

Memo

Aan
Rena Hoogland (RWS), Ernst Lofvers (RWS)

Datum 18 december 2014	Kenmerk 1209381-008-ZKS-0008	Aantal pagina's 43
Van Arnold van Rooijen, Albert Oost	Doorkiesnummer +31(0)88335 7908	E-mail arnold.vanrooijen@deltares.nl
Kwaliteitsborging Dirk-Jan Walstra		

Onderwerp
Regionale advisering Ameland Noordwest

1 Introductie

1.1 Algemeen

Dit memo is opgesteld in opdracht van WVL (Rijkswaterstaat), en bevat een beknopt overzicht van de historische ontwikkeling en de huidige status van de kuststrook tussen kustrai 3,0 en 4,0 op noordwest-Ameland, in het bijzonder de zeereep, ofwel de meest zeewaarts gelegen duinenrij. Voor de kustbeheerders (i.e. Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Rijkswaterstaat Noord Nederland) is het van belang zich een goed beeld van de huidige toestand en trends van de duinen te vormen, om zo een afweging te kunnen maken of eventuele extra maatregelen genomen dienen te worden om de kans op een mogelijke duindoorkraak te verkleinen.

Op basis van dit memo wordt een eerste indruk verkregen over welke ontwikkelingen het betreffende stuk duin op korte en lange termijn heeft ondergaan, en mogelijk in de toekomst zal ondergaan. De inzichten kunnen ook mee worden genomen in het kader van de voorgenomen suppletieactiviteiten van 2015.

1.2 Achtergrond

Op basis van enkele lokale waarnemingen heeft Rijkswaterstaat Noord Nederland haar zorgen geuit over de huidige toestand van de buitenste duinenrij aan de noordwestzijde van Ameland (tussen kustrai 3,0 en 4,0). De Sinterklaasstorm van de nacht van 5 op 6 december 2013 had een relatief groot effect op dit deel van de kust en heeft geleid tot significante duinerosie. Op enkele plekken resteert momenteel nog slechts een dunne duinenrij van maximaal NAP +6,5 tot 9 meter hoog, die bij een fikse volgende storm mogelijk kan doorbreken. Aangezien er geen bebouwing in het achterliggend gebied ligt en de kernzone van de primaire waterkering nog achter deze duinen ligt, is er van een veiligheidsprobleem geen sprake. Er ligt echter wel een terrein van een oude proefboorlocatie van de Nederlandse Aardolie Maatschappij BV (NAM), ook al wordt hier momenteel geen gas gewonnen. Daarnaast ligt het Hollumer waterwingebied in het achterliggende duin.

Rijkswaterstaat Noord Nederland wil weten hoe groot de kans op doorbraak of overspoeling is, wat de risico's precies zijn en of (en welke) beheermaatregelen getroffen moeten worden. Rijkswaterstaat heeft tevens behoefte om de ontwikkelingen in de grotere morfologische

context te kennen en daarmee zicht te krijgen op de lange termijn ontwikkelingen van dit kustvak. Daarnaast zijn de hoge natuur- en recreatiewaarden van het gebied (met name de langgerekte duinvallei Lange Duinen Noord) een punt van aandacht. Er is namelijk een sterke emotionele verbondenheid van de inwoners van Hollum en Ballum met het gebied. Dit bleek al in de jaren '90 van de vorige eeuw. Men reageerde toen bezorgd over een mogelijke doorbraak in het gebied als gevolg van dynamisch kustbeheer.

1.3 Doel van deze studie

WVL heeft Deltares gevraagd een korte memo op te stellen met daarin een overzicht van de bestaande kennis (o.a. uit de beheerbibliotheek Ameland), alsook een overzicht van de meest recente bodemdata, en de daaruit volgende verwachte ontwikkeling. Een belangrijke aanvulling op eerdere studies hierbij is de LIDAR-bodemhoogte-dataset uit 2014, aangezien de effecten van de Sinterklaasstorm hierin aanwezig zijn.

Op basis van de kennis uit de beheerbibliotheek en de data analyse kan een inschatting worden gemaakt van de ontwikkeling op zowel korte als lange termijn. Het doel hiervan is om op basis van deze inschatting een besluit te nemen over of het huidige beheer voldoende is of moet worden aangepast.

Ten slotte bevat dit memo enkele 1D simulaties met het morfologische stormimpact model XBeach, waarin de Sinterklaasstorm van 5-6 december 2013 is gesimuleerd in combinatie met de huidige (2014) bodemligging. Deze simulaties geven een eerste indicatie hoe (on)veilig de duinenrij op NW-Ameland is tegen een doorbraak. Gezien de complexiteit van het systeem kan het echter wenselijk zijn om ook enkele tweedimensionale XBeach simulaties uit te voeren. Op basis van de resultaten van dit memo wordt een suggestie gedaan voor de wenselijkheid van een vervolgstudie waarin eveneens gekeken kan worden naar de consequenties van een doorbraak.

