voor dit rapport is gebruikt gemaakt van XBeach revisie 4567 (King's Day release).

### 4.2 Overzicht simulaties

De uitgevoerde XBeach simulaties vallen uiteen in een tweetal onderdelen. Allereerst is er een hindcast uitgevoerd van de Sinterklaasstorm ter validatie van het model op dit stuk kust (Hoofdstuk 4.4). Dit betekent dat we op de randen van het model de werkelijk opgetreden condities opleggen en de door het model berekende duinafslag/erosie vergelijk met de gemeten afslag. Als deze goed overeenkomen zullen we verder onderzoeken wat de reden voor de lokaliteit van de opgetreden duinerosie (Hoofdstuk 4.5).

Ten tweede zijn er synthetische stormen doorgerekend in XBeach (Hoofdstuk 4.6) om zo een beter inzicht te hebben in de effecten van verschillende stormen ter hoogte van de zwakke plek bij raai 320 – 380. Dit betekent dat we basis van een set hydraulische condities met een bepaalde terugkeerperiode een stormverloop over de tijd aannemen volgens de relatie van Steetzel (1993). Dit wordt gedaan voor 5 scenario's (bodems; 2015, 2011, 2013, '2035', 1989) en 6 terugkeerperiodes (1/10, 1/50, 1/100, 1/200, 1/1000 en 1/2000). De bodems zijn in principe gemeten. De bodem uit 2011 en 2013 laten de situatie zien net na een suppletie (deelvraag 3a). De situatie voor 2035 is synthetisch en is de situatie waar de eerste zeereep volledig is weg geërodeerd (deelvraag 3b). De bodem uit 1989 is er een met een andere geul-plaat configuratie (deelvraag 3c).

Voor beide onderdelen is een aparte modelopzet gemaakt. Dit heeft als reden dat de voor de reproductie van de Sinterklaasstorm er een breder (en dus groter) model nodig is vanwege de gemeten scheef-invallende golven. Grotere modellen vergen meer rekentijd. Voor de synthetische stormen in Hoofdstuk 4.6 rekenen we met golven uit alleen NW-richting (i.e. gemiddelde golfval tijdens stormen voor Ameland) en gebruiken we dus een smaller (en dus kleiner) model. Dit bespaart rekentijd. Een nadeel van deze aanpak is dat, hoewel de golfrichting bij de kust nog in de tijd kan variëren door verschillen in refractiesnelheden door water-

standsverschillen, de duinerosie minder diffuus is dan in de werkelijkheid omdat de golfrichting dicht bij de kust minder varieert in de tijd dan tijdens een gemeten storm (e.g. Sinterklaasstorm). Tevens moet opgemerkt worden dat door kromming van de kust, de golven maar op een beperkt aantal plaatsen daadwerkelijk loodrecht invallen.

Tabel 4.1 Overzicht van bathymetrische condities per scenario

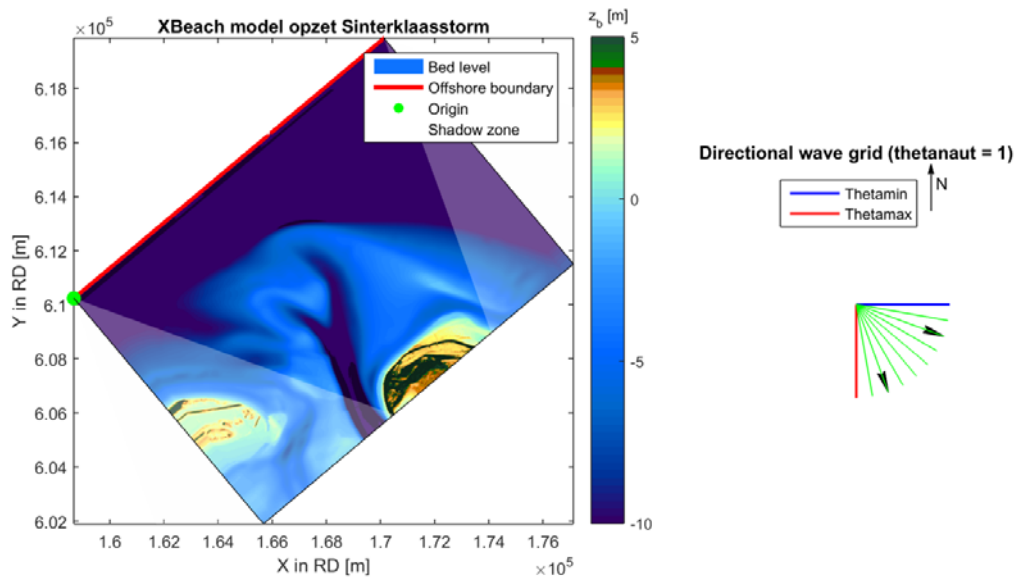
Type	#	Jaar	Opmerkingen	Bronnen
Sinterklaasstorm		2013	Hindcast Scheef-invallende golven	JARKUS-grids en LiDAR
Synthetisch	1	2015	Huidige situatie Vlak na een grote suppletie	JARKUS-grids en LiDAR
Synthetisch	2	2011	Duinen wat sterker dan huidig Vlak na een grote suppletie	Vaklodingen en LiDAR
Synthetisch	3	2013	Duinen wat sterker dan huidig Strandsuppletie heeft zich verdeeld	JARKUS-grids en LiDAR
Synthetisch	4	2035*	Zeereep compleet weg geërodeerd	Synthetisch op basis LiDAR data 2015
Synthetisch	5	1989	Vlak voor aanlanden Bornrif	Vaklodingen

### 4.3 Modelopzet

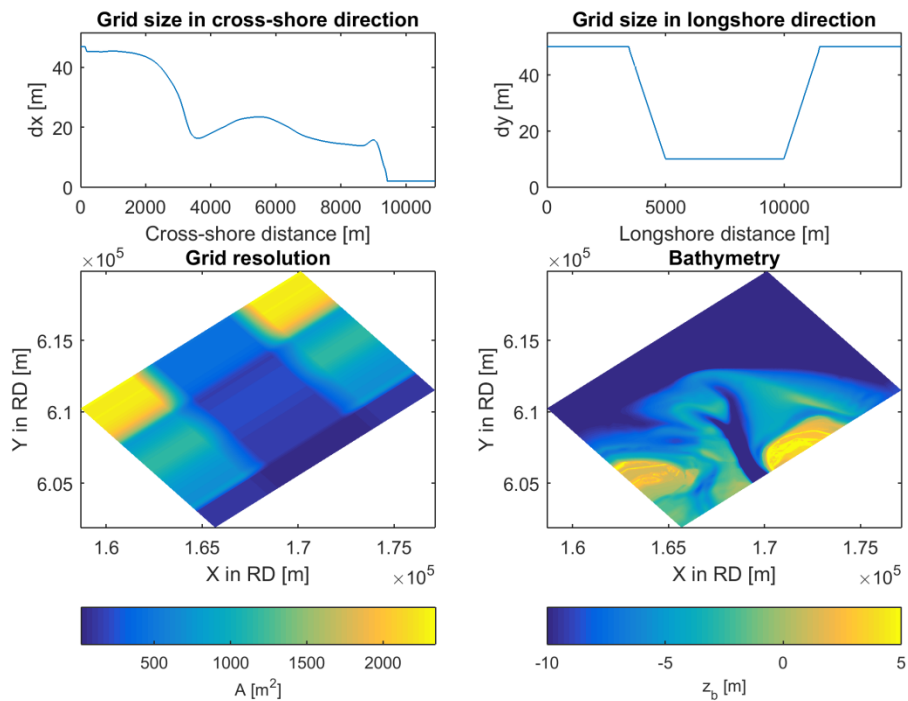
We modeleren de hele kop van Ameland Noordwest om zo de invloed van het Bornrif en het Oostgat mee te nemen. De offshore rand bevindt zich op 25m waterdiepte. Het model heeft een maximale gridgrootte van 20x50 m en een minimale gridgrootte van 2x10 m (rond waterniveau). Door verschillen in de gesimuleerde hoek van inval van de golven, rekenen wij met twee modelschematisaties; één voor de reproductie van de Sinterklaasstorm (Figuur 4.1) en één voor de overige XBeach simulaties (Figuur 4.3). Het verloop van de roostercellen voor beide modelopzetten zijn weergegeven in Figuur 4.2 en Figuur 4.4.

Golfspectra en waterniveaus worden op de offshore rand gelegd. De randvoorwaarden van de simulatie van de Sinterklaasstorm zijn gebaseerd op metingen (zie Figuur 4.5). Golven zijn gebaseerd op boei 1\_1 (in het Amelander zeegat) en waterniveaus op Wierumergronden. De randvoorwaarden van de simulatie met synthetische stormen zijn gebaseerd op condities afgeleid in het kader van Wettelijk Toets Instrumentarium (WTI, Boers et al. 2014) en gelden voor kustrai 320 (zie Figuur 4.6). De golfcondities variëren in de tijd. In Hoofdstuk 3.3 is aangetoond dat de getijstroming door het Oostgat klein is, en daarom is gekozen de uitwisseling van het kustlangse getij op zee en het kustdwarse getij door het zeegat niet te simuleren in XBeach.

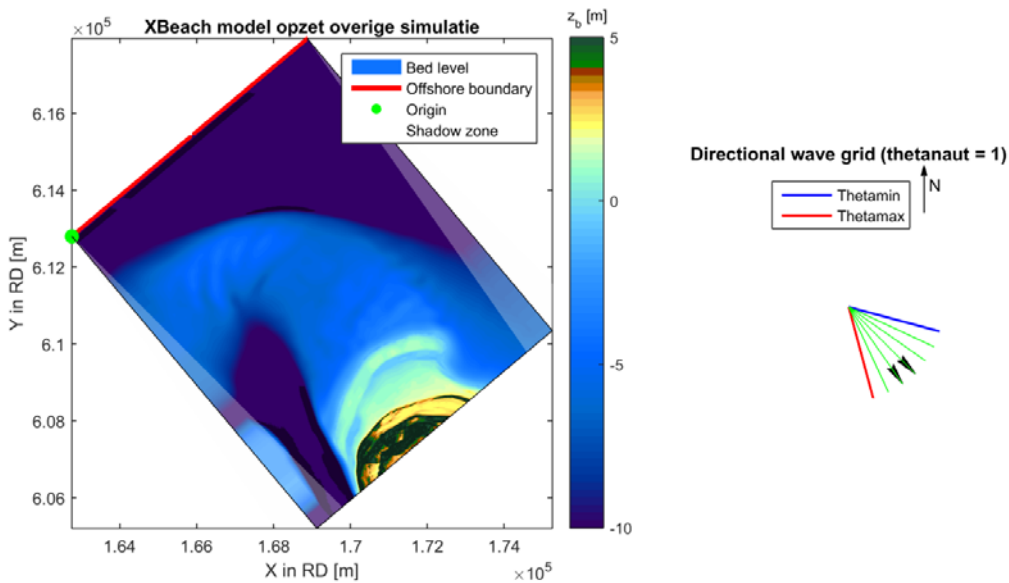
Het breken van golven wordt berekend met een formulering van Daly et al. (2010) om zo het starten en stoppen van breken over het Bornrif beter te kunnen reproduceren. De bodemwrijving wordt bepaald met een Mannings ruwheid coëfficiënt van  $0.02 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ . Zinkstukken en het NAM-platform zijn meegenomen in de bathymetrie door een niet-erodeerbare laag en extra ruwheid te introduceren in het model. Op basis van een gevoeligheidsanalyse is gekozen om morfologische acceleratie factor (*morfac*) van 5 toe te passen. Deze waarde wordt algemeen acceptabel beschouwd en is lager (en dus nauwkeuriger) dan vele andere studies (e.g., McCall et al., 2010; De Vet et al., 2015). Alle overige modelparameters behouden hun default waarden (Deltares, 2015).



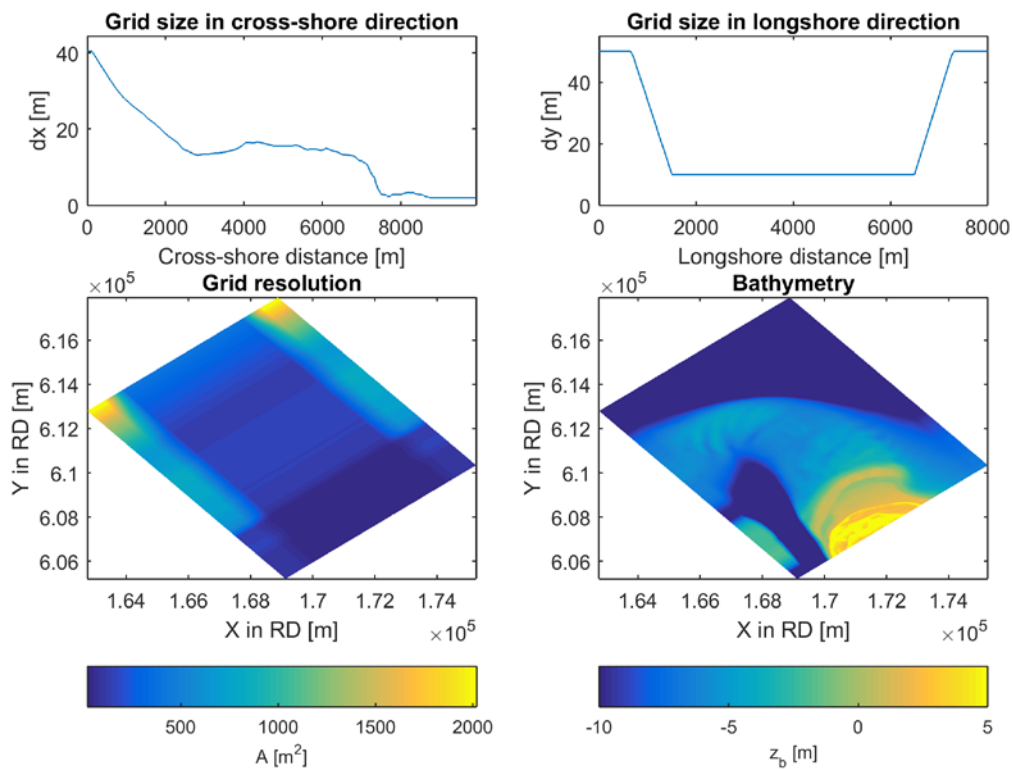
Figuur 4.1 XBeach model bathymetrie en golfrooster voor de Sinterklaasstorm. De gepresenteerde bathymetrie is van 2013.



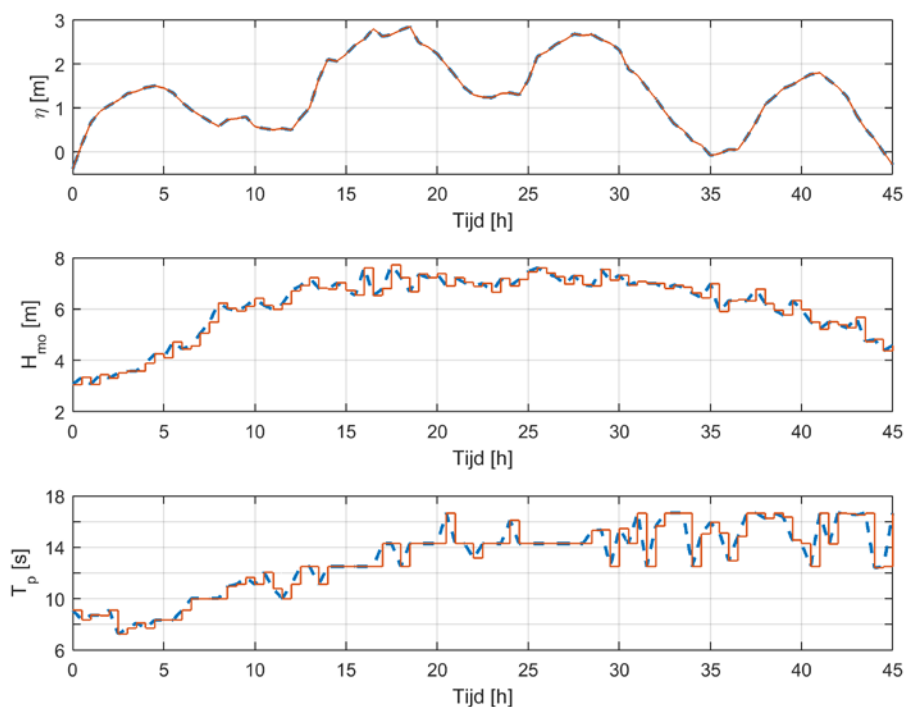
Figuur 4.2 Kenmerken van het XBeach model rooster voor de Sinterklaasstorm.



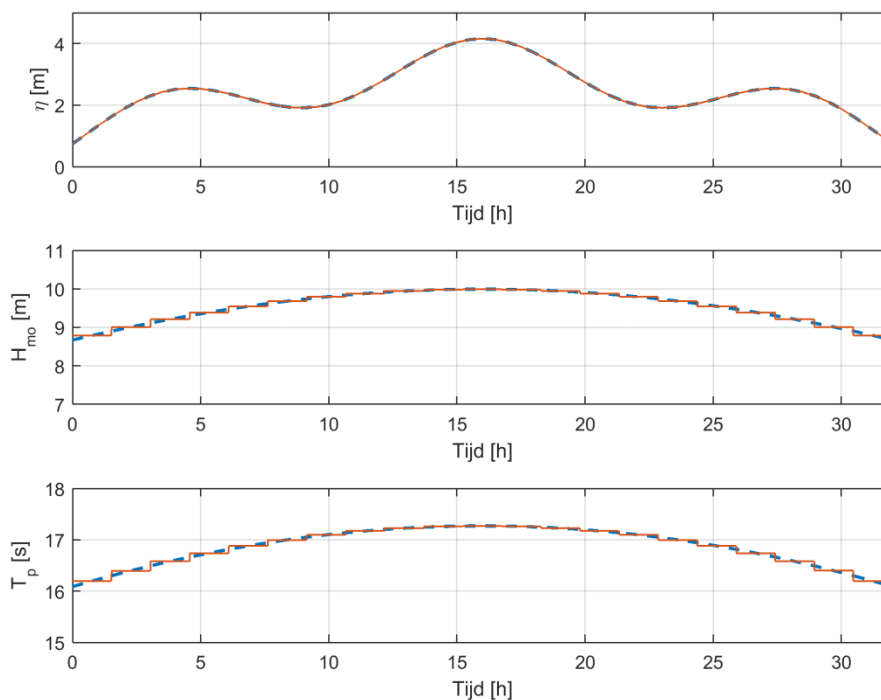
Figuur 4.3 XBeach model bathymetrie en golfrooster voor de overige simulaties. De gepresenteerde bathymetrie is van 1989.



Figuur 4.4 Kenmerken van het XBeach model rooster voor de overige simulaties.



Figuur 4.5 Tijdsree voor randvoorwaarden tijdens de Sinterklaasstorm met hierin waterniveau (bovenste paneel), golfhoogte (midden paneel) en golfperiode (onderste paneel). De blauwe lijn is de gemeten water en de rode lijn is toegepast in XBeach.

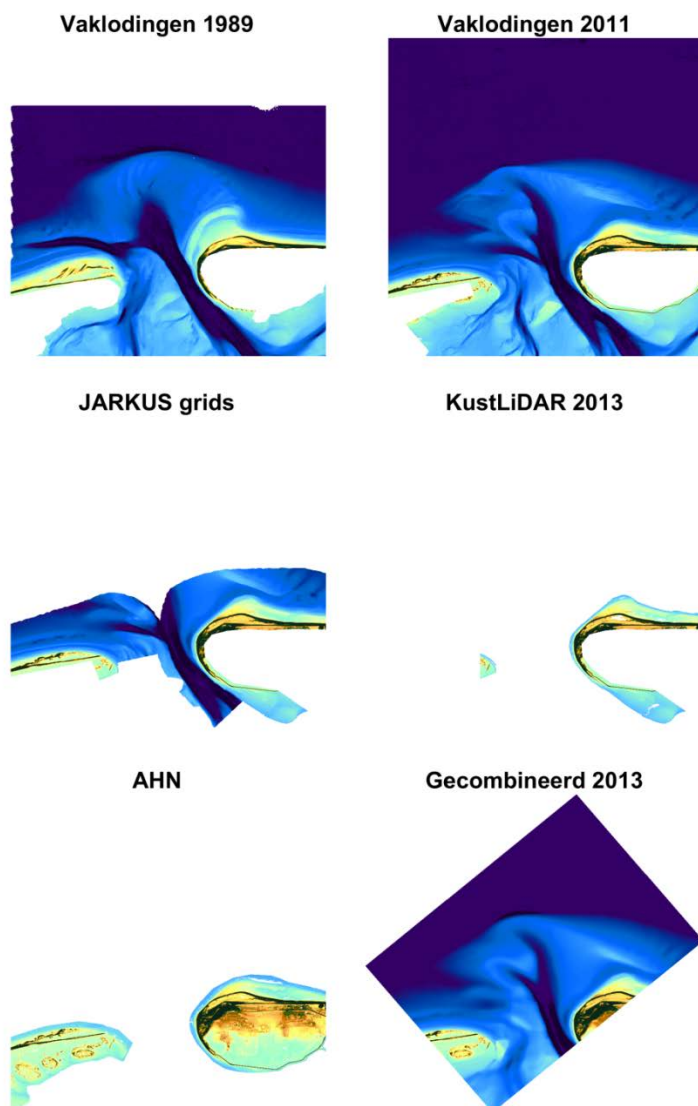


Figuur 4.6 Tijdsree voor randvoorwaarden tijdens een synthetische storm met een terugkeerfrequentie van 1/2000 met hierin waterniveau (bovenste paneel), golfhoogte (midden paneel) en golfperiode (onderste paneel). De blauwe lijn is de relatie en de rode lijn is toegepast in XBeach.

De basis van de modelopzet is informatie uit 2011. KustLiDAR is altijd overschrijdend gebruikt, aangezien het een hogere resolutie heeft dan de overige databronnen. AHN is alleen toegepast wanneer er anders geen bodemhoogte voor de rooster cel bekend was. Wanneer er een specifieke periode wordt gemodelleerd (bijvoorbeeld 2013), worden de rooster cellen geüpdatet op basis van de beschikbare data voor bathymetrie en duinen. De opzet en dekking per databron is weergegeven in Tabel 4.2 en kan visueel worden geïnspecteerd in Figuur 4.7. NB: Vaklodgingen uit 1989 zijn niet vlakkend, de onberekenende data is dan gebaseerd op de 1991-1995 metingen.

Tabel 4.2 Databronnen duinen en bathymetrie XBeach model opzet

Type	Databron	Resolutie	Jaren
Basis	KustLiDAR + Vaklodgingen + AHN	combinatie (20x20 offshore, 5x5 duinen)	2011
Bathymetry	Vaklodgingen JARKUS grids:	20 x 20 meter	1989 2013, 2014, 2015
Duinen	KustLiDAR	5 x 5 meter	2013, 2014, 2015



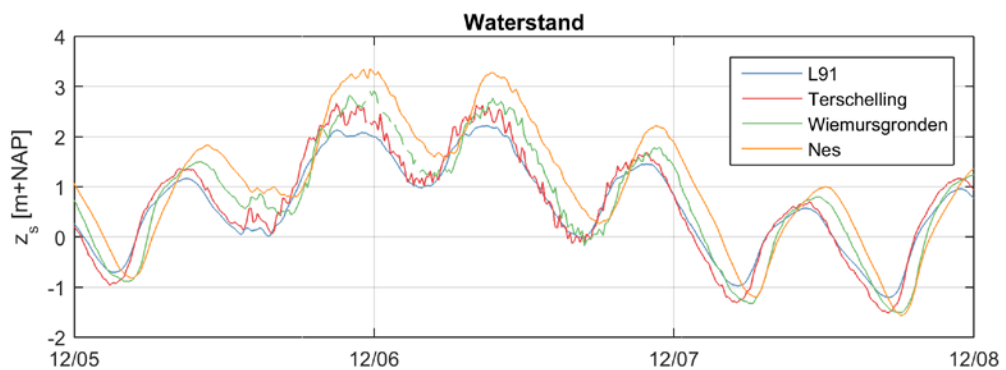
Figuur 4.7 Verschillende databronnen (5 subfiguren) gebruikt om het XBeach model voor de Sinterklaas-storm te maken (rechtsonder).



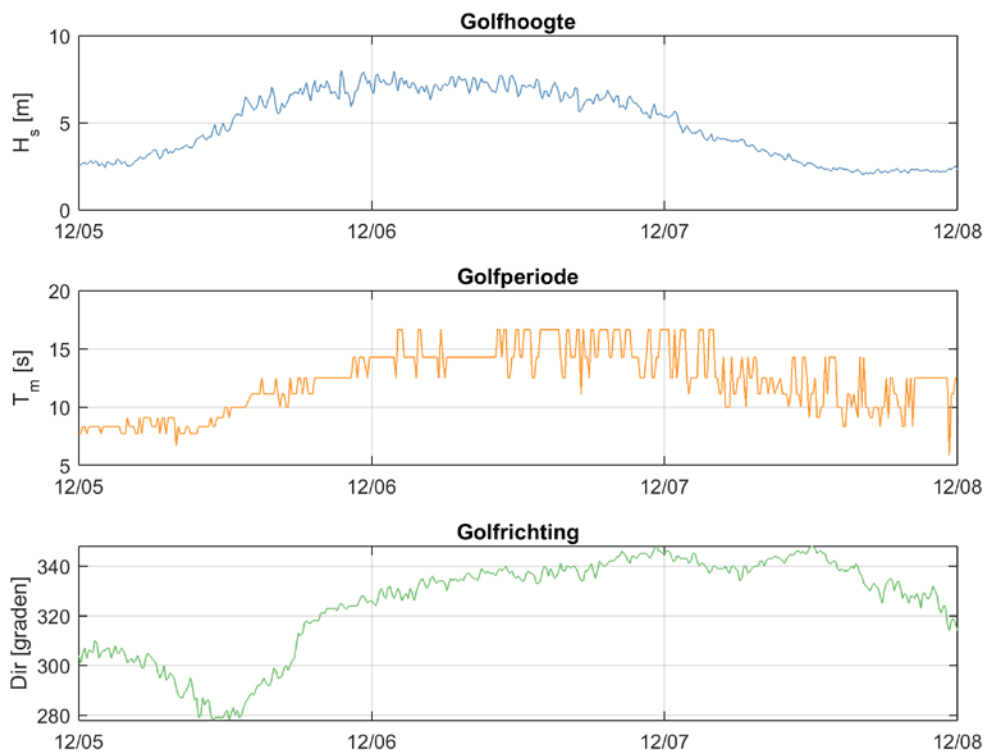
## 4.4 Reproductie Sinterklaasstorm

### 4.4.1 Hydrodynamische data

De Sinterklaasstorm was een zware storm die op 5 en 6 december 2013 over Nederland trok. De storm viel samen met springtij wat tot gevolg had dat er hoge waterstanden werden gemeten. De maximale waterstand in station Terschelling Noordzee bedroeg ongeveer NAP +2.7 m (Figuur 4.8), terwijl golven gemeten in het Amelanders Zeegat (20 m water diepte) een maximum golfhoogte ( $H_s$ ) bereikte van 8.0 m met een golfperiode ( $T_p$ ) van 16.6 s (Figuur 4.9).



Figuur 4.8 Gemeten waterstanden voor diverse stations rondom Terschelling tijdens de Sinterklaasstorm. Het meest dichtbij zijnde station (Terschelling; op +/- 12 m waterdiepte) zal worden gebruikt in het XBeach model (bron: MATROOS).



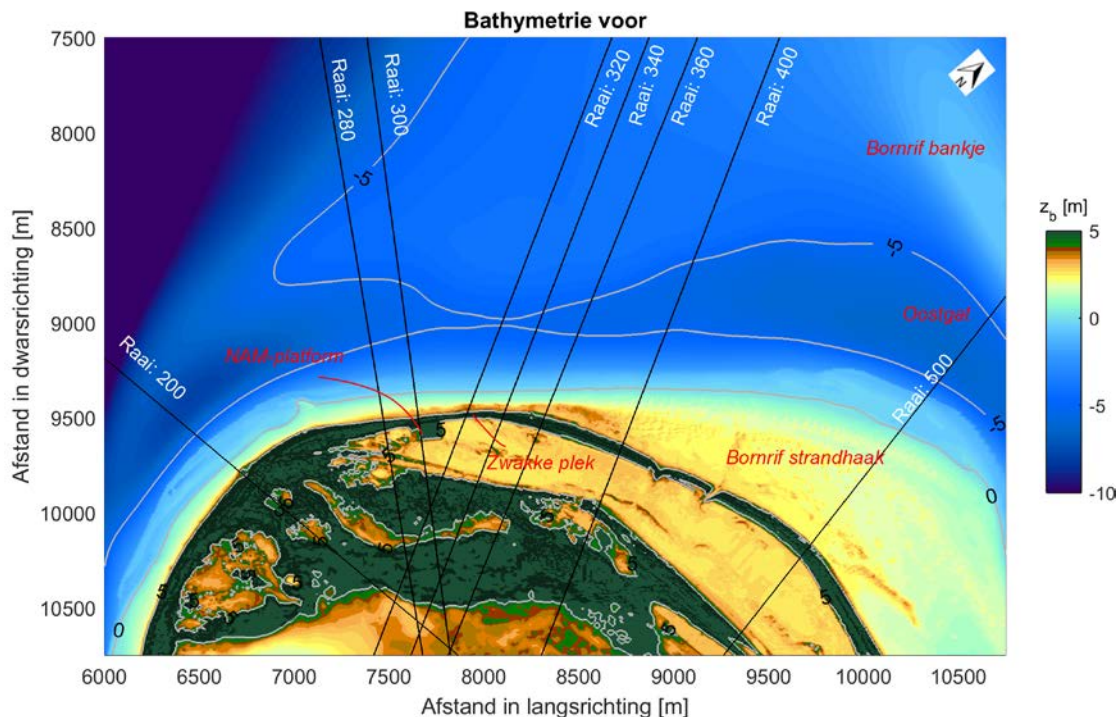
Figuur 4.9 Gemeten golfcondities op diep water (20 m) golfperiode voor boei 1\_1 (Amelanders Zeegat) tijdens de piek van de Sinterklaasstorm (bron: MATROOS).

## 4.4.2 Morfologische data

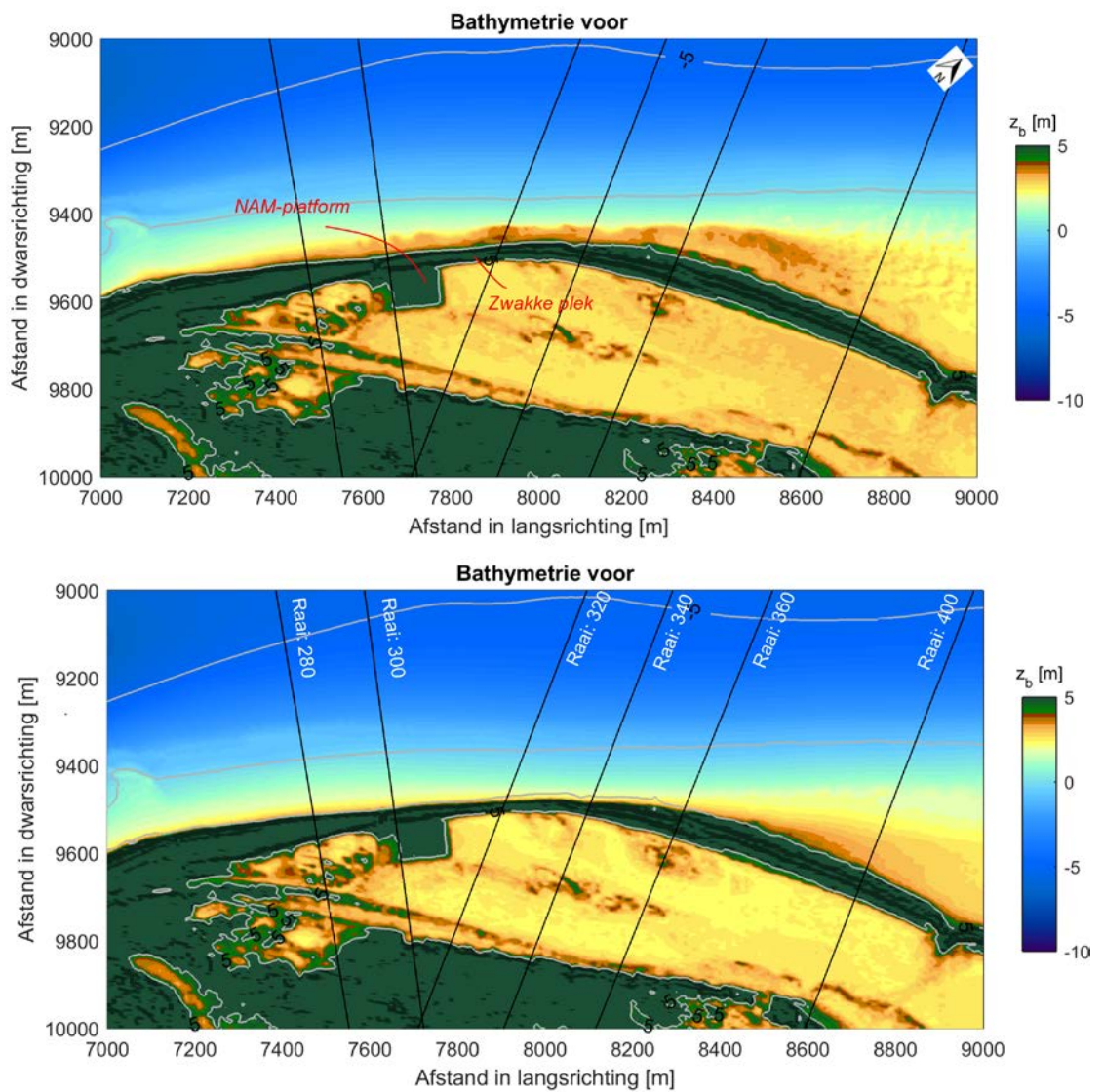
Ameland NW kent al langere tijd problemen met structurele erosie van de eilandkop. Naast de structurele erosie met bijhorende BKL-overschrijdingen heeft meer recent de Sinterklaasstorm van 2013 in grote duinafslag geresulteerd tussen raai 300 en 400. Tijdens de Sinterklaasstorm van 5-6 december 2013 is er een flink deel van het buitenste duin afgeslagen. In het gehele gebied treedt er een gemiddelde duinerosie op van gemiddeld 55 m<sup>3</sup>/m met een maximum van 193 m<sup>3</sup>/m bij raai 340. De ligging van het Bornrif is voor de ruimtelijke distributie van golfenergie van belang, aangezien de rug van het Bornrif inkomende (korte) golfenergie dissipeert en retracteert (zie ook Hoofdstuk 3).

In Figuur 4.10 en Figuur 4.11 valt op dat duin erg smal is geworden op een langafstand van 7500-8500 m (raai 320 en 380). Uit het overzicht van de sedimentatie en erosie patronen van 2013 naar 2014 (Figuur 4.12) kan worden opgemaakt dat het Bornrif landwaarts verplaatst. Grote morfologische veranderingen vinden plaats rond de NAP -5 meter contourlijn. We zien bijvoorbeeld grote erosie vanaf de 0 meterlijn tot en met de -5 meter bij raai 320 t/m 400. Daarnaast vindt er depositie plaats tussen raai 200 en 280 richting het Bordiep en migreert het Bornrif bankje landwaarts en wordt het Oostgat daarmee nauwer. Deze veranderingen zijn gedreven door de meer dagelijkse condities en zullen niet worden gereproduceerd door een driedaagse XBeach simulatie. Daarnaast zien we sedimentatie en erosie bij de zinkstukken bij raai 200.

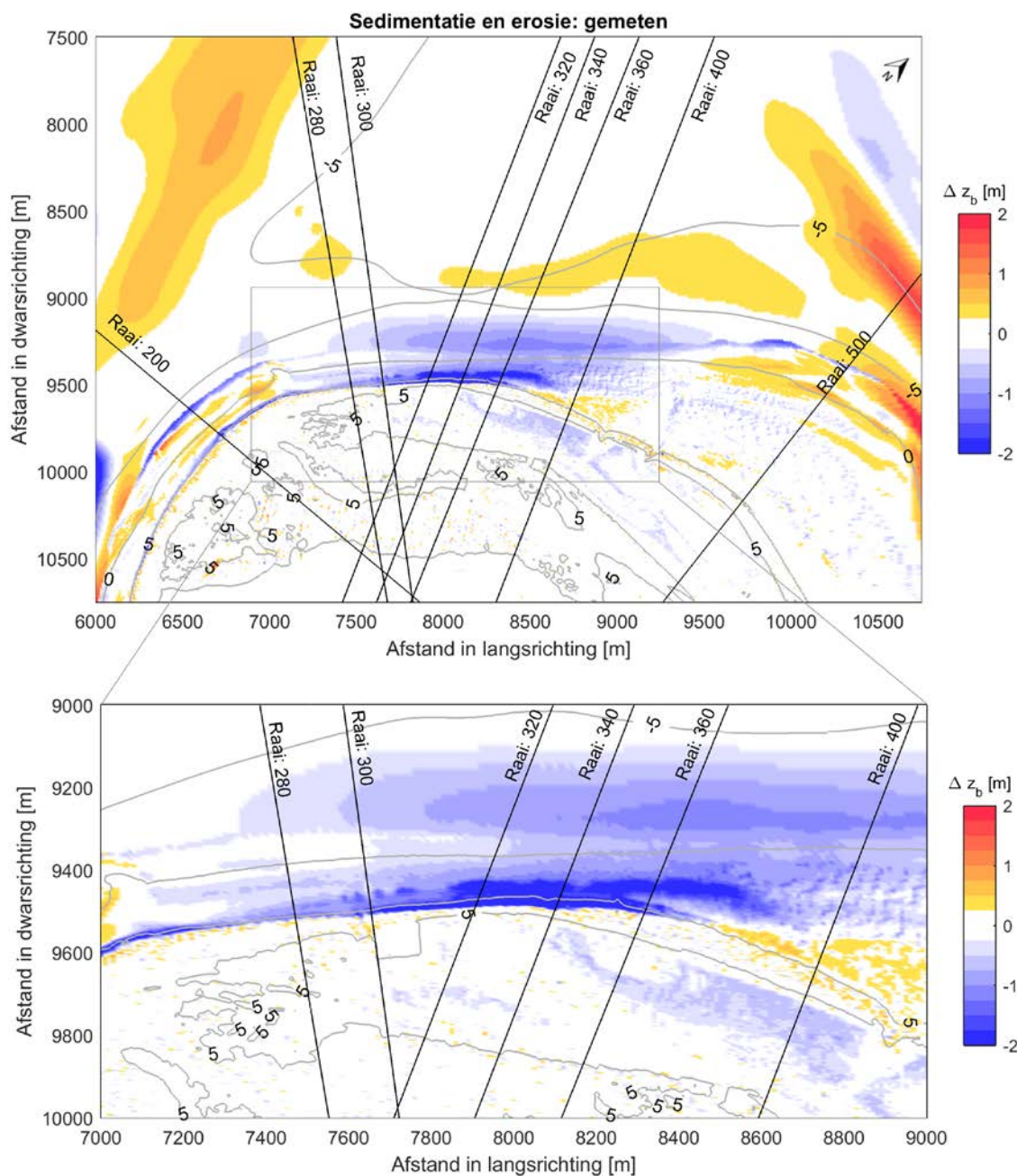
Wanneer we meer detail kijken (beneden kader, Figuur 4.12) zien we duidelijk dat er morfologische veranderingen optreden in de duinvallei (erosie) en op de strandhaak (erosie en depositie). Dit zijn veranderingen gedreven door lange termijn processen (eg. eolisch zandtransport). Deze processen zijn niet opgenomen in XBeach.



Figuur 4.10 Overzichtsbathymetrie 2013 In de paarse cirkel is het Bornrif is het aangegeven. De contourlijnen op -5, 0 en +5 m+NAP is in beide figuren uit 2013.

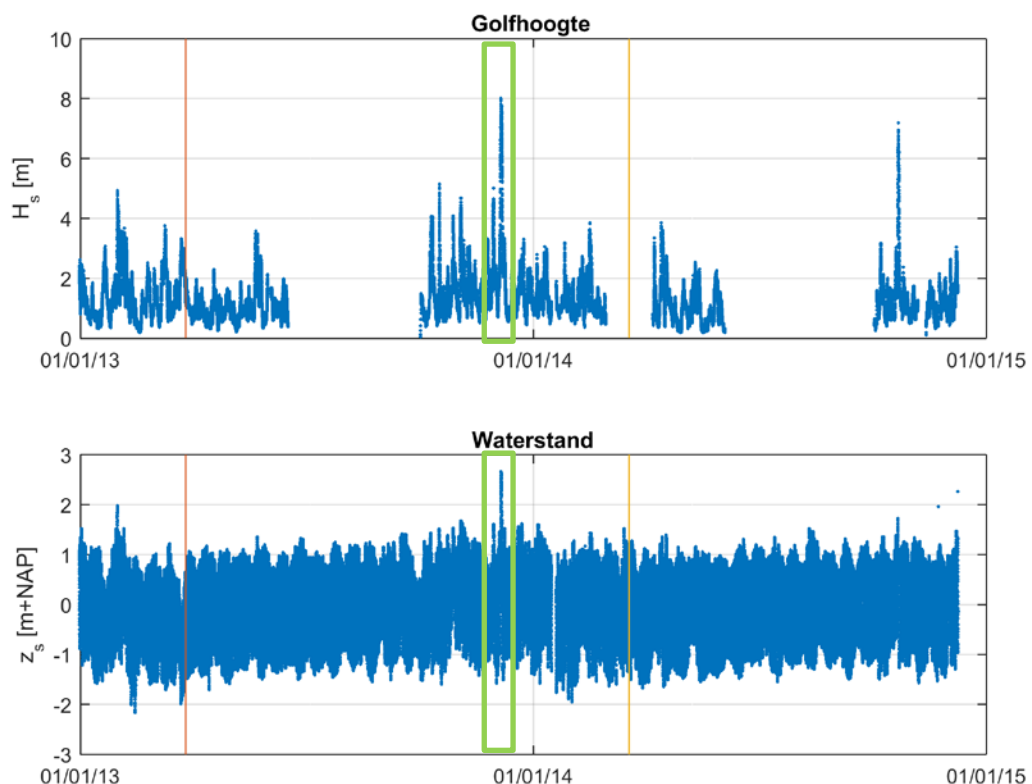


Figuur 4.11 Bathymetrie 2013 (boven) en 2014 (onder) van Ameland NW (detail). In het rode blok is het NAM-platform aangegeven en met de rode lijn is raai 340 (zwakste raai) aangemerkt. De contourlijnen op -5, 0 en +5 meter+NAP is in beide figuren uit 2013.