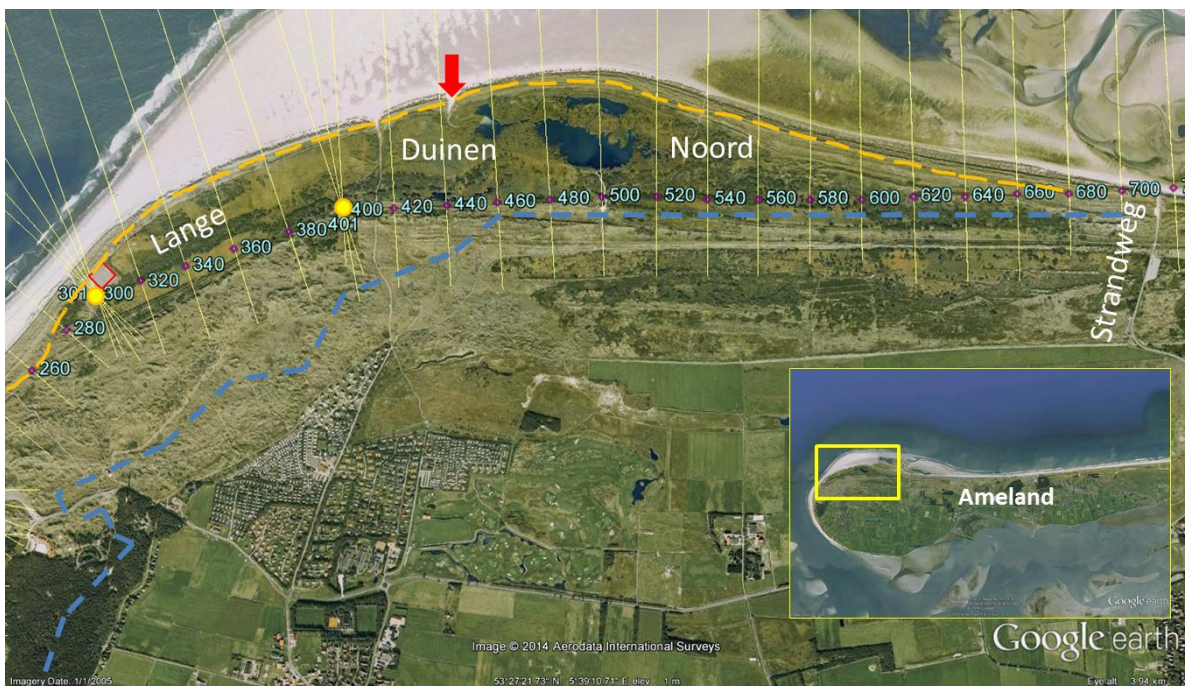
1.4 Leeswijzer

Na de beschrijving van het gebied en het probleem (hoofdstuk 2) en een korte uitleg over de gevolgde aanpak (hoofdstuk 3), wordt ingegaan op de resultaten van het grootschalige gedrag (hoofdstuk 4), en het kleinschalige gedrag (hoofdstuk 5). In hoofdstuk 6 wordt met behulp van een 1D-versie van XBeach gekeken hoe het buitenste duin zich houdt onder stormcondities. Ten slotte wordt in hoofdstuk 7 een voorspelling van de toekomstige ontwikkelingen gedaan en worden tevens aanbevelingen gegeven voor toekomstig beheer, monitoring en onderzoek.

2 Gebieds- & probleembeschrijving¹

2.1 Ligging

Noordwest Ameland bestaat uit het Noordzee-deel van de eilandkop (Figuur 2.1). Vanaf de zee worden in kustwaartse 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 ligt momenteel op ongeveer NAP +6,5m. De binnenste duinen zijn deels natuurlijk en bestaan deels uit stuifdijken. De hoogte varieert sterk, vooral in het westelijke deel. De aaneengesloten duintoppen liggen minstens rond NAP +7 m, terwijl de hoogste duinen tot NAP +25 m reiken. Oostelijk van hoofdstrandpaal 4 (HP4 in Figuur 2.1) gaan de duinen over in een stuifdijk. Deze stuifdijk ligt vrijwel overal op NAP +7m. De enige uitzondering vormt de Strandweg overgang bij Ballum, welke rond NAP +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 NAP +4,8 en NAP +5,4 m. In het gebied ligt verder een fietspad en diverse wandelwegen parallel (Frettepad), en loodrecht op de vallei. 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 (geel-oranje cirkel), de stuifdijk is weergegeven met de gestreepte oranje lijn, en de primaire waterkering is weergegeven met de gestreepte blauwe lijn. Satellietbeeld 2005 Google.*

¹ Bronnen: Oost, 1995; Brijker, 2012; Ecomare-website (<http://www.ecomare.nl/>)

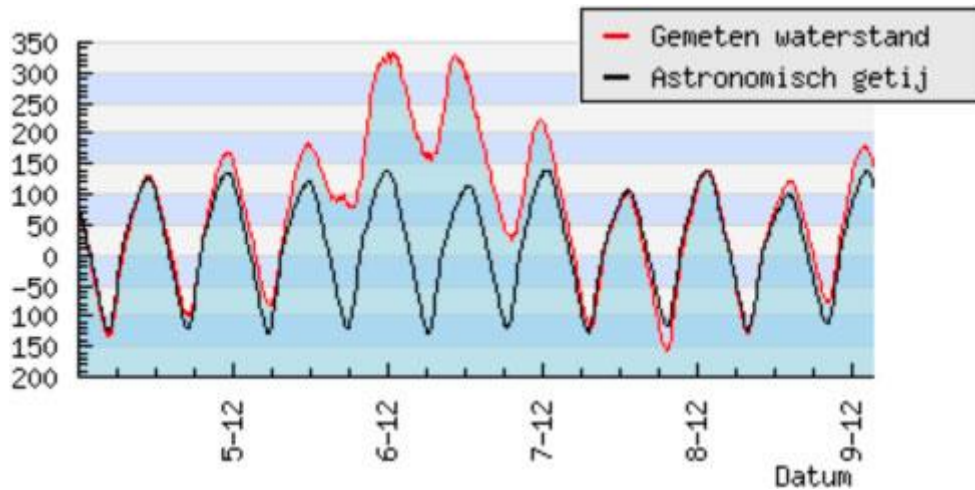
2.2 Ontstaan en ontwikkeling



Figuur 2.2 Topografische kaart 1950 over satellietbeeld 2005 Google Earth (Bron: Tresora, <http://www.frieslandwonderland.nl/>). Duidelijk te zien is hoe de vroegere kustlijn landwaarts van Lange Duinen Noord lag

Het gebied is ontstaan uit een voormalige strandvlakte (Figuur 2.2). Deze is zelf weer ontstaan door de sluiting van een buitendelta-geul toen de zeewaarts ervan liggende buitendelta-plaat verheelde met het eiland. De, ten behoeve van de afsluiting van de Waddenzee, in 1959 aangelegde stuifdijk veranderde het gebied in een moeras. De vallei werd aan de noordzijde begrensd door deze nieuwe zeereep en aan de zuidzijde door de vroegere zeereep, die bekend was als de “steile duinen”. De duinvoet lag toen langs het huidige Rietpad.

Bij kustrai 4,0 en 4,4 vormden in het midden van de jaren zestig een tweetal smalle gaten in de zeereep (zie sluffer in Figuur 2.1). Vanaf 1970 zijn deze gaten open gelaten, en kon bij stormvloed regelmatig zeewater naar binnen dringen. Zeewater heeft daarbij de NAM-put met haar hoge ligging niet wezenlijk beïnvloed. De openingen in de zeereep zijn door verstuing geleidelijk steeds hoger komen te liggen, waardoor instroming van zout water tegenwoordig nauwelijks meer plaats vindt. Elk voorjaar (februari / maart) wordt in een voormalige kerf en op het strand een geul gegraven om zo het waterpeil in het binnenduin te verlagen. Dit is vastgelegd in het beheerplan Rijksgronden en wordt gedaan om de paden in het binnenduin weer toegankelijk te maken en het maaien van riet mogelijk te maken.



Figuur 2.3 Waterstanden tijdens de Sinteklaasstorm van 5-6 december 2013 (station Lauwersoog)



Figuur 2.4 Afslag aan de westkop van Ameland na de Sinteklaasstorm van 5-6 december 2013 (exacte locatie onbekend)².

Tijdens de Sinteklaasstorm van 5-6 december 2013, die gepaard ging met zeer hoge waterstanden en harde wind (Bft 10-11), is er een flink deel van het buitenste duin afgeslagen (Figuur 2.3 en Figuur 2.4, zie ook analyse in Hoofdstuk 5). Hierdoor is op de smalste delen van de buitenste duinrij nog 10-15 m van de breedte van de stuifdijk over. De hoogte is in maart 2014 op sommige delen nog slechts ca. 5,5 m boven GHW (ca. NAP +6,5 m, zie ook hoofdstuk 5).

2.3 Natuurwaarden

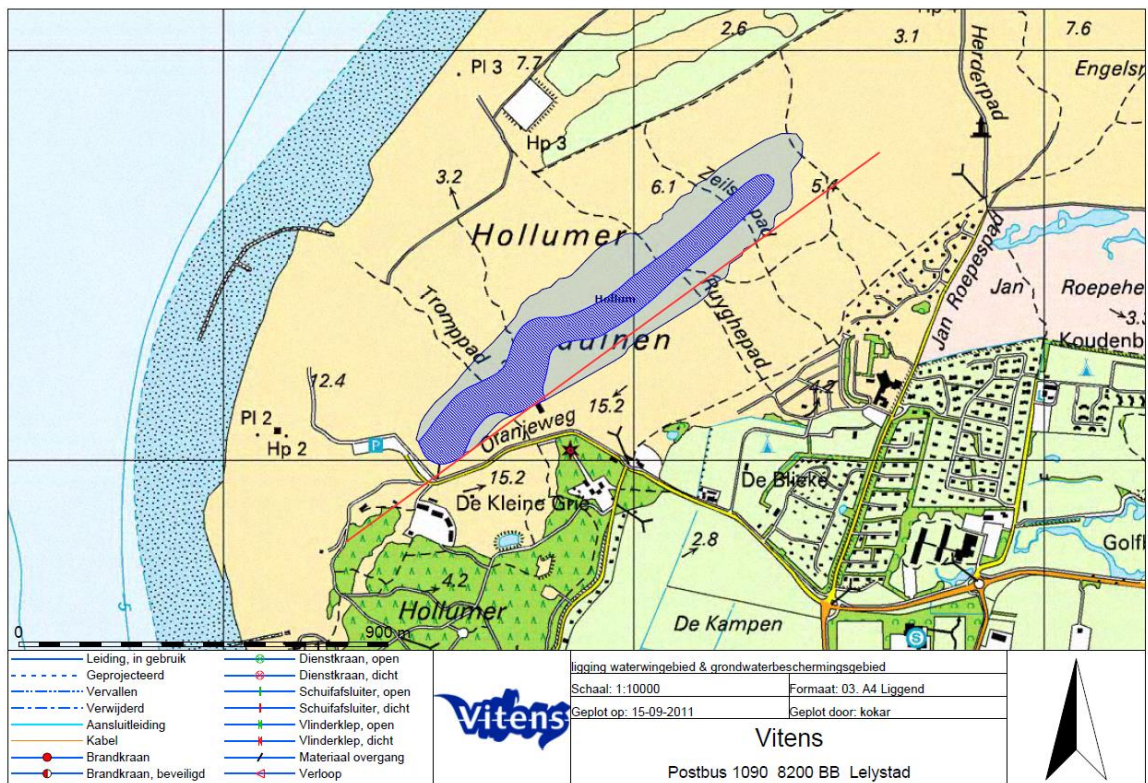
De Lange Duinen Noord en het omgrenzend duin en stuifdijkgebied maakt deel uit van de Amelander Duinen die aangewezen zijn als Natura 2000 gebied. Voor planten en dieren is de Lange Duinen Noord een gebied van grote betekenis. De kern van het gebied wordt gevormd door een aaneengesloten rietmoeras van ongeveer 60 ha. De belangrijkste elementen van dit moeras zijn het open water en de uitgestrekte rietvelden, waartussen drogere duinruggen en natte duinvalleien liggen. Aan zowel de noord- als de zuidzijde ontwikkelde zich duinvegetatie, valleivegetatie, en boom- en struweelgroepen. Door de grote variatie in biotoopomstandigheden in het moeras broeden jaarlijks zo'n 45 tot 50 verschillende vogelsoorten in het gebied. Naast de zeldzame roerdomp, broeden er ook verschillende 'Rode Lijst'-soorten, o.a. graspieper, kneu, nachtegaal, koekoek en slobbeend. Andere

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

veelvoorkomende vogelsoorten in het gebied zijn de rietzanger, de kleine karekiet, de fitis, de rietgors, de bruine kiekendief, de blauwborst, het baardmannetje, de waterral, de meerkoet, de merel, de wilde eend, de winterkoning, de grasmus, de braamsluiper en de houtduif.

2.4 Overige bijzonderheden

In het westelijke deel van het gebied ligt een stuk grond van de NAM met een put, waar geen gaswinning plaatsvindt. Het Hollumer waterwingebied ligt in het stuk duin dat landwaarts van de duinvallei Lange Duinen Noord te vinden is (Figuur 2.5). Uit navraag bij eilandbewoners bleek verder dat zij zeer gesteld zijn op de Lange Duinen Noord vanwege de recreatieve en natuurwaarden. Voor de dorpsbewoners van Hollum is dit één van de belangrijkste natuurgebieden in de nabijheid. Het gebied is onder beheer van Rijkswaterstaat, met ondersteuning van Staatsbosbeheer. De nauwe betrokkenheid van burgers bij de natuur door de relatief grote deelname aan vogeltellingen e.d., de hoge natuurwaarden (o.a. Roerdampen) en het feit dat het één van de recreatief meest aantrekkelijke wandel- en fietsgebieden aan de NW zijde van het eiland is, hebben geleid tot een vrij sterke emotionele betrokkenheid. Dit kwam in de jaren '90 van de vorige eeuw al naar voren bij de discussies over dynamisch kustbeheer waar men bevreesd was voor een doorbraak van de zee in het gebied. In de gebiedsgerichte studie die voor dit kustvak is uitgevoerd voor het toepassen van dynamisch kustbeheer, is afgesproken dat de zeereep tussen paal 49 en 3 gesloten moet blijven, maar dat tussen paal 3 en 5 wel evt. openingen zijn toegestaan.



Figuur 2.5: Ligging waterwingebied Hollum op NW-Ameland.

3 Gebruikte methoden

3.1 Inleiding

In de onderstaande memo is ervoor gekozen om twee deelstudies uit te voeren. De eerste is een analyse van de morfodynamische ontwikkeling van het gebied met behulp van de schalenbenadering (zie paragraaf 3.2). De tweede deel is een analyse van de situatie tussen raai 3,0 en 4,0 (zie paragraaf 3.3).