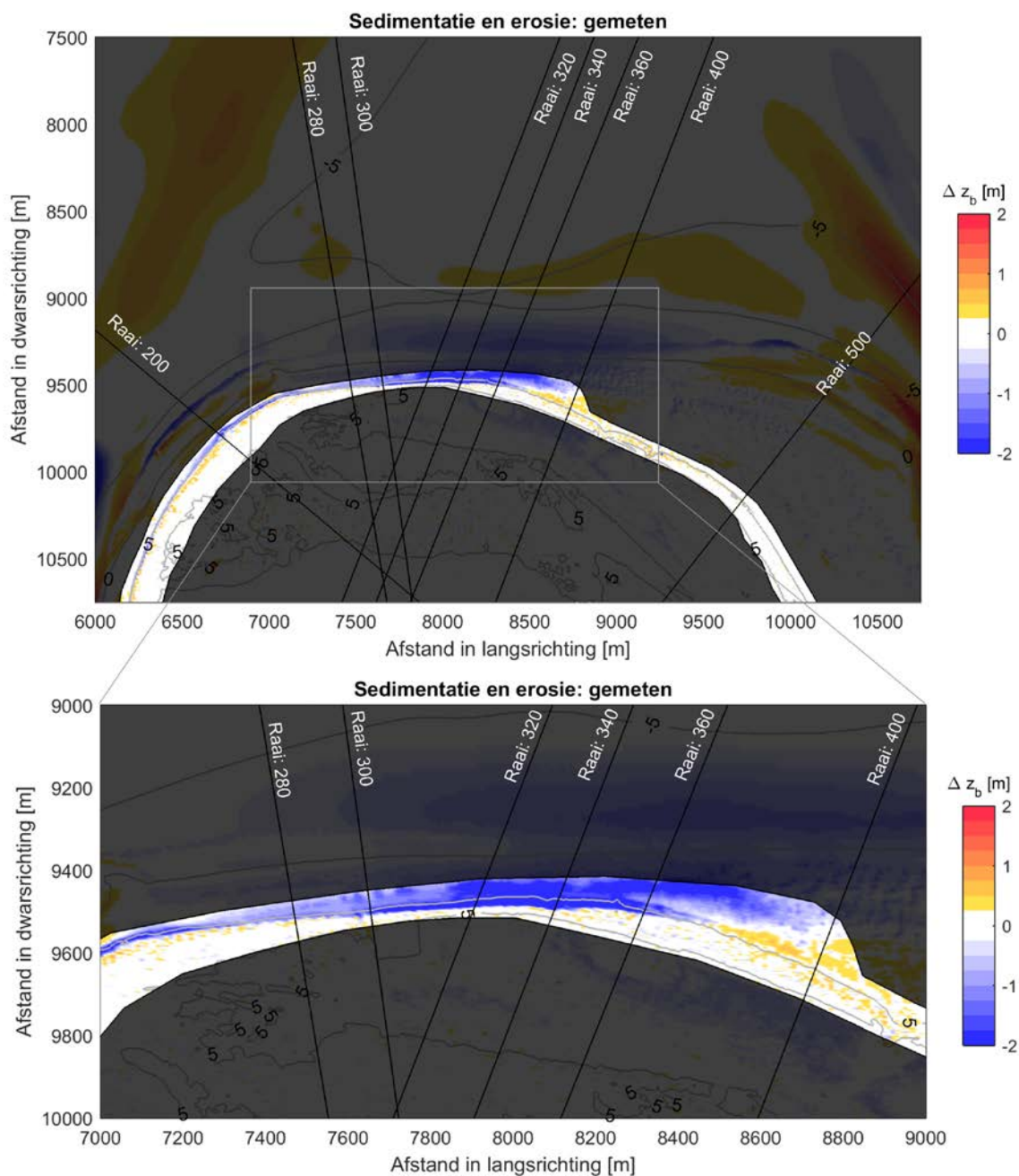


**Figuur 4.12** Sedimentatie en erosie gemeten door JARKUS grids en kustLiDAR van 2013 van 2014 af te halen. Rode kleuren zijn depositie en blauwe kleuren zijn erosie. Bovenste paneel is een overzichtsfiguur. Onderste paneel geeft alleen het probleemgebied weer. Rode kader is het NAM-platform. Rode lijn is raai 340.

We gebruiken in deze studie de bathymetrie van 2013 (27 maart) als initiële bodem voor het rekenmodel voor de hindcast van de Sinterklaasstorm. Er is geen bodemopname beschikbaar vlak voor de storm. We vergelijken het eindresultaat van XBeach (het berekende kustprofiel en duin na drie dagen hydrodynamica rondom de Sinterklaasstorm) met het gemeten duin van 2014. Daarbij nemen we aan dat alle erosie die tussen 2013 en 2014 gemeten is boven +3 meter ten opzichte van NAP (duinerosie) veroorzaakt is door de Sinterklaasstorm. Onze argumentatie hiervoor is de tijdreeks van waterstanden en golfhoogte van 01/01/13 t/m 01/01/15. Het blijkt dat tussen de twee meetmomenten van de JARKUS (rode en oranje lijn) er geen andere stormen met waterstanden boven de 2 meter zijn geweest en geen andere stormen met golven boven de 5 meter hebben plaatsgevonden, zie Figuur 4.13, waardoor het onwaarschijnlijk is dat significant duinerosie tijdens andere stormen dan de Sinterklaasstorm heeft plaatsgevonden. Voor de erosie van lagere delen van het kustprofiel kunnen we geen voorspelling doen met een driedaagse XBeach simulatie. Delen van de morfologie die niet kunnen worden gereproduceerd in een driedaagse XBeach berekening, zijn beperkt zichtbaar gemaakt zoals te zien is in Figuur 4.14. Om deze morfologie te reproduceren is een combinatie nodig van lange en korte termijn morfologie. Dit valt echter buiten de scope van dit onderzoek.



Figuur 4.13 Tijdreeks van de golfhoogte ( $H_s$ ; boei Amelanders zeegat 1\_1) en waterstand ( $z_s$ ; boei Terschelling Noordzee) in het Amelanders Zeegat voor 01/01/13 t/m 01/01/15. Bron: MATROOS. Twee meetmomenten van JARKUS zijn aangegeven met rood en oranje. Sinterklaasstorm is in groen weergegeven.



Figuur 4.14 Sedimentatie en erosie gemeten door JARKUS grids en kustLiDAR van 2013 van 2014 af te halen en die gereproduceerd kan worden in een driedaagse XBeach simulatie. Bovenste paneel is een overzichtsfiguur. Onderste paneel geeft alleen het probleemgebied weer.

#### 4.4.3 XBeach simulatie: 5 snap shots

Morfologische ontwikkelingen van Ameland Noordwest tijdens extreme condities, zoals de Sinterklaasstorm, zijn complex door de interactie van getij, golfopzet, transformatie van korte en lange golven in combinatie met morfologische processen zoals duinerosie en dat op een complexe onderliggende bodem met geulen en platen. Figuur 4.15 t/m Figuur 4.20 geven een beeld van de morfologische ontwikkeling op basis de XBeach simulatie.

In de eerste 12 uur (Figuur 4.15) van de simulatie vindt er relatief weinig bodemverandering plaats. Korte golven nemen in hoogte toe van 2 meter tot een hoogte van 7 a 8 meter, echter heeft het waterniveau nog niet de 2 meter weten te overschrijden. Het gevolg is dat korte en lange golven wel het strand bereiken maar het duinfront nog maar beperkt. We zien lichte erosie rond de waterlijn en een erosie van de lokale uitbouw op de eilandkop.

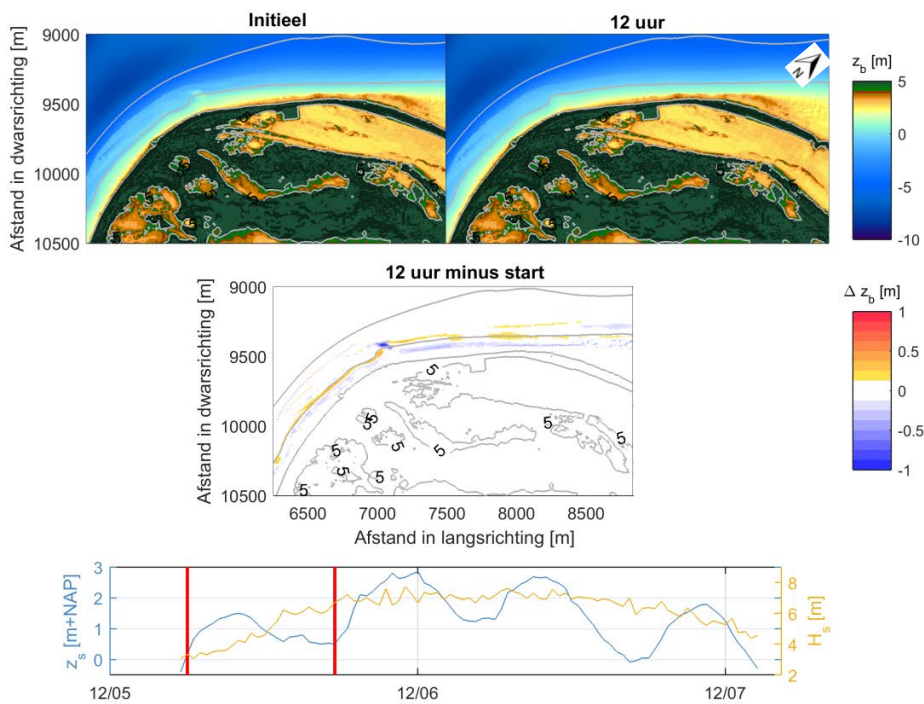
In de aanloop naar de eerste waterniveaupiek, tussen 12 en 18 uur (Figuur 4.16), vinden de grootste morfologische veranderingen plaats. Als gevolg van de hogere waterstand (zowel gedreven door de randvoorwaarden als golfopzet), bereikt golfenergie het strand en duin. Dit heeft twee uitingsvormen. Ten eerste worden onregelmatigheden op het strand (e.g. embryonale duinen) in de bathymetrie op de strandhaak weg geërodeerd. Ten tweede vindt er erosie van het duin plaats.

Tussen 18 en 24 uur (Figuur 4.17) vindt er meer erosie plaats zoals al gezien tussen 12-18 uur. Dit treedt vooral op in de periode met wat hogere waterniveaus. Depositie vindt wel verder onder in het profiel plaats. Sediment komt nu ongeveer tot de 0 meterlijn.

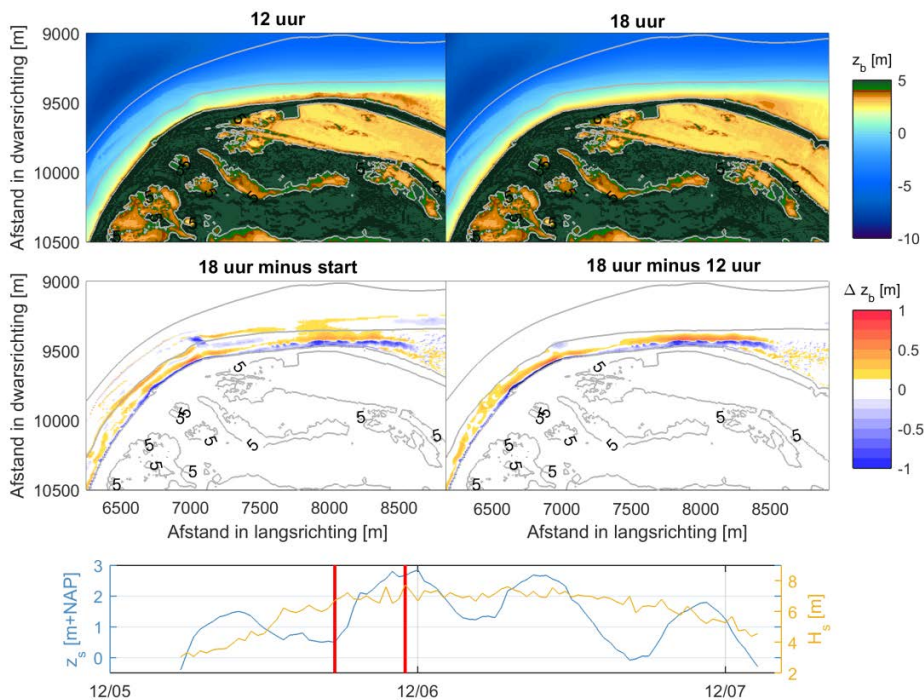
De tweede waterniveaupiek, tussen 24 en 30 uur (Figuur 4.18), wordt gekenmerkt door lokaal-optredende duinerosie. Hiermee wordt bedoeld dat duinerosie optreedt tussen raai 300 en 380 en dat bij hogere en lagere raainummers de duinerosie beperkt is. De energie die het duin bereikt veroorzaakt het afschuiven van het duin. Dit treedt pas op wanneer een deel van het strand is opgeruimd en de kritieke helling wordt overschreden. In eerste instantie komt het geërodeerde sediment hoog op het strand terecht.

Tussen 30 en 36 uur (met fors lagere waterniveaus, Figuur 4.19) wordt sediment van het hogere strand naar onder de waterlijn getransporteerd. Het einde van de simulatie (36-45 uur, Figuur 4.20) is vergelijkbaar met de periode daarvoor. Het duin erodeert nog maar beperkt en er vindt vooral afvoer van de daarvoor afgeleden materiaal plaats.

De morfologische ontwikkelingen zijn inzichtelijke gemaakt in de bij dit rapport meegeleverde animaties. In Figuur 4.21 en Figuur 4.22 is bathymetrie voor en na de Sinterklaasstorm voor geheel Ameland NW (overzichtsanimatie) en meer gefocust op raai 300-360 (detailanimatie). In de simulaties is te zien dat golven pas bij een waterniveau van meer dan NAP +2 m de strandhaak en duin weten bereiken. Tijdens de eerste hoogwaterpiek worden onregelmatigheden op het strand en de strandhaak opgeruimd. De tweede piek heeft vooral invloed op het duin.

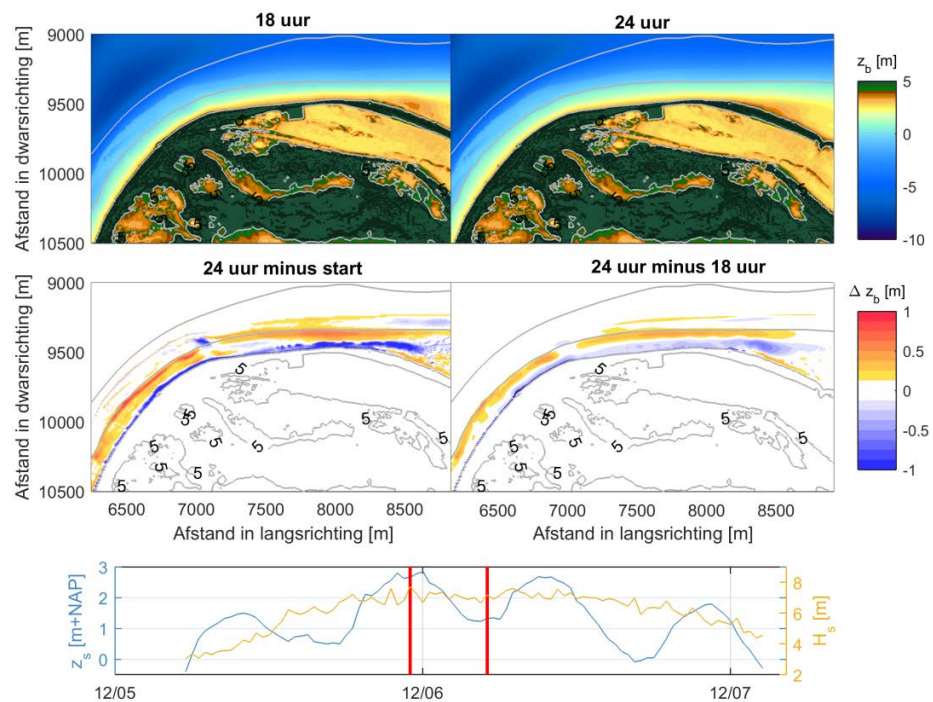


Figuur 4.15 Morfologische ontwikkeling tussen 0 en 12 uur in de XBeach simulatie. Linksboven is de bathymetrie op de eerste tijdstap. Rechtsboven is de bathymetrie op de tweede tijdstap. Linksonder is de totale sedimentatie en erosie. Rechtsonder is de sedimentatie en erosie tussen de twee tijdstappen. Tijdsreeksen geven een indicatie van de waterstanden en korte golfhoogte op de modelrand.

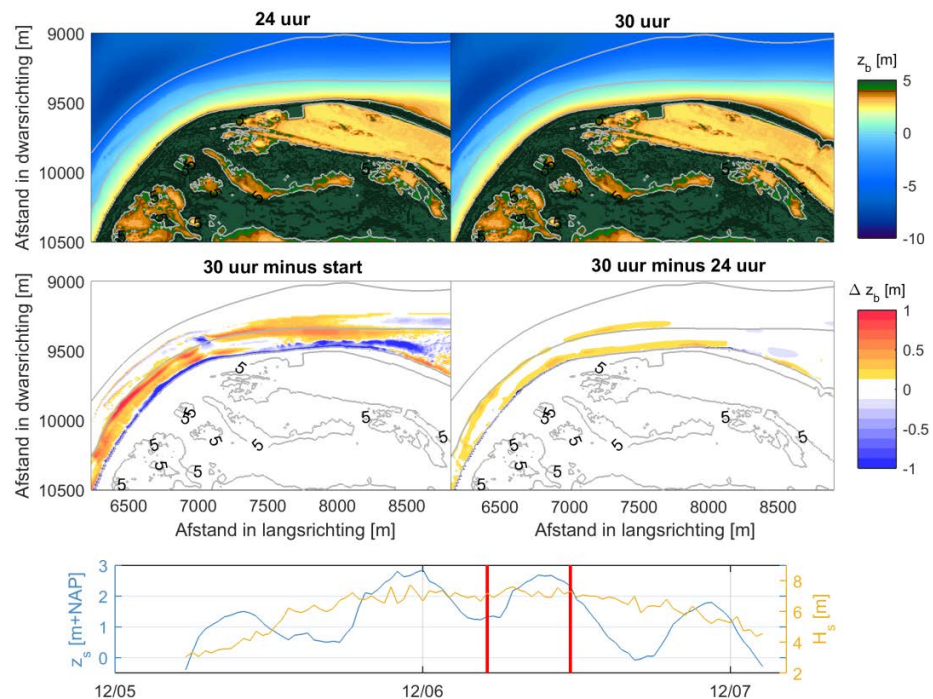


Figuur 4.16 Morfologische ontwikkeling tussen 12 en 18 uur in de XBeach simulatie. Linksboven is de bathymetrie op de eerste tijdstap. Rechtsboven is de bathymetrie op de tweede tijdstap. Linksonder is de totale sedimentatie en erosie. Rechtsonder is de sedimentatie en erosie tussen de twee tijdstappen. Tijdsreeksen geven een indicatie van de waterstanden en korte golfhoogte op de modelrand.

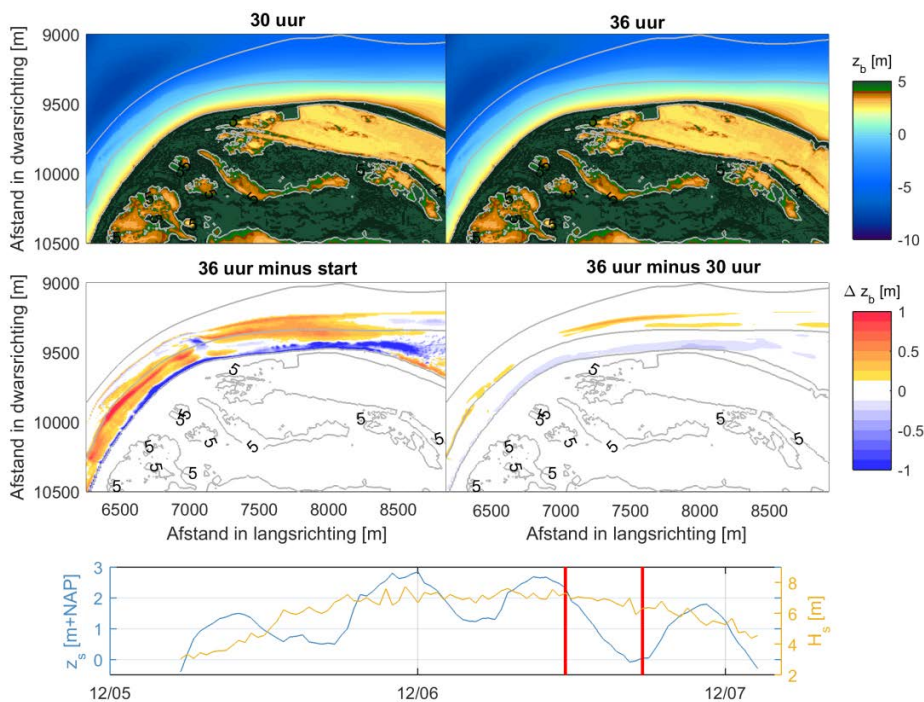




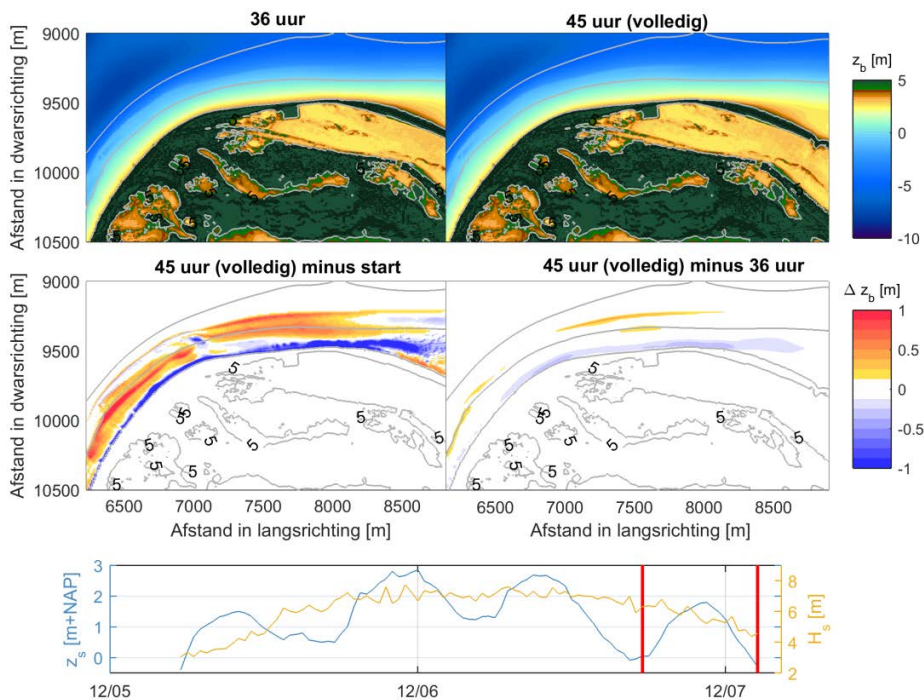
Figuur 4.17 Morfologische ontwikkeling tussen 18 en 24 uur in de XBeach simulatie. Linksboven is de bathymetrie op de eerste tijdstap. Rechtsboven is de bathymetrie op de tweede tijdstap. Linksonder is de totale sedimentatie en erosie. Rechtsonder is de sedimentatie en erosie tussen de twee tijdstappen. Tijdsreeksen geven een indicatie van de waterstanden en korte golfhoogte op de modelrand.



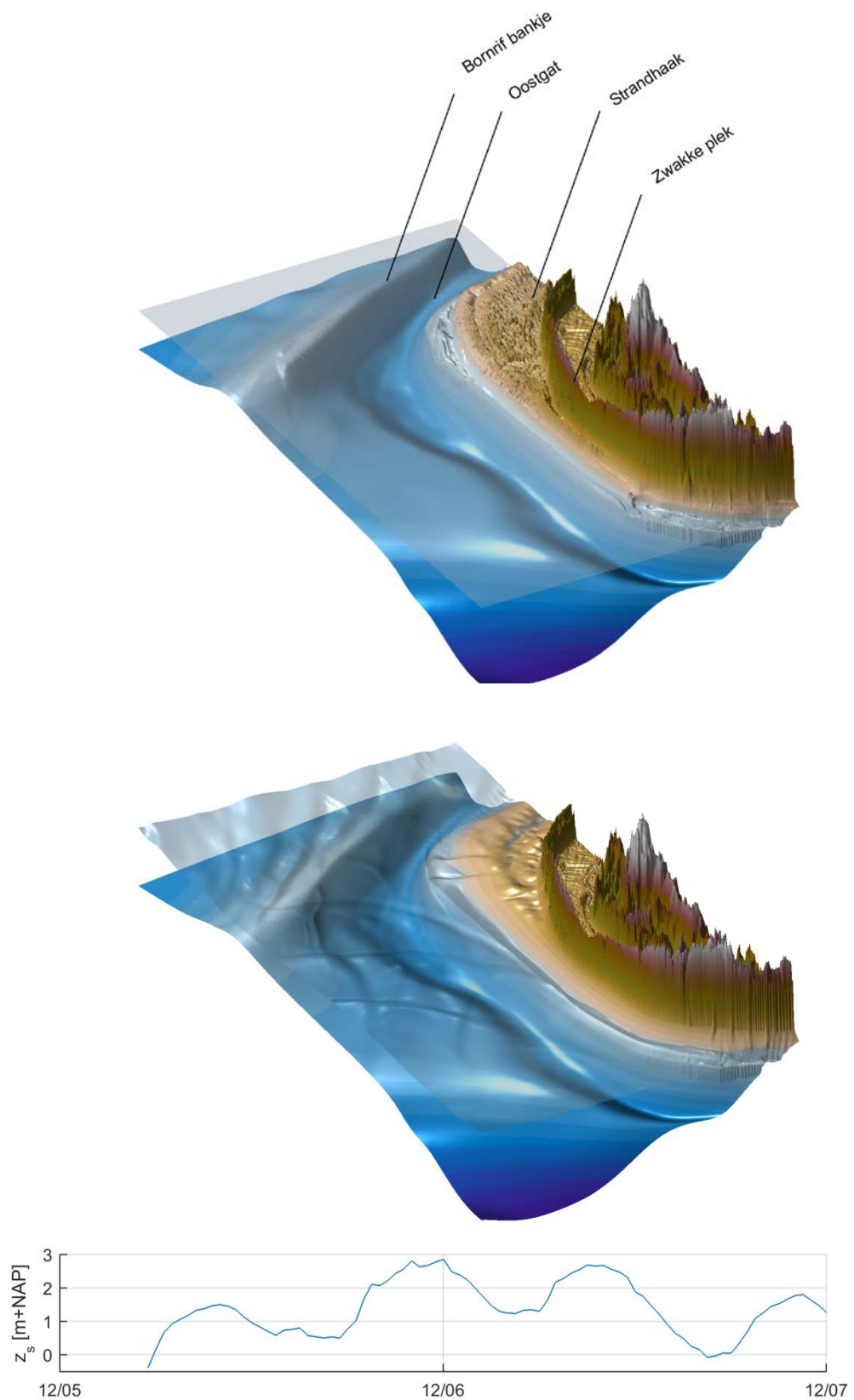
Figuur 4.18 Morfologische ontwikkeling tussen 24 en 30 uur in de XBeach simulatie. Linksboven is de bathymetrie op de eerste tijdstap. Rechtsboven is de bathymetrie op de tweede tijdstap. Linksonder is de totale sedimentatie en erosie. Rechtsonder is de sedimentatie en erosie tussen de twee tijdstappen. Tijdsreeksen geven een indicatie van de waterstanden en korte golfhoogte op de modelrand.



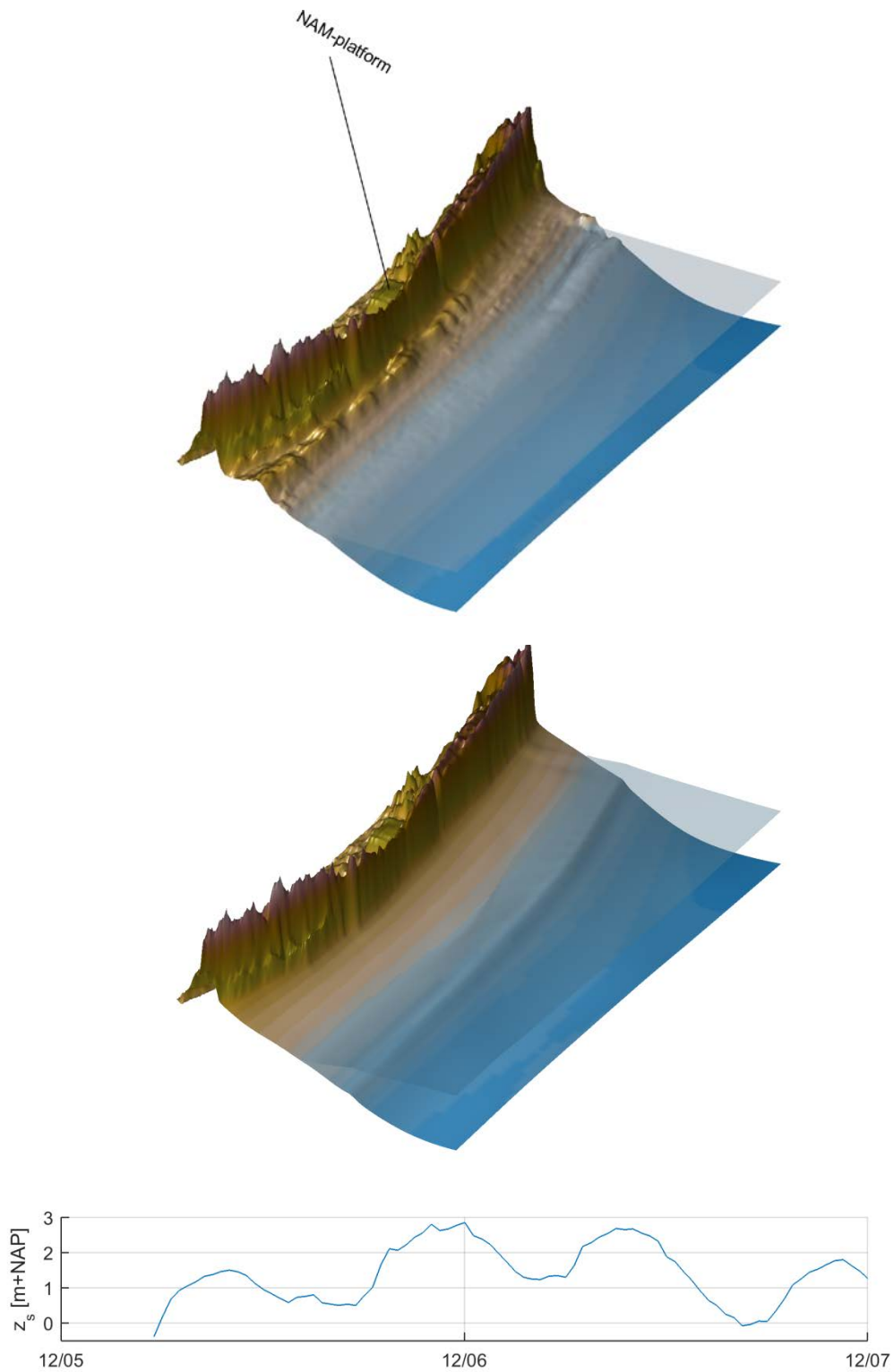
Figuur 4.19 Morfologische ontwikkeling tussen 30 en 36 uur in de XBeach simulatie. Linksboven is de bathymetrie op de eerste tijdstap. Rechtsboven is de bathymetrie op de tweede tijdstap. Linksonder is de totale sedimentatie en erosie. Rechtsonder is de sedimentatie en erosie tussen de twee tijdstappen. Tijdseries geven een indicatie van de waterstanden en korte golfhoogte op de modelrand.



Figuur 4.20 Morfologische ontwikkeling tussen 36 en 45 uur (einde) in de XBeach simulatie. Linksboven is de bathymetrie op de eerste tijdstap. Rechtsboven is de bathymetrie op de tweede tijdstap. Linksonder is de totale sedimentatie en erosie. Rechtsonder is de sedimentatie en erosie tussen de twee tijdstappen. Tijdseries geven een indicatie van de waterstanden en korte golfhoogte op de modelrand.



Figuur 4.21 Overzichtsanimatie: bathymetrie voor (boven) en gesimuleerd (onder) voor de Sinterklaasstorm zoals berekend door XBeach. Zie bijbehorende animaties voor details.

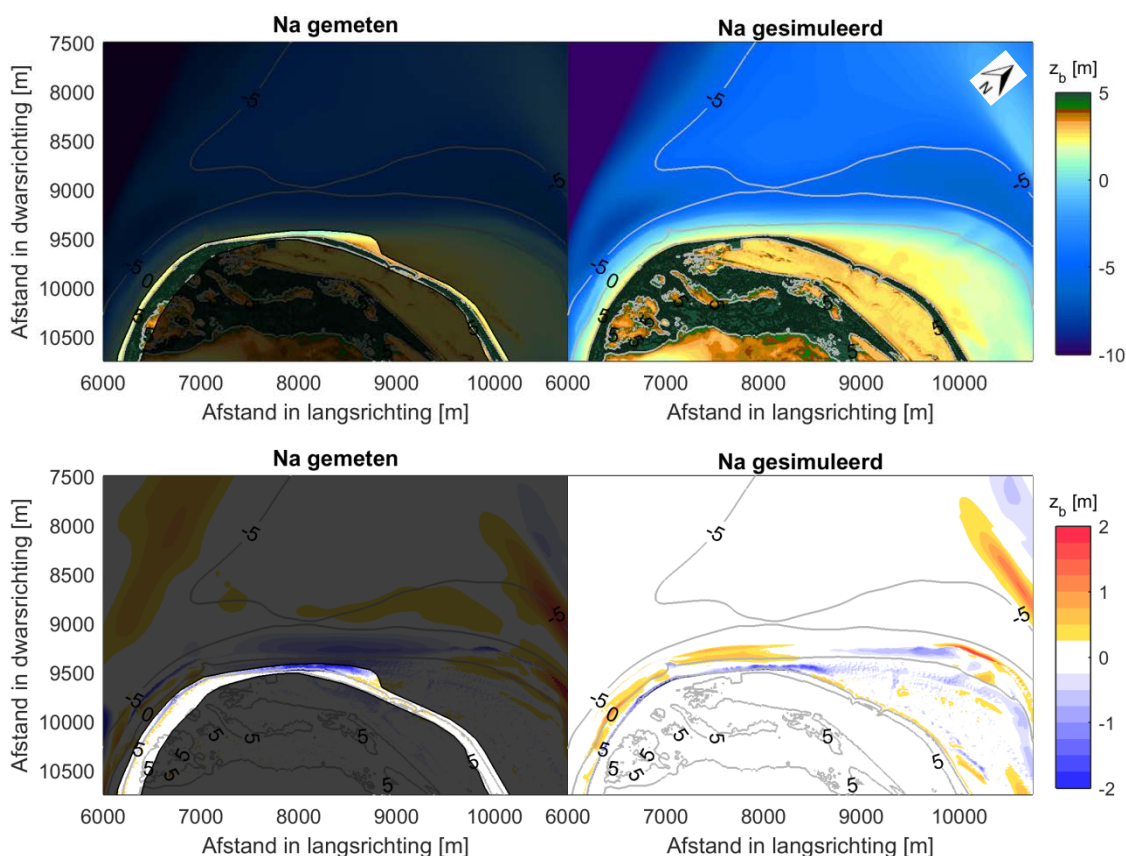


Figuur 4.22 Detailanimatie: bathymetrie voor (boven) en gesimuleerd (onder) voor de Sinterklaasstorm zoals berekend door XBeach. Zie bijbehorende animaties voor details.

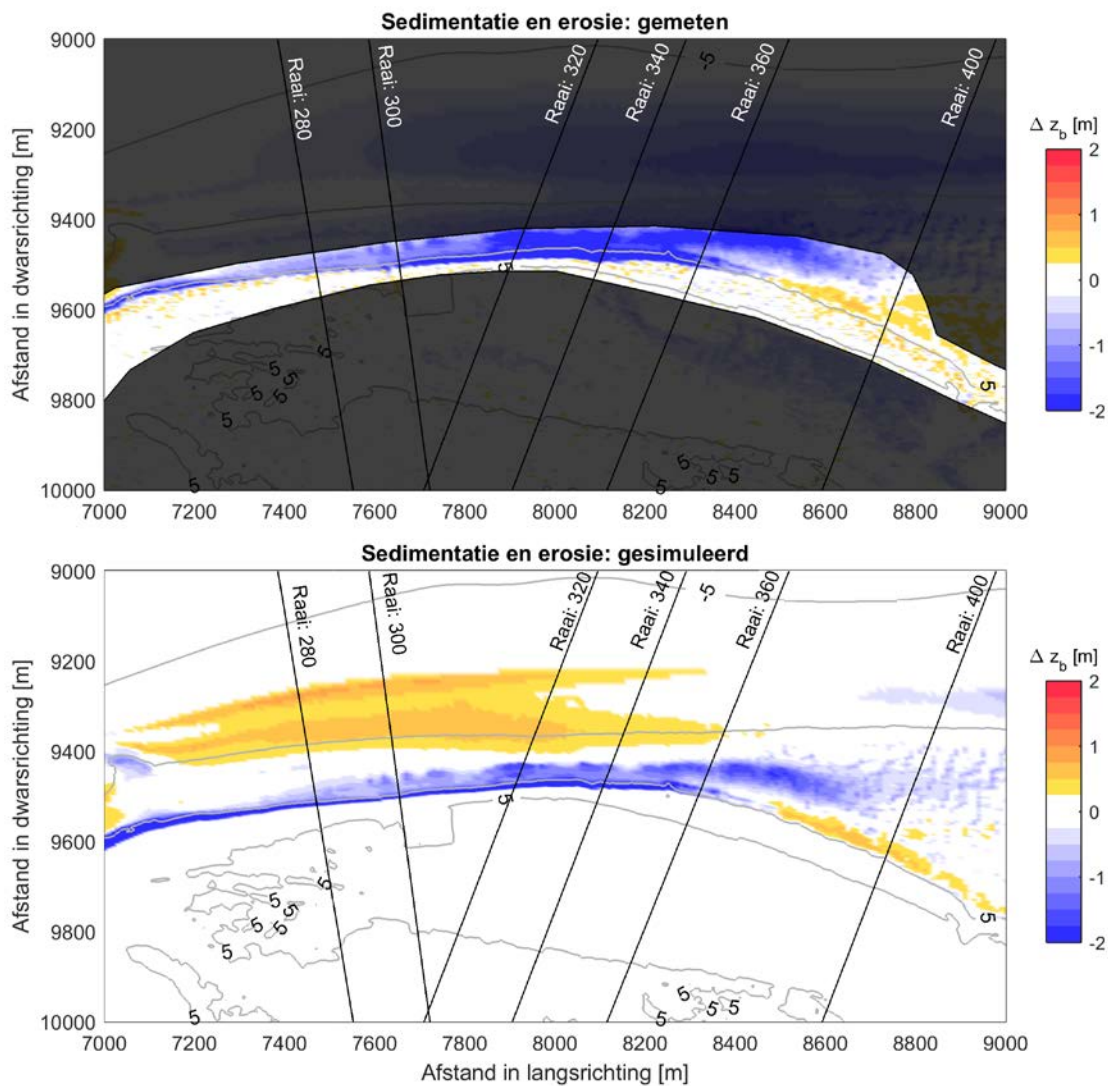
#### 4.4.4 Vergelijking met meetdata Sinterklaasstorm

Wanneer we de resultaten van de XBeach simulatie naast de gemeten bodemhoogte uit 2014 leggen constateren we dat de patronen van de delen onder hoogwater (2 meter), zoals verwacht, grote verschillen, zie Figuur 4.23. De verschillen wat betreft de hoogte en positie van het duin zijn echter een stuk kleiner. De duinerosie wordt deels gereproduceerd qua volume als locatie (Figuur 4.24). Tijdens de Sinterklaasstorm is grote erosie opgetreden. Deze erosie zien we in het model ook ontstaan. De meer complexe sedimentatie en erosie patronen tussen de zinkstukken (raaien 200-300) wordt ook (gedeeltelijk) gereproduceerd.

Er erodeert in de simulatie geen/nauwelijks materiaal onder de 0 meter, terwijl in de jaarlijkse meting hier wel veel materiaal is verdwenen. Dit is zeer waarschijnlijk het gevolg van de meer dagelijkse condities. De metingen zijn respectievelijk van 27 maart 2013 en 19 maart 2014. In de XBeach simulaties vindt depositie van materiaal plaats tussen de +1 en -5 meter. Dit is ook niet te vinden in de jaarlijkse metingen. Wel zien we hier lokaal minder erosie in de metingen. Mogelijk hangt dit samen met depositie opgetreden tijdens de Sinterklaasstorm.

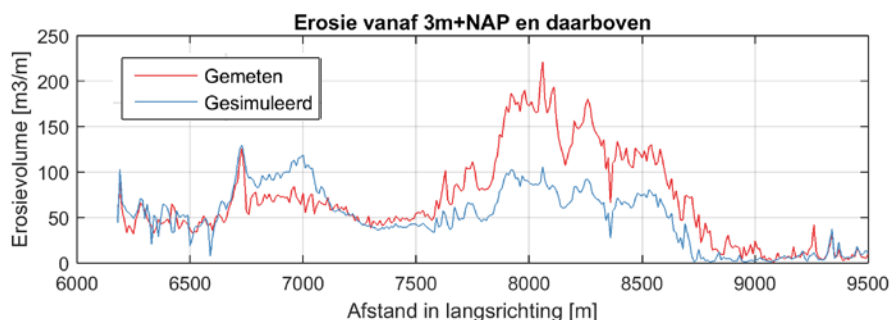


Figuur 4.23 Overzichtsfiguur: bathymetrie (boven) en sedimentatie en erosie patronen (onder) na de Sinterklaasstorm zoals gemeten (links) en gesimuleerd met XBeach (rechts).

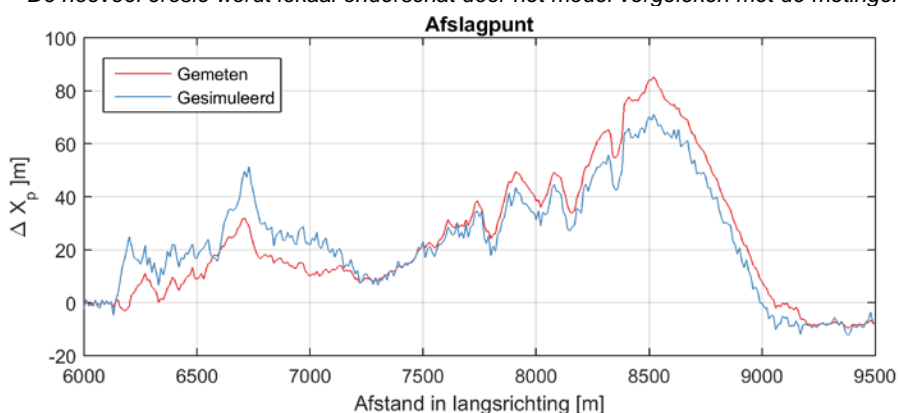


Figuur 4.24 Detailfiguur: sedimentatie en erosie patronen na de Sinterklaasstorm zoals gemeten (boven) en gesimuleerd met XBeach (onder).

Deze kwalitatieve beschouwing wordt ondersteund door een kwantitatieve analyse van de erosie volumes. Duinerosie van de eerste zeereep wordt beperkt gereproduceerd, aangezien het model de extreme duinerosie tussen raai 320 en 340 onderschat (gemeten 193, gesimuleerd: 88 m<sup>3</sup>/m). De patronen in duinerosie worden wel goed in het model gevangen. Het gemiddelde volume wordt iets onderschat (gemeten 55, gesimuleerd 43 m<sup>3</sup>/m). Dit beeld wordt verder bevestigd door het afslagpunt zoals gemeten en gesimuleerd naast elkaar te leggen (gemeten: 85 m, gesimuleerd: 71 m). De erosievolumes kunnen worden gevonden in Figuur 4.25, het afslagpunt staat in Figuur 4.26. Erosie gemeten vanaf de waterlijn wordt, zoals verwacht, niet goed gereproduceerd. Hierbij zijn naar verwachting de dagelijkse condities (zie bijvoorbeeld Hoofdstuk 3.5.2) meer van belang.