3.2 Schalenbenadering

Over het algemeen blijkt de, vrij pragmatische, schalenbenadering (Oost, 1995) een effectieve manier te zijn om problemen in de kust te analyseren. Daar is ook in deze studie voor gekozen. De schalenbenadering gaat ervan uit dat het morfodynamische gedrag van een gebied te beschouwen is op verschillende tijd- en ruimteschalen. Tijd- en ruimteschaal zijn onderling gekoppeld. Hoe groter de ruimtelijke schaal die beschouwd wordt, hoe meer tijd over het algemeen benodigd is om een bepaalde vaak karakteristieke ontwikkeling door te maken.

Door op deze wijze ontwikkelingen te beschouwen, stellen we ons het gebied a.h.w. voor als een serie geneste ontwikkelingen. Daarbij vinden ontwikkelingen plaats op een bepaalde ruimte- en tijdschaal, die zelf onderdeel is van een ontwikkeling op grotere ruimte en tijdschaal, maar zij is tevens zelf weer opgebouwd uit ontwikkelingen op kleinere schaal. Een voorbeeld is de ontwikkeling van een buitendelta-geul, die onderdeel uitmaakt van de buitendelta, maar die tevens wordt opgebouwd uit geulbochten die elk hun eigen ontwikkeling doormaken. Via de schalenbenadering kan een probleem a.h.w. worden onderverdeeld in een aantal ontwikkelingen die in elkaar grijpen. Om te analyseren wat er aan de hand is wordt dan gekeken naar die schaal zelf, de bovenliggende schaal (om de context te begrijpen) en de direct onderliggende schaal (om de opbouw en de effecten te begrijpen).

3.3 Aanpak analyse situatie raai 3,0 en 4,0

Met behulp van LIDAR-metingen is gekeken naar de meest recente ontwikkelingen van de kust voor zover niet al behandeld in de beheerbibliotheekrapportage van Elias & Bruens (2013). Gekeken wordt naar zowel de profielontwikkeling zelf als de ontwikkeling van het duinvolume boven NAP +3 m. Dit laatste is een belangrijke indicator voor de sterkte van het duin. Op grond van deze terreinhoogtes is vervolgens met behulp van een 1D-versie van het stormimpact model XBeach een eerste inschatting gemaakt van gevoeligheid van het zwakste profiel voor overstroming en doorbraak. Hiertoe is in eerste instantie een storm doorgerekend met eigenschappen vergelijkbaar met de Sinterklaasstorm van 2013. Daarnaast zijn enkele theoretische stormen gesimuleerd, waarbij de hydraulische randvoorwaarden zijn gekoppeld aan een bepaalde kans van voorkomen.

4 Ontwikkeling van het gebied op diverse tijd- en ruimteschalen

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden op basis van de beheerbibliotheek Ameland de globale ontwikkelingen van het interessegebied beschreven.

Het gebied tussen kustrai 3,0 tot 4,0 maakt deel uit van het duingebied Lange Duinen Noord, gelegen op de noordwest kop van Ameland. Het gedrag van de westkop van het eiland wordt tot op grote hoogte bepaald door:

1) de grootschalige ontwikkeling van het Amelander Zeegat, waarbij de volgende processen in het bijzonder van belang zijn:

- a) de oostwaartse opschuiving van de keel van het zeegat;
- b) het cyclisch aanlanden van platen uit de buitendelta en op kleinere schaal:

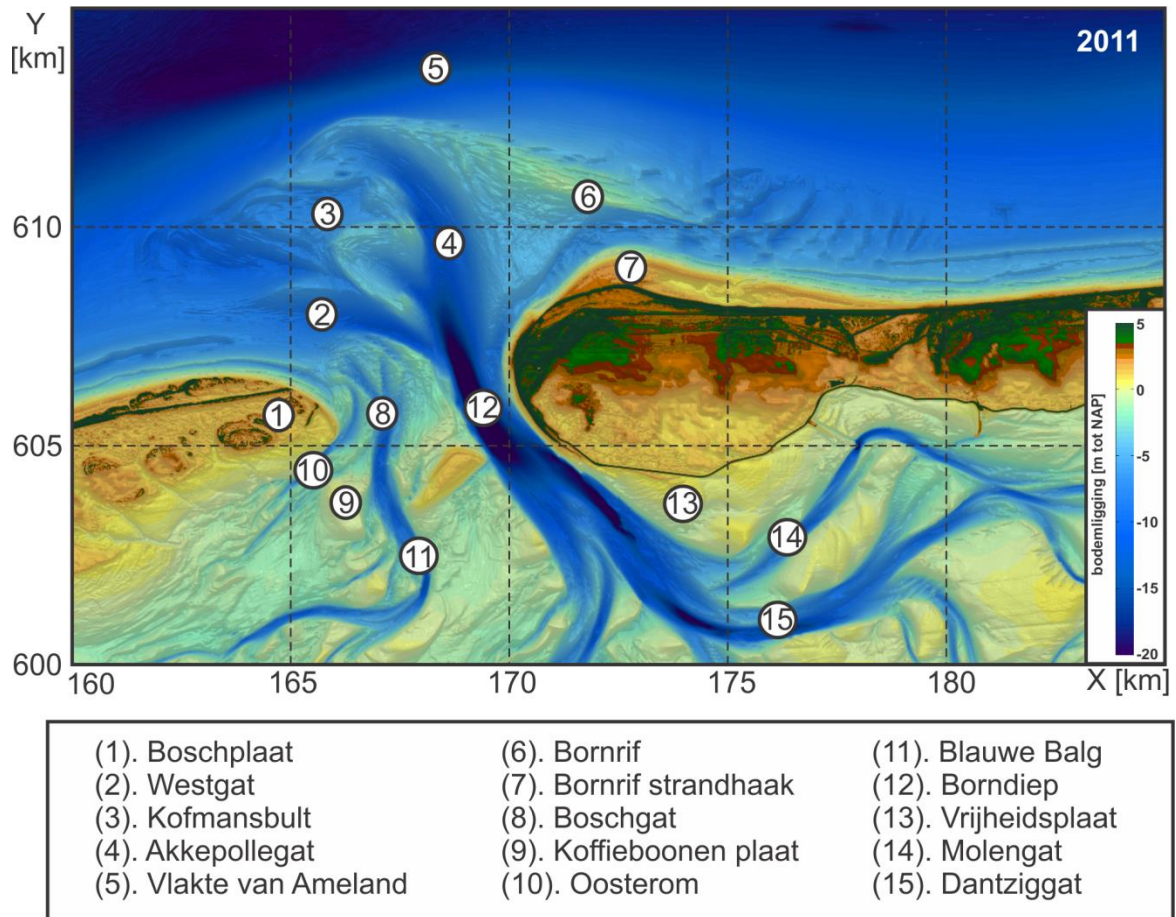
2) de herverdeling van het zand van de getijplaten langs de kust. Hieronder wordt eerst de ontwikkeling op grote schaal besproken, gevolgd door de opdeling langs de kust.

4.2 Grootschalige ontwikkeling van het Amelander Zeegat³

4.2.1 Cyclisch gedrag

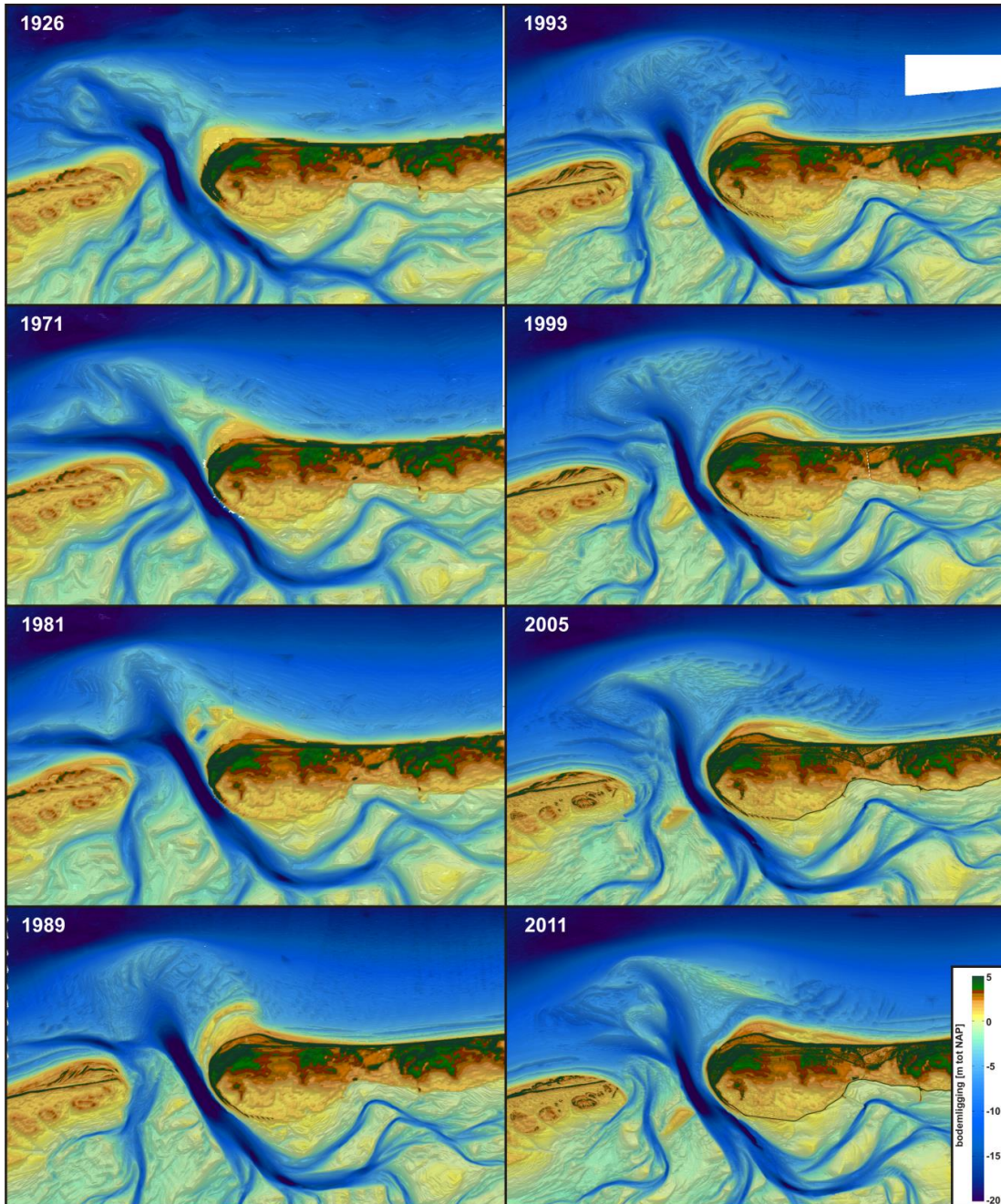
Figuur 4.1 geeft een overzicht van de belangrijkste geulen in het Amelander Zeegat. Historisch gezien vertoont het zeegat een cyclisch gedrag waarin enkele en dubbele geulconfiguraties elkaar afwisselen (Van der Spek en Noorbergen, 1992, Israël, 1998, Israël en Dunsbergen, 1999; Cheung et al. 2007). De 2011 bodem (Figuur 4.1) vertoont een duidelijke hoofdgeul aan de oostzijde, langs de westkust van Ameland (het Borndiep-Akkepollegat [12,4]). Aan de westzijde, langs de Boschplaat [1], bevinden zich de geulen Westgat [2] aan de zeezijde en Boschgat in het bekken [8]. De grootte en invloed van deze twee nevengeulen varieert door de tijd. Op dit moment zijn de geulen over een ondiepte met elkaar verbonden.

³ Bron (grotendeels): Elias & Bruens (2013)