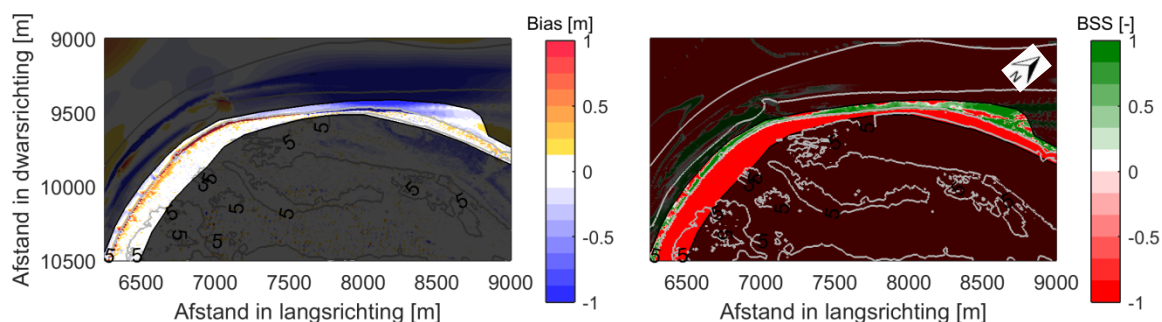


Figuur 4.25 Erosie zoals gemeten voor de jaarlijkse metingen en gesimuleerd in een driedaagse simulatie. De hoeveel erosie wordt lokaal onderschat door het model vergeleken met de metingen.



Figuur 4.26 Afslagpunt zoals gemeten voor de jaarlijkse metingen en gesimuleerd in een driedaagse simulatie. De patronen in afslagpunt komen goed overeen tussen de metingen en het model.

Een andere mogelijkheid voor een kwantitatieve analyse is het berekenen van de bias en Brier Skill Score (BSS, Sutherland et al., 2004) van de simulatie. Wanneer we dit per roostercel berekenen, zien we dat de duinerosie van de eerste zeereep over het algemeen goed wordt weergegeven. Richting het oosten (langsrichting 8000 tot 9000 m) wordt de duinerosie wel nog onderschat en ook richting het westen (langsrichting 7000 tot 6000 m) nog iets overschat. De eerste zeereep wordt door de XBeach simulatie met een BSS van 0.46 en bias van -0.015 meter gereproduceerd. Dit is volgens Van Rijn (2003) een *redelijk* morfologische reproductie te noemen. De achterkant van de eerste zeereep laat geen erosie zien in de metingen, maar bouwt juist iets uit. Dit zijn veranderingen gedreven door lange termijn processen (eg. eolisch zandtransport). Deze processen worden niet opgelost door het XBeach model en kunnen dus ook niet terug gezien worden in de modelresultaten. Vandaar dat we hier in Figuur 4.27 een positieve bias en negatieve BSS hebben.



Figuur 4.27 Bias en BSS van de driedaagse simulatie vergeleken met de jaarlijkse meting.

Wanneer we in meer detail naar de verschillende dwarsdoorsnedes kijken, zien we dat we de zeer lokaal optredende duinerosie kunnen reproduceren. We zullen hier alleen raai 300 (weinig veranderingen) en raai 340 (veel veranderingen) behandelen. Voor doorsnede van alle raaien van voor en na de Sinterklaasstorm wordt verwezen naar Bijlage A. Een overzicht van de gemeten en gesimuleerde duinerosie op raainiveau kan worden gevonden in Tabel 4.3

De duinerosie van raaien 200-300 en 400-500 is beperkt (minder dan 50 m<sup>3</sup>/m) in de metingen en modelsimulatie. Morfologische ontwikkelingen van het Bornrif en de meer structurele erosie tussen de +2 en -5 m+NAP worden, logischerwijs, niet gereproduceerd. Specifiek voor raai 200 (Figuur 4.28) reproduceert het model de beperkt opgetreden duinerosie a 23 m<sup>3</sup>/m goed. Gemeten jaarlijkse veranderingen van de platen worden niet gereproduceerd. Met het XBeach model voorspellen we namelijk niet tot nauwelijks veranderingen.

De lokaal optredende duinerosie tussen raaien 300 en 400 wordt redelijk gereproduceerd. Hoewel, met name, de exacte erosie voor raai 320, 340 en 360 nog erg wordt onderschat. Dit kan in theorie 3 verschillende redenen hebben.

- 1 Initiële condities en randvoorwaarden.
  - 1.1 We rekenen met de bathymetrie van voorjaar 2013, terwijl de Sinterklaasstorm optrad in december. Dagelijkse condities hebben waarschijnlijk reeds een deel van het sediment afgevoerd. Hierdoor rekenen we in het model met een voorover / bodem die in het model te hoog ligt waardoor er te weinig energie dissipeert voordat het duin wordt bereikt.
  - 1.2 De randvoorwaarden zijn afgeleid van metingen, maar deze metingen lagen niet direct op de offshore modelrand. Hierdoor wordt ruimtelijke variatie van golven en waterstanden niet meegenomen en rekenen we in XBeach dus mogelijk met te hoge of te lage golven en waterstanden.
- 2 Processen die niet worden berekend met XBeach. We rekenen in XBeach met slechts 1 sediment diameter en zonder de invloed van vegetatie. Verschillen in geologie en biologie hebben in realiteit invloed op de erosie tijdens stormcondities.
- 3 Modelfouten gerelateerd aan processen die wel worden meegenomen. Verschillen tussen de modelresultaten en metingen kunnen ook bijvoorbeeld te maken hebben met de gebruikte sediment transport formulering of met numerieke effecten vanaf de rand.

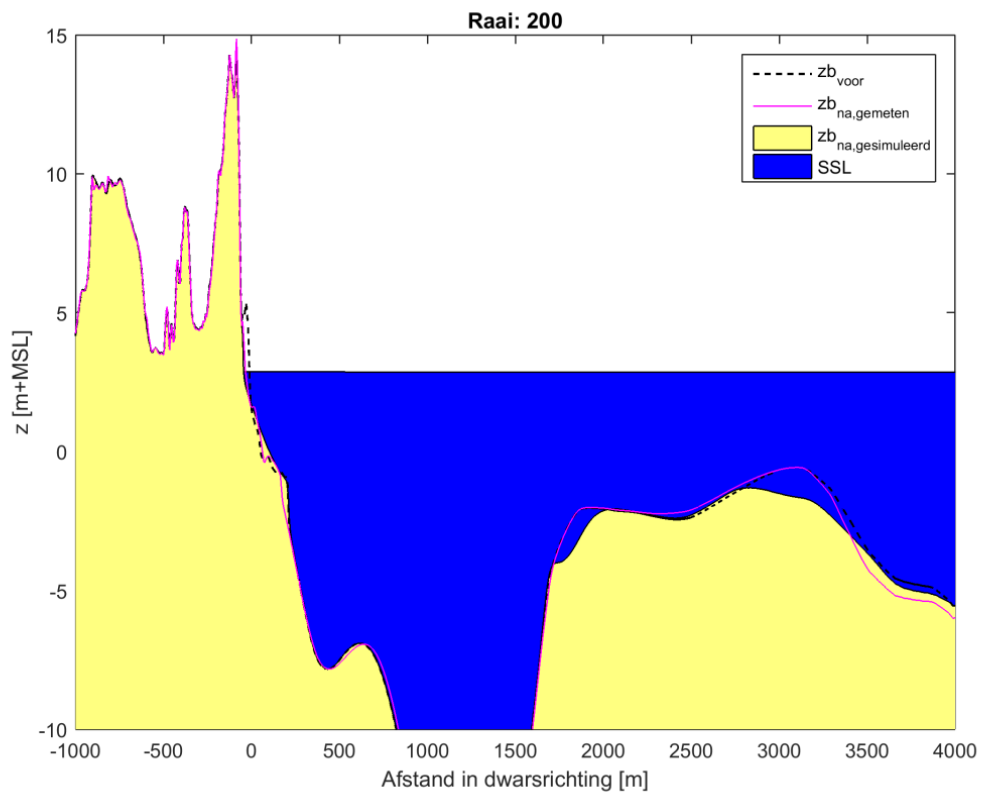
De dataset voorhanden geeft onvoldoende mogelijkheid om echt vast te stellen wat de modelfout is (zowel numerieke fouten als processen niet meegenomen). Een betere dataset zou het mogelijk maken om echt vast te stellen wat de modelfout is.

Tabel 4.3 Duinerosie voor diverse raaien van Ameland Noordwest opgetreden tijdens de Sinterklaasstorm. Waarden zijn zowel gemeten als gesimuleerd met XBeach. Duinerosie is gedefinieerd als erosie dat plaatsvindt boven de NAP +3 meter met als eenheid m<sup>3</sup>/m.

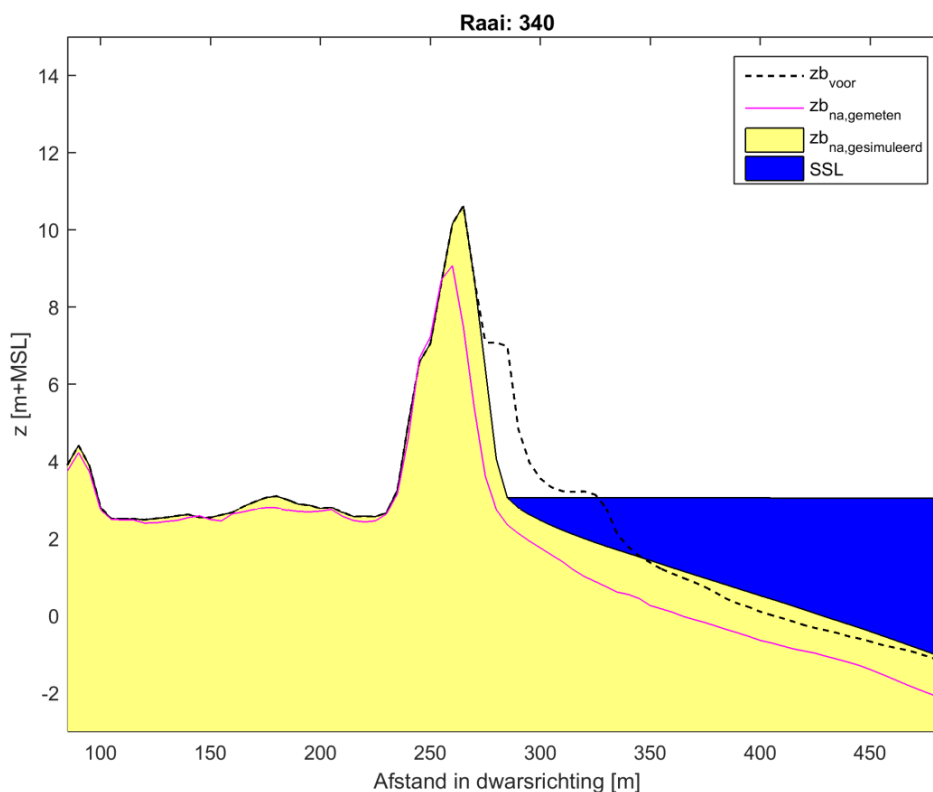
Raainummer	Duinerosie gemeten	Duinerosie gesimuleerd	% relatief gesimuleerd t.o.v. gemeten
100	23	34	+46%
101	39	17	-55%
102	25	29	+17%
103	52	19	-63%
104	64	56	+13%
120	20	10	-50%
140	33	32	-3%
200	86	91	+6%



201	67	65	-3%
202	51	65	+28%
203	49	66	+36%
204	58	72	+25%
220	59	89	+52%
240	49	72	+48%
260	36	42	+15%
280	40	43	+7%
300	52	38	-27%
301	53	40	-24%
302	66	50	-24%
303	73	52	-28%
304	100	69	-31%
320	177	107	-39%
340	193	88	-54%
360	118	59	-50%
380	100	68	-34%
400	23	2	-91%
401	16	0	-98%
402	42	2	-96%
420	5	6	-9%
440	17	23	+35%
460	3	6	+141%
480	8	5	+49%
500	4	8	+96%
<b>Gemiddelde</b>	<b>55</b>	<b>43</b>	<b>-21%</b>



Figuur 4.28 Dwarsdoorsnede van raai 200 op Ameland Noordwest. Informatie gepresenteerd van voor en na de Sinterklaasstorm (zowel gemeten als gesimuleerd door XBeach)



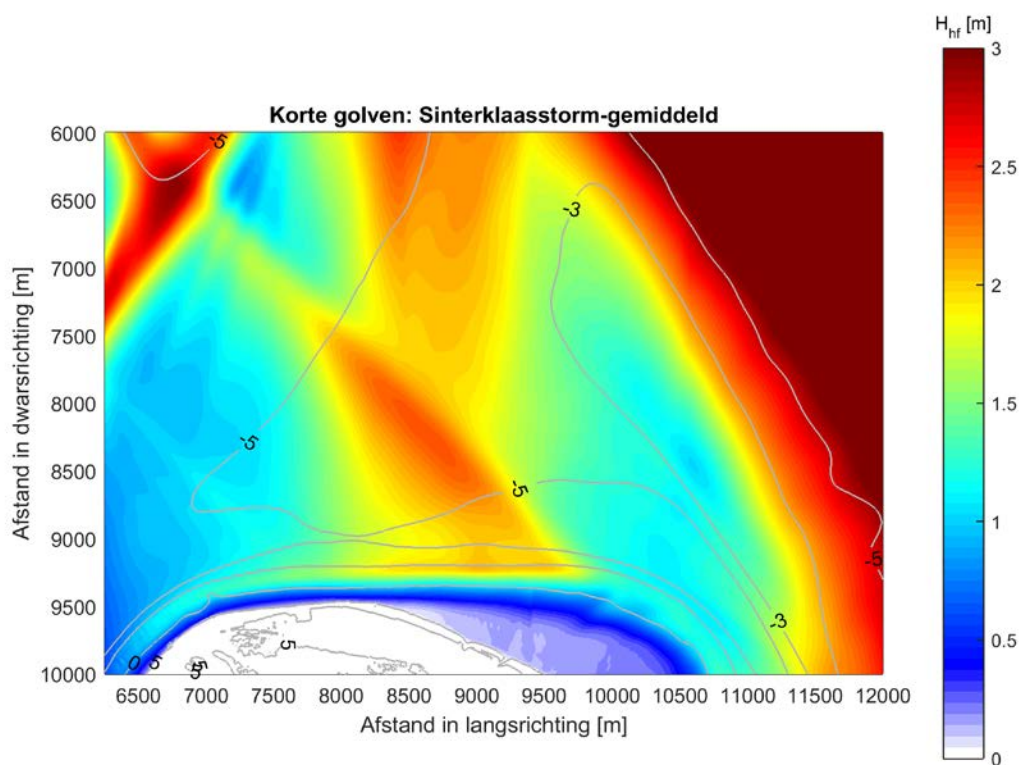
Figuur 4.29 Dwarsdoorsnede van raai 340 op Ameland Noordwest. Informatie gepresenteerd van voor en na de Sinterklaasstorm (zowel gemeten als gesimuleerd door XBeach)

#### 4.5 Analyse Sinterklaasstorm

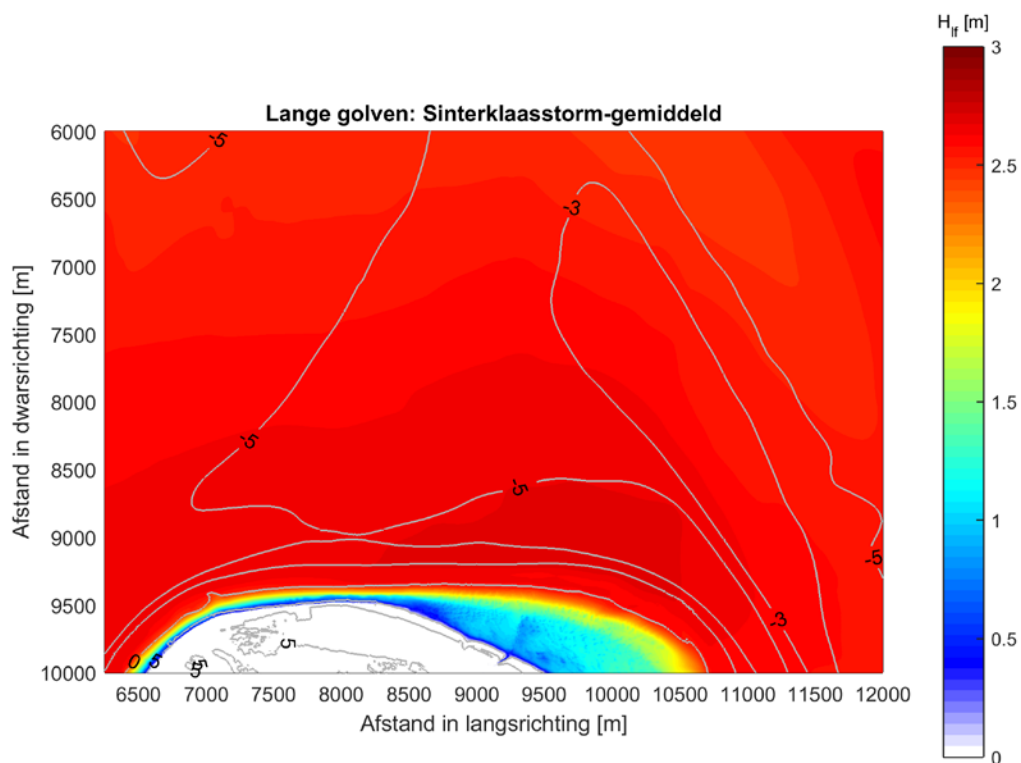
Nu we een gevalideerd model hebben kunnen we in meer detail kijken naar de oorzaken (i.e. hydrodynamica) die verantwoordelijk is voor de lokaliteit van de optredende duinerosie. Dit zullen we doen door zowel de korte en lange golven te analyseren als naar de snelheden in het model te kijken.

Tijdens stormen weten zowel korte als lange golven gedeeltelijk de kust te bereiken als gevolg van de hogere waterstand (door wind en golf gedreven opzet). Door lange golven zal de waterstand tijdelijk hoger zijn waardoor korte golven kunnen propageren richting het duinfront. Wanneer golven het duinfront bereiken, zal deze afglijden (i.e. avalanching). Dit resulteert in hoge sediment concentraties. De naar de kustgerichte mass flux wordt gecompenseerd door een undertow welke het sediment afvoert. In XBeach simulaties zien we terug komen dat de korte golven (Figuur 4.30) al grotendeels zijn gebroken voordat ze de kust kunnen bereiken. Wel constateren we een lokale hotspot als gevolg van de golfinvalshak en oriëntatie van het Bornrif. Dit zal leiden tot lokaal meer sedimentafvoer en dus meer (duin)erosie. Lange golven (zie Figuur 4.31) kunnen relatief ongestoord de kust bereiken ( $H_{lf} = 2.5$  meter) en laten geen / nauwelijks lokaal hogere waardes zien. Dit patroon van korte en lange golven resulteert in een lokaal sterke (duin)erosie op langsricting 8000 – 9500 meter (i.e. raai 320-360).

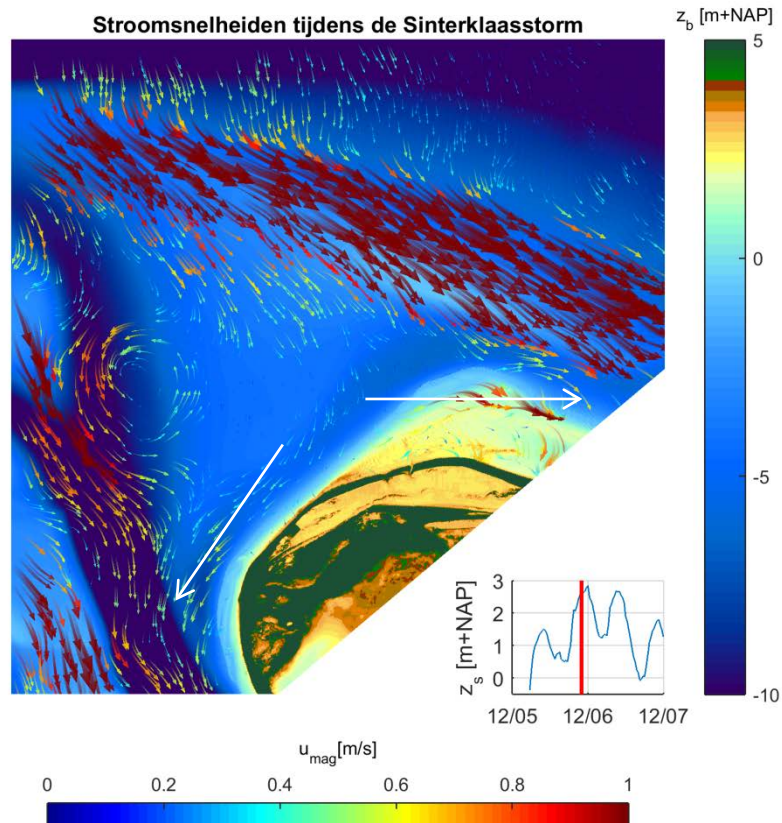
In Figuur 4.32 zijn de stroomsnelheden tijdens de eerste piek weergegeven. Water stroomt voornamelijk van oost naar west langs de kust en versnelt op de rug van het Bornrif. Daarnaast, tijdens hoog water, wordt water het Borndiep in geduwd.



Figuur 4.30 Sinterklaasstorm-gemiddelde significante korte golfhoogte in meters zoals berekend door XBeach.



Figuur 4.31 Sinterklaasstorm-gemiddelde significante lange golfhoogte in meters zoals berekend door XBeach.



Figuur 4.32 Stroomsnelheden tijdens de eerste piek van de Sinterklaasstorm. Hierin zijn de twee dominante stroomrichtingen zichtbaar gemaakt met witte pijlen. Water stroomt sneller op de het Bornrif (grotere rode pijlen).

## 4.6 Impact variërende stormcondities op verschillende bodems

### 4.6.1 Inleiding

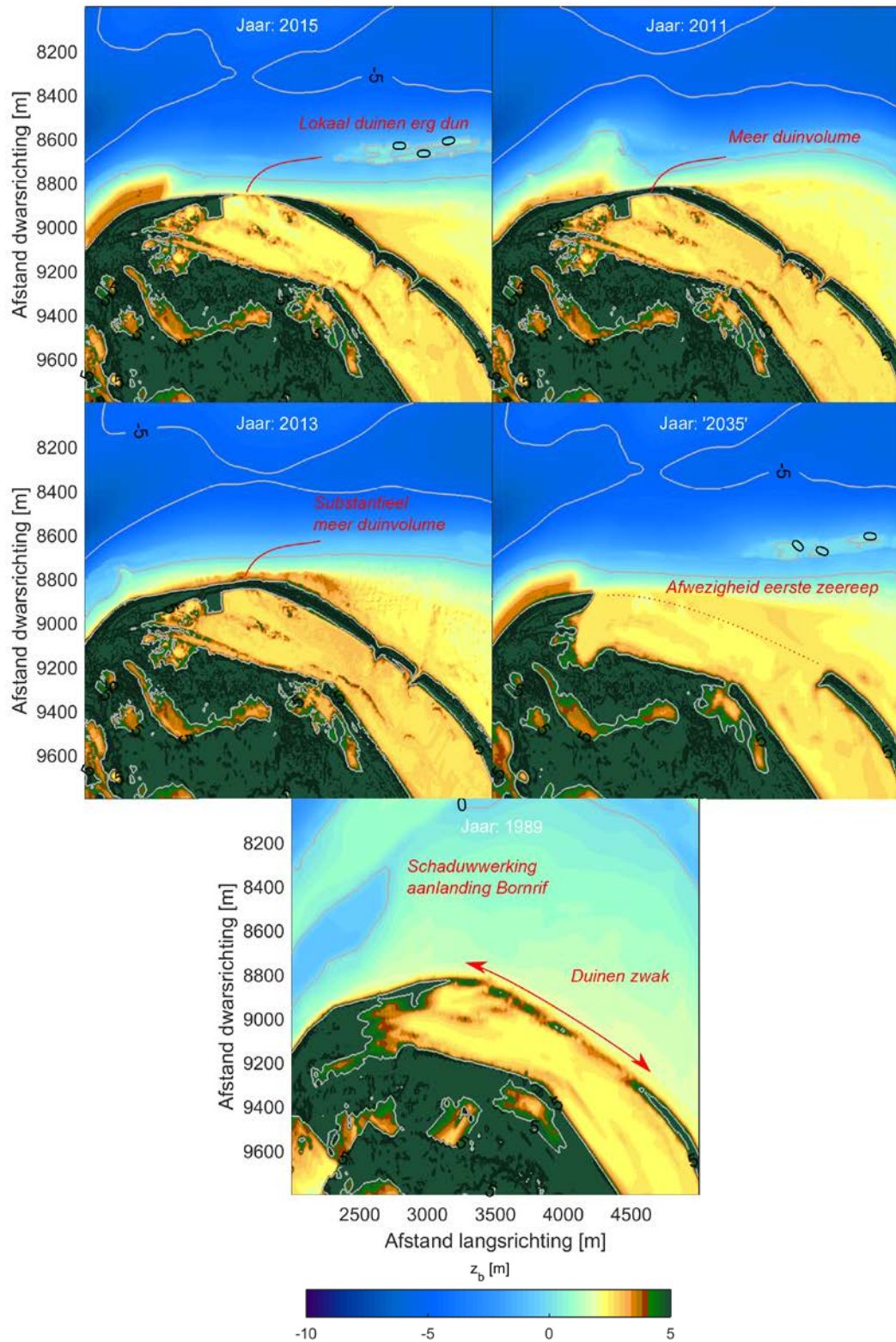
Om een beter inzicht te hebben in de effecten van verschillende stormen op de kust ter hoogte van raai 320 en 340 zijn een aantal verschillende stormen voor verschillende bodems met XBeach doorgerekend. We zullen voor de verschillende scenario's de gevolgen van de stormen in kaart brengen (e.g., erosievolumes, faalkans van de eerste zeereep, waterdieptes, etc.). In Hoofdstuk 4.4.4 hebben we laten zien dat de duinerosie opgetreden tijdens de Sinterklaasstorm met redelijke nauwkeurigheid door het XBeach model wordt gereproduceerd. Dit geeft ons vertrouwen in het model en schematisatie. De lokale onderschatting van de duinerosie tijdens de Sinterklaasstorm betekent wel dat mogelijk bij echte stormen het duin eerder zal doorbreken dan wordt gesimuleerd in XBeach. Om deze reden moeten de modelresultaten worden geanalyseerd in termen van relatieve effecten, in plaats van de absolute effecten.

Een overzicht van de verschillende synthetische stormen en bijbehorende condities is weergegeven in Tabel 4.4. De condities zijn afgeleid in het kader van Wettelijk Toets Instrumentarium (WTI, Boers et al. 2014), en gelden voor kustraai 320. Op basis van de afgeleide condities kan de Sinterklaasstorm tussen 1/10 en 1/50 jaar storm worden geclassificeerd. De in XBeach gesimuleerde stormen zijn echter synthetisch. De opgelegde tijdserie volgt een patroon zoals beschreven door Steetzel (1993). De gesimuleerde duur is 32 uur met hierin een variatie over de tijd, zie Figuur 4.6

Tabel 4.4 Overzicht van hydraulische condities per type storm.

Storm type	Significante golfhoogte [m]	Piek golfperiode [s]	Rekenpeil [m NAP]	Terugkeerperiode
Sinterklaas 2013	7,73	16,6	2,62	-
1/10 jaar	6,87	13,37	2,87	10 jaar
1/50 jaar	7,92	14,72	3,30	50 jaar
1/100 jaar	8,33	15,25	3,47	100 jaar
1/500 jaar	9,22	16,38	3,85	500 jaar
1/1000 jaar	9,58	16,84	4,01	1000 jaar
Normatief	9,93	17,27	4,16	2000 jaar

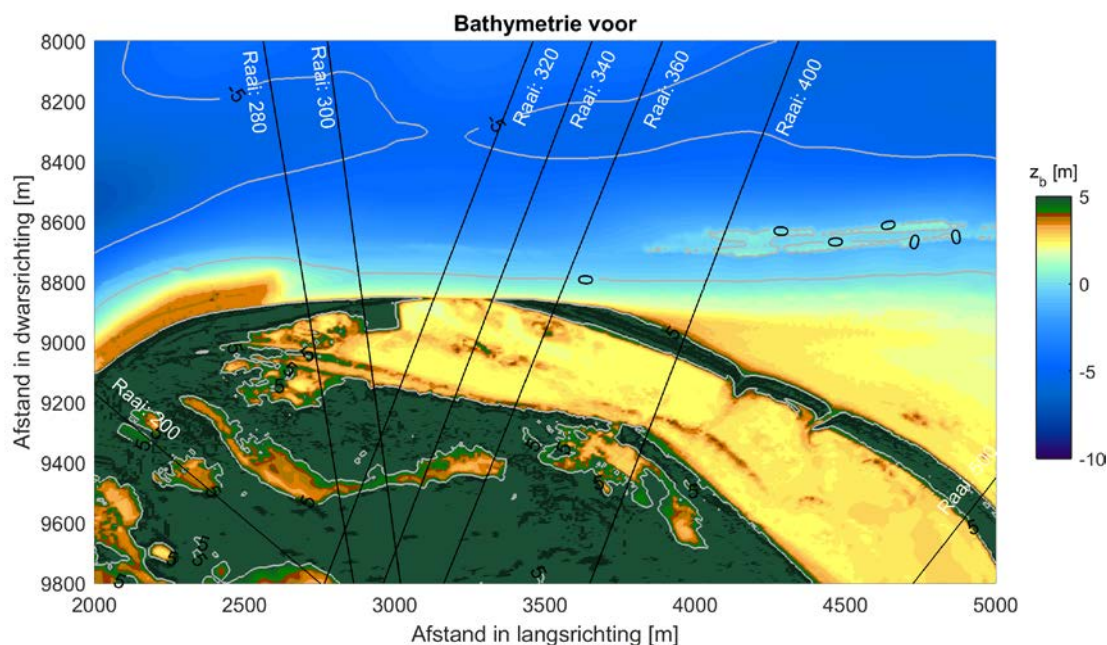
Naast de huidige situatie (jaar: 2015) zullen we een aantal andere bathymetrische situaties doorrekenen (scenario's). Dit zijn zowel mogelijke toekomstige scenario's als plaat-geul configuraties uit het verleden. Welke bodems er wordt doorgerekend is voorafgaand van de studie vastgesteld. Een overzicht van de bathymetrische scenario's kan worden gevonden in Figuur 4.33. Voor de methode van construeren van de bathymetrie wordt verwezen naar Hoofdstuk 4.2 (specifiek Tabel 4.2 en Figuur 4.7).



Figuur 4.33 Overzicht van de toegepaste bathymetrische scenario's

## 4.6.2 Scenario 1: huidige situatie (jaar: 2015)

Ameland NW kent al langere tijd problemen met structurele erosie van de eilandkop. Naast de structurele erosie met bijhorende BKL-overschrijdingen heeft meer recent de Sinterklaasstorm van 2013 in grote duinafslag geresulteerd tussen raai 300 en 400. Dit is zeer duidelijk te zien in de huidige situatie (jaar 2015, zie Figuur 4.34), waarin de duintop op een afstand van 3000 tot 3500 meter in langsrichting (raai 320-340) lokaal erg dun is geworden. Er is wel een suppletie uitgevoerd in 2015 welke zichtbaar is op een afstand van 2000 tot 2500 meter in langsrichting (raai 200-280).



Figuur 4.34 Bathymetrie van Ameland Noordwest voor 2015.

Al bij de een storm met een terugkeerfrequentie van 1/10 jaar zal volgens de berekeningen het duin doorbreken (Figuur 4.35). Een gevolg hiervan is dat water in de duinvallei terecht komt. Het duin is inmiddels zover verzwakt dat over een breedte van 350 meter een doorbraak wordt verwacht. Het geërodeerde materiaal komt dan zowel in de duinvallei als in de brandingszone terecht. De strandsuppletie reduceert de gesimuleerde erosie direct voor het NAM-platform wat, maar kan de doorbraak bij raai 320 en 340 (nog) niet voorkomen.

De doorbraak vindt plaats aan één zijde van het NAM-platform, zoals kan worden gezien in Figuur 4.37. Opvallend is dat lokaal bij raai 360 (zie Tabel 4.5 en Figuur 4.36) er erg veel duinerosie plaatsvindt. Dit komt doordat in het model de doorbraak zich vanaf raai 340 uitbreidt richting het oosten (naar de strandhaak). De erosie versterkt zich door uitscheuring na de initiële doorbraak. Raai 320 en 340 eroderen minder boven de 3 meter (i.e. in de duinen) omdat er nog maar beperkt sediment beschikbaar is om te eroderen. Daarnaast verplaatst de rug van het Bornrif naar de kust toe met als gevolg het kleiner worden van het Oostgat.

Voor grotere stormen vindt er steeds meer (duin)erosie plaats en wordt de breedte van de doorbraak groter (e.g. 450 meter voor 1/500 en 600 meter voor een storm met een terugkeerfrequentie van 1/2000 jaar). De sedimentatie en erosie patronen (Figuur 4.38) nemen toe in intensiteit. Depositie in de duinvallei neemt bijvoorbeeld toe en het overige duinmassief ondervindt erosie vanaf een storm met een terugkeerfrequentie van 1/500 jaar. Bij een dergelijke storm is er een brede doorbraak en is het stormpeil hoog genoeg (3.85 meter) om de lange golven te laten propageren in de duinvallei. Een doorbraak aan de westelijke zijde van het NAM-platform wordt verwacht bij een storm van 1/500 tot 1/1000 jaar. Daarnaast constateren

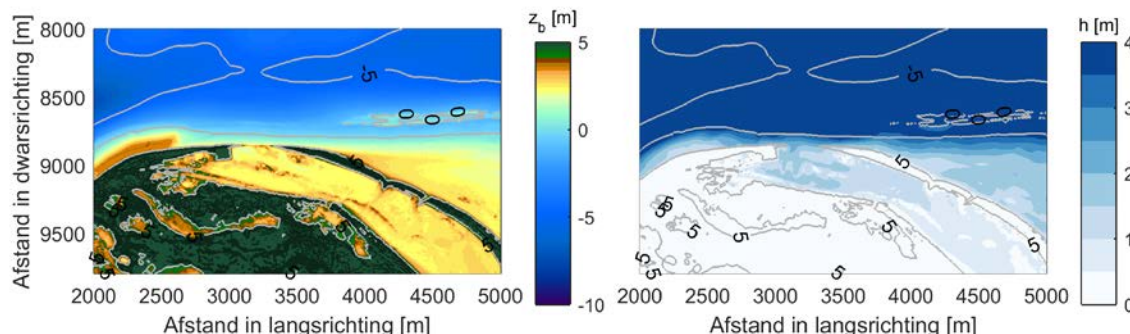


we geen vorming van een sluffer. Er wordt in XBeach wel een ondiepe geul in de simulatie gevormd die meandert door de duinvallei (Figuur 4.39). Deze wordt zichtbaar bij een storm vanaf 1/100 en neemt in intensiteit toe bij grotere stormen. Voor de overige raaien (e.g. raai 500) zien we dat het duin erodeert als gevolg van het hogere stormniveau, maar worden op basis van de XBeach simulaties geen grote morfologische veranderingen verwacht. De duinerosie neemt toe van gemiddeld 93 m<sup>3</sup>/m voor een van 1/100 jaar storm tot 150 m<sup>3</sup>/m voor een storm met een terugkeerfrequentie van 1/2000 jaar. De Sinterklaasstorm was verantwoordelijk voor gemiddeld 77 m<sup>3</sup>/m duinerosie van de eerste zeereep. De duinerosie volumes van overige scenario's (2 t/m 5) zullen worden vergeleken met de waardes met dit scenario's (huidig situatie).

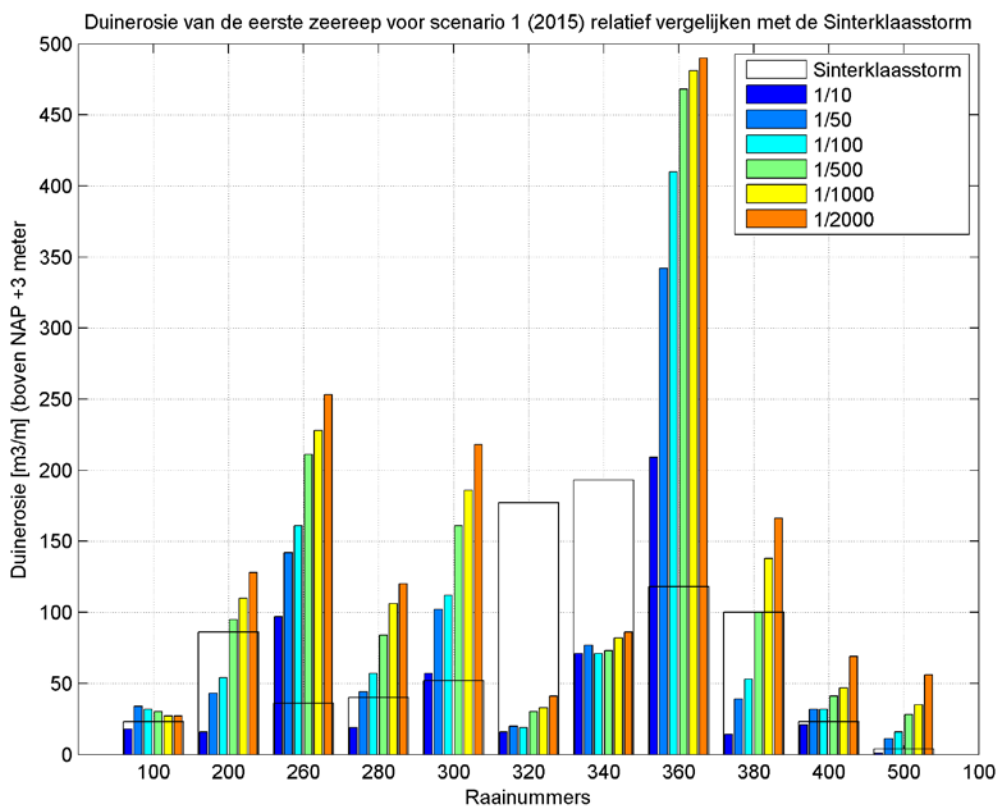
De morfologische ontwikkelingen zijn inzichtelijke gemaakt in de bij dit rapport meegeleverde animaties. In Figuur 4.40 en Figuur 4.41 is de bathymetrie van scenario 2 voor en na een 1/2000 storm voor geheel Ameland NW (overzichtsanimatie) en meer gefocust op raai 300-360 (detailanimatie). Voor doorsnedes van verschillende raaien wordt verwezen naar Appendix B1.

Tabel 4.5 Duinerosie van de eerste zeereep voor scenario 1 (2015) zoals berekend door XBeach. Getallen in de laatste kolom zijn de gemeten duinerosie waardes na de Sinterklaasstorm.