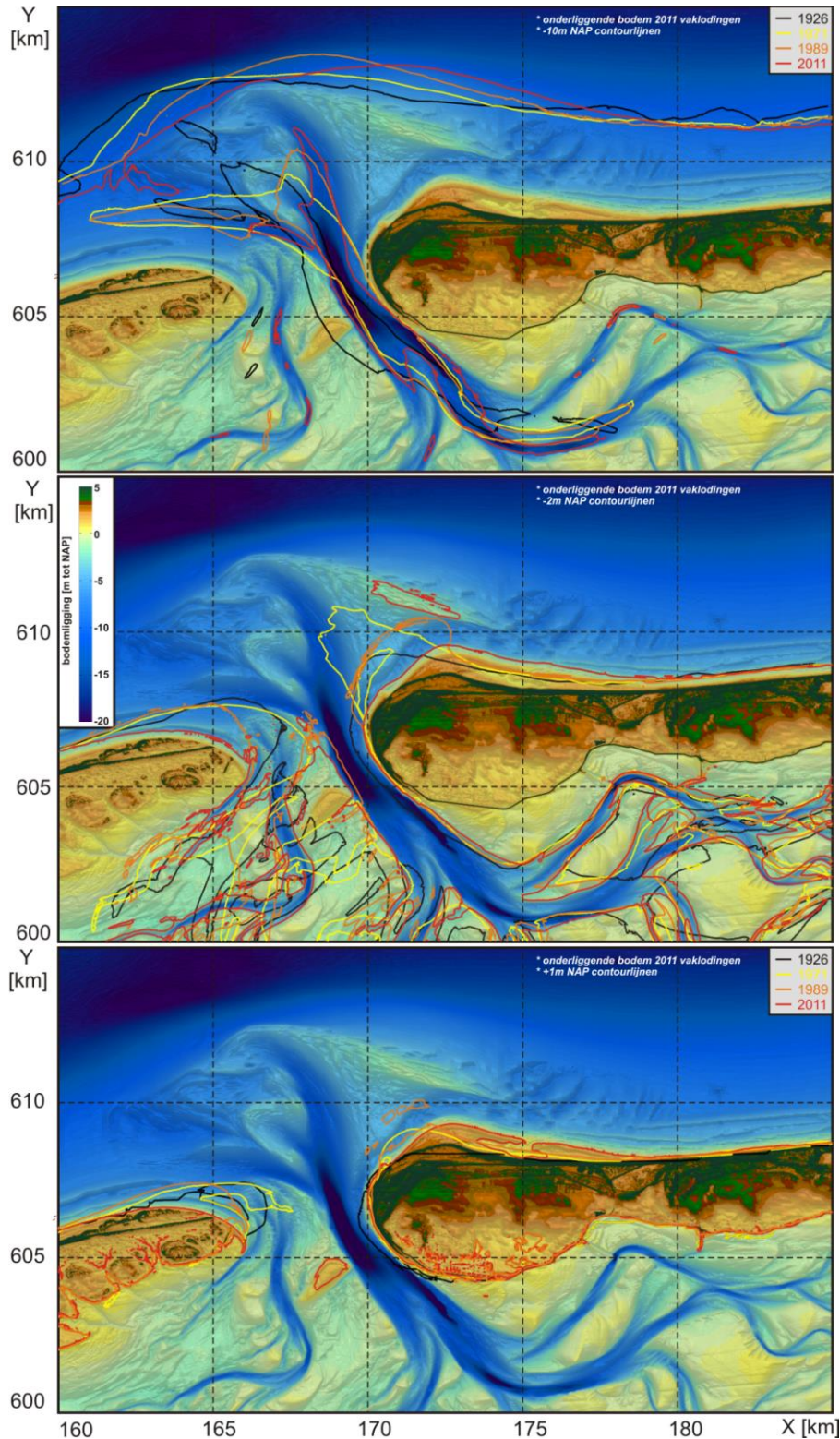


Figuur 4.1 Overzicht van de belangrijkste geulen en platen in het Amelanders zeegegat in 2011.

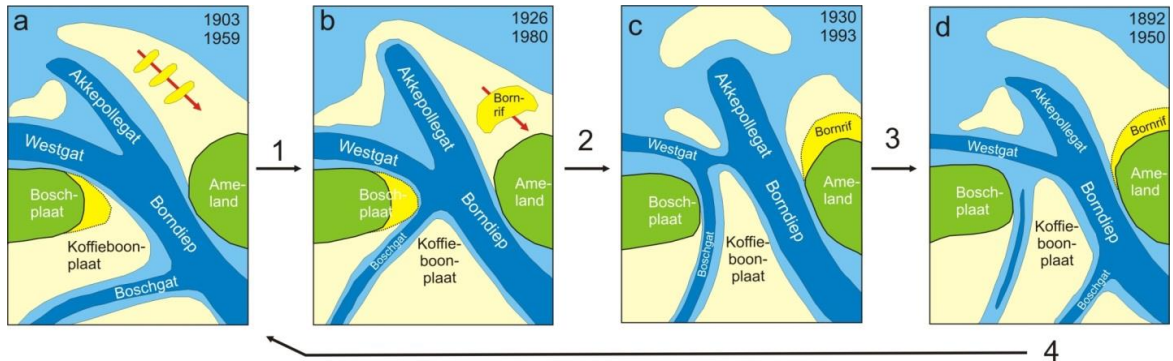
Het grootste plaatoppervlakte op de buitendelta ligt ten noorden van de hoofdgeul. Periodiek is er door het aanlanden van zandbanken sprake van (veel) zanduitwisseling met de kust van Ameland. Een voorbeeld hiervan is de vorming en aanlanding van het Bornrif [6 en 7], zie details verderop in dit hoofdstuk. In deze studie zullen we de buitendelta aanmerken als Bornrif [6]. Het aangelande gedeelte van Bornrif wordt beschreven als strandhaak Bornrif [7]. De ontwikkeling van de strandhaak Bornrif heeft de achterliggende kustontwikkeling van Ameland over de laatste decennia in grote mate gestuurd.



Figuur 4.2 Grootschalige morfologische ontwikkeling van het Amelandse zeevat aan de hand van de bodems gecompileerd vanuit de Vaklodingen datasets. De eilanden zijn ingevuld met het AH-1N (Algemeen Hoogtebestand Nederland met data uit de periode 1996-2003).



Figuur 4.3 Grootchalige morfologische ontwikkeling van het Amelandse zeegat d.m.v. geselecteerde contourlijnen (van boven naar onder): -10 m (representatief voor de hoofdgeulen), -2 m (net onder laagwaterlijn) en +1 m NAP (hoogwaterlijn).



Figuur 4.4 Cycliciteit in het Amelander zeegat (Israël en Dunsbergen, 1999).

De cyclische ontwikkelingen in het Amelander zeegat zijn bekend en onder andere beschreven in Israël en Dunsbergen (1999), Cheung et al. (2007) en samengevat in Elias en Bruens (2012). De uitwisseling tussen het zeegat en de noordwest kust van Ameland is uitvoerig beschreven in Cleveringa et al. (2005). Deze laatste studie vat de resultaten van 10 jaar morfologisch onderzoek in het kader van Rijkswaterstaat programma's KUST2000 en KUST2005 samen. De grootschalige morfologische ontwikkelingen worden bepaald door complexe interacties op een breed scala van tijd- en ruimteschalen (Cleveringa et al., 2004). De dominante veranderingen zijn de toename van het sedimentvolume en de sedimentherverdeling van west (updrift) naar oost (downdrift) op de buitendelta. De hoofdgeul (Borndiep-Akkepollegat) ontwikkelt een westelijke (updrift) uitstroming maar verplaatst als geheel oostwaarts. Dit is in Figuur 4.2 en Figuur 4.4 goed te zien in de periode 1926-1971. Vanaf 1983 lijkt de hoofdgeul zich weer westwaarts te bewegen en zich verder op de buitendelta uit te strekken. In 1989 is te zien dat de oorspronkelijk vrij brede, enkele geul zich heeft ontwikkeld in een 2-geulen systeem. De hoofdgeul (Borndiep) ligt hierin tegen de westelijke kop van Ameland aan, terwijl een tweede, kleinere geul de oostpunt van Terschelling (Boschplaat) doorsnijdt.