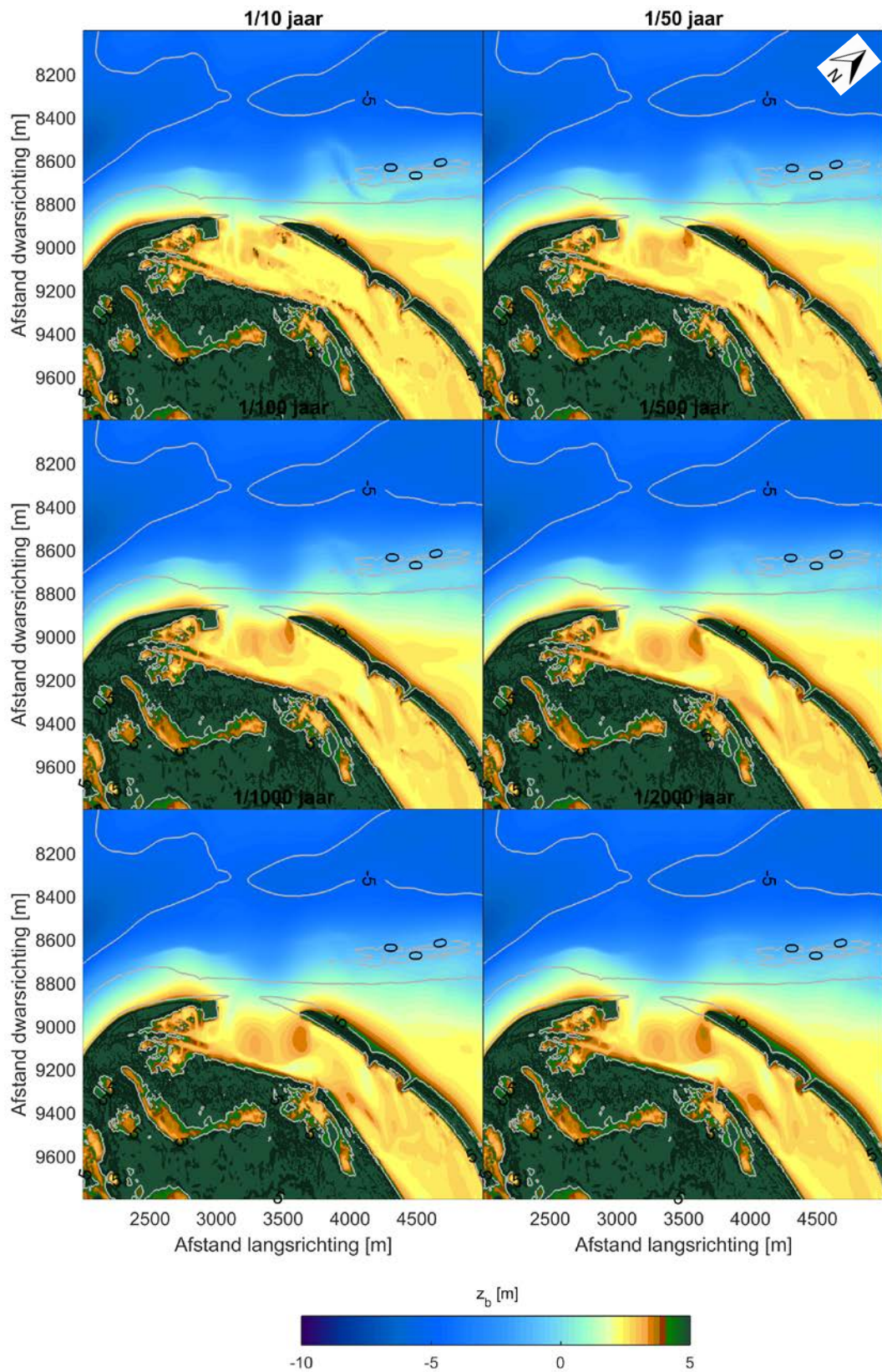
Raai	1/10	1/50	1/100	1/500	1/1000	1/2000	Sinterklaasstorm
100	18	34	32	30	27	27	23
200	16	43	54	95	110	128	86
260	97	142	161	211	228	253	36
280	19	44	57	84	106	120	40
300	57	102	112	161	186	218	52
320	16	20	19	30	33	41	177
340	71	77	71	73	82	86	193
360	209	342	410	468	481	490	118
380	14	39	53	100	138	166	100
400	21	32	32	41	47	69	23
500	1	11	16	28	35	56	4
Gemiddelde	49	80	93	120	134	150	77



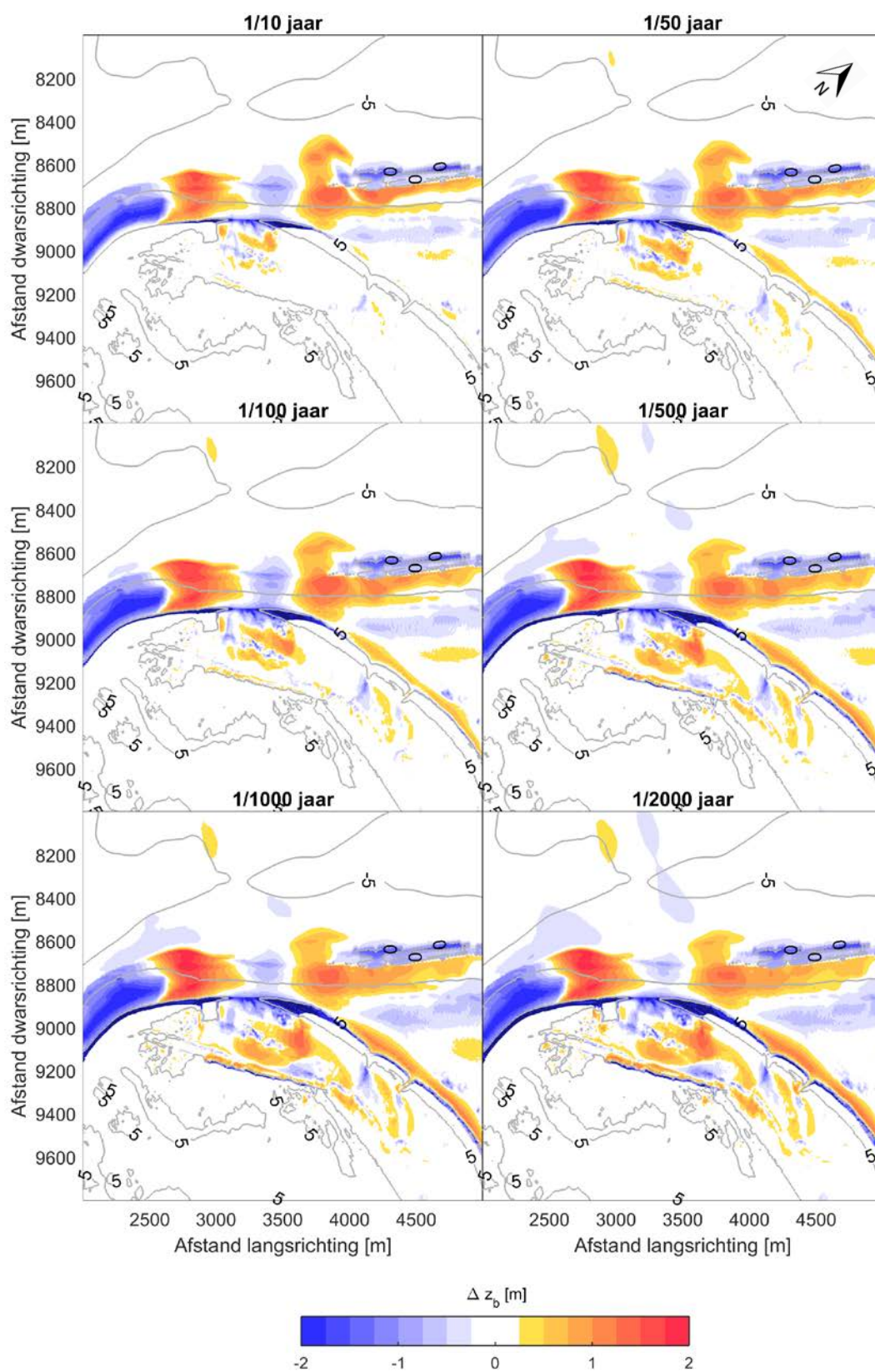
Figuur 4.35 Rechts: maximale waterdieptes voor scenario 1 (2015) en storm 1/10 zoals berekend door XBeach



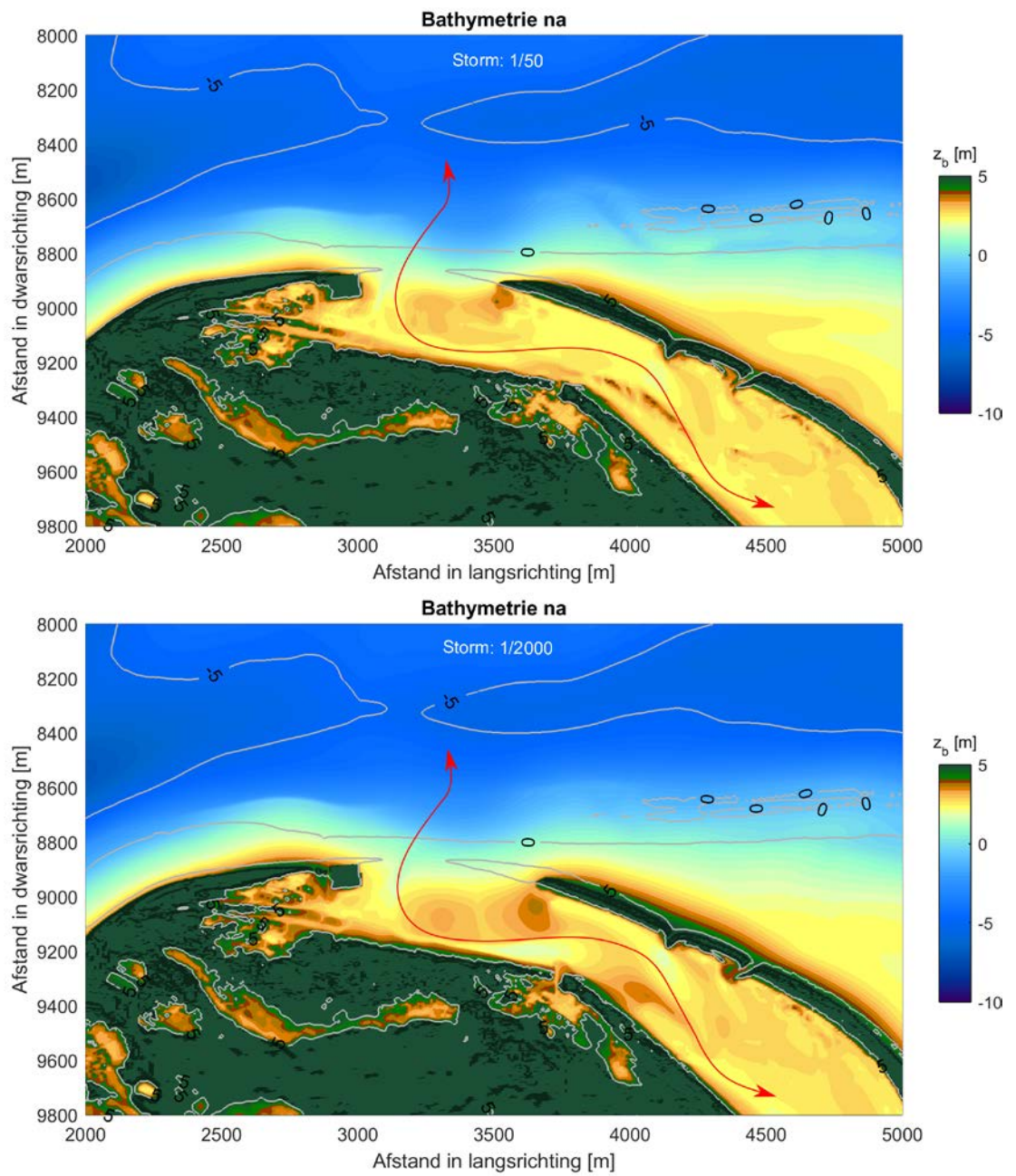
Figuur 4.36 Duinerosie van de eerste zeereep voor scenario 1 (2015) zoals berekend door XBeach. Getallen zijn relatief weergegeven ten opzichte van de erosie opgetreden tijdens de Sinterklaasstorm. Raai 320 en 340 eroderen minder omdat er nog maar weinig beschikbaar is. Raai 360 erodeert juist meer omdat de doorbraak in het model zich naar het oost uitbreidt.



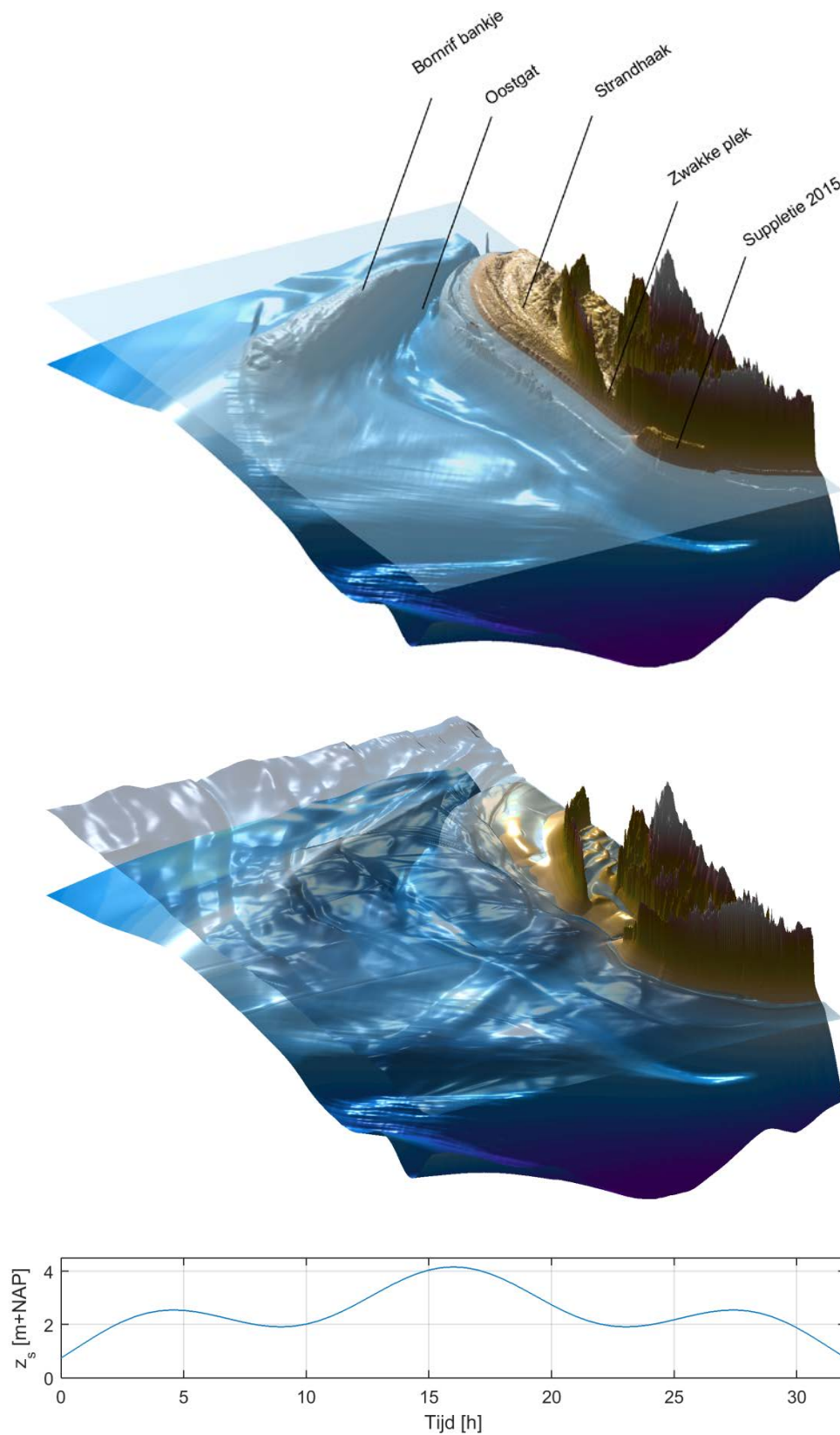
Figuur 4.37 Bathymetrie na de storm voor scenario 1 (2015) voor meerdere stormen zoals berekend door XBeach



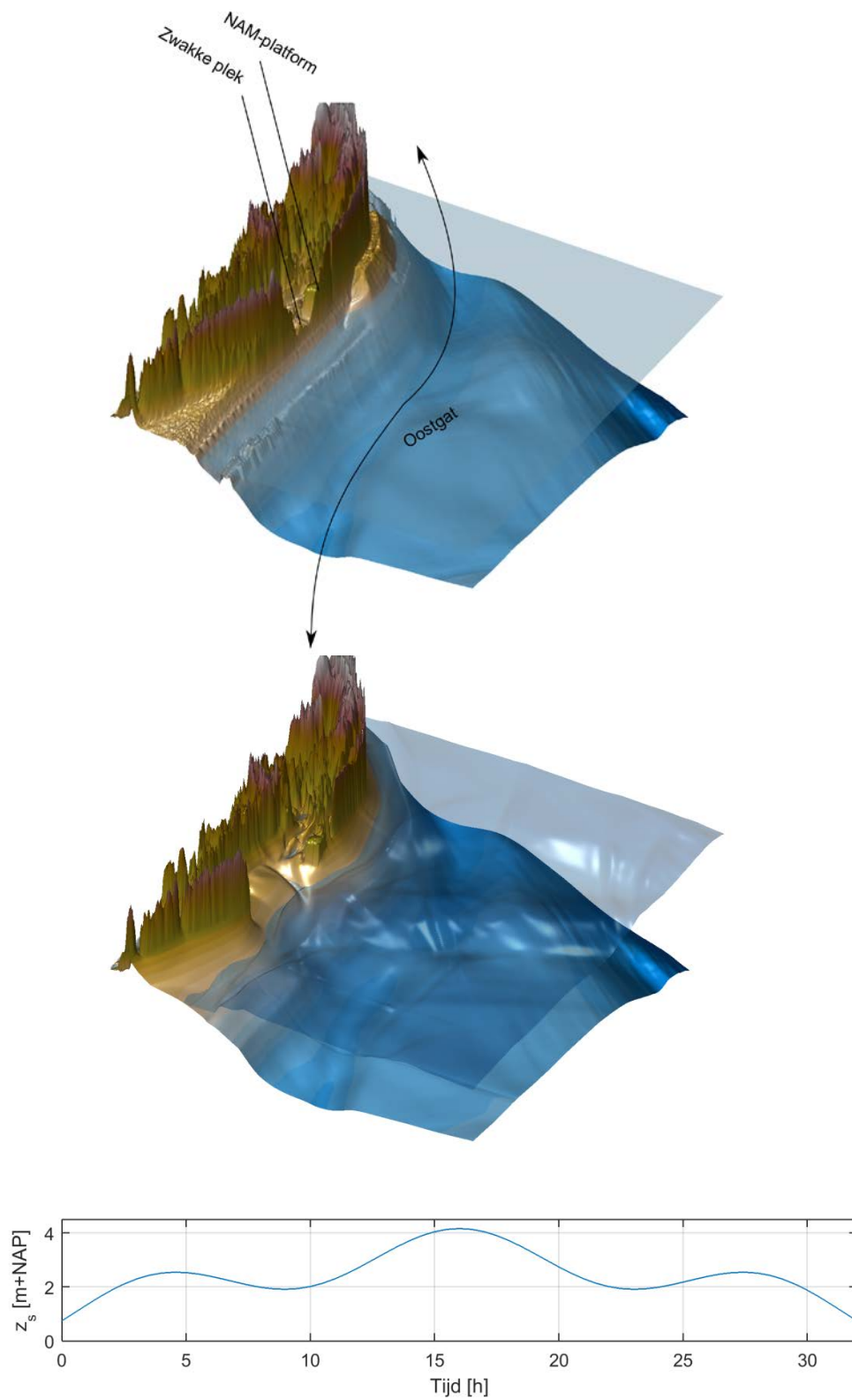
Figuur 4.38 Sedimentatie en erosie na de storm voor scenario 1 (2015) voor meerdere stormen zoals berekend door XBeach. Blauw is erosie en rood sedimentatie.



Figuur 4.39 bathymetrie na de simulatie voor scenario 1 (2015) en storm 1/50 (bovenpaneel) en storm 1/2000 (benedenpaneel) zoals berekend door XBeach. In rood is het geconstateerde meanderen aangegeven.



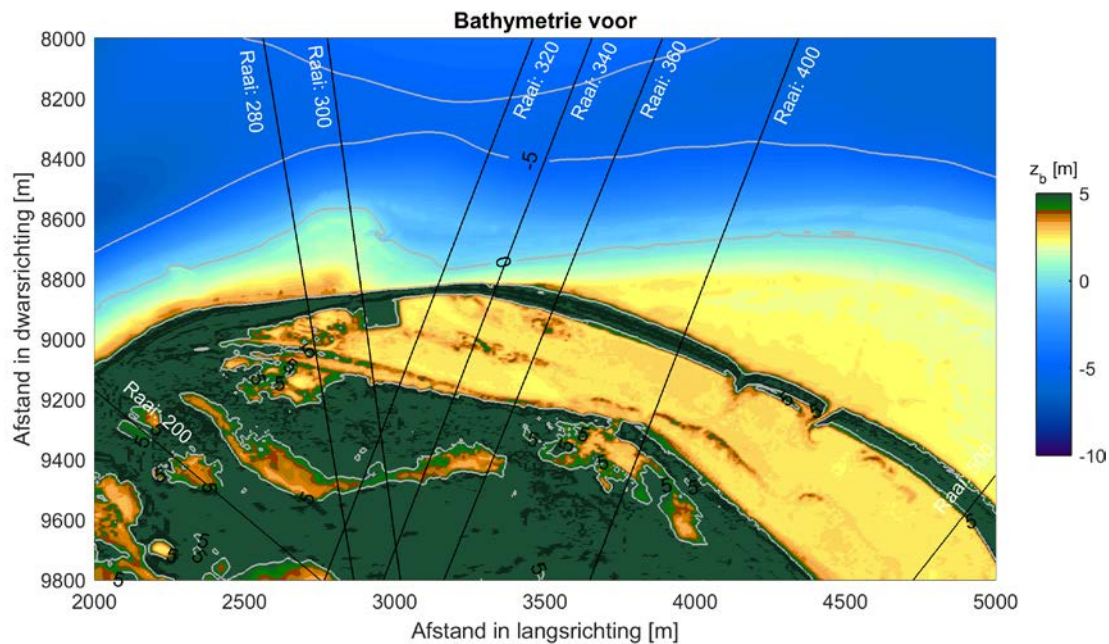
Figuur 4.40 Overzichtsanimatie: bathymetrie voor (boven) en gesimuleerd (onder) voor scenario 1 (jaar: 2015) voor een 1/2000 storm zoals berekend door XBeach. Zie bijbehorende animaties voor details.



Figuur 4.41 Detailanimatie: bathymetrie voor (boven) en gesimuleerd (onder) voor scenario 1 (jaar: 2015) voor een 1/2000 storm zoals berekend door XBeach. Zie bijbehorende animaties voor details.

#### 4.6.3 Scenario 2: meer duinvolume in probleemgebied (jaar: 2011)

De situatie in 2011 is sterker dan de huidige situatie (jaar 2015) aangezien er meer duinvolume in de eerste zeereep bij het probleemgebied zit. In 2011 was er een grote suppletie (1.89 miljoen m<sup>3</sup>) uitgevoerd die voornamelijk zichtbaar is op een afstand van 2000 tot 3000 meter in langsricting (raai 200 – 300). Het gevolg is dat kust van Ameland Noordwest een kleine bolling kent waardoor de nulmeterlijn rond het NAM-platform de kust inloopt. Vergeleken met twee jaar later (jaar: 2013) is er minder sediment tussen 0 en +3 meter voor raai 320 t/m 360.



Figuur 4.42 Bathymetrie van Ameland Noordwest voor scenario 2 (jaar: 2011)

Tijdens een storm met een terugkeerfrequentie van 1/10 jaar treedt naar verwachting over een groot deel van de eerste zeereep duinerosie op (Figuur 4.45). Daarnaast wordt het zand op de sedimentbult (als gevolg van de suppletie) in het model herverdeeld. Er komt zowel materiaal ten oosten (richting de strandhaak) als ten westen (richting het Borddiep) terecht. Raai 320 en 340 eroderen 80 a 90 m<sup>3</sup>/m. De overige raaien eroderen minder dan 30 m<sup>3</sup>/m. De eerste zeereep breekt in XBeach bij deze stormen nog niet door.

Bij een storm met hogere terugkeerperiode (bijvoorbeeld van 1/50 jaar) erodeert naar verwachting het gehele duin tussen 320 en 340 en treedt er overwash op waardoor sediment wordt afgezet in de duinvallei in de vorm van washover fans. Als gevolg hiervan komt er zee-water in de duinvallei. Vanaf een storm met een terugkeerfrequentie van 1/100 jaar zal er naar verwachting een sluffer worden gevormd en stromen grotere hoeveelheden zeewater de vallei in (Figuur 4.43). De diepte van de sluffer neemt toe naar mate de intensiteit (en dus de terugkeerperiode) toeneemt. Vanaf een storm van 1/1000 jaar kan mogelijk het achterliggende duinmassief aangevallen worden door lange golven. Grotere stormen laten een vergelijkbaar patroon zien als stormen met een terugkeerfrequentie van 1/100 tot 1/500 jaar (zie sedimentatie en erosie patronen in Figuur 4.46). De duinerosie neemt echter toe van gemiddeld 64 m<sup>3</sup>/m voor een van 1/100 jaar tot 116 m<sup>3</sup>/m voor een storm met een terugkeerfrequentie van 1/2000 jaar (Tabel 4.6).

De erosiepatronen (i.e. hoeveel erosie er in welke raai plaatsvindt) komt overeen met deze van de Sinterklaasstorm. De meest erosie wordt verspeld tussen raai 320 en 360, net zoals gemeten tijdens de Sinterklaasstorm. Dit is een gevolg van de topo- en bathymetrie. Materi-

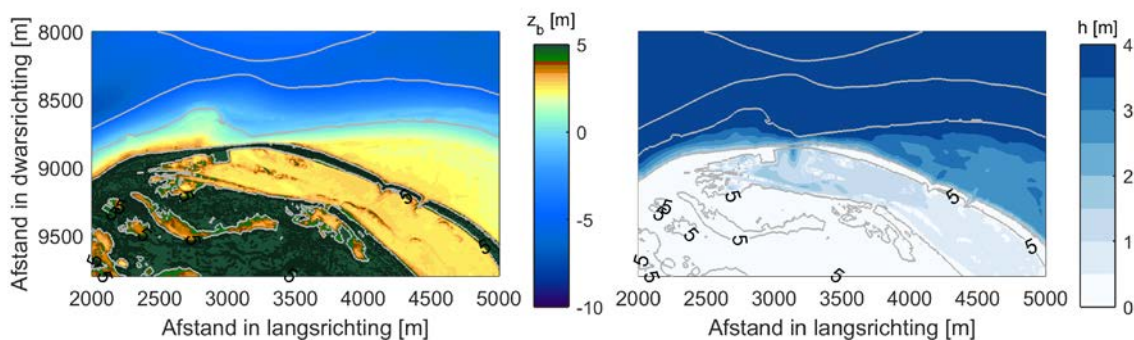


aal kan in dit geval eroderen op raai 320 en 340 (dit in tegenstelling tot scenario 1). Daarnaast resulteert de oriëntatie van het Bornrif in een lokale hotspot van korte golfenergie en dus meer sedimentafvoer.

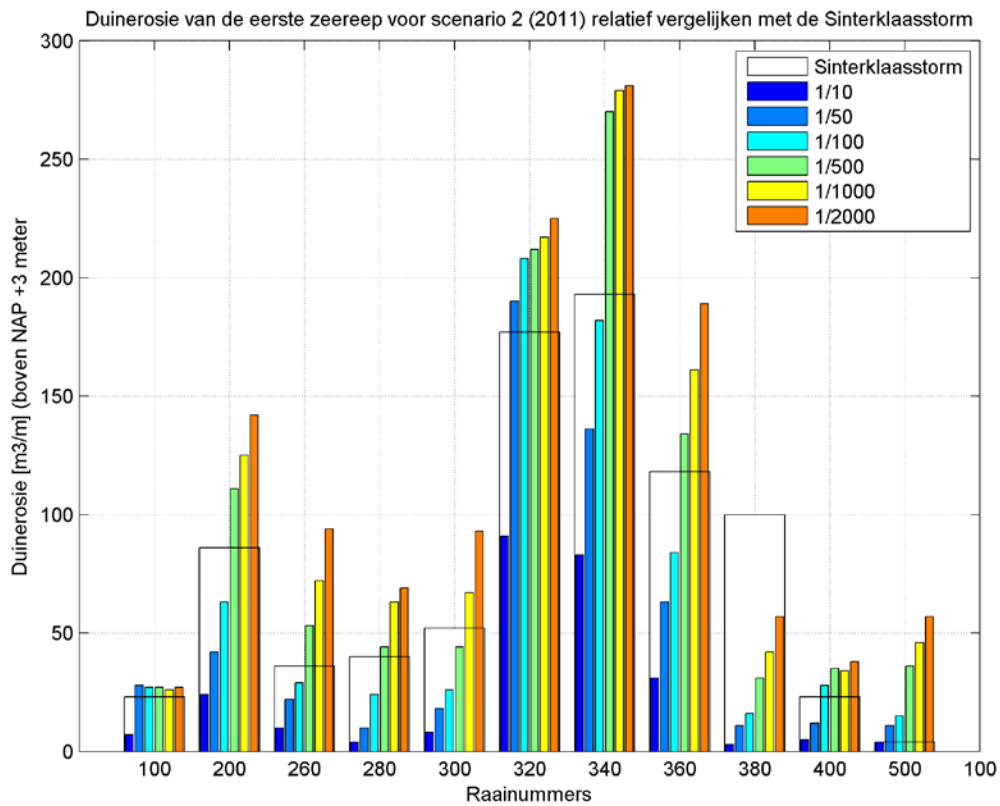
De morfologische ontwikkelingen zijn inzichtelijk gemaakt in de bij dit rapport meegeleverde animaties. In Figuur 4.47 en Figuur 4.48 is de bathymetrie van scenario 2 voor en na een 1/2000 storm voor geheel Ameland NW (overzichtsanimatie) en meer gefocust op raai 300-360 (detailanimatie). Voor doorsnedes van verschillende raaien wordt verwezen naar Appendix B2.

Tabel 4.6 Duïnerosie van de eerste zeereep voor scenario 2 (2011) zoals berekend door XBeach. Percentage is duïnerosie volume van scenario 2 gedeeld door volume in scenario 1 (huidige situatie) \* 100%. Percentages boven 100% is meer duïnerosie, onder 100% is minder duïnerosie.

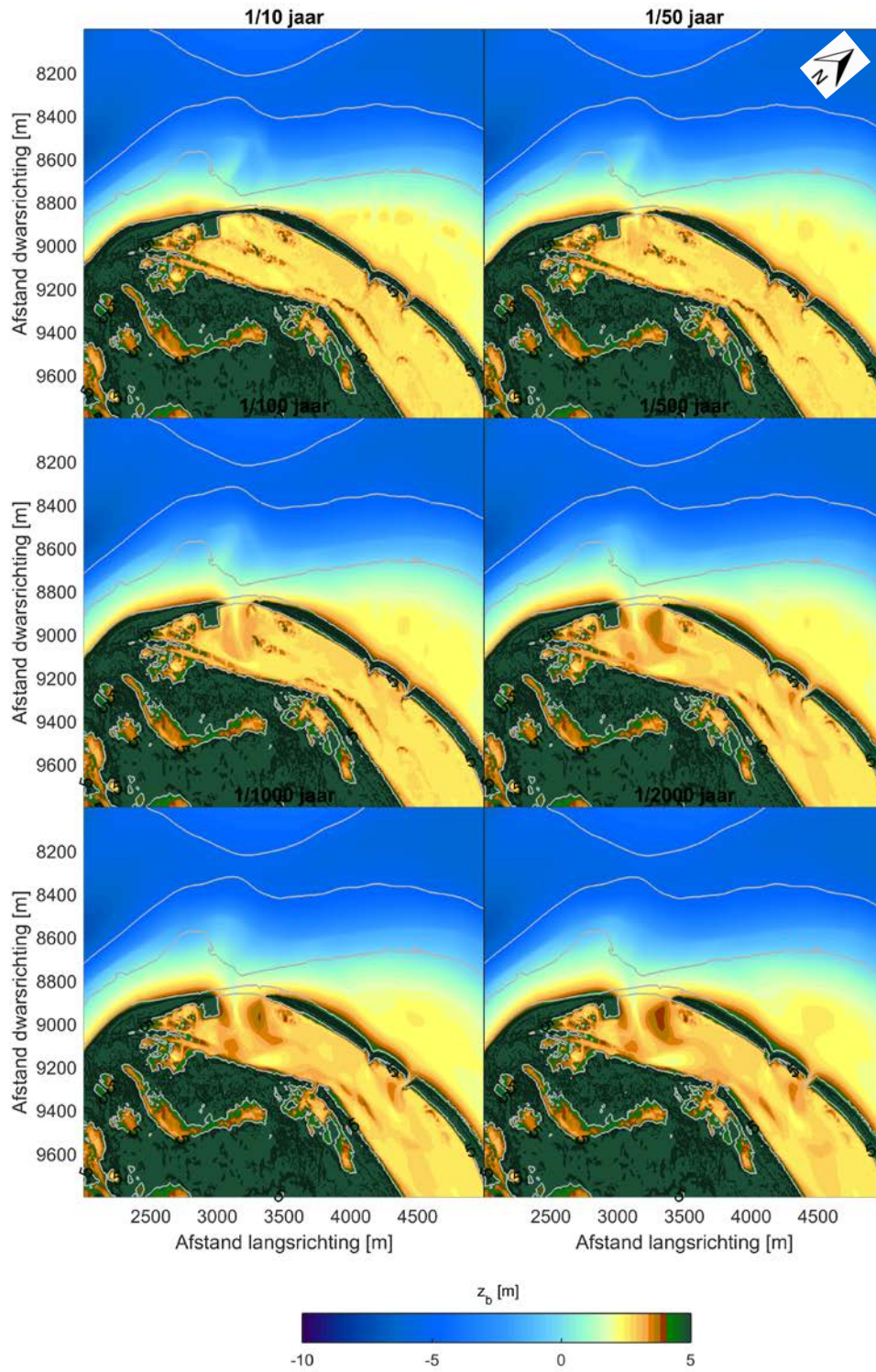
Raai	1/10		1/50		1/100		1/500		1/1000		1/2000	
100	7	38%	28	83%	27	83%	27	90%	26	93%	27	99%
200	24	149%	42	96%	63	117%	111	116%	125	114%	142	111%
260	10	10%	22	16%	29	18%	53	25%	72	31%	94	37%
280	4	21%	10	22%	24	43%	44	52%	63	59%	69	58%
300	8	13%	18	18%	26	23%	44	28%	67	36%	93	43%
320	91	570%	190	940%	208	1081%	212	696%	217	663%	225	555%
340	83	117%	136	177%	182	256%	270	372%	279	341%	281	324%
360	31	15%	63	19%	84	20%	134	29%	161	34%	189	39%
380	3	25%	11	28%	16	30%	31	31%	42	30%	57	35%
400	5	22%	12	38%	28	89%	35	85%	34	72%	38	55%
500	4	341%	11	101%	15	94%	36	131%	46	130%	57	102%
Gemid.	24	50%	49	61%	64	69%	91	75%	103	77%	116	132%



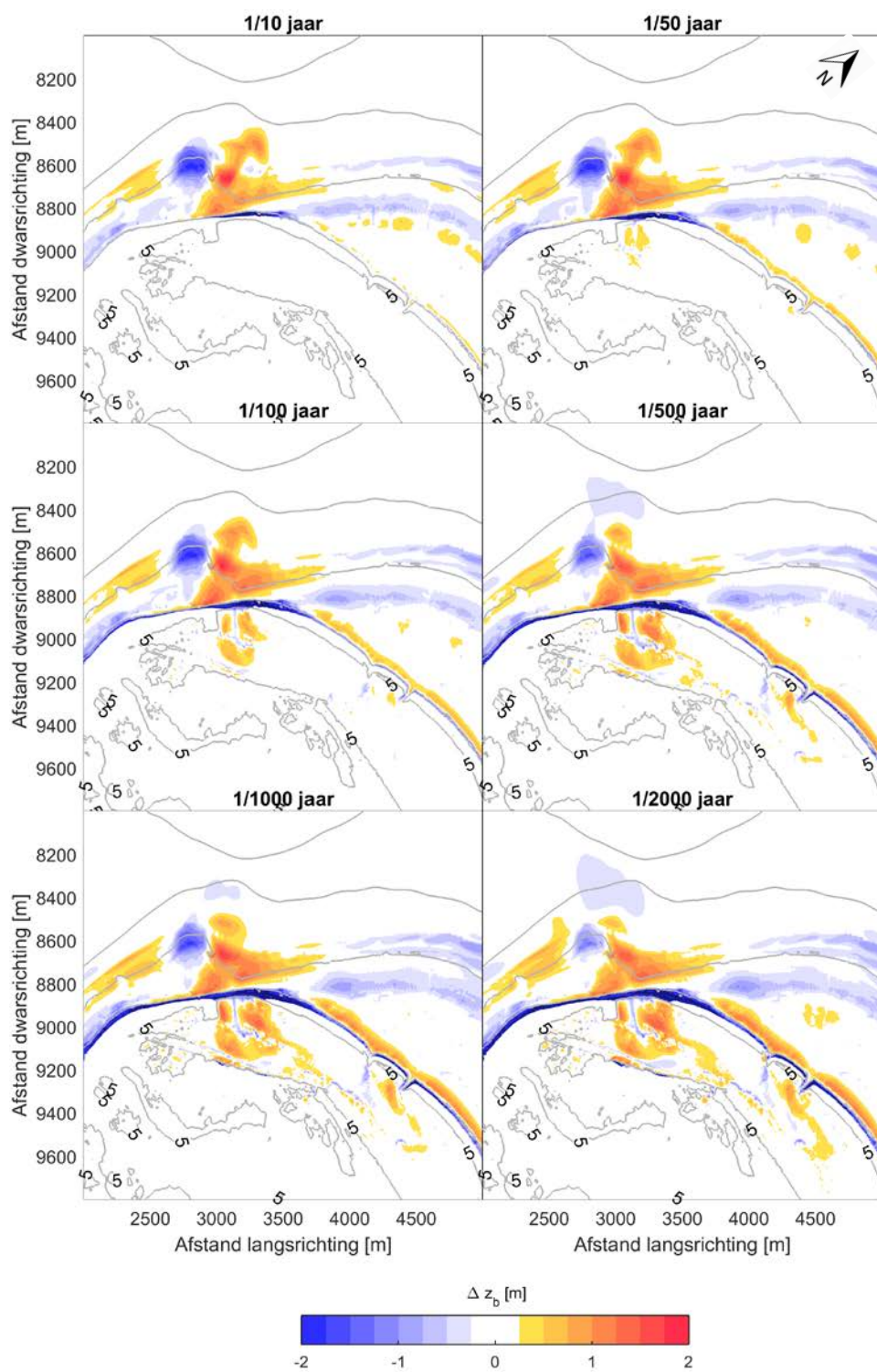
Figuur 4.43 Rechts: maximale waterdieptes voor scenario 2 (2011) en storm 1/100 zoals berekend door XBeach



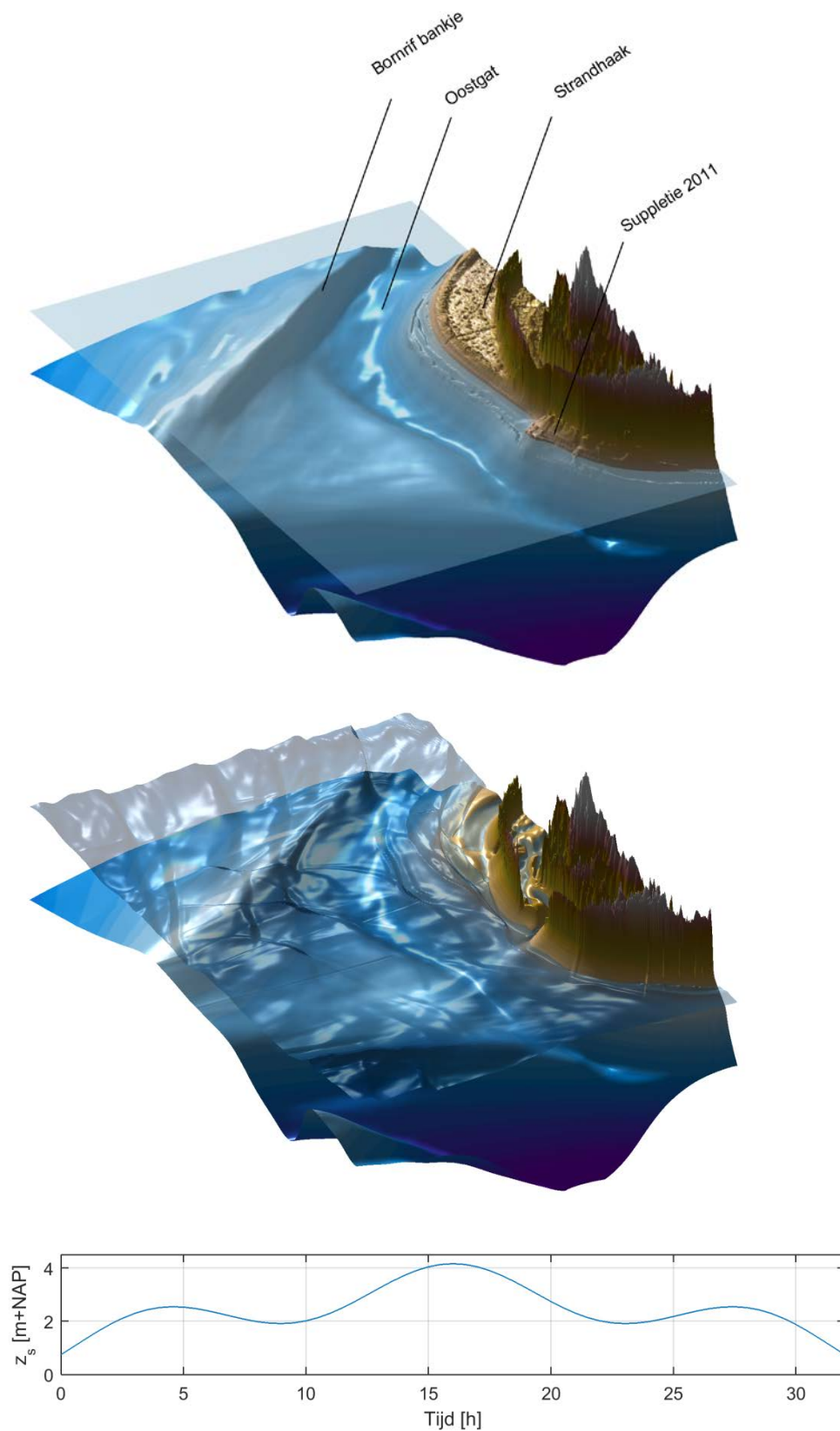
Figuur 4.44 Duinerosie van de eerste zeereep voor scenario 2 (2011) zoals berekend door XBeach. Getallen zijn relatief weergegeven ten opzichte van de erosie opgetreden tijdens de Sinterklaasstorm. Sedimentpatronen komen overeen met de gemeten duinerosie tijdens de Sinterklaasstorm.



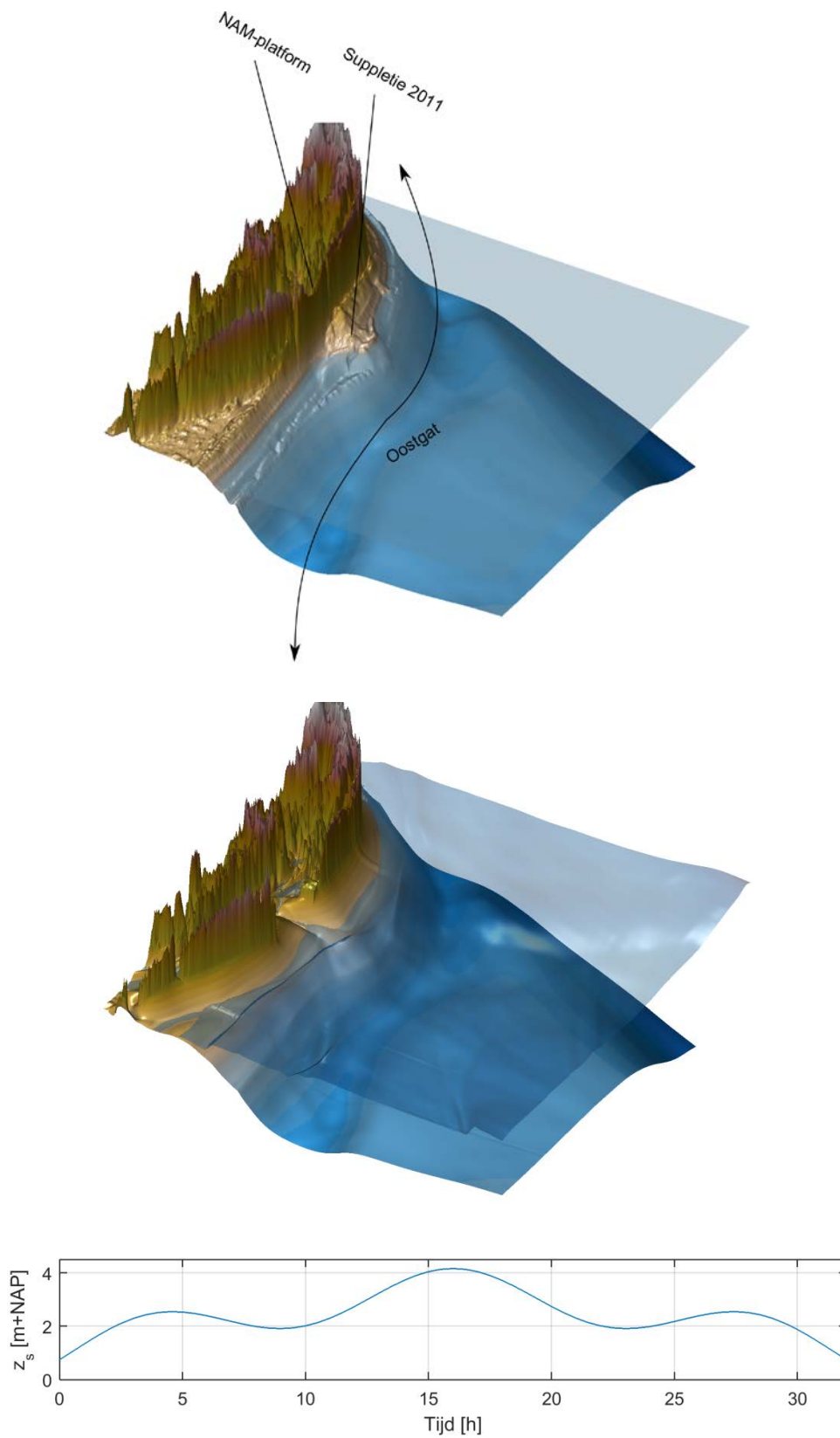
Figuur 4.45 Bathymetrie na de storm voor scenario 2 (2011) voor meerdere stormen zoals berekend door XBeach



Figuur 4.46 Sedimentatie en erosie voor scenario 2 (2011) voor meerdere stormen zoals berekend door XBeach



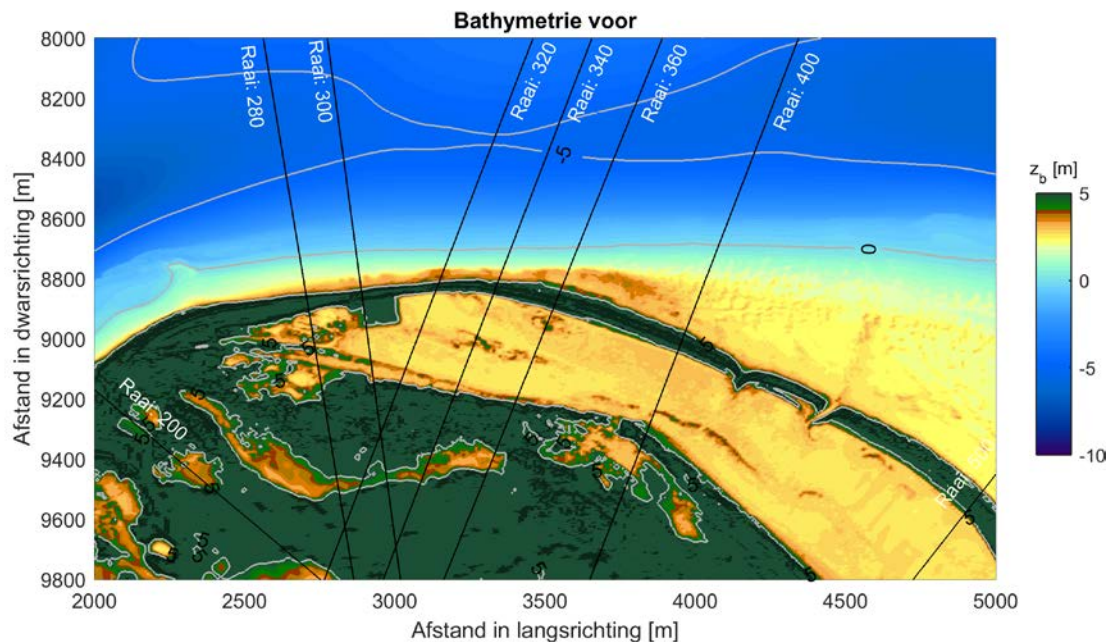
Figuur 4.47 Overzichtsanimatie: bathymetrie voor (boven) en gesimuleerd (onder) voor scenario 2 (jaar: 2011) voor een 1/2000 storm zoals berekend door XBeach. Zie bijbehorende animaties voor details.