Gebaseerd op de analyse van historische data over de periode 1798 tot 1999, wijzen zowel van der Spek en Noorbergen (1992), Israël en Dunsbergen (1999) als Cheung et al. (2007) op het mechanisme van cyclische plaat-geul ontwikkelingen. De geobserveerde cyclus heeft een lengte van 50 tot 60 jaar. In deze plaat-geul cyclus zijn vier karakteristieke stadia te onderscheiden (Figuur 4.4). In fase 1 (Figuur 4.4a) is er sprake van een één geul systeem. Er ligt één dominante hoofdgeul tussen de eilandkoppen die verbonden is met een grote westelijke geul (Westgat) en een iets kleinere zeewaartse geul (Akkepollegat). De Boschplaat zit hier ruim in het zand en steekt relatief diep in het zeegat met een west-oost oriëntatie. Dit systeem gaat geleidelijk over in een twee-geulen systeem (fase 2, Figuur 4.4b). Het Boschgat migreert hierbij dichterbij de Boschplaat toe, terwijl de Boschplaat als een spit verder oostwaarts uitbreidt. Op een bepaald moment wordt de spit doorsneden door een kortsluitgeul die het Westgat en het Boschgat met elkaar verbindt. Er is nu sprake van een twee-geulen systeem in het zeegat (fase 3 en 4, Figuur 4.4c en Figuur 4.4d). Het Boschgat is in het twee-geulen systeem relatief klein ten opzichte van het Borndiep. Op de buitendelta heeft de hoofdgeul (Akkepollegat) nu een zeewaartse richting terwijl het Westgat kleiner is. Vergelijken we dit cyclische model met de opgetreden ontwikkelingen (Figuur 4.4) dan zien we dit gedrag duidelijk terug in de metingen. Dit is op zich logisch want Israël en Dunsbergen gebruiken (tot 1999) dezelfde data. Een tekortkoming van het cyclische model is dat de mechanismen welke de overgang tussen de verschillende fasen in de cyclus slechts beperkt bekend en beschreven is. Dit komt mede door het beperkt aantal lodingen waarop dit model gebaseerd is. Hierdoor

kunnen op dit moment geen (voldoende) nauwkeurige voorspellingen worden gedaan. Gebaseerd op de cyclus geven Israël en Dunsbergen (1999) als prognose voor 2010: *“Voor de Ameland kust is met name de aanlanding van zandbanken met origine op de buitendelta van belang. Als onderdeel van de morfologische cyclus ontwikkelen er zich op de buitendelta zandbanken (zie o.a. Bornrif strandhaak) die onder invloed van golven en getij over de buitendelta richting de kust migreren. Aanlanding van deze zandbanken geeft lokaal een sterke sedimentimpuls”*.

Voor het gebied van Lange Duinen Noord geldt dat dit ontstaan is uit een eerdere aanlanding van een zandplaat uit de buitendelta tussen 1926 en 1930 (figuur 4.4). Een deel ervan is bewaard gebleven. De nieuwe zandplaat die aanlandde tussen 1980-1985 leidde in eerste instantie tot een zeewaartse uitbreiding van de kust. De strandhaak Bornrif vertoont over de periode 1982-2008 een volumeafname van 20 miljoen m³. De erosie heeft vooral geleid tot een nagenoeg verdwijnen van het strand ten zuiden van raai 4,0. De kust ervoor is vrij steil en kent hoge stroomsnelheden, door het opdringen van de oostelijke buitendeltageul (Oostgat). Verwacht mag worden dat erosie zal aanhouden tot het uitsmeren van het zand van de volgende aanlandende zandbank ook dit gebied zal bereiken.

Of het gebied tussen strandpaal 3 en 4 bereikt wordt door dit zand is de vraag. Sinds 2008 nemen de volumes van het Bornrifgebied weer toe. Dit is waarschijnlijk gerelateerd aan het landwaarts migreren van een voorliggende bank op het Bornrif. Deze bank kan mogelijk in de toekomst weer verhelen met de kust van Ameland. Aanlanding van de zandplaat mag volgens het model van Israel & Dunsbergen (1999) verwacht worden rond 2030. Daarbij dient wel opgemerkt te worden dat deze verwachting een grote mate van onzekerheid kent door het beperkt aantal waarnemingen waarop zij gebaseerd is. Het verdient aanbeveling om de analyse van Israel & Dunsbergen (1999) nog eens aan te scherpen op grond van andere karteringen dan alleen de vaklodingen. Uit de bodemopnamen is te zien dat deze nieuwe zandbank zich momenteel niet identiek gedraagt als de strandhaak Bornrif. De aanlanding van de strandhaak Bornrif gebeurde dicht bij de eilandpunt, vanuit het centrale gedeelte van de buitendelta. De nieuwe bank verplaatst zich meer over de rand van de buitendelta en zal waarschijnlijk verder oostwaarts aanlanden. De relatief grote geul die tussen de bank en het eiland aanwezig is en die het zand kustlangs verplaatst zou hier verantwoordelijk voor kunnen zijn. Het verder landwaarts opschuiven van de bank zou er ook voor kunnen zorgen dat deze geul smaller wordt, verder verdiept en landwaarts migreert. Dit kan verdere erosie in het gebied van de strandhaak Bornrif veroorzaken. Deze ontwikkeling moet in de toekomst nauwgezet gevolgd worden. Door het meer oostelijke aanlandingspunt van de volgende plaat is het de vraag of het zuidelijke gebied van Lange Duinen Noord daarvan mee profiteert. Er wordt nu 3 jaarlijks gelood op de buitendelta. Er wordt aangeraden om te overwegen om de plaatverplaatsing beter te monitoren. Dit kan of door de frequentie van de lodingen te verhogen (jaarlijks of zo vaak als nodig) of met behulp van radar of luchtfoto's.