Figuur 4.48 Detailanimatie: bathymetrie voor (boven) en gesimuleerd (onder) voor scenario 2 (jaar: 2011) voor een 1/2000 storm zoals berekend door XBeach. Zie bijbehorende animaties voor details.

#### 4.6.4 Scenario 3: substantieel meer duinvolume in probleemgebied (jaar: 2013)

De situatie in 2013 is een stuk sterker dan de huidige situatie (jaar 2015) aangezien er substantieel meer duinvolume in de eerste zeereep bij het probleemgebied zit. Vergeleken met 2011 heeft namelijk de strandsuppletie zich richting beide zijdes verspreid. Het gevolg is dat de zwakke plek (tussen raai 320 en 340) meer sediment heeft tussen 0 en 3 m+NAP dan in het jaar 2011. Sediment is hier gekomen als het gevolg van eolisch transport. Daarnaast zijn er embryonale duinen op de strandhaak te zien in Figuur 4.49.



Figuur 4.49 Bathymetrie van Ameland Noordwest voor scenario 3 (jaar: 2013)

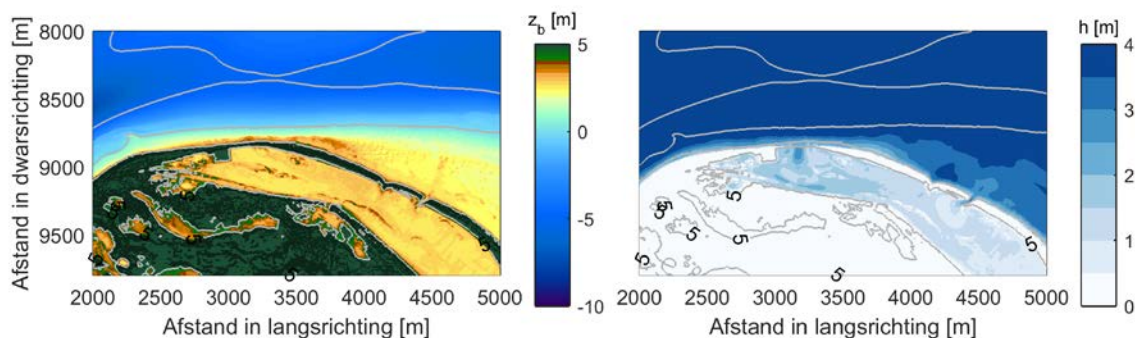
Tijdens de uitgevoerde XBeach simulaties zien we dat tot en met een storm met een terugkeerfrequentie van 1/100 jaar er alleen duinerosie optreedt en dat nergens water over de eerste duinenrij heen komt (Figuur 4.52). De duinerosie volumes nemen wel toe voor grotere stormen. Voor de zwakke plek resulteert dit in duinerosie van 80-100 m<sup>3</sup>/m voor een terugkeerfrequentie van 1/10 jaar tot 170-200 m<sup>3</sup>/m voor een 1/100 storm. Depositie vindt plaats voor het NAM-platform (afstand in langsrichting 2500-3000 meter) en vanaf raai 400 (afstand in langsrichting 3500 – 4000 meter), zie Tabel 4.7 en Figuur 4.51. De eerste zeereep breekt bij deze stormen in XBeach nog niet door.

Bij stormen met een terugkeerfrequentie van 1/500 jaar en hoger vindt er waarschijnlijk overwash plaats en ontstaat er een sluffer (Figuur 4.50). Naar mate de intensiteit van de storm toeneemt, neemt ook de diepte van de sluffer toe. Voor stormen met een terugkeerfrequentie van 1/2000 jaar vindt er mogelijk ook duinerosie plaats achter in de duinvallei bij het overige duinmassief (Figuur 4.53). De erosiepatronen komen overeen met deze van de Sinterklaas-storm en scenario 2 (Figuur 4.53). Dit is wederom het een gevolg van de topo- en bathymetrie.

De morfologische ontwikkelingen zijn inzichtelijk gemaakt in de bij dit rapport meegeleverde animaties. In Figuur 4.54 en Figuur 4.55 is de bathymetrie van scenario 3 voor en na een 1/2000 storm weergegeven voor geheel Ameland NW (overzichtsanimatie) en meer gefocust op raai 300-360 (detailanimatie). Voor doorsnedes van verschillende raaien wordt verwezen naar Appendix B3.

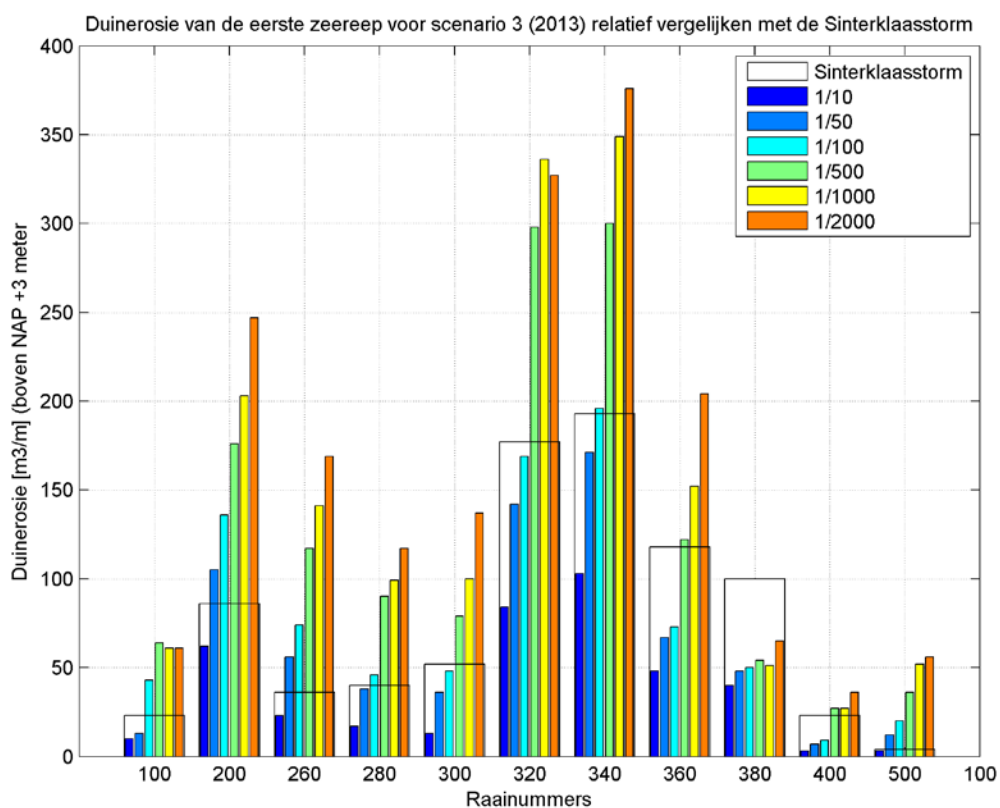
Tabel 4.7 Duinerosie van de eerste zeereep voor scenario 3 (2013) zoals berekend door XBeach. Percentage is duinerosie volume van scenario 2 gedeeld door volume in scenario 1 (huidige situatie) \* 100%. Percentages boven 100% is meer duinerosie, onder 100% is minder duinerosie.

Raai	1/10		1/50		1/100		1/500		1/1000		1/2000	
100	10	58%	13	37%	43	132%	64	213%	61	221%	61	225%
200	62	385%	105	243%	136	251%	176	185%	203	184%	247	193%
260	23	23%	56	40%	74	46%	117	55%	141	62%	169	67%
280	17	92%	38	87%	46	80%	90	108%	99	94%	117	97%
300	13	24%	36	35%	48	43%	79	49%	100	54%	137	63%
320	84	526%	142	704%	169	879%	298	980%	336	1026%	327	806%
340	103	146%	171	222%	196	275%	300	412%	349	427%	376	435%
360	48	23%	67	20%	73	18%	122	26%	152	32%	204	42%
380	40	298%	48	125%	50	94%	54	54%	51	37%	65	39%
400	3	15%	7	21%	9	29%	27	66%	27	58%	36	51%
500	3	308%	12	114%	20	123%	36	128%	52	146%	56	101%
Gemid.	37	76%	63	79%	78	85%	124	103%	143	107%	163	109%

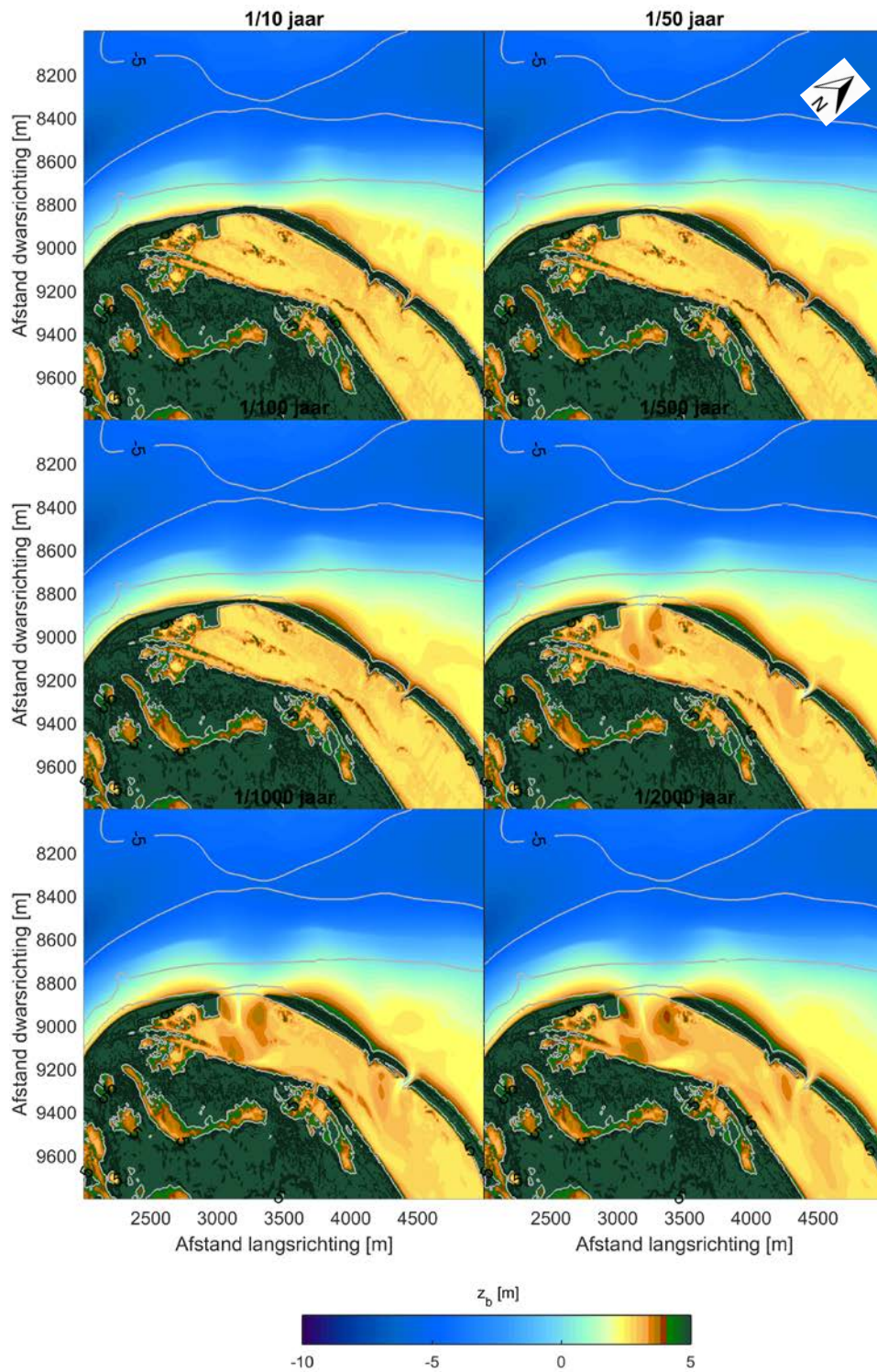


Figuur 4.50 Rechts: maximale waterdieptes voor scenario 3 (2013) en storm 1/500 zoals berekend door XBeach

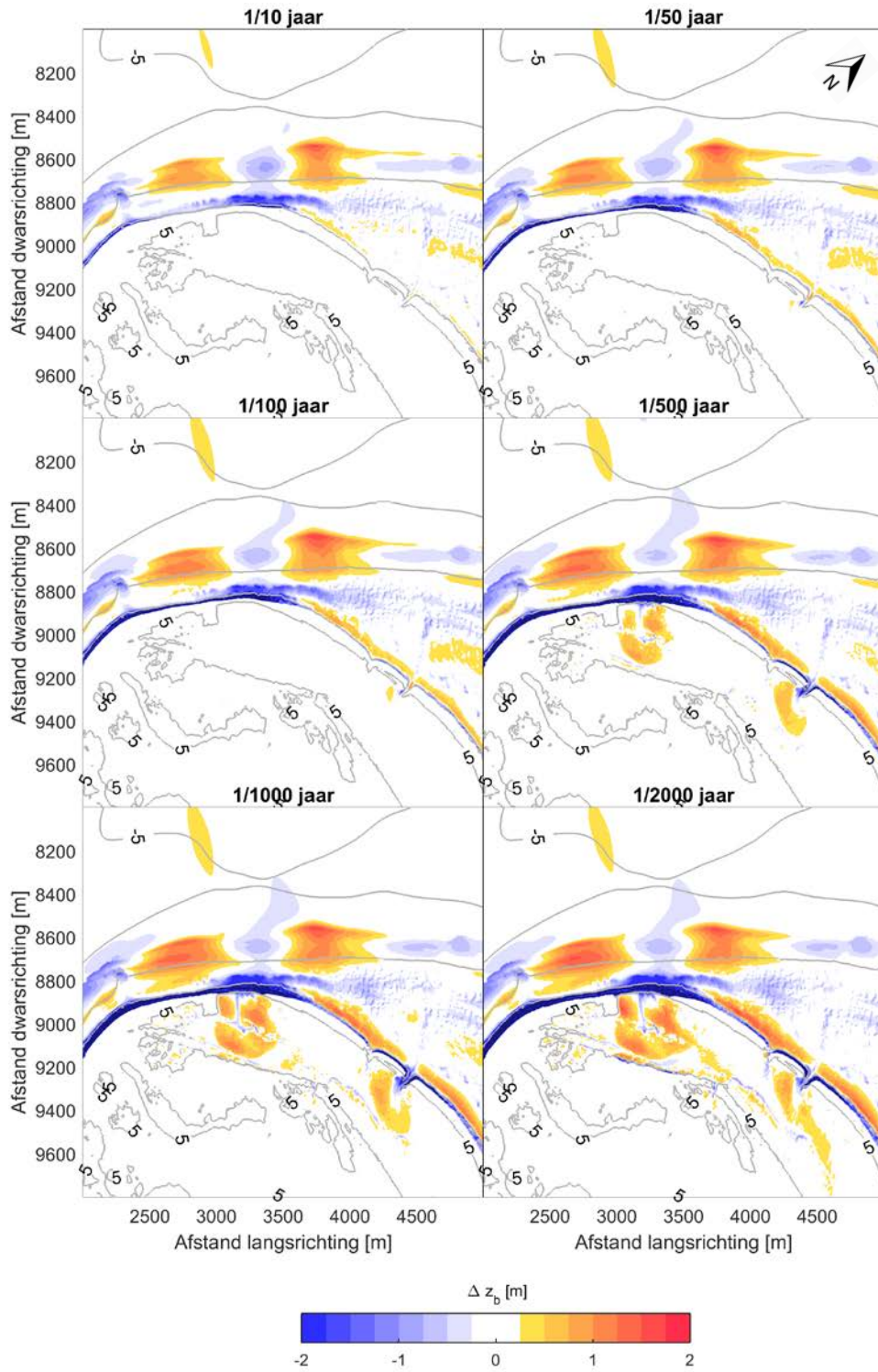




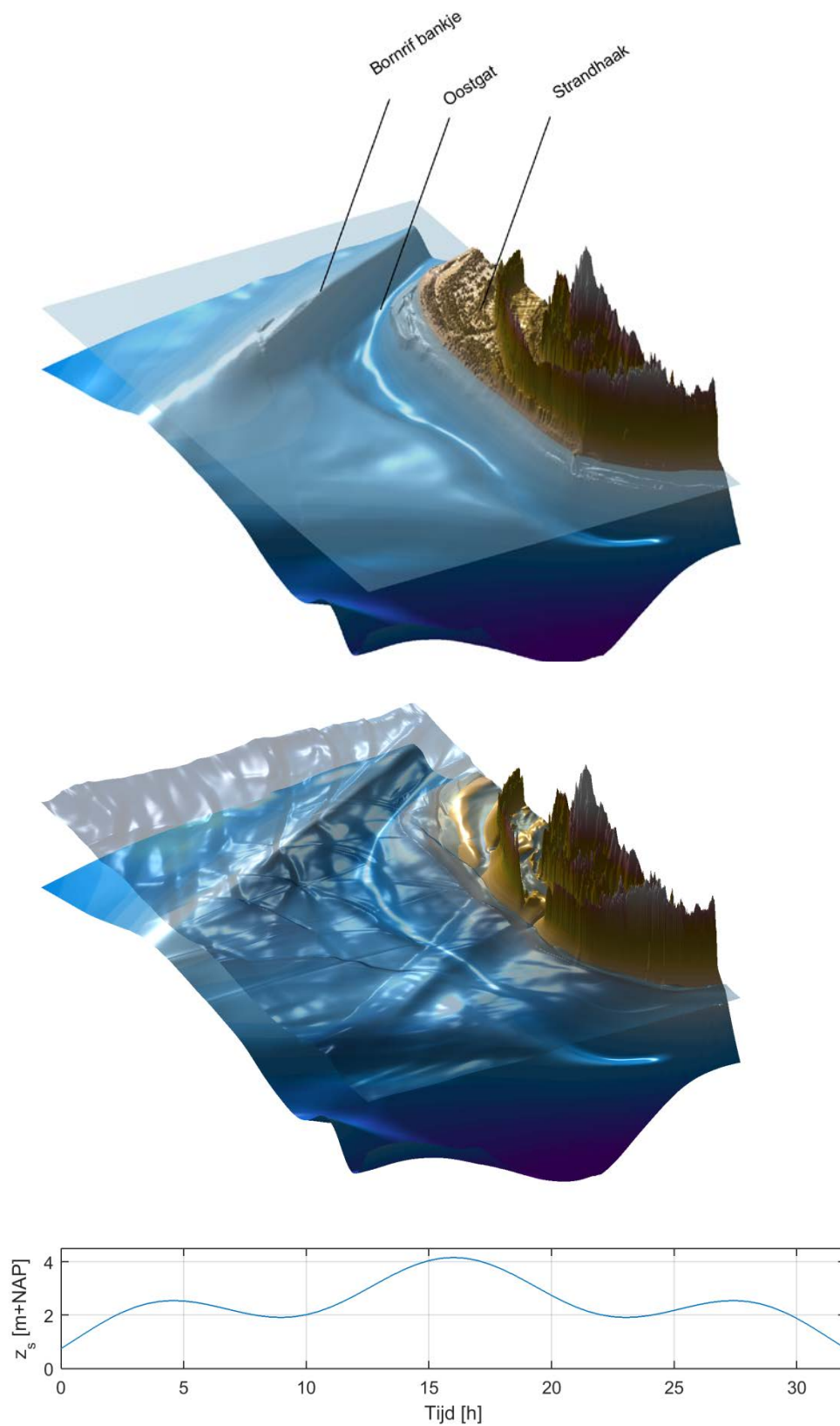
Figuur 4.51 Duinerosie van de eerste zeeoep voor scenario 3 (2013) zoals berekend door XBeach. Getallen zijn relatief weergegeven ten opzichte van de erosie opgetreden tijdens de Sinterklaasstorm. Sedimentpatronen komen overeen met de gemeten duinerosie tijdens de Sinterklaasstorm en scenario 2.



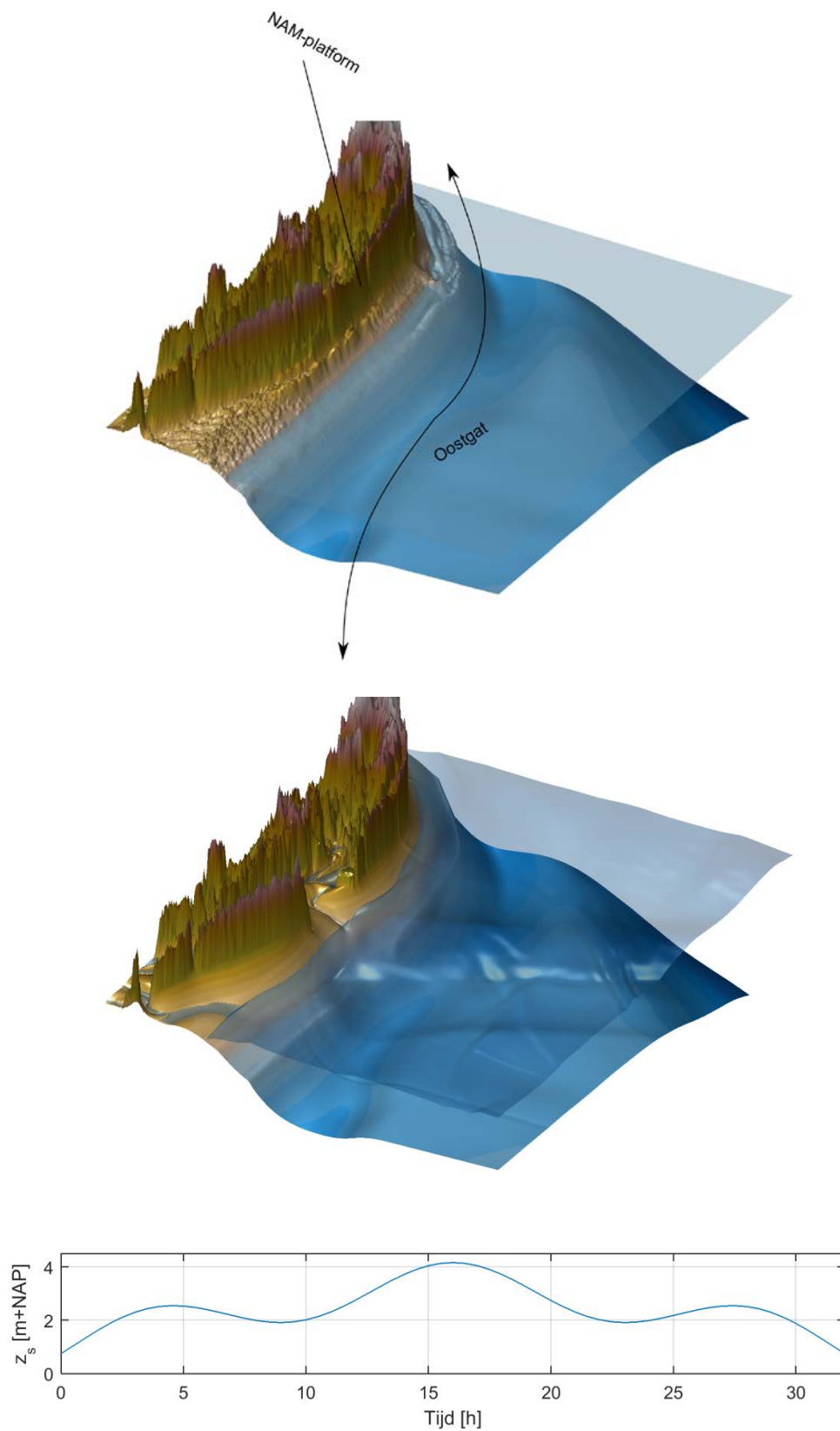
Figuur 4.52 Bathymetrie na de storm voor scenario 3 (2013) voor meerdere stormen zoals berekend door XBeach



Figuur 4.53 Sedimentatie en erosie voor scenario 3 (2013) voor meerdere stormen zoals berekend door XBeach



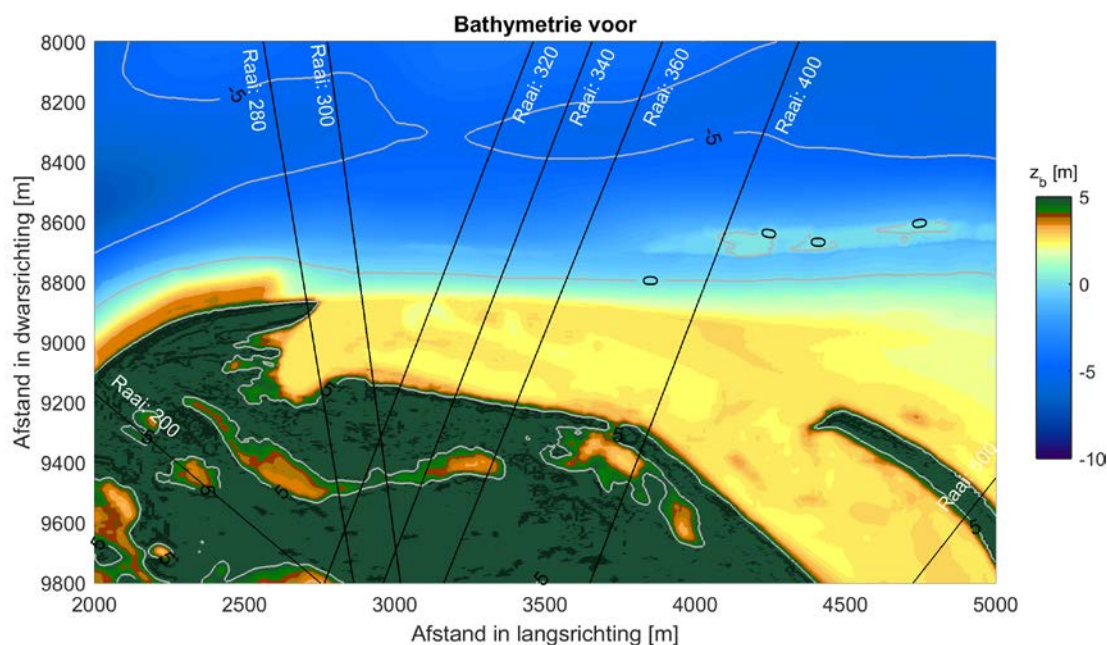
Figuur 4.54 Overzicht: bathymetrie voor (boven) en gesimuleerd (onder) voor scenario 3 (jaar: 2013) voor een 1/2000 storm zoals berekend door XBeach. Zie bijbehorende animaties voor details.



Figuur 4.55 Detail: bathymetrie voor (boven) en gesimuleerd (onder) voor scenario 3 (jaar: 2013) voor een 1/2000 storm zoals berekend door XBeach. Zie bijbehorende animaties voor details.

## 4.6.5 Scenario 4: zonder eerste zeereep (jaar: 2035)

Een mogelijk toekomstige situatie is er één waarbij een groot deel van de eerste zeereep is weg geërodeerd als gevolg van de structurele erosie van Ameland Noordwest. Dit betekent dat er een duinvallei van ongeveer 2 meter+NAP overblijft waar tijdens stormcondities water in loopt. De suppletie uit 2015 is nog wel in de bathymetrie van Figuur 4.56 zichtbaar, maar het NAM-platform is afgebroken.



Figuur 4.56 Bathymetrie van Ameland Noordwest voor scenario 4 (jaar: 2035)

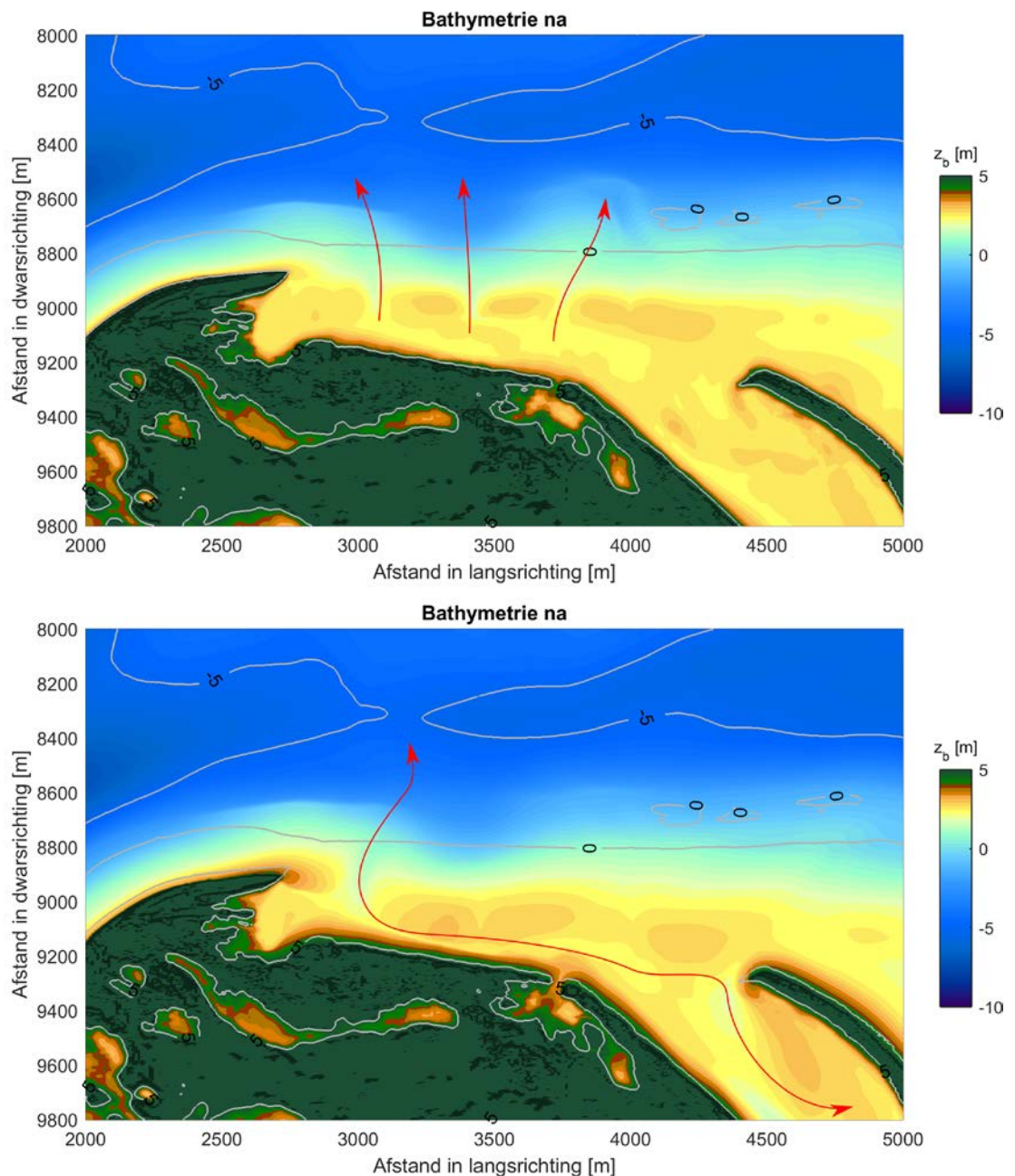
Voor een storm met een terugkeerfrequentie van 1/10 jaar zien we in het model de grootste morfologische veranderingen rond de waterlijn. De patronen verder vanaf de zeereep laten een vergelijkbaar patroon zien als Hoofdstuk 4.6.2 (scenario 1, jaar: 2015). Het Bornrif erodeert op de rug en er vindt depositie richting de kust plaats. Daarnaast erodeert de strand-suppletie uit 2015. Dit materiaal komt hoogst waarschijnlijk zowel terecht aan westelijke (Borndiep) als oostelijke zijde (voor het voormalige NAM-platform). Ook constateren we de vorming van geulen in de lagere delen van de duinvallei (zie Figuur 4.57). Daarnaast loopt water de duinvallei in (Figuur 4.58).

Voor stormen met een hogere terugkeerperiode (1/500, 1/1000 en 1/2000) zien we dat er één geul gaat domineren van de drie geulen die we zagen bij een storm van 1/10 jaar. Deze geul, Figuur 4.57 of Figuur 4.61, ontstaat op afstand in langsrichting van 3000 meter (raai 300 en 320) en voert water en materiaal af tijdens lagere waterstanden. Daarnaast wordt het overige duinmassief voor deze terugkeerperiodes waarschijnlijk wel bereikt. Erosie van het duinmassief is echter beperkt en depositie vindt voornamelijk plaats in de duinvallei (Figuur 4.62). Daarnaast ontstaat er een tweede geul op een langsafstand van 4500 meter (raai 400-500). Hoewel er grote hoeveelheden water de duinvallei in lopen (waterdiepte 3-4 meter) verwachten we geen water voorbij de primaire waterkering (Figuur 4.58 en Figuur 4.59).

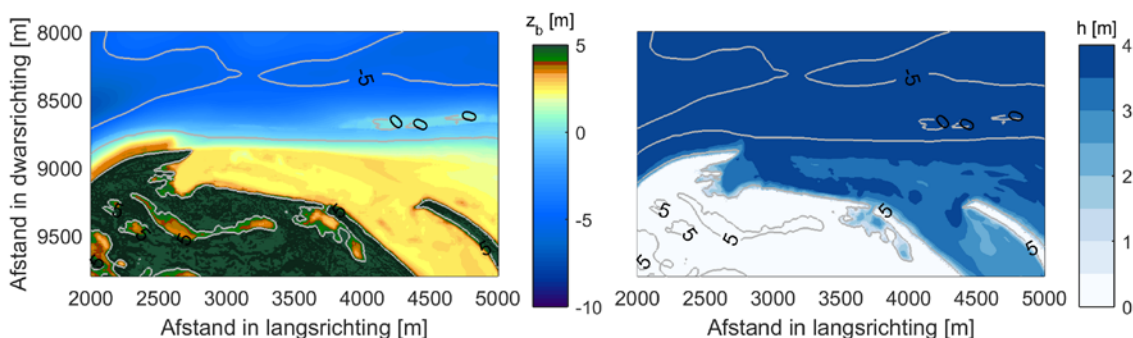
De erosievolumes op raainiveau hebben een ander patroon dan voorgaande scenario's. Doordat de eerste zeereep grotendeels afwezig is zijn de zeereep-gemiddelde duinerosie volumes van de eerste zeereep lager in scenario 4 dan in de situatie in 2015 (scenario 1). Op raainiveau zijn we de erosievolumes vanaf raai 280 en lager toenemen. Dit heeft te maken met de afwezigheid van het duin. Dit heeft invloed op de sedimenttransportpatronen rondom

de kop van Ameland Noordwest, aangezien een deel van het sediment in de duinvallei wordt geduwd door de golfkrachten. Dit resulteert in 20 tot 25% extra duinerosie bij raai 260 en 280 zoals kan worden afgelezen in Tabel 4.8 en Figuur 4.59.

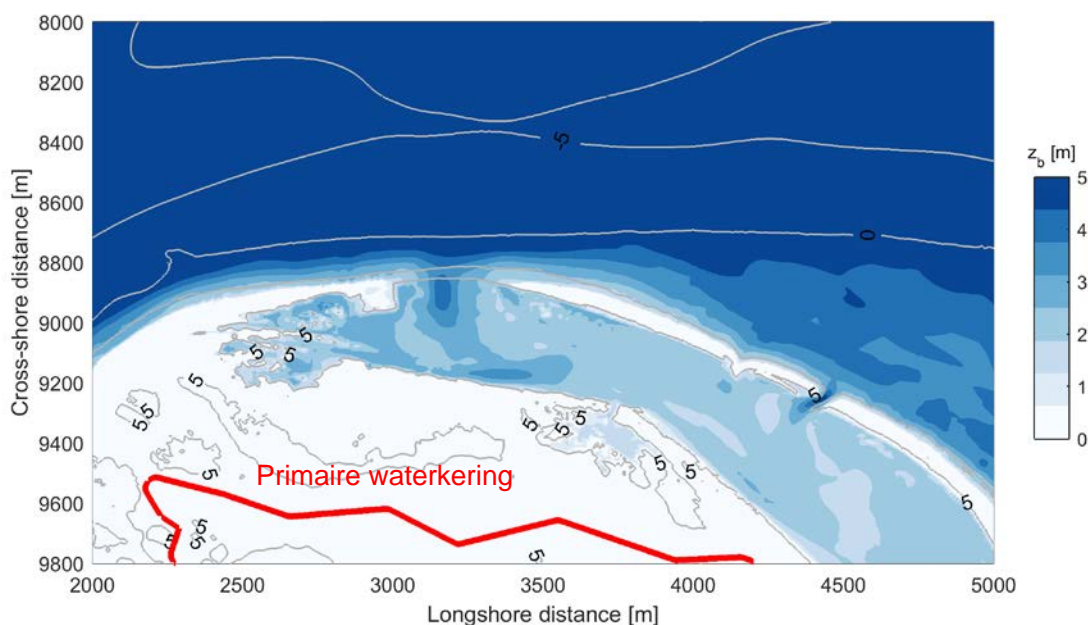
De morfologische ontwikkelingen zijn inzichtelijk gemaakt in de bij dit rapport meegeleverde animaties. In Figuur 4.63 en Figuur 4.64 is de bathymetrie van scenario 4 voor en na een 1/2000 storm weergegeven voor geheel Ameland NW (overzichtsanimatie) en meer gefocust op raai 300-360 (detailanimatie). Voor doorsnedes van verschillende raaien wordt verwezen naar Appendix B4.



Figuur 4.57 Bathymetrie na een 1/10 storm voor scenario 4 (jaar: 2035) met hierin aangegeven de drie gevormde geulen (boven) Bathymetrie na 1/2000 storm voor scenario 4 (jaar: 2035) met hierin aangegeven de drie gevormde geulen (onder).



Figuur 4.58 Rechts: maximale waterdieptes voor scenario 4 (2035) en storm 1/2000 zoals berekend door XBeach. Grote versie van deze Figuur staat hieronder.

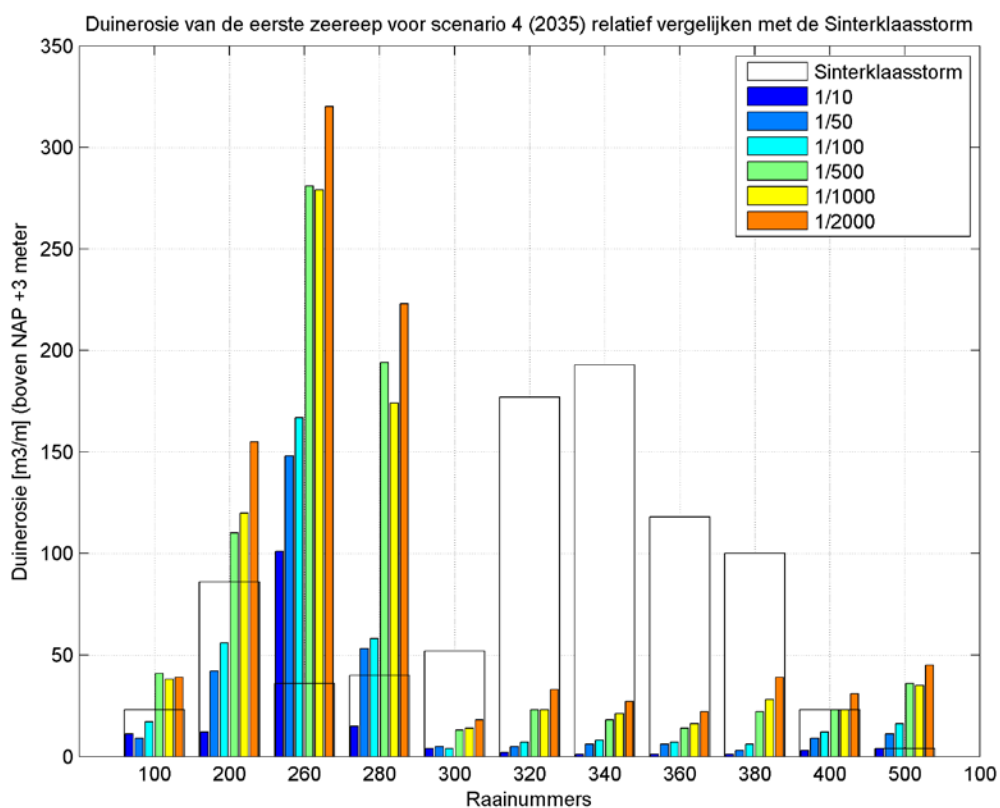


Figuur 4.59 Maximale waterdieptes voor scenario 4 (2035) en storm 1/2000 zoals berekend door XBeach. Rood is de grens van de primaire waterkering.

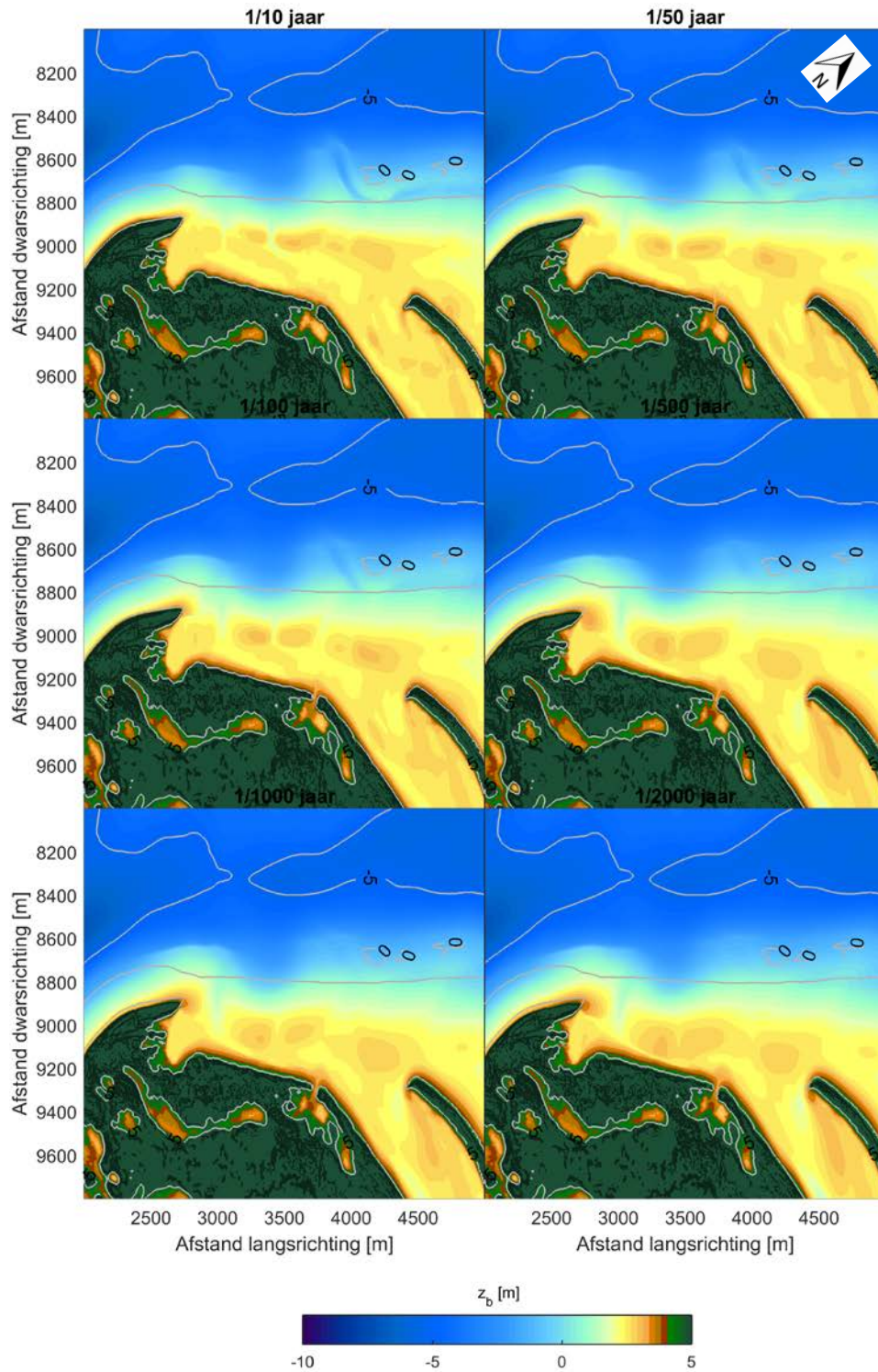
Tabel 4.8 Duinerosie van de eerste zeereep voor scenario 4 (2035) zoals berekend door XBeach. Percentage is duinerosie volume van scenario 2 gedeeld door volume in scenario 1 (huidige situatie) \* 100%. Percentages boven 100% is meer duinerosie, onder 100% is minder duinerosie.

Raai	1/10		1/50		1/100		1/500		1/1000		1/2000	
100	11	60%	9	27%	17	52%	41	136%	38	140%	39	144%
200	12	77%	42	97%	56	103%	110	116%	120	109%	155	121%
260	101	104%	148	105%	167	103%	281	133%	279	122%	320	127%
280	15	80%	53	121%	58	102%	194	231%	174	164%	223	186%
300	4	8%	5	5%	4	4%	13	8%	14	7%	18	8%
320	2	15%	5	23%	7	36%	23	74%	23	69%	33	81%
340	1	2%	6	8%	8	11%	18	25%	21	26%	27	31%
360	1	1%	6	2%	7	2%	14	3%	16	3%	22	4%
380	1	6%	3	9%	6	12%	22	22%	28	20%	39	23%
400	3	13%	9	28%	12	38%	23	56%	23	49%	31	44%
500	4	360%	11	101%	16	99%	36	131%	35	98%	45	81%
Gemid.	14	29%	27	34%	33	35%	70	59%	70	52%	87	58%

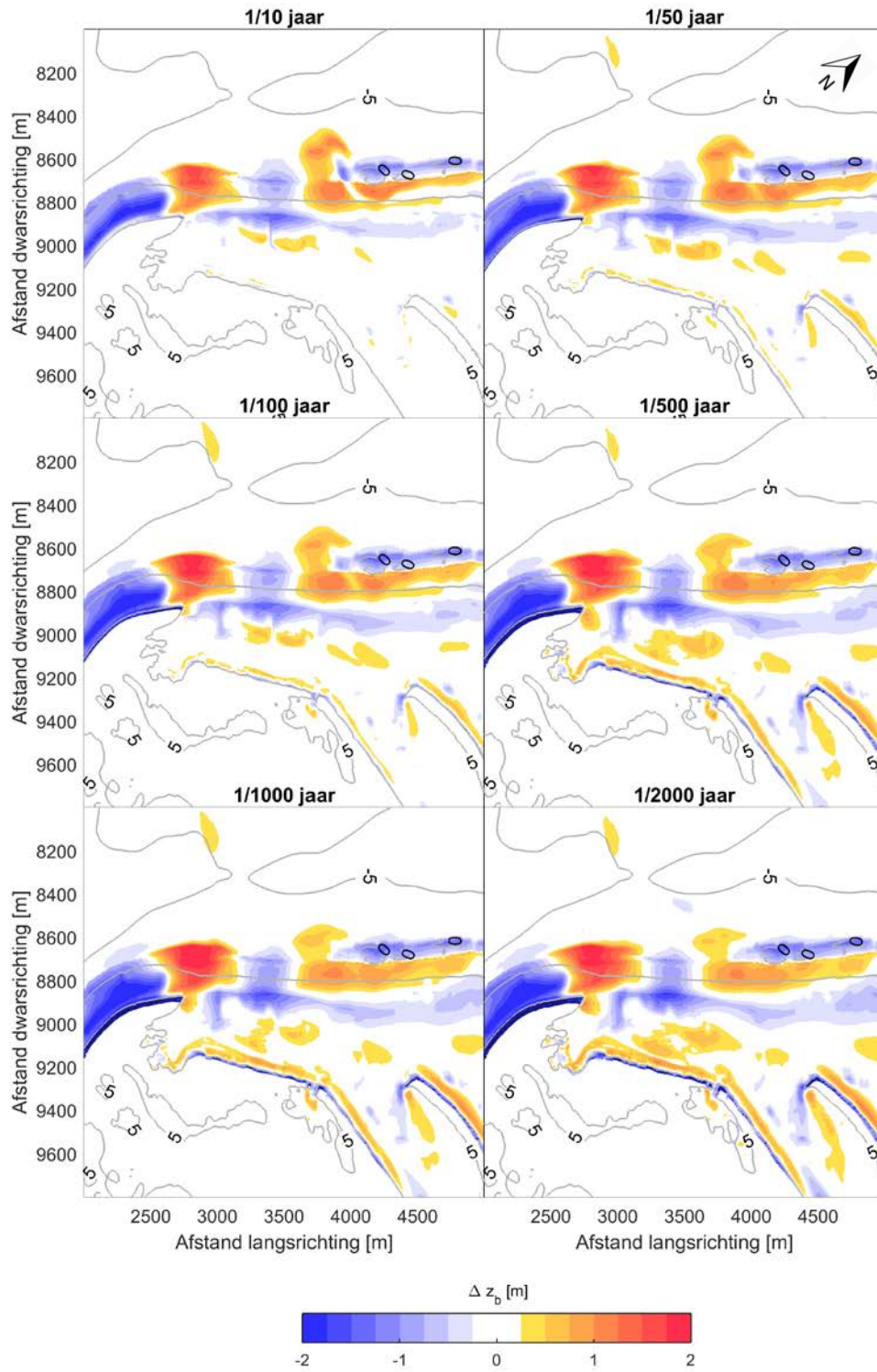




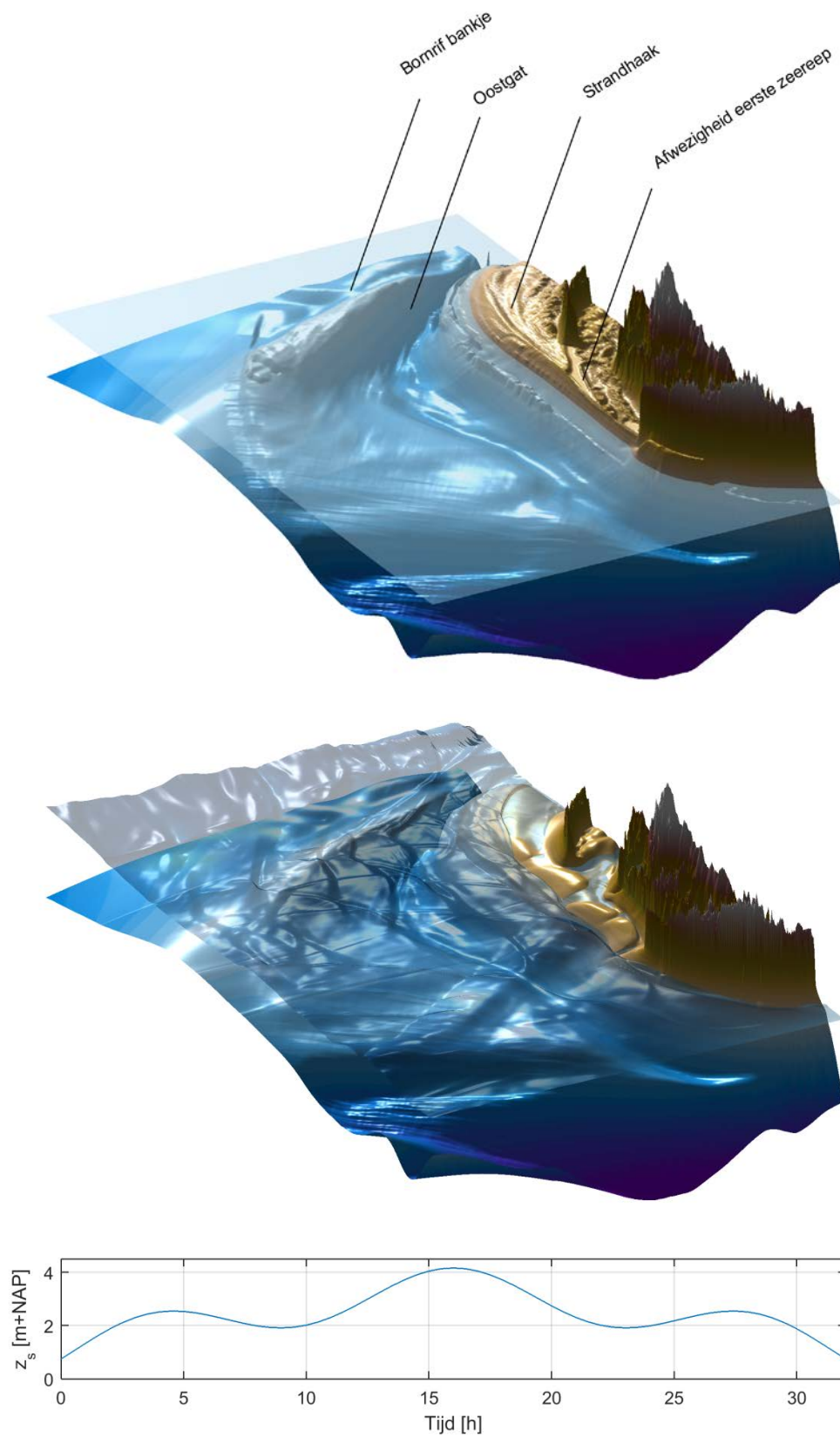
Figuur 4.60 Duinerosie van de eerste zeeleep voor scenario 4 (2035) zoals berekend door XBeach. Getallen zijn relatief weergegeven ten opzichte van de erosie opgetreden tijdens de Sinterklaasstorm. Duinerosie vindt in dit geval voor plaats tussen raai 200-280 en zeer beperkt tussen 300-500 door de afwezigheid van de eerste zeeleep.



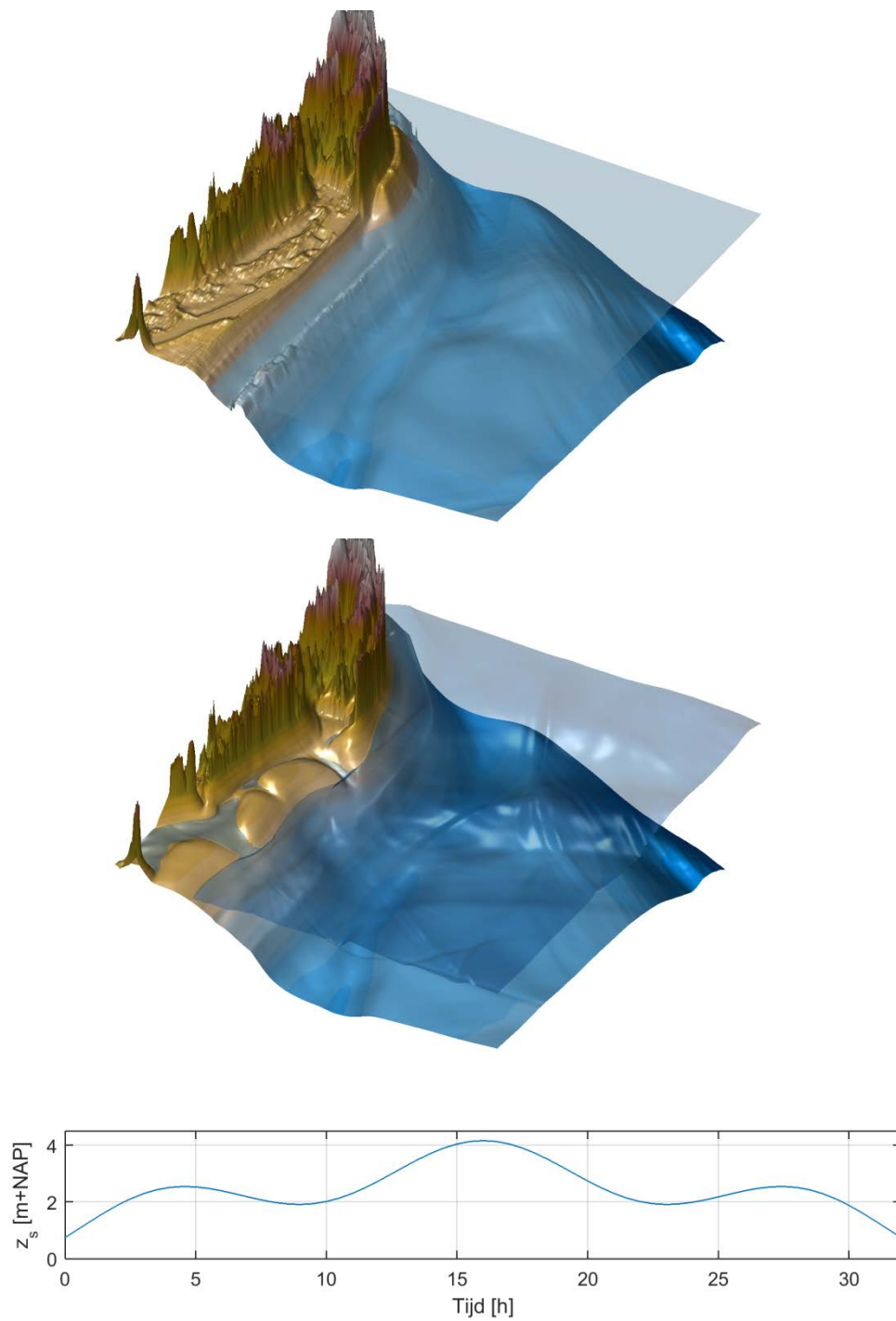
Figuur 4.61 Bathymetrie na de storm voor scenario 4 (2035) voor meerdere stormen zoals berekend door XBeach



Figuur 4.62 Sedimentatie en erosie voor scenario 4 (2035) voor meerdere stormen zoals berekend door XBeach



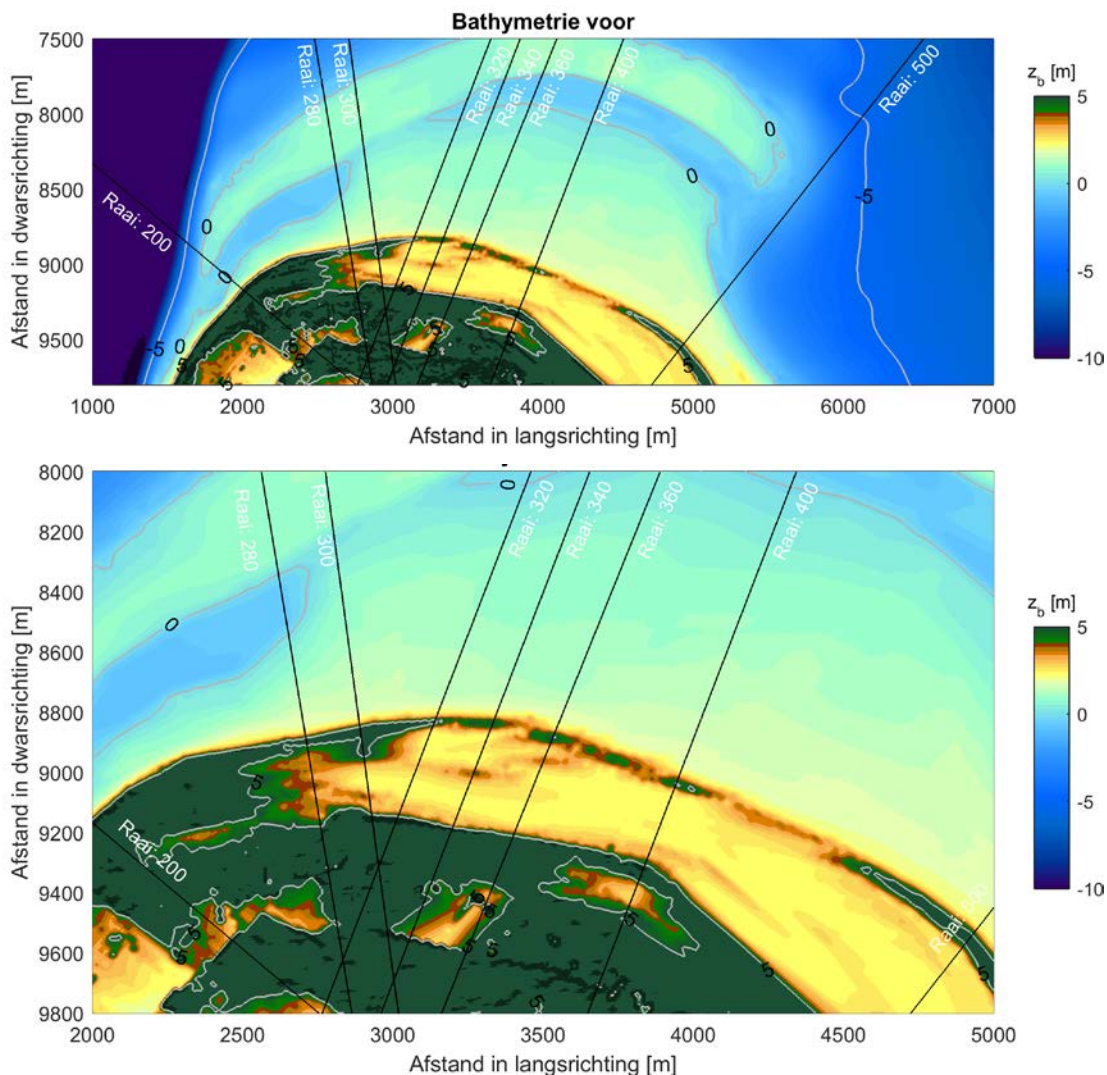
Figuur 4.63 Overzicht: bathymetrie voor (boven) en gesimuleerd (onder) voor scenario 4 (jaar: 2035) voor een 1/2000 storm zoals berekend door XBeach. Zie bijbehorende animaties voor details.



Figuur 4.64 Detail: bathymetrie voor (boven) en gesimuleerd (onder) voor scenario 4 (jaar: '2035) voor een 1/2000 storm zoals berekend door XBeach. Zie bijbehorende animaties voor details.

4.6.6 Scenario 5: vlak voor aanlanding ‘oude’ Bornrif (jaar: 1989)

De situatie in 1989 was er een van vlak voor de aanlanding van het ‘oude’ Bornrif. De eerste zeereep had over de gehele breedte beperkte hoeveelheid sediment boven de 3 meter+NAP. Er was bijvoorbeeld geen sluitende duinenrij van 5 meter hoog. Dit maakt het eenvoudiger dat tijdens storm condities zeewater de duinvallei binnendringt, echter de oriëntatie van het ‘vorige’ Bornrif zal de kust wat meer beschermen.



Figuur 4.65 Bathymetrie van Ameland Noordwest voor scenario 5 (jaar: 1989). Boven paneel overzicht gehele delta. Beneden paneel detail gefocust op de eerste zeereep.

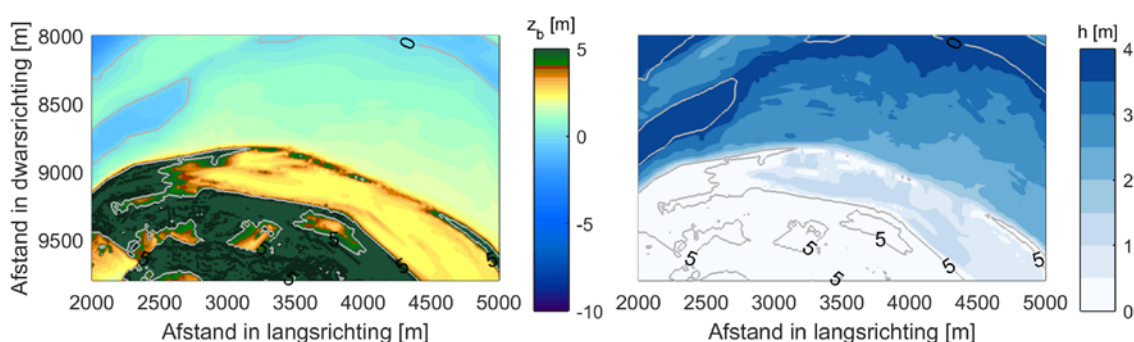
In de simulatie met een terugkeerfrequentie van 1/10 jaar verwachten we dat de grootste morfologische veranderingen plaatsvinden op het Bornrif (Figuur 4.68). Immers, de eerste grote reductie van de golfaanval vindt hier plaats. Korte golven worden sterk gereduceerd, maar de lange golven propageren door richting de eerste zeereep en resulteren mogelijk langs de gehele kust van Ameland Noordwest in de vorming van washover fans. Korte golven breken namelijk in het model op de strandhaak omdat ze de bodem eerder ‘voelen’ dan de lange golven. Dit heeft tot het gevolg dat zeewater en sediment, dat van het duin wordt geroedeerd, in de duinvallei terecht komt (Figuur 4.66). Dit vindt plaats in pulsen van lange golven (i.e. surf-beats). Het grote voordeel hiervan is dat het sediment dus in het systeem blijft, het wordt immers gevangen in de duinvallei in de washover fans. De gemiddelde duinerosie is 15 m<sup>3</sup>/m en vindt uniform over de gehele zeereep plaats.

Voor de grote stormen vindt er eigenlijk een vergelijkbaar patroon plaats. Er vindt meer duinerosie plaats en er dringt meer water en sediment de duinvallei in, Sediment wordt door inkomende golfenergie de duinvallei ingedruwd en vanaf een storm met een terugkeerfrequentie van 1/500 jaar wordt mogelijk het overige duinmassief bereikt (Figuur 4.69). Er wordt naar verwachting geen sluffer gevormd, aangezien er niet 1 zwakke plek was voorafgaand van de storm. De duinerosie neemt toe van gemiddeld 49 m<sup>3</sup>/m voor 1/50 jaar storm naar 115 m<sup>3</sup>/m voor 1/2000 jaar (Tabel 4.9). Opmerkelijk is dat de duinerosie in het model vrij gelijkmatig optreedt. Dit is een gevolg van de afwezigheid van het Bornrif (i.e. er is geen hotspot van korte golfenergie), zie Figuur 4.66.

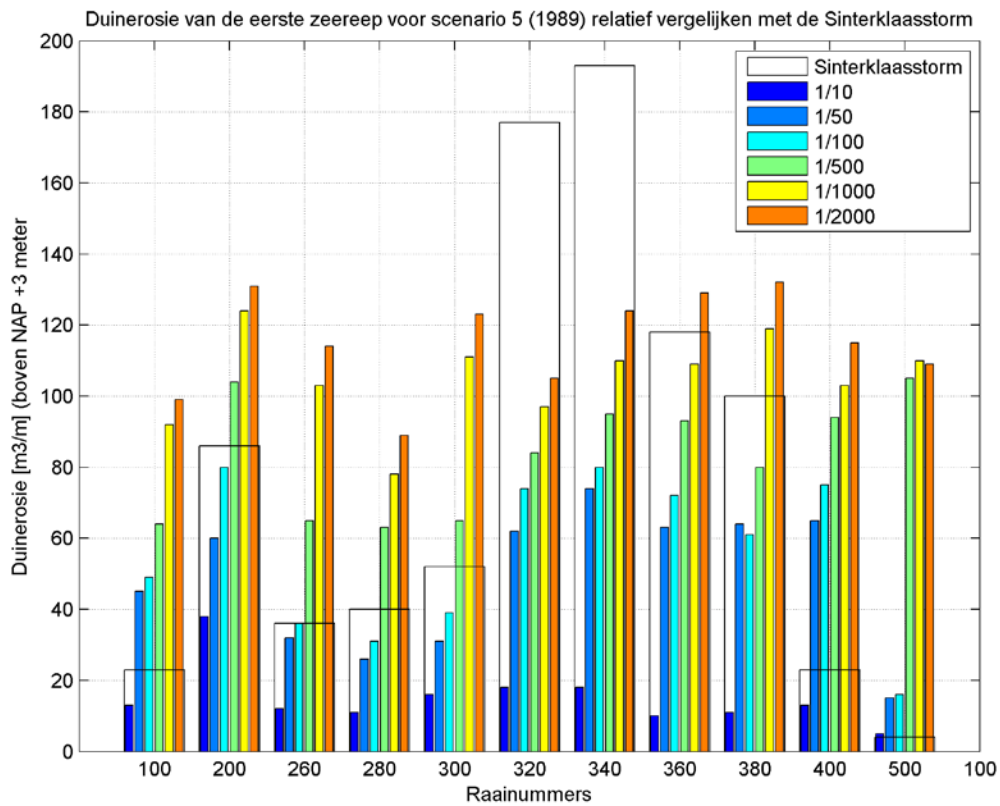
De morfologische ontwikkelingen zijn inzichtelijk gemaakt in de bij dit rapport meegeleverde animaties. In Figuur 4.70 en Figuur 4.71 is de bathymetrie van scenario 4 voor en na een 1/2000 storm weergegeven voor geheel Ameland NW (overzichtsanimatie) en meer gefocust op raai 300-360 (detailanimatie). Voor doorsnedes van verschillende raaien wordt verwezen naar Appendix B5.

Tabel 4.9 Duinerosie van de eerste zeereep voor scenario 5 (1989) zoals berekend door XBeach. Percentage is duinerosie volume van scenario 2 gedeeld door volume in scenario 1 (huidige situatie) \* 100%. Percentages boven 100% is meer duinerosie, onder 100% is minder duinerosie.

Raai	1/10	1/50	1/100	1/500	1/1000	1/2000
100	13 74%	45 134%	49 153%	64 213%	92 333%	99 367%
200	38 234%	60 138%	80 148%	104 109%	124 113%	131 103%
260	12 13%	32 22%	36 23%	65 31%	103 45%	114 45%
280	11 56%	26 59%	31 54%	63 75%	78 74%	89 74%
300	16 27%	31 31%	39 34%	65 40%	111 60%	123 56%
320	18 113%	62 306%	74 386%	84 277%	97 295%	105 260%
340	18 26%	74 96%	80 112%	95 130%	110 134%	124 143%
360	10 5%	63 18%	72 18%	93 20%	109 23%	129 26%
380	11 82%	64 166%	61 115%	80 80%	119 86%	132 80%
400	13 62%	65 205%	75 237%	94 229%	103 220%	115 166%
500	5 437%	15 142%	16 98%	105 379%	110 311%	109 195%
Gemid.	15 31%	49 61%	56 60%	83 69%	105 78%	115 77%

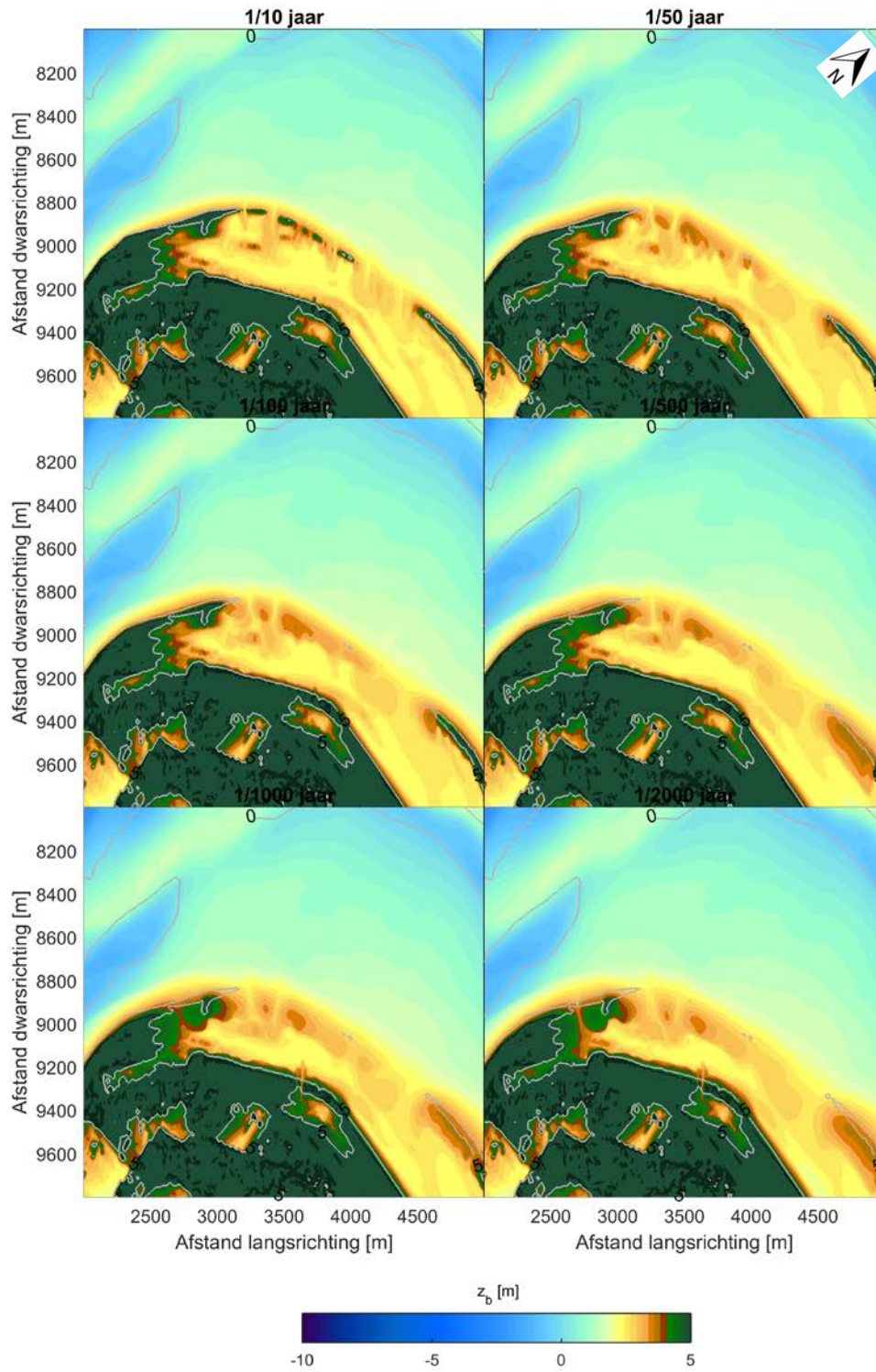


Figuur 4.66 Rechts: maximale waterdieptes voor scenario 5 (1989) en storm 1/10 jaar zoals berekend door XBeach

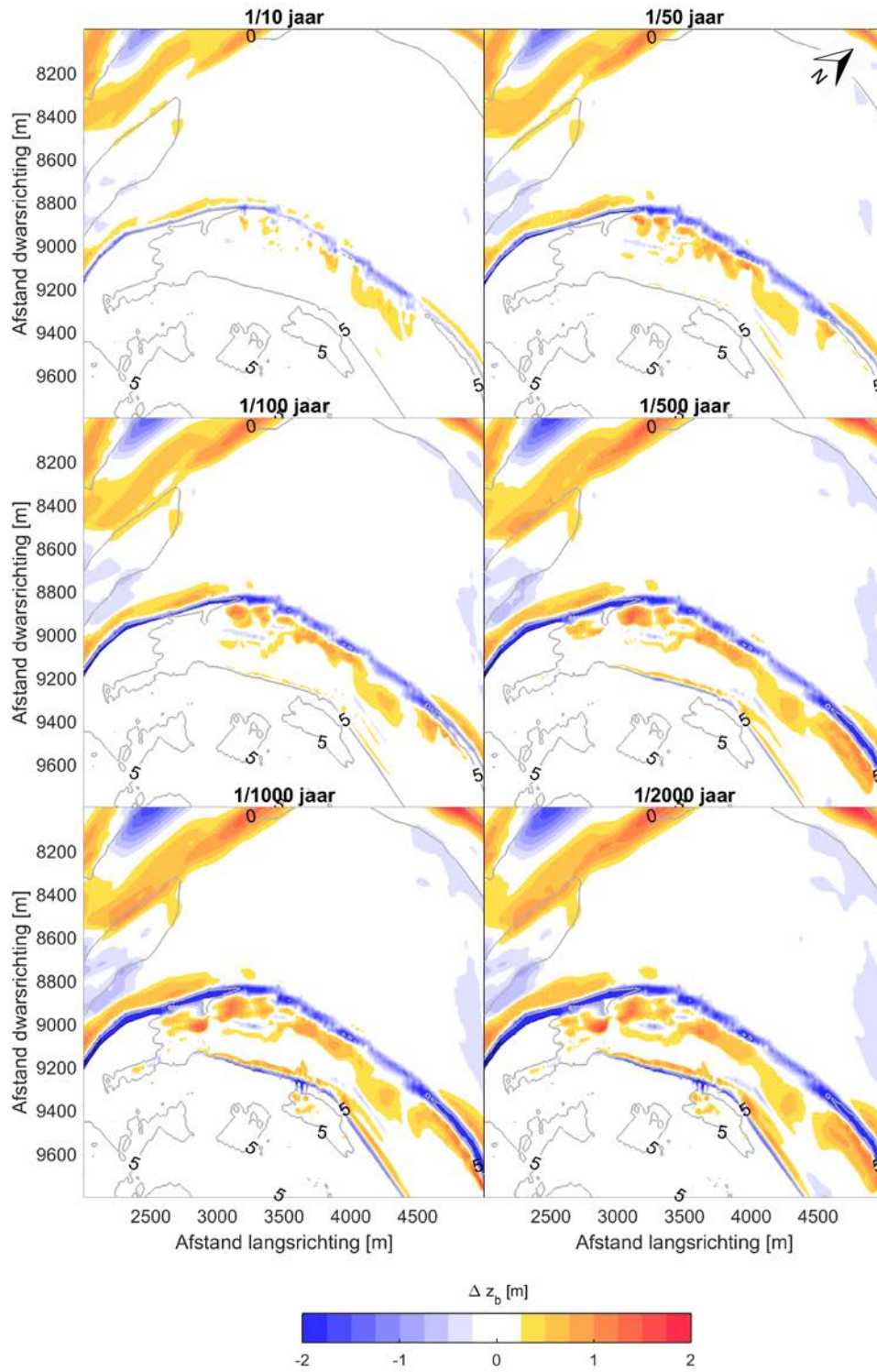


Figuur 4.67 Duinerosie van de eerste zeereep voor scenario 5 (1989) zoals berekend door XBeach. Getallen zijn relatief weergegeven ten opzichte van de erosie opgetreden tijdens de Sinterklaasstorm. Sedimentpatronen zijn veel gelijkmatiger over de kop van Ameland NW vergeleken met de Sinterklaasstorm.

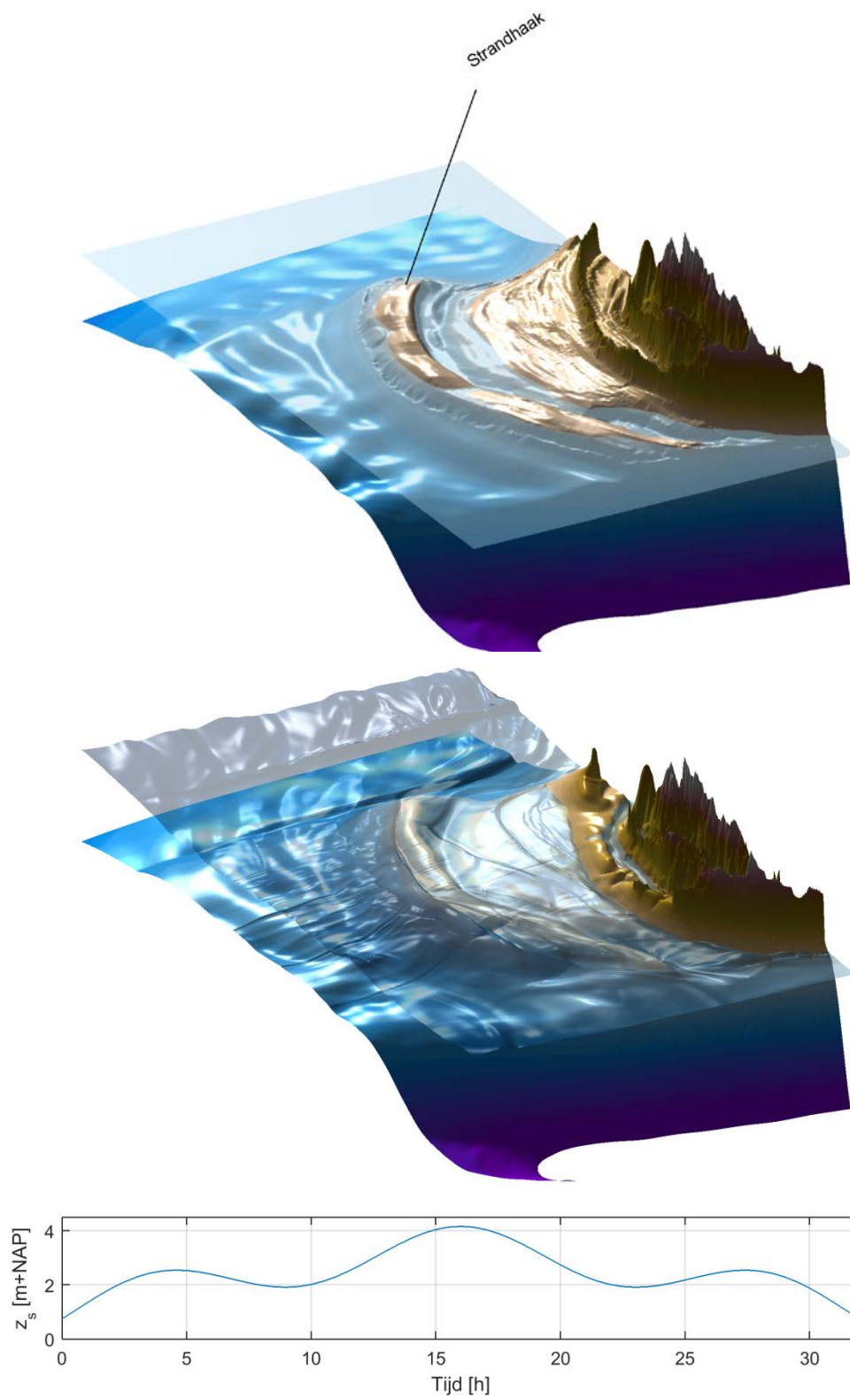




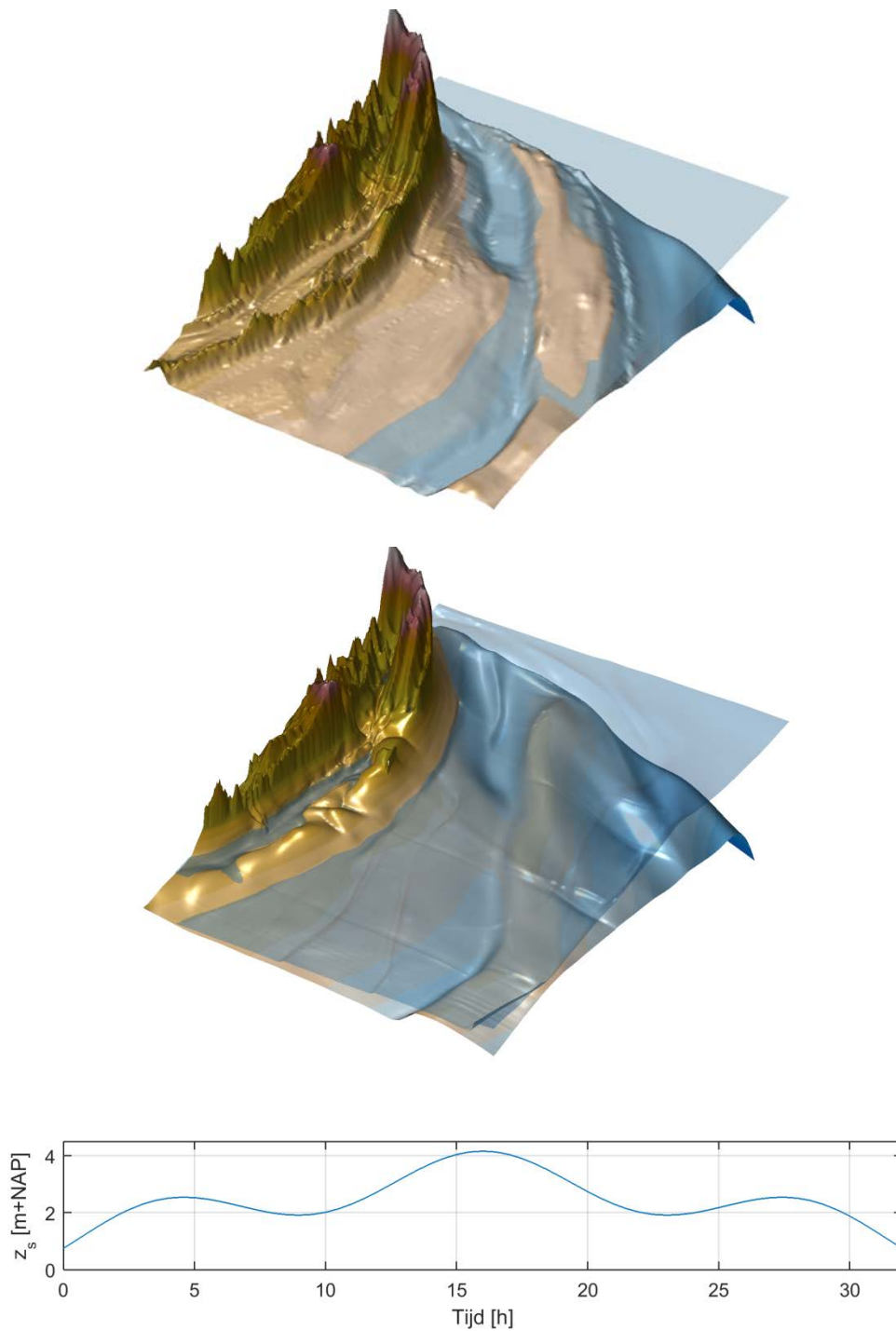
Figuur 4.68 Bathymetrie na de storm voor scenario 5 (1989) voor meerdere stormen zoals berekend door XBeach



Figuur 4.69 Sedimentatie en erosie voor scenario 5 (1989) voor meerdere stormen zoals berekend door XBeach



Figuur 4.70 Overzicht: bathymetrie voor (boven) en gesimuleerd (onder) voor scenario 5 (jaar: 1989) voor een 1/2000 storm zoals berekend door XBeach. Zie bijbehorende animaties voor details.



Figuur 4.71 Detail: bathymetrie voor (boven) en gesimuleerd (onder) voor scenario 5 (jaar: 1989) voor een 1/2000 storm zoals berekend door XBeach. Zie bijbehorende animaties voor details.

#### 4.7 Conclusies

De focus van dit deel is het in kaart te brengen van de processen die verantwoordelijk zijn voor duinerosie en aan te geven welke gebieden extra gevoelig hiervoor zijn. Dit inzicht helpt ons de incidentele (duin)erosie die hier plaatsvindt beter te v en een voorspelling te doen voor wat komen gaat. Hierbij proberen we de volgende deelvragen te beantwoorden:

##### 1a. Kan XBeach worden ingezet om de duinerosie te reproduceren (validatie)?

De modelresultaten zijn in overeenstemming met metingen. Hoewel de (duin)erosie tussen raai 320 en 360 tussen de 34 en 54% wordt onderschat, volgen de gesimuleerde patronen de metingen goed. De simulatie kent bijvoorbeeld een goede reproductie van het afslagpunt en de morfologische verandering van de eerste zeereep wordt gereproduceerd met een BSS van 0.44. Dit kan als een *redelijke* reproductie van de morfologie worden aangemerkt volgens Van Rijn (2003). De verschillen tussen de modelresultaten en metingen hangen logischerwijs ook samen met de databronnen, aangezien we vergelijken met jaarlijkse JARKUS en LiDAR metingen terwijl we maar drie dagen morfologie simuleren in XBeach. Dagelijkse condities hebben waarschijnlijk reeds een deel van het sediment afgevoerd waardoor we rekenen met een bodem die in het model te hoog ligt. Daarnaast resulteert het gebruik van numerieke modellen altijd in een modelfout. Deze fout is met de huidige dataset niet vast te stellen, maar de validatie geeft voldoende vertrouwen in de relatieve voorspellingen van synthetische stormen met het toegepaste model en modelopzet.

##### 1b. Wat is de reden voor de lokaal-opgetreden duinerosie op Ameland Noordwest tijdens de Sinterklaasstorm

Het XBeach model van de Sinterklaasstorm voorspelt ruimtelijk sterk variërende golfpatronen Noordwest Ameland. We constateren een lokale hotspot ter hoogte van raai 320 – 360 van de korte golfenergie als gevolg van de golfinvalshoek en de oriëntatie van het Bornrif die de lokaal optredende duinerosie verklaren. Deze lokale hotspot in korte golfenergie resulteert in meer afvoercapaciteit. Daarnaast drijven gradiënten in golfhoogte een langtransport aan. Hoewel XBeach de waargenomen erosie niet volledig reproduceert, is het plausibel dat dit de lokaal sterke (duin)erosie veroorzaakt. Een andere mogelijkheid is dat de onderschatting te wijten is aan een modelfout bijvoorbeeld als het gevolg van een incorrecte langsgradiënt of de invloed van geologie of biologie.

##### 2. Onder welke stormcondities zou een doorbraak plaats kunnen vinden, welk stuk kust is het meest gevoelig voor een mogelijke doorbraak en wat zijn de gevolgen voor het gebied achter de duinen indien een doorbraak optreedt (e.g., lokale waterdiepte, sedimentatie in vallei)?

Hoewel de modelresultaten geanalyseerd moeten worden in termen van relatieve effecten vanwege de verschillen tijdens de hindcast van de Sinterklaasstorm, verwachten we in de huidige situatie dat de eerste zeereep al kan doorbreken als gevolg van een storm met een terugkeerfrequentie van 1 tot 1/10 jaar. Hierbij moet echter worden opgemerkt dat de onzekerheid groot is, aangezien de duinerosie van de Sinterklaasstorm erg werd onderschat en dat het stormverloop schematisch wordt meegenomen. Bij een dergelijke storm voorspelt het model dat er in eerste instantie geen sluftvormige doorbraak tussen raai 320 en 340 ontstaat. Het duin is inmiddels wel zover verzwakt dat er volgens de modelresultaten een doorbraak van +/- 350 meter kan ontstaan. Voor stormen met een hogere terugkeerperiode neemt de breedte verder toe. Bijvoorbeeld een storm met een terugkeerfrequentie van 1/2000 jaar

resulteert in de XBeach simulatie in een doorbraak van 600 meter. Tijdens doorbreken zal er erosie rondom het NAM-platform aan de noord en westkant optreden. Bij stormen vanaf 1/500 tot 1/1000 jaar vindt er in de modelresultaten ook erosie plaats aan de oostelijke zijde van het platform. De primaire waterkering is in de simulaties nooit in het geding geweest.

3. Is er een verandering zichtbaar in de morfologie tijdens stormcondities als we de huidige (2015) bodem vergelijken met een bodem met een sterkere eerste zeereep (bijvoorbeeld na een suppletie), geen eerste zeereep of voor de aanlanding van Bornrif (1989).

De scenario's gebaseerd op de metingen uit 2011 en 2013 zijn relatief vergelijkbaar. De situatie in 2013 was iets wat robuuster, aangezien de suppletie uit 2011 in langsricting was uitgesmeerd. Hierdoor treedt er waarschijnlijk een doorbraak op voor de 2011 bodem bij een storm van 1/50 tot 1/100 jaar, terwijl voor de situatie in 2013 dit is bij een terugkeerfrequentie van 1/100 tot 1/500 jaar. De gevolgen bij een doorbraak zijn in het model echter wel vergelijkbaar. Er ontstaat een sluffer die bij hogere stormintensiteit uitdiept en naar het oosten meandert. De vorm van de meander in de duinvallei is vergelijkbaar met de huidige situatie. Pas voor stormen met een terugkeerfrequentie van 1/1000 tot 1/2000 jaar vindt er mogelijk duinerosie van het achterliggende duinmassief plaats. Erosie rondom het NAM-platform zal in de bathymetrische situatie van 2011 en 2013 minder plaatsvinden dan in 2015, aangezien de sluffer sediment rondom het NAM-platform neergelegd. Dit verschil in doorbraakkans laat zien dat suppleties helpen de kust te beschermen. Dit is specifiek het geval na een aantal jaren (in dit voorbeeld 2 jaar; 2013-2011) wanneer door eolische processen zand het duin is in gewaaid

Zonder eerste zeereep (i.e. mogelijk toekomstige scenario van 2035) zullen er tijdens een storm grote hoeveelheden water de duinvallei binnendringen. Dit resulteert echter in het model in beperkte duinerosie aan het achterliggende duinmassief. Het merendeel van de erosie vindt plaats op de kop van de duinvallei. Daarnaast voorspelt XBeach de vorming van geulen in de vallei. Bij lichtere stormen zullen dit er meerdere zijn. Bij grotere stormen (vanaf een terugkeerfrequentie van 1/500 – 1/1000 jaar) voorspelt het model één dominante geul. Zelfs bij een normatieve storm (i.e. 1/2000 jaar) en zonder eerste zeereep komt er waarschijnlijk geen water voorbij de primaire waterkering.

Het scenario met een compleet andere configuratie qua geulen en platen (jaar: 1989) laat het belang van de buitendelta op de gesimuleerde duinerosie zien. In deze simulaties dissipeert in de gehele langsricting golfenergie al op het 'oude' Bornrif voordat de golven het duin kunnen bereiken. Dit heeft tot gevolg dat er zeereep-gemiddeld 25% minder duinerosie plaatsvindt. Daarnaast wordt het geërodeerde materiaal afgezet als washover fans in plaats van afgevoerd te worden via de geulen naar elders. Ook vindt de duinerosie meer verspreid plaats over de gehele zeereep in plaats van lokaal bij enkele raaien. Een andere plaatconfiguratie van Ameland Noordwest (i.e. een breed strand en geen plaat) resulteert dus ten eerste in een gelijkmatigere verdeling van golfenergie in langsricting (geen hotspot). Ten tweede dissipeert meer golfenergie op het strand en bereikt minder energie het duin. Het gevolg van beide punten is een lokaal minder sterke duinafslag.

## 5 Conclusies

Structurele erosie die de afgelopen 25 jaar optreedt op Ameland Noordwest is een gevolg van een divergentiepunt in de sedimenttransporten. Dit divergentiepunt ligt ongeveer in het midden van het Oostgat. Transport ten oosten gaat richting de strandhaak Bornrif en transport ten westen gaat richting het Borndiep. De transporten zijn relatief klein, maar kunnen wel een lange-termijn structurele erosie veroorzaken. In de huidige situatie (bodem: 2014) zijn variaties in golfhoogte de reden voor de gradiënten in sediment transport. Vijfentwintig jaar geleden (bodem: 1989) was de bolling van de kust de reden. Er is geen argumentatie gevonden dat de vorming van het Oostgat (geul) in een toename van de structurele stranderosie resulteert.

Incidentele (duin)erosie tijdens de Sinterklaasstorm is terug te leiden tot een lokale hotspot van de korte golfenergie als gevolg van de golfinvalshoek en de oriëntatie van het Bornrif. De huidige situatie (bodem: 2015) is inmiddels zover verzwakt dat deze tussen raai 320 en 340 het duin waarschijnlijk volledig zal doorbreken bij een storm met een terugkeerfrequentie van 1 tot 1/10 jaar. Bij een wat sterkere eerste duinrij (bodem: 2011 of 2013) stroomt er vermoedelijk water de duinvallei in bij een storm met een terugkeerfrequentie van rond de 1/100 jaar. Het is niet aannemelijk dat het duin volledig zal doorbreken, maar sediment wordt in deze gevallen waarschijnlijk als slufte afgezet. In geen van uitgevoerde simulaties is de primaire waterkering in het geding.

## 5.1 Deelvragen voor de Delft3D modelering

De focus van dit deel van de rapportage was het in kaart te brengen van de stromingen en sedimenttransporten in en nabij het Oostgat. Dit inzicht helpt ons de structurele erosie die hier plaatsvindt beter te begrijpen. Hierbij stonden drie deelvragen centraal:

1. Wat is de stromingskarakteristiek van het Oostgat en is dit een (belangrijke) stroomvoerende geul?

Op basis van de stromingspatronen lijkt het Oostgat geen 'klassieke' stroomvoerende geul te vormen. Een duidelijk doorgaande eb- of vloedstroming over het gehele Oostgat vindt slechts gedurende een klein gedeelte van het getij plaats. In deze periode vertoont dan niet alleen het Oostgat, maar eigenlijk de gehele naastliggende buitendelta een uniforme stroming.

2. Wat is het transportpotentieel langs de aanliggende kust en zijn er redenen aanwijsbaar voor structurele erosie?

Variaties in golfhoogte zorgen in de huidige situatie (bodem 2014) voor een divergentiepunt in de sedimenttransporten. Dit divergentiepunt ligt ongeveer in het midden van het Oostgat. Transport ten oosten hiervan, gaat ook naar oostelijke richting (naar de strandhaak Bornrif). Transport ten westen gaat richting Borndiep. De transporten zijn relatief klein, maar kunnen wel een lange-termijn structurele erosie veroorzaken.

3. Is er een verandering zichtbaar in de stroming en het transportpotentieel als we de huidige (2014) bodem vergelijken met een bodem voor de aanlanding van Bornrif (1989)?

De verschillen in bodemligging tussen de 1989 en 2014 bodem geven eigenlijk geen echt andere sedimenttransportpatronen langs de kust. De forcering achter dit patroon is wel anders. In 2014 zien we duidelijke gradiënten in de golfhoogte. In 1989 zijn de gradiënten minder sterk, echter de kust vertoont een veel grotere kromming (bolle kust) wat vergelijkbare gradiënt in the transporten resulteert. Een belangrijk verschil tussen de bodemschematisaties is dat in 2014 de erosie direct op de kust optreedt. In 1989 treedt er waarschijnlijk een vergelijkbare erosie op, alleen vindt deze plaats op de nog niet aangelande strandhaak



## 5.2 Deelvragen voor de XBeach modelering

De focus van dit deel is het in kaart te brengen van de processen die verantwoordelijk zijn voor duinerosie en aan te geven welke gebieden extra gevoelig hiervoor zijn. Dit inzicht helpt ons de incidentele (duin)erosie die hier plaatsvindt beter te begrijpen en een voorspelling te doen voor wat komen gaat. Hierbij proberen we de volgende deelvragen te beantwoorden:

1. Wat is de reden voor de lokaal-opgetreden duinerosie op Ameland Noordwest tijdens de Sinterklaasstorm en kan XBeach worden ingezet om de duinerosie te reproduceren (validatie)?

Het XBeach model van de Sinterklaasstorm voorspelt ruimtelijk sterk variërende golfpatronen Noordwest Ameland. We constateren een lokale hotspot van de korte golfenergie als gevolg van de golfinvalshoek en de oriëntatie van het Bornrif die de lokaal optredende duinerosie verklaren. De modelresultaten zijn in overeenstemming met metingen. Hoewel de (duin)erosie tussen raai 320 en 340 met 34-54% wordt onderschat, volgen de gesimuleerde patronen de metingen goed. De simulatie kent bijvoorbeeld een goede reproductie van het afslagpunt en de morfologische verandering van de eerste zeereep wordt gereproduceerd met een BSS van 0.44. Dit kan als een redelijke reproductie van de morfologie worden aangemerkt volgens Van Rijn (2003).

2. Onder welke stormcondities zou een doorbraak plaats kunnen vinden, welk stuk kust is het meest gevoelig voor een mogelijke doorbraak en wat zijn de gevolgen voor het gebied achter de duinen indien een doorbraak optreedt (e.g., lokale waterdiepte, sedimentatie in vallei)?

Voor de huidige situatie verwachten we dat de eerste zeereep al kan doorbreken voor een storm met een terugkeerfrequentie van 1 tot 1/10 jaar. Bij een dergelijke storm zal er in eerste instantie waarschijnlijk geen sluftervormige doorbraak tussen raai 320 en 340 ontstaan. Het duin is inmiddels zover verzwakt dat er een doorbraak van +/- 350 meter zal optreden. Voor stormen met een hogere terugkeerperiode ontstaan er een bredere doorbraak. Tijdens een doorbraak zal erosie rondom het NAM-platform plaatsvinden.

3. Is er een verandering zichtbaar in de morfologie tijdens stormcondities als we de huidige (2015) bodem vergelijken met een bodem met een sterkere eerste zeereep (bijvoorbeeld na een suppletie), geen eerste zeereep of voor de aanlanding van Bornrif (1989).

In de situatie met een sterke eerste zeereep zal naar verwachting het duin later doorbreken dan in de huidige situatie. Hierdoor treedt er een mogelijke doorbraak op voor 2011 bij een storm van 1/50 tot 1/100 jaar, terwijl voor de situatie in 2013 dit is bij een terugkeerfrequentie van 1/100 tot 1/500 jaar. Daarnaast wordt er in het model een slufte gevormd en vindt er minder erosie rondom het NAM-platform plaats.

Zonder eerste zeereep (mogelijk toekomstige scenario van 2035) zullen er tijdens een storm grote hoeveelheden water de duinvallei binnendringen. Dit resulteert echter in het model beperkt in duinerosie van het achterliggende duinmassief. Daarnaast verwachten we de vorming van geulen in de vallei. Er wordt geen water voorbij de primaire kering voorspeld.

In de simulaties met een bodem uit 1989 vindt er zeereep-gemiddeld 25% minder duinerosie plaatsvindt. Daarnaast wordt het geërodeerde materiaal afgezet als washover fans in plaats afgevoerd via de geulen naar elders en vindt de duinerosie meer verspreid plaats over de gehele zeereep in plaats van lokaal bij raai 320 en 340.

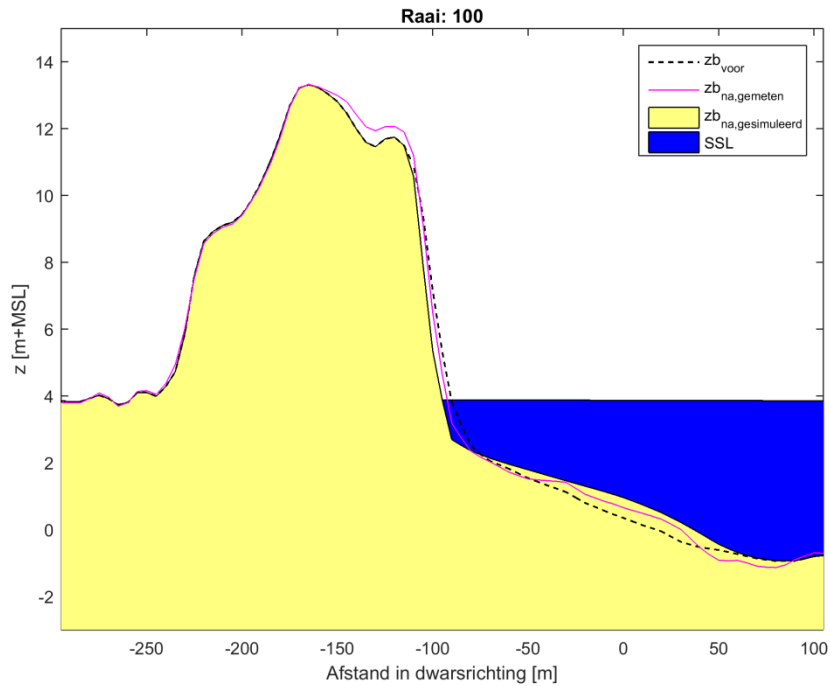


## 6 Referenties

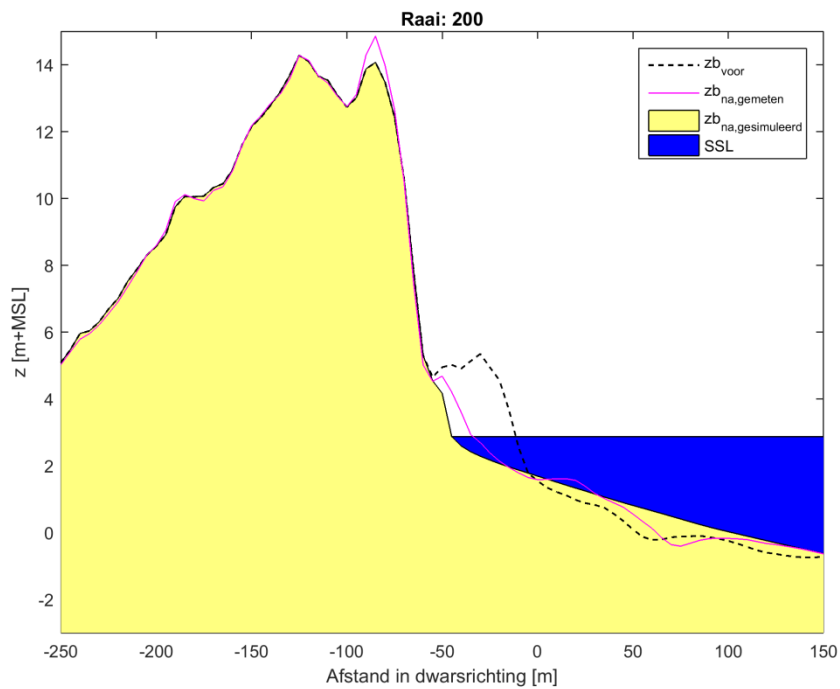
- Boers, M., P. van Geer, J. Groeneweg (2014). Methode voor het bepalen van HR Duinen voor WTI 2017. Deltares rapport 1209433-004-HYE-0001.
- Daly, C., Roelvink, J. A., van Dongeren, A. R., & McCall, R. T. (2010). Short wave breaking effects on low frequency waves. Proceedings 30th International Conference on Coastal Engineering, San Diego, 1–13.
- De Fockert, A. (2008). "Impact of relative sea level rise on the Ameland inlet Morphology," Master thesis, Delft University, Delft, The Netherlands.
- De Vet, P. L. M., McCall, R. T., Den Bieman, J. P., Stive, M. J. F., & Van Ormondt, M. (2015). Modelling dune erosion, overwash and breaching at Fire Island (NY) during Hurricane Sandy. Coastal Sediments 2015: The Proceedings of the Coastal Sediments 2015, San Diego, USA.
- De Vriend, H.J. (1991). "Mathematical modelling and large-scale coastal behaviour. Part 1: Physical processes," Journal of Hydraulic Research, Vol 29-6, 727-740.
- Deltares (2014). Delft3D-FLOW. User Manual. Version 3.15.34158. May 2014
- Deltares (2015). XBeach Technical Reference: Kingsday Release
- Den Heijer, C. (2013). The role of bathymetry, wave obliquity and coastal curvature in dune erosion prediction. Delft University of Technology.
- Elias, E.P.L., van der Spek, A.J., Lazar, M. (2015). "Modelling tidal-inlet morphodynamics on medium time scales" Coastal Sediments 2015: The Proceedings of the Coastal Sediments 2015, San Diego, USA.
- Elias, E.P.L., van der Spek, A.J., Wang, Z.B. and De Ronde, J. (2012). "Morphodynamic development and sediment budget of the Dutch Wadden Sea over the last century," Netherlands Journal of Geosciences, 91-3.
- Elias, E.P.L. and Hansen, J. (2012). "Understanding processes controlling sediment transports at the mouth of a highly energetic inlet system (San Francisco Bay, CA)," Marine Geology, 345, 207-220.
- Elias E.P.L. en A. Bruens, (2013). "Beheerbiobliotheek Ameland – Feiten & cijfers ter ondersteuning van de jaarlijkse toetsting van de kustlijn". Rapport 1207724-004, Deltares, Delft.
- Israël, C.G. en D.W. Dunsbergen, 1999, Cyclic morphological development of the Ameland Inlet, proceedings of the I.A.H.R Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Genova, Italy, p. 705-714.
- Latteux, B., (1995). "Techniques for long-term morphological simulation under tidal action." Marine Geology, 126, pp 129-141.).

- Lesser, G.R. (2009). "An approach to medium-term coastal morphological modelling," Ph.D. Thesis, UNESCO-IHE, Delft, The Netherlands.
- Lesser, G.R., Roelvink, J.A., Van Kester, J.A.T.M. and Stelling, G.S. (2004). "Development and validation of a three-dimensional model," *Coastal Engineering*, 51, 883-915.
- McCall, R. T., van Thiel de Vries, J. S. M., Plant, N. G., van Dongeren, A. R., Roelvink, J. A., Thompson, D. M., & Reniers, A. J. H. M. (2010). Two-dimensional time dependent hurricane overwash and erosion modeling at Santa Rosa Island. *Coastal Engineering*, 57(7), 668–683. doi:10.1016/j.coastaleng.2010.02.006
- Nederhoff, C.M, Vermaas T., Oost, A. (2015). Erosie op Ameland Noordwest. Evaluatie morfologische ontwikkelingen. Projectnummer: 1503-0080.
- Roelvink, J. A., Reniers, A. J. H. M., van Dongeren, A. R., van Thiel de Vries, J. S. M., McCall, R. T., & Lescinski, J. (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*, 56(11-12), 1133–1152. doi:10.1016/j.coastaleng.2009.08.006.
- Sutherland, J., Peet, a. H., & Soulsby, R. L. (2004). Evaluating the performance of morphological models. *Coastal Engineering*, 51(8-9), 917–939. doi:10.1016/j.coastaleng.2004.07.015
- Teske, R. (2012). "Tidal inlet channel stability in long term process based modelling". MSc. Traineeship report, Utrecht University, Utrecht.
- Van Rijn, L. C. (2003). The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based models. *Coastal Engineering*, 47(3), 295–327. doi:10.1016/S0378-3839(02)00120-5
- Van Rijn, L.C., (2007a). "Unified view of sediment transport by currents and waves. I: Initiation of motion, bed roughness, and bed-load transport." *Journal of Hydraulic Engineering* 133, 19.
- Van Rijn, L.C., (2007b). "Unified view of sediment transport by currents and waves. II: Suspended transport." *Journal of Hydraulic Engineering* 133, 22.
- Van Rijn, L.C., (2007c). "Unified view of sediment transport by currents and waves. III: Graded beds." *Journal of Hydraulic Engineering* 133, 15.
- Van Rooijen, A. & A. Oost (2014). Memo: Regionale advisering Ameland Noordwest. Deltares-Memo 1209381-008-ZKS-0008.

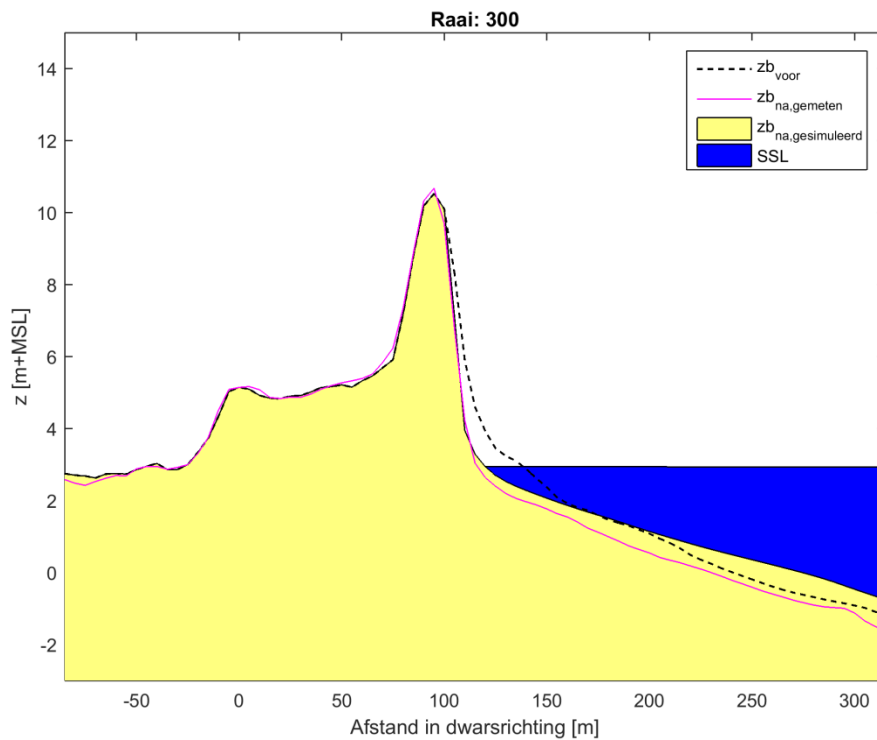
Aanvullende figuren Sinterklaasstorm



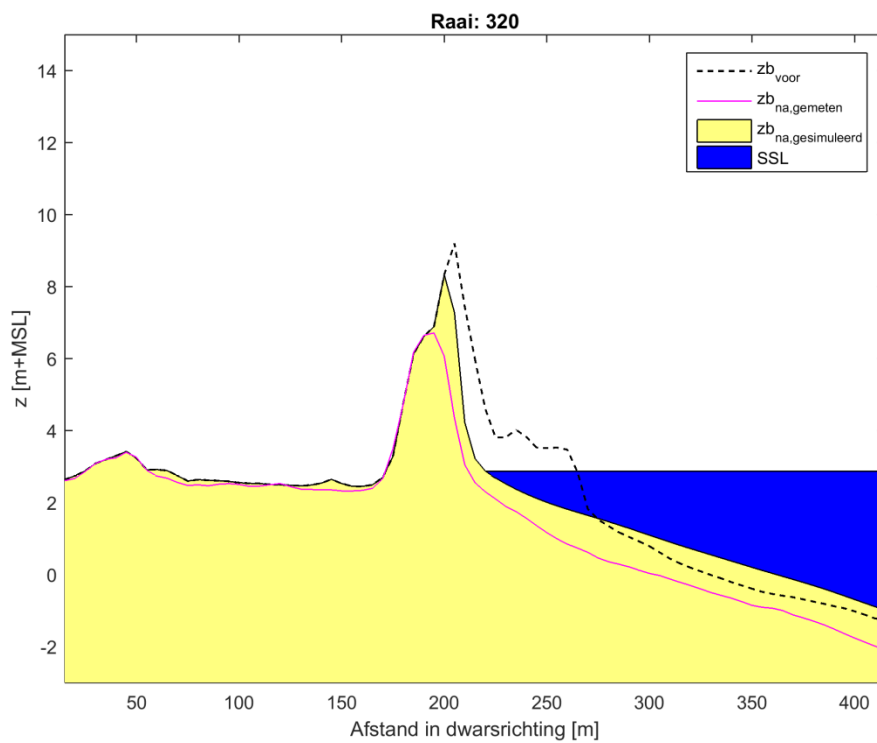
Figuur 6.1 Dwarsdoorsnede van raai 100 op Ameland Noordwest. Informatie gepresenteerd van voor en na de Sinterklaasstorm (zowel gemeten als gesimuleerd door XBeach)



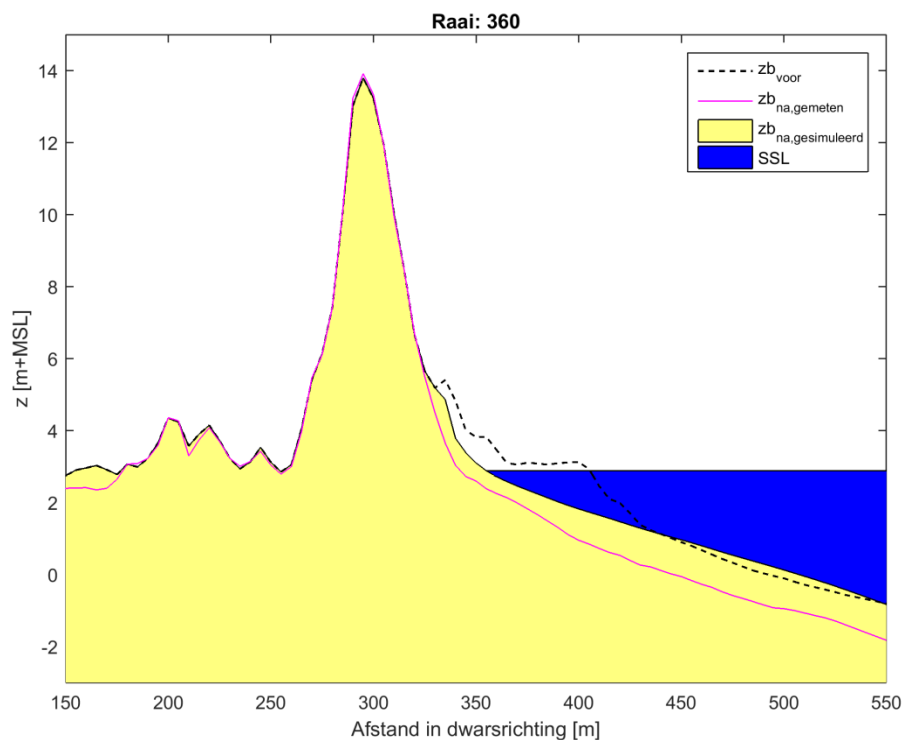
Figuur 6.2 Dwarsdoorsnede van raai 200 op Ameland Noordwest. Informatie gepresenteerd van voor en na de Sinterklaasstorm (zowel gemeten als gesimuleerd door XBeach)



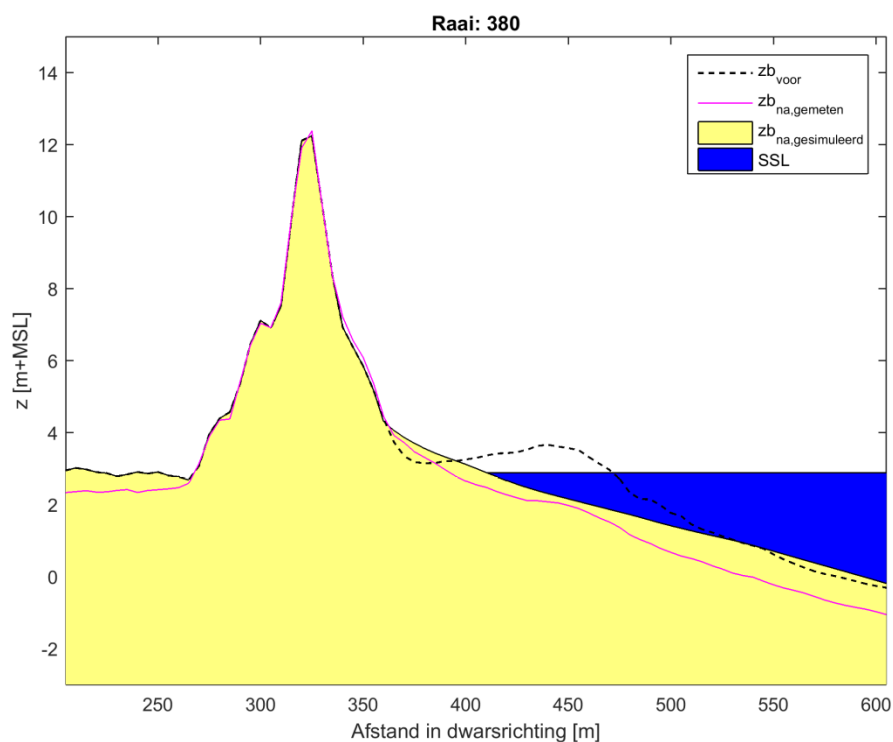
Figuur 6.3 Dwarsdoorsnede van raai 300 op Ameland Noordwest. Informatie gepresenteerd van voor en na de Sinterklaasstorm (zowel gemeten als gesimuleerd door XBeach)



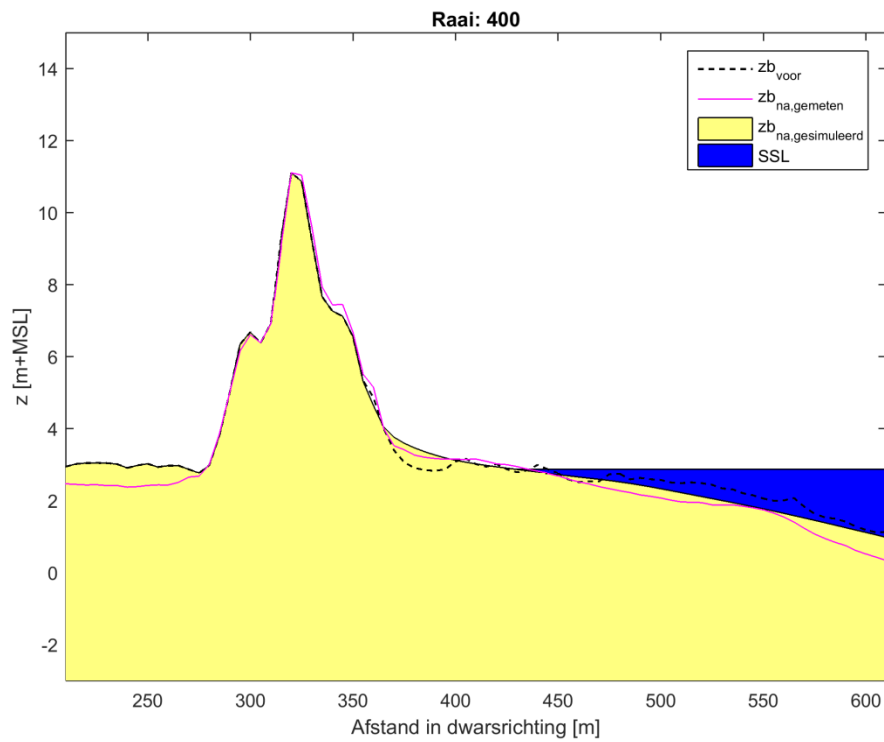
Figuur 6.4 Dwarsdoorsnede van raai 320 op Ameland Noordwest. Informatie gepresenteerd van voor en na de Sinterklaasstorm (zowel gemeten als gesimuleerd door XBeach)



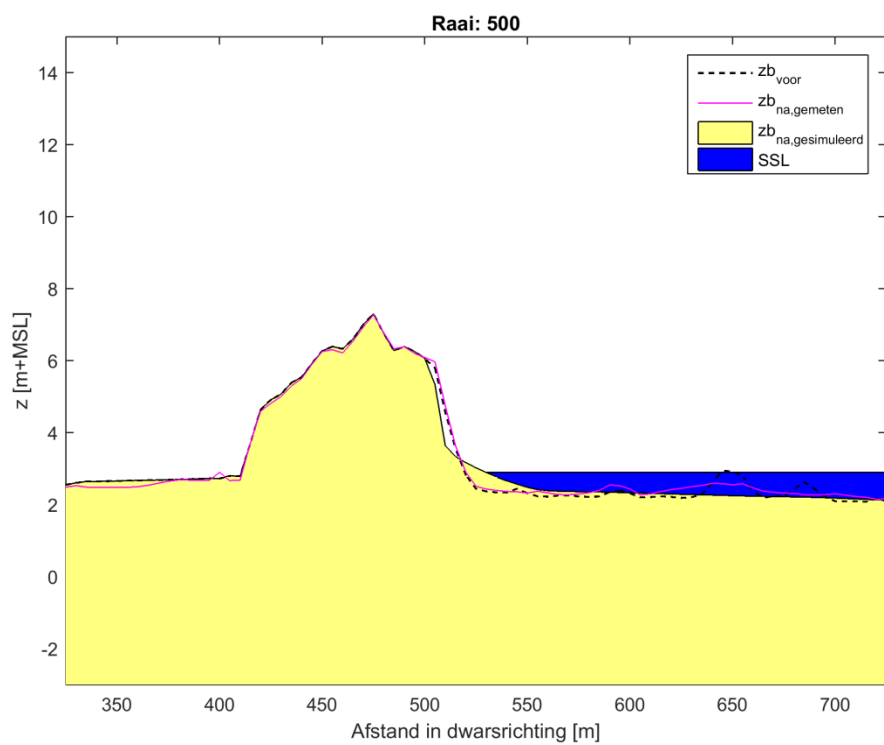
*Figuur 6.5 Dwarsdoorsnede van raai 360 op Ameland Noordwest. Informatie gepresenteerd van voor en na de Sinterklaasstorm (zowel gemeten als gesimuleerd door XBeach)*



*Figuur 6.6 Dwarsdoorsnede van raai 380 op Ameland Noordwest. Informatie gepresenteerd van voor en na de Sinterklaasstorm (zowel gemeten als gesimuleerd door XBeach)*



Figuur 6.7 Dwarsdoorsnede van raai 400 op Ameland Noordwest. Informatie gepresenteerd van voor en na de Sinterklaasstorm (zowel gemeten als gesimuleerd door XBeach)



Figuur 6.8 Dwarsdoorsnede van raai 500 op Ameland Noordwest. Informatie gepresenteerd van voor en na de Sinterklaasstorm (zowel gemeten als gesimuleerd door XBeach)

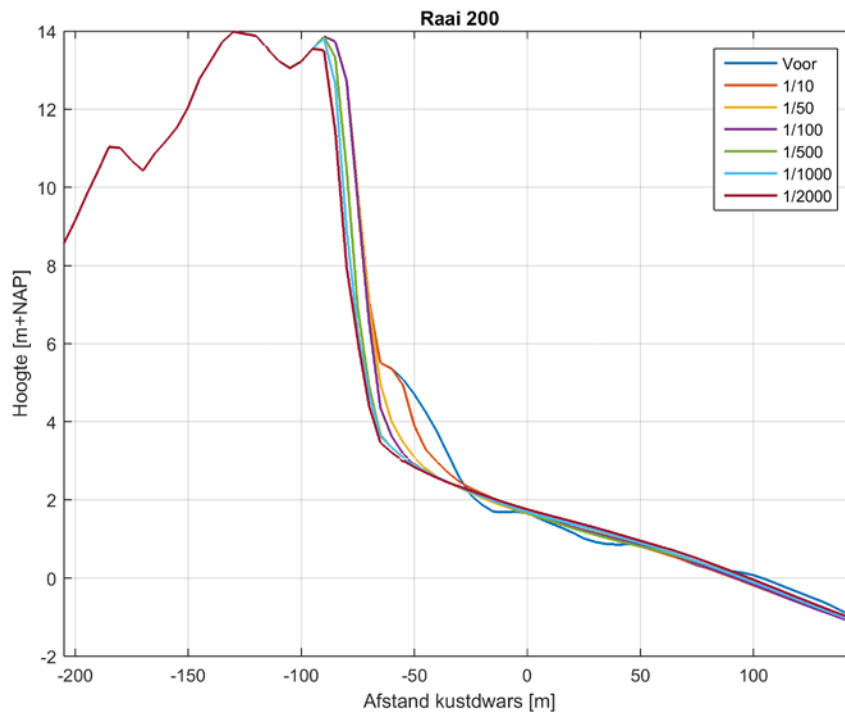




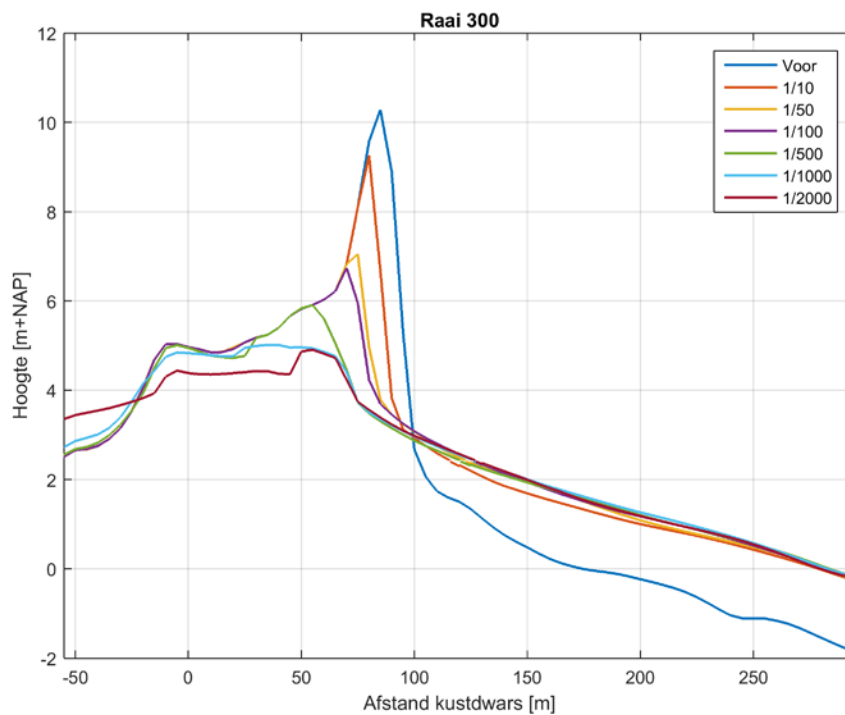


## A Aanvullende figuren synthetische stormen

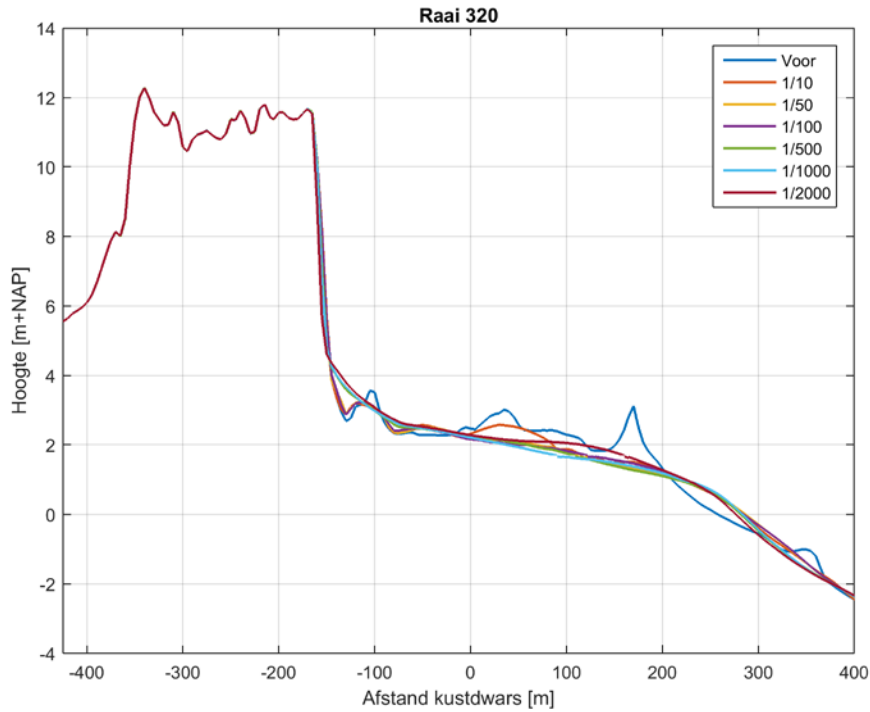
### A.1 Scenario 1: huidige situatie



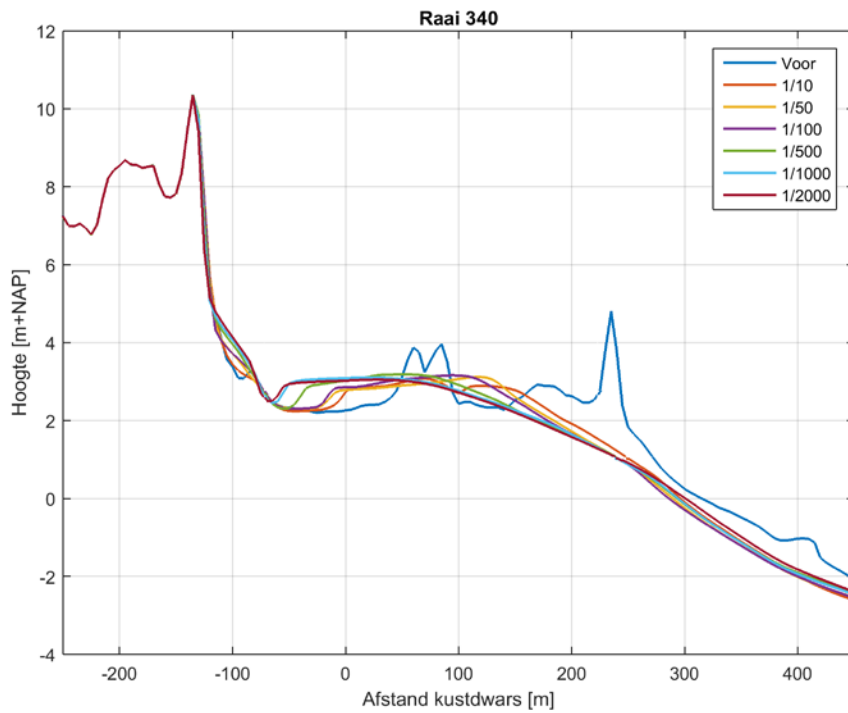
Figuur 6.9 Raai 200 voor scenario 1 (2015) en meerdere stormen zoals berekend door XBeach



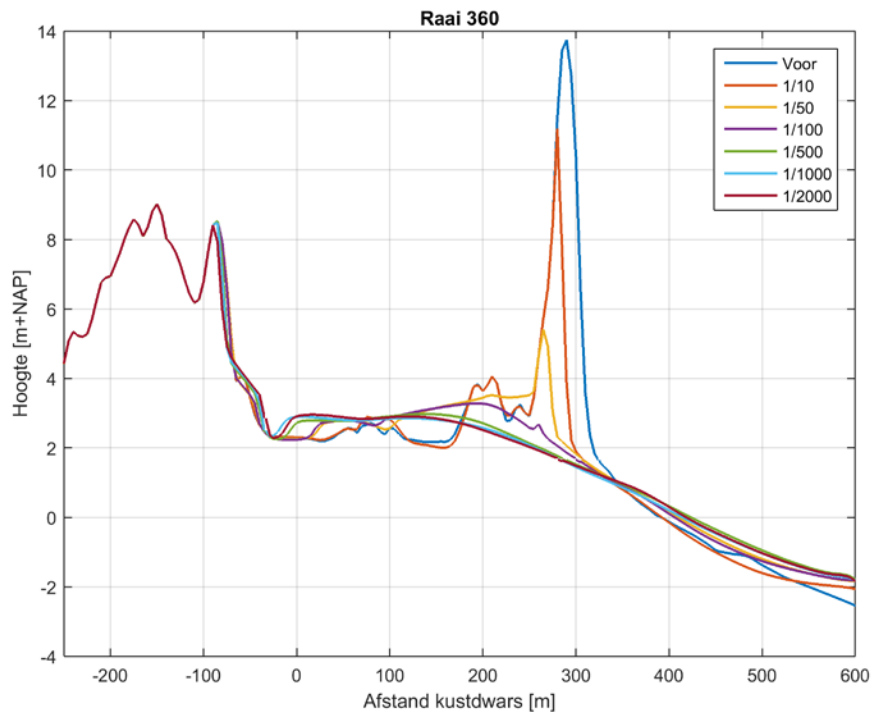
Figuur 6.10 Raai 300 voor scenario 1 (2015) en meerdere stormen zoals berekend door XBeach



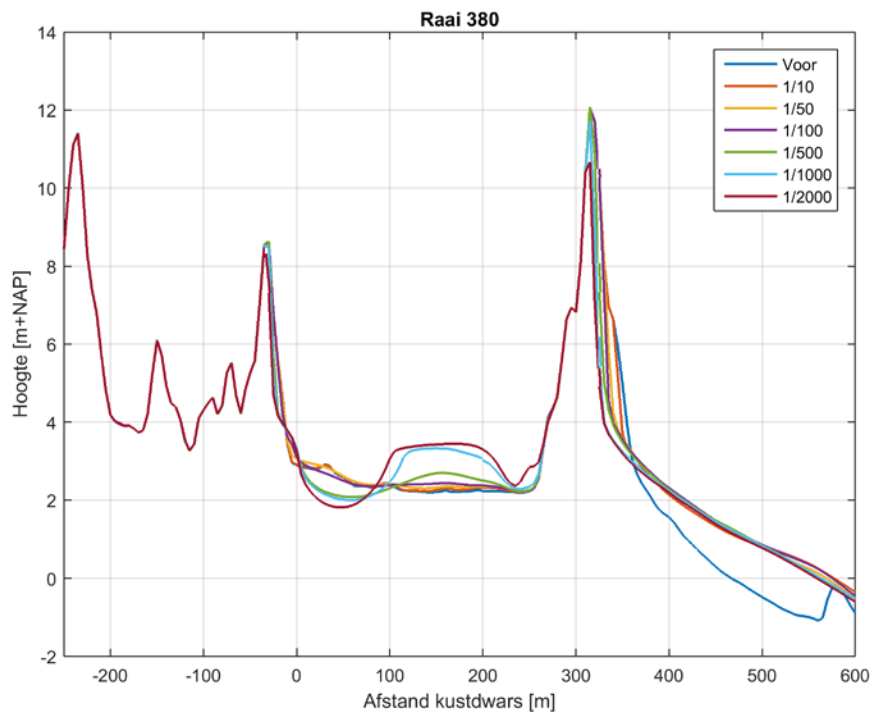
Figuur 6.11 Raai 300 voor scenario 1 (2015) en meerdere stormen zoals berekend door XBeach



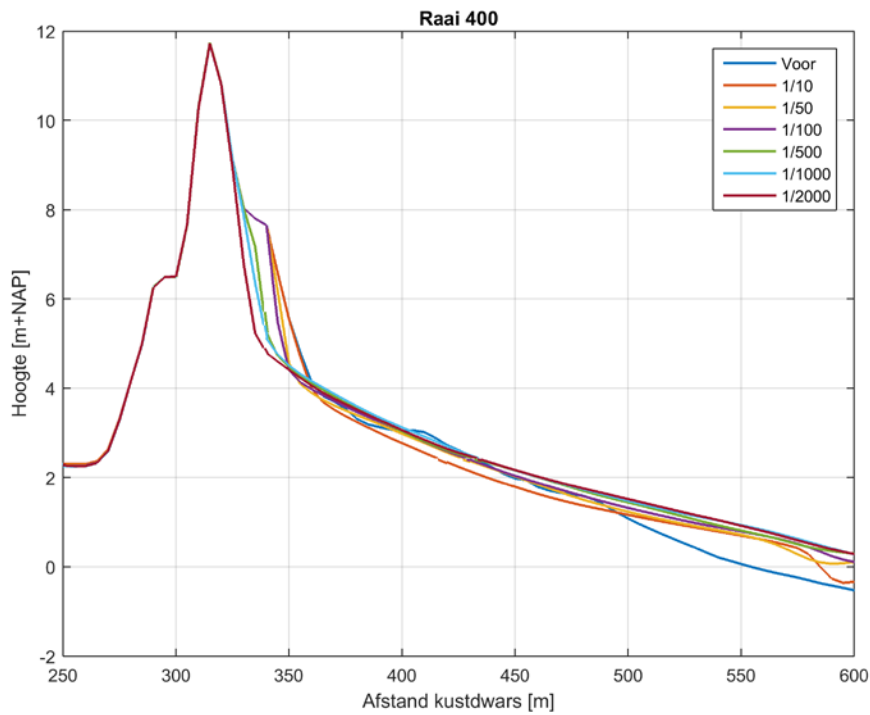
Figuur 6.12 Raai 340 voor scenario 1 (2015) en meerdere stormen zoals berekend door XBeach



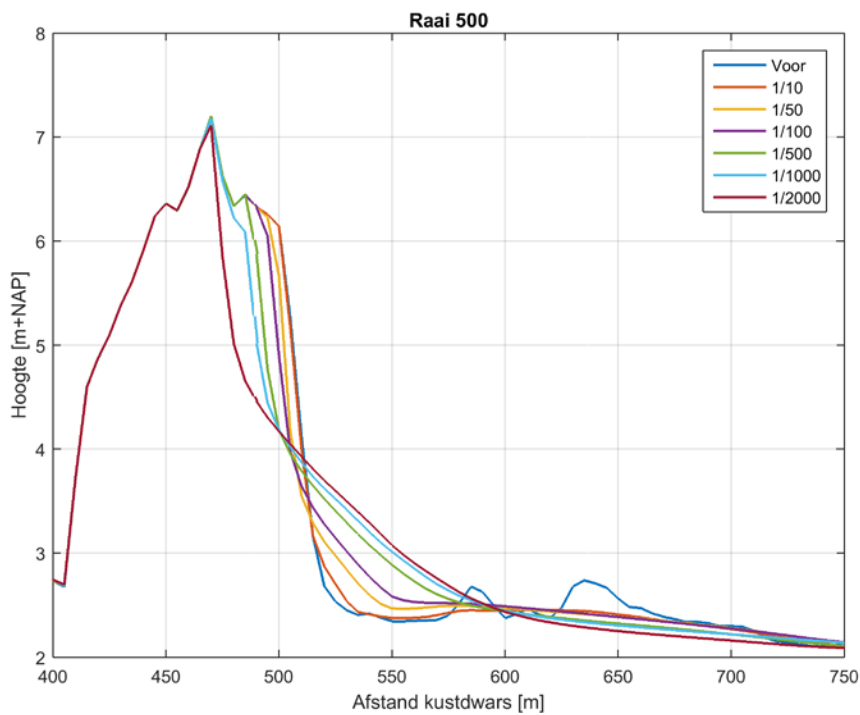
Figuur 6.13 Raai 360 voor scenario 1 (2015) en meerdere stormen zoals berekend door XBeach



Figuur 6.14 Raai 380 voor scenario 1 (2015) en meerdere stormen zoals berekend door XBeach

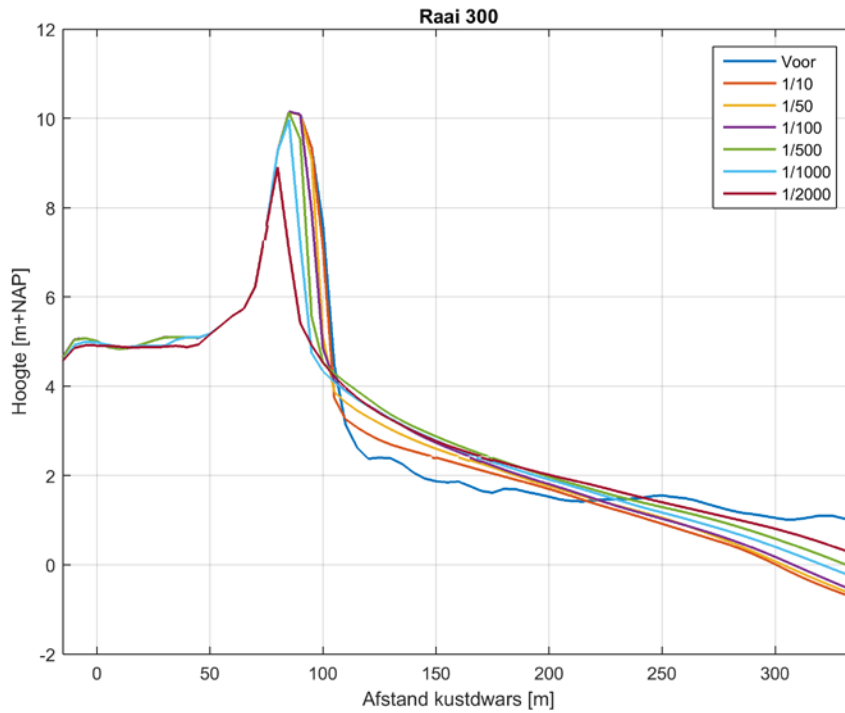


Figuur 6.15 Raai 400 voor scenario 1 (2015) en meerdere stormen zoals berekend door XBeach

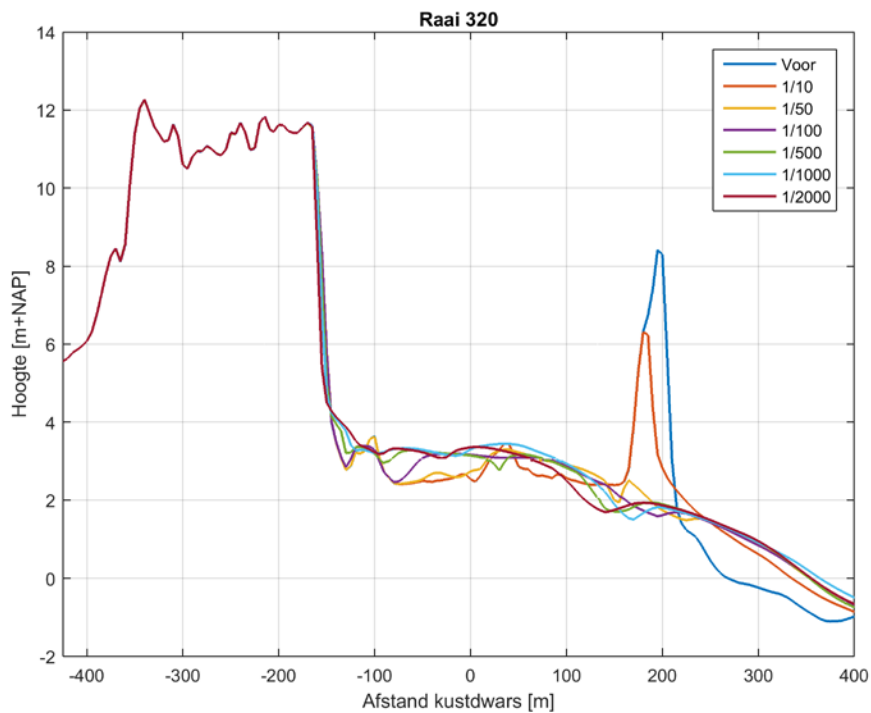


Figuur 6.16 Raai 500 voor scenario 1 (2015) en meerdere stormen zoals berekend door XBeach

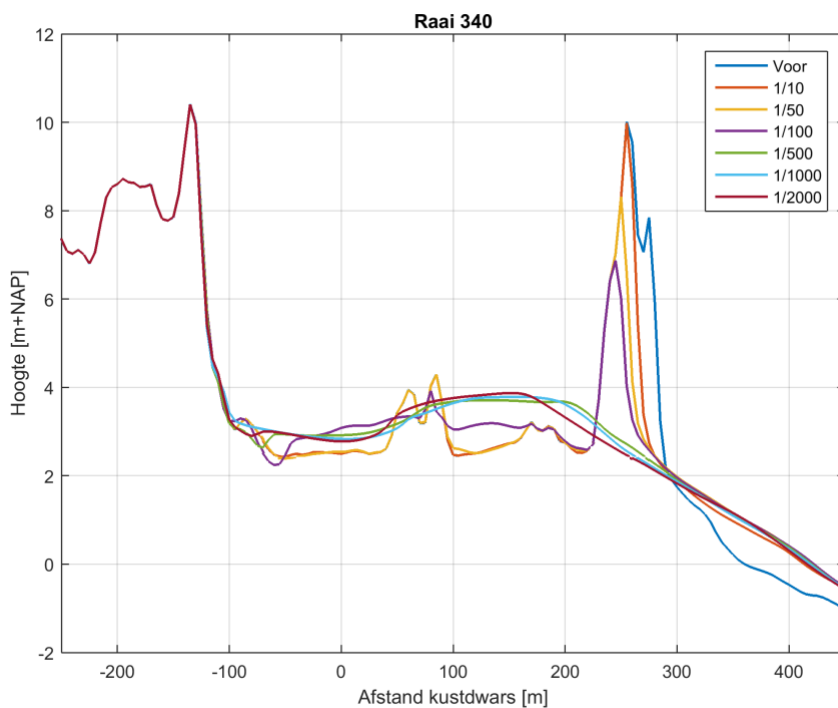
**A.2 Scenario 2: meer duinvolume in probleemgebied (jaar: 2011)**



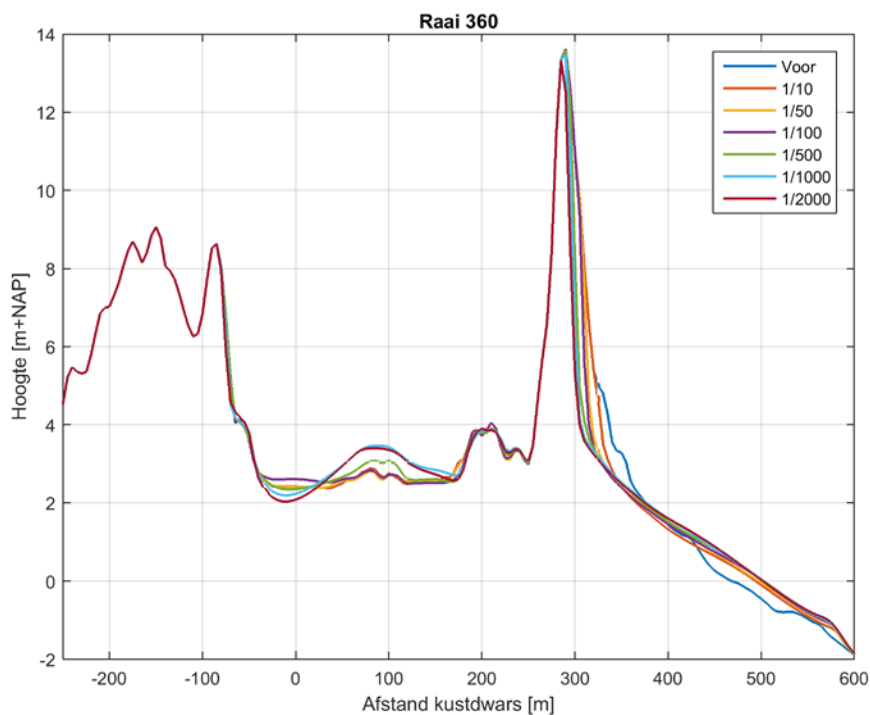
Figuur 6.17 Raai 300 voor scenario 2 (2011) en meerdere stormen zoals berekend door XBeach



Figuur 6.18 Raai 320 voor scenario 2 (2011) en meerdere stormen zoals berekend door XBeach



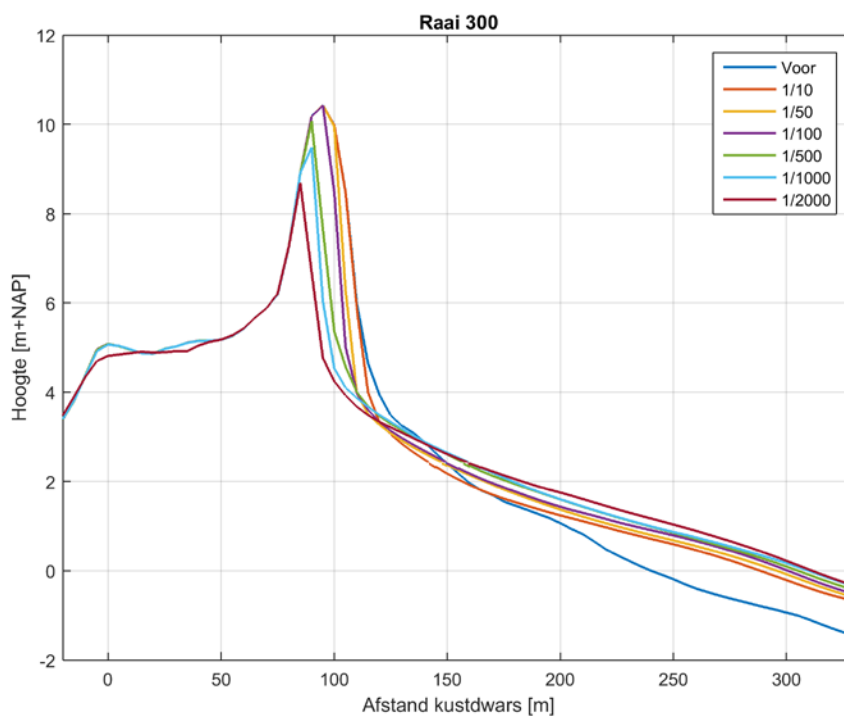
Figuur 6.19 Raai 340 voor scenario 2 (2011) en meerdere stormen zoals berekend door XBeach



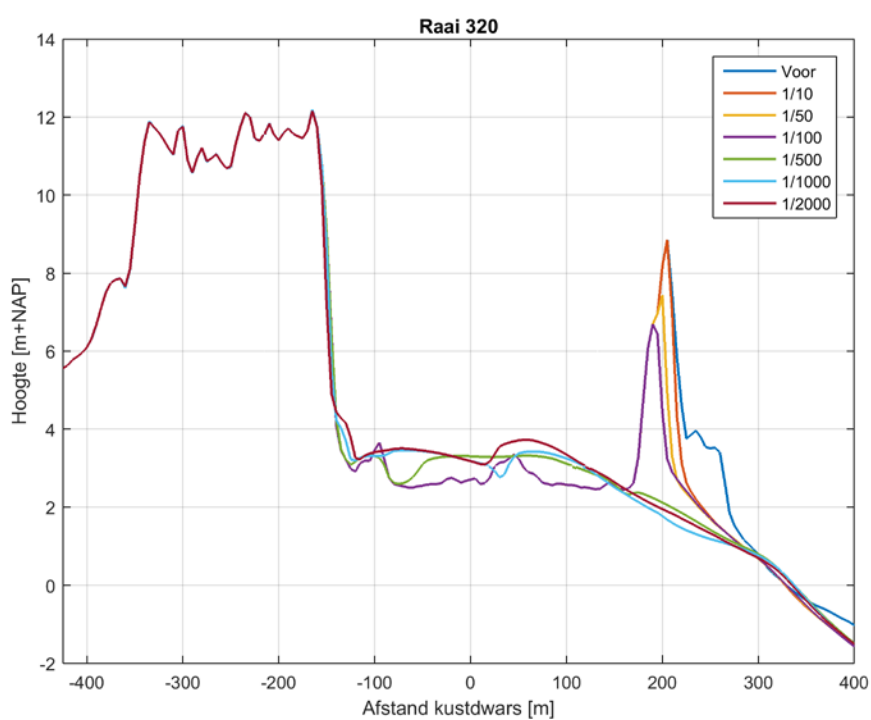
Figuur 6.20 Raai 360 voor scenario 2 (2011) en meerdere stormen zoals berekend door XBeach



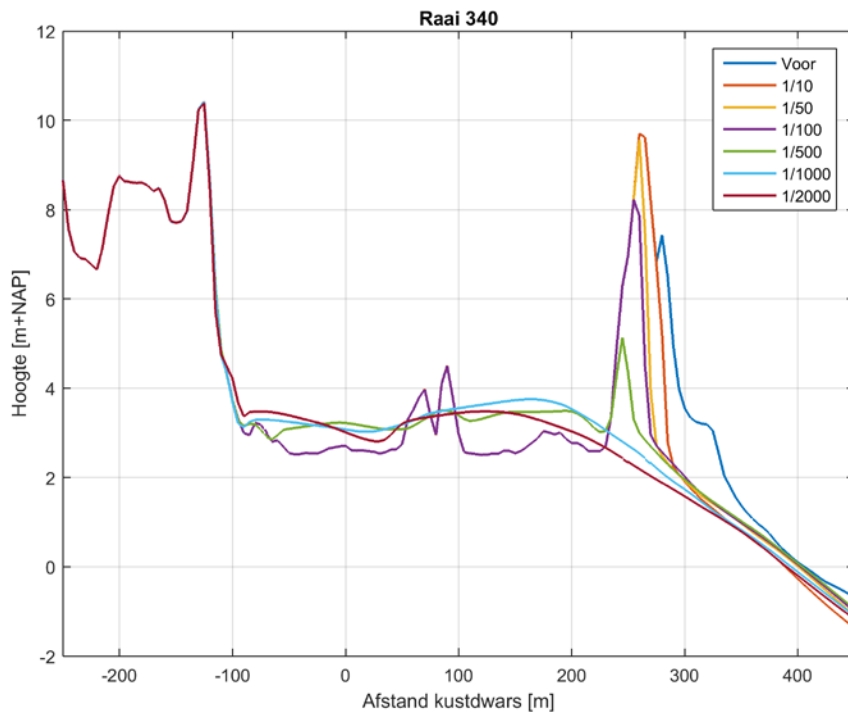
### A.3 Scenario 3: substantieel meer duinvolume in probleemgebied (jaar: 2013)



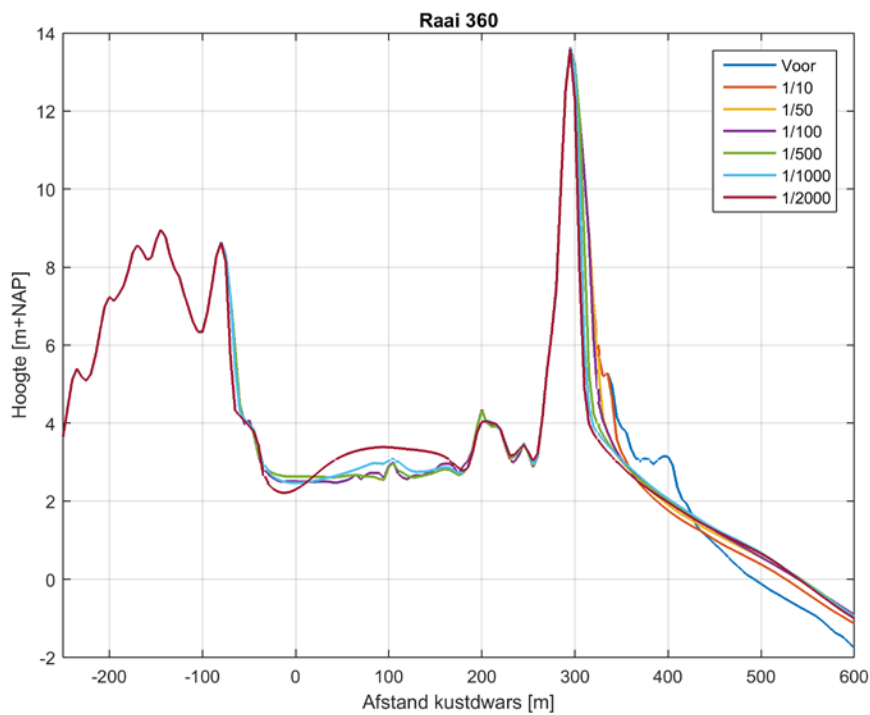
Figuur 6.21 Raai 300 voor scenario 3 (2013) en meerdere stormen zoals berekend door XBeach



Figuur 6.22 Raai 320 voor scenario 3 (2013) en meerdere stormen zoals berekend door XBeach

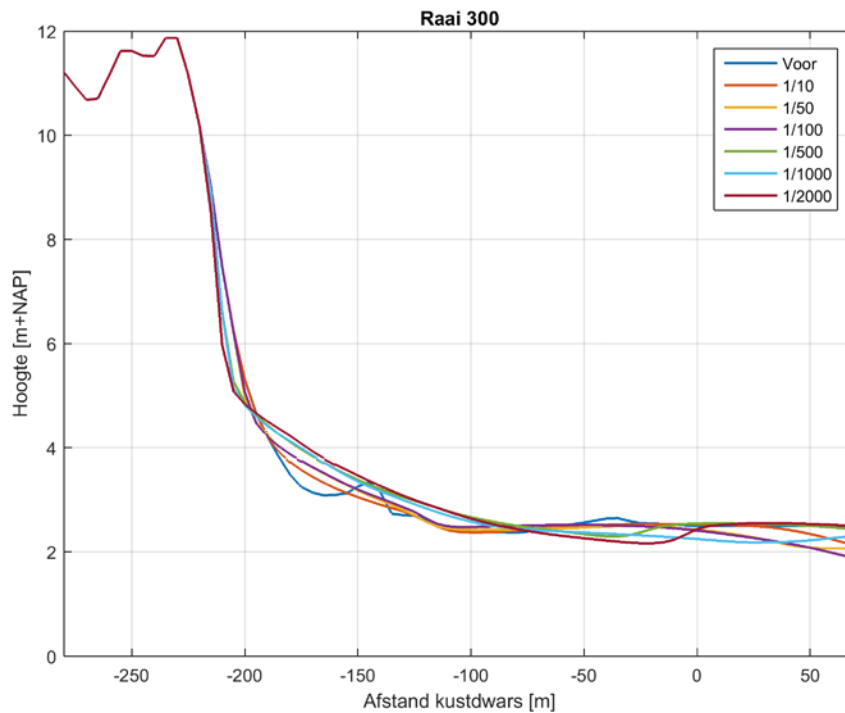


Figuur 6.23 Raai 340 voor scenario 3 (2013) en meerdere stormen zoals berekend door XBeach

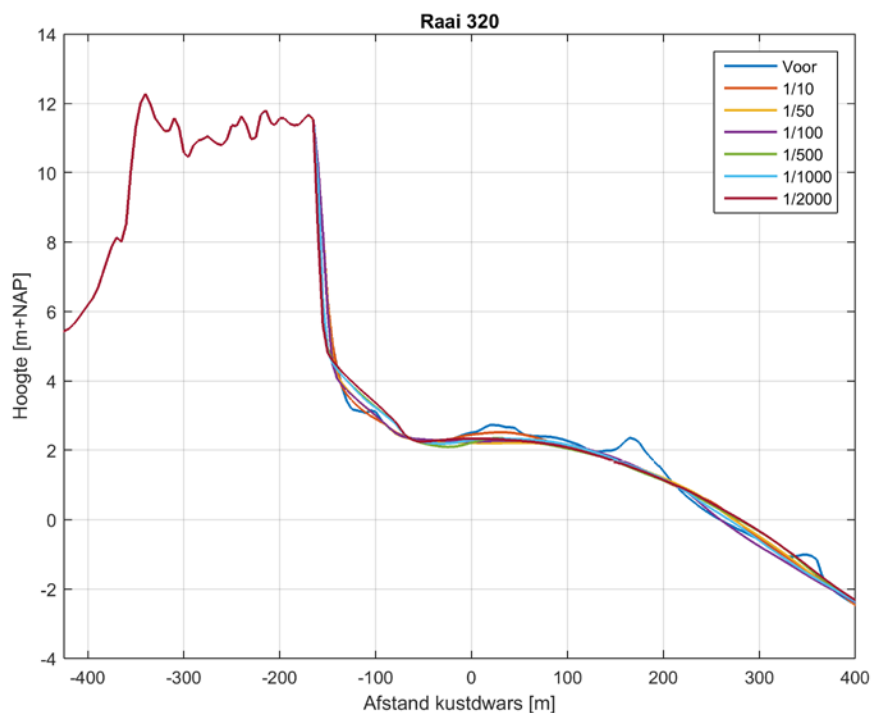


Figuur 6.24 Raai 360 voor scenario 3 (2013) en meerdere stormen zoals berekend door XBeach

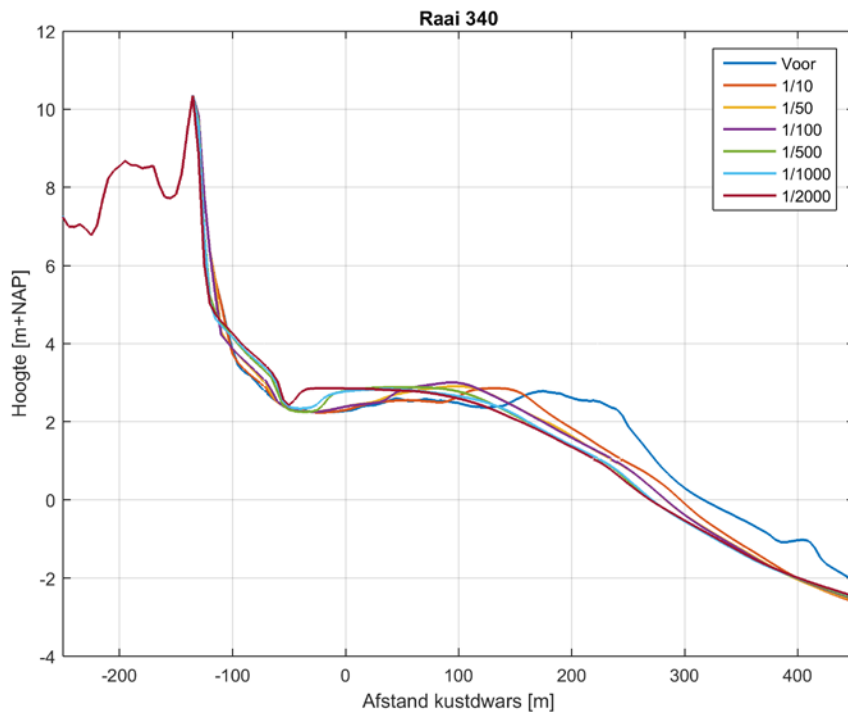
#### A.4 Scenario 4: zonder eerste zeereep (jaar: 2035)



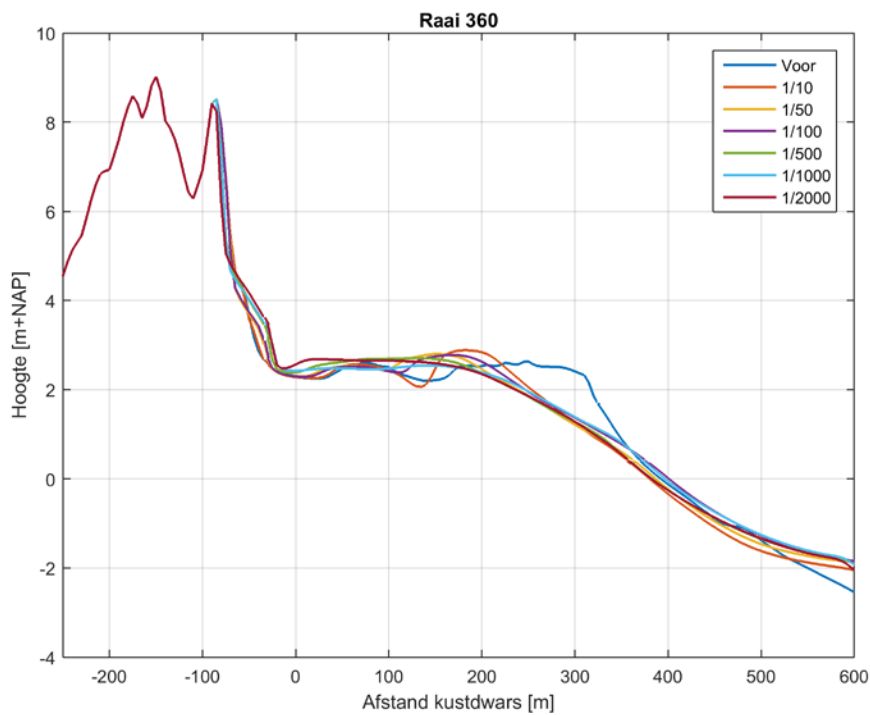
Figuur 6.25 Raai 300 voor scenario 4 (2035) en meerdere stormen zoals berekend door XBeach



Figuur 6.26 Raai 320 voor scenario 4 (2035) en meerdere stormen zoals berekend door XBeach

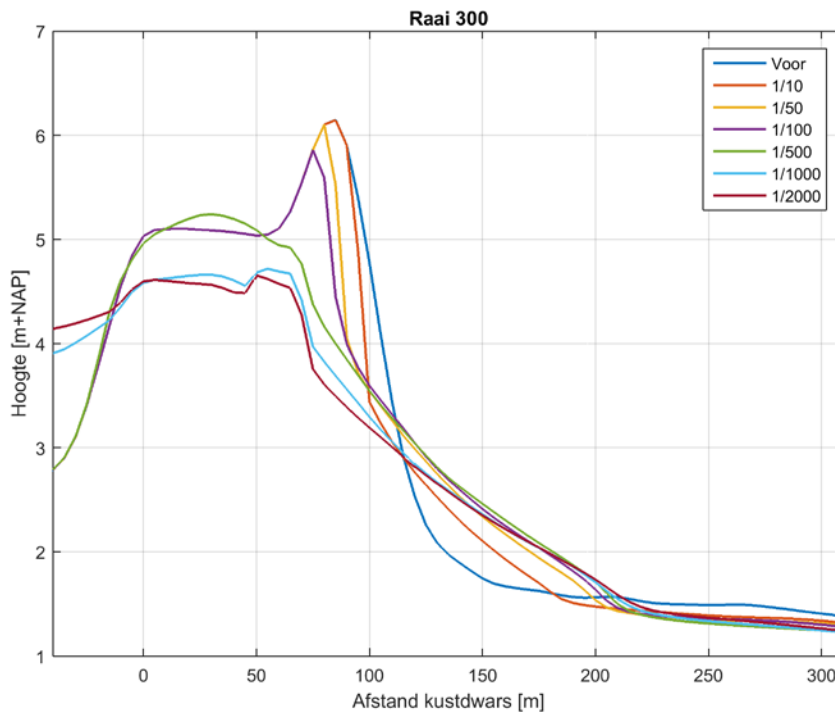


Figuur 6.27 Raai 340 voor scenario 4 (2035) en meerdere stormen zoals berekend door XBeach

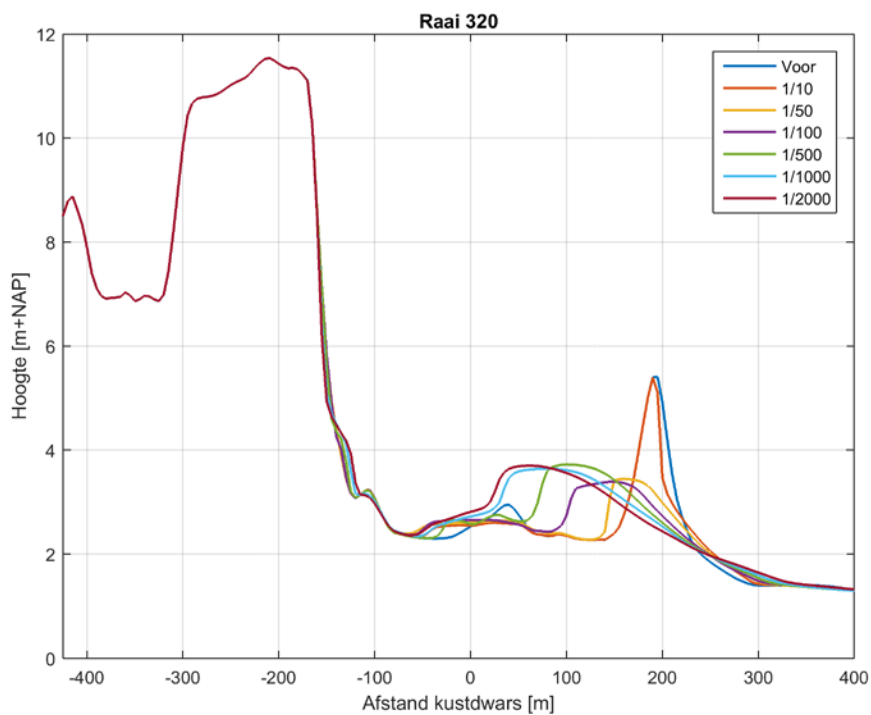


Figuur 6.28 Raai 360 voor scenario 4 (2035) en meerdere stormen zoals berekend door XBeach

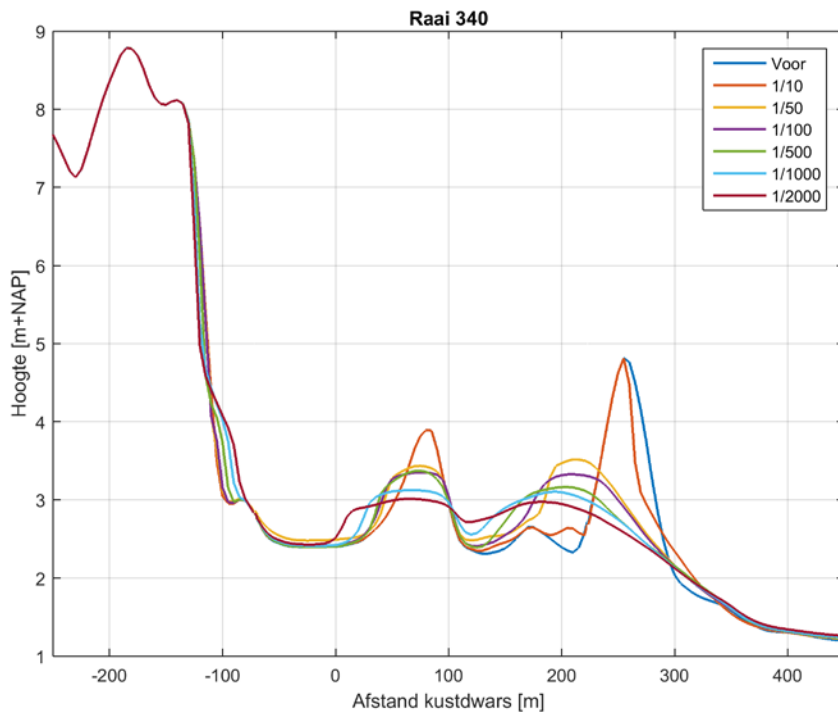
**A.5 Scenario 5: vlak voor aanlanding 'oude' Bornrif (jaar: 1989)**



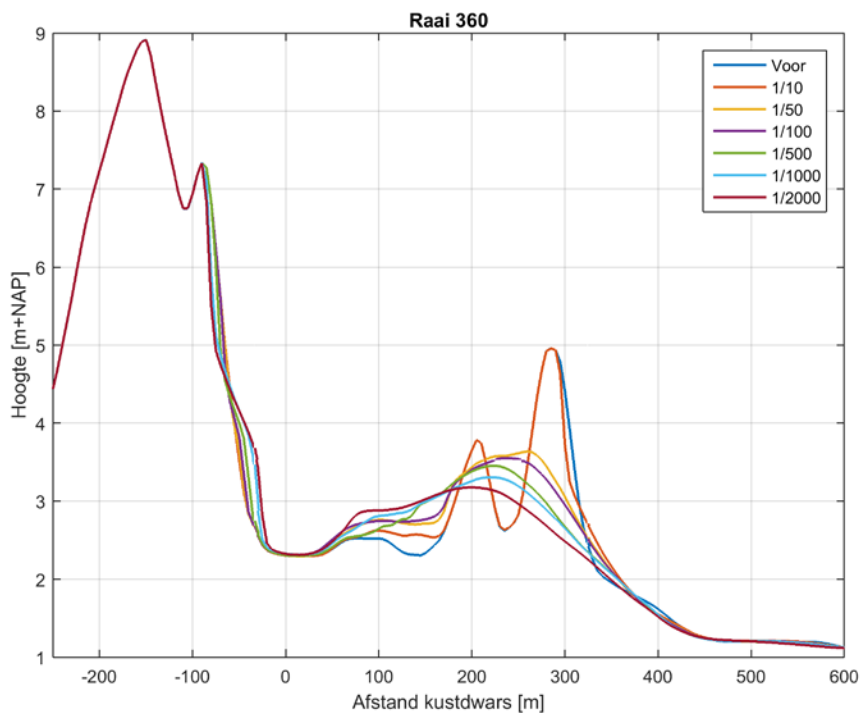
Figuur 6.29 Raai 300 voor scenario 5 (1989) en meerdere stormen zoals berekend door XBeach



Figuur 6.30 Raai 320 voor scenario 5 (1989) en meerdere stormen zoals berekend door XBeach



Figuur 6.31 Raai 340 voor scenario 5 (1989) en meerdere stormen zoals berekend door XBeach



Figuur 6.32 Raai 360 voor scenario 5 (1989) en meerdere stormen zoals berekend door XBeach