4.2.2 Opdringen van de hoofdgeul het Borndiep

De erosie van de westkust van Ameland is gerelateerd aan de oostwaartse verplaatsing van de hoofdgeul Borndiep. In Figuur 4.3 is deze verplaatsing duidelijk te zien in de ligging van de 10 m dieptecontour. Vanuit de literatuur (Beckering Vinckers, 1947; Oost, 1995; Cleveringa et al., 2005) worden verschillende redenen gegeven voor deze oostwaartse migratie. Zowel de ontwikkelingen van buitendelta en bekken lijken hiervoor van belang te zijn. De verplaatsing van Borndiep hangt samen met:

- (1) de oostelijke verplaatsing van het kombergingsgebied (tussen de wantijen ten zuiden van Terschelling en Ameland). Vanaf 1830 is dit wantij enkele kilometers verplaatst

- (van der Spek, 1995). Deze verplaatsing is mede gestuurd door de opvulling van het achterliggende bekken (de Middellzee). Maar ook de oostelijke getij- en windgedreven resttransporten (de Boer et al. 1991a,b) over de wantijen lijken van belang te zijn.
- (2) het verbinden en vastleggen van Boschplaat met Terschelling in de 19^e eeuw. Door deze afsluiting is de vorming van kortsluitgeulen over de Boschplaat verhinderd. Het debiet kan alleen nog door het Borndiep.
 - (3) het cyclische gedrag in buitendelta ontwikkeling (zie voorgaande paragraaf).

Ook aan de NW zijde is sprake van kusterosie, omdat een geul aanwezig is tussen de buitendeltaplaat westelijk ervan en het eiland (Figuur 4.2 en Figuur 4.3). Deze geul verplaatst zich naar het oosten waarbij deze dicht onder de kust komt te liggen wat leidt tot erosie van het strand. Aanbevolen wordt om voor wat betreft de lange termijn een aparte kwantitatieve studie op te zetten naar de ontwikkeling van de geulen van het Ameland Zeegat en de buitendelta voor zover van belang voor Ameland, omdat het ernaar uitziet dat dit een langdurig probleem aan het vormen is.

4.3 Herverdeling zand van aangelande platen langs de kust

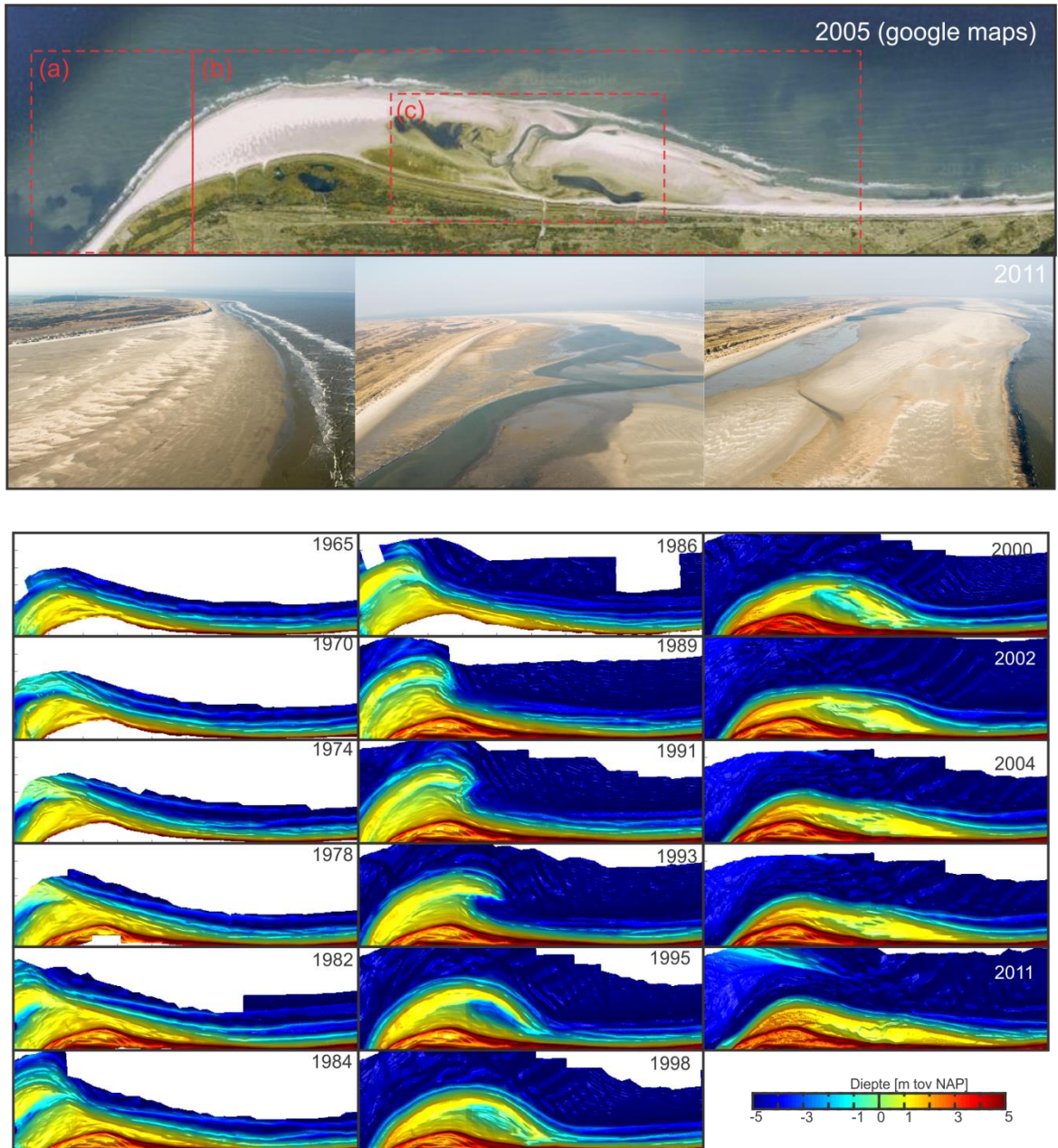
4.3.1 Aanlanden en uitsmeren op de kust

Als onderdeel van de cyclische ontwikkeling van de Ameland buitendelta landen er periodiek zandbanken en daarmee grote zandvolumes aan op de noordwestkust van Ameland. In Figuur 4.3, Figuur 4.5 en Figuur 4.6 is de aanlanding en vervolgens de verspreiding van de strandhaak Bornrif te volgen. Initieel geeft de aanlanding tussen raai 1,0 en 5,0 een grote, bijna instantane, zeewaartse sprong van de kustlijn (Figuur 4.5, 1980-1985). Het aangelande volume wordt daarna in de loop van jaren als een strandhaak langs de kust verspreid. Na aanlanding bouwt de oostelijke punt van de strandhaak snel uit naar het zuidoosten, in de richting van de kust (Figuur 4.5, 1989-1995). Deze uitbouw wordt gevoed door een verplaatsing van de zandbank. De noordwestelijke rand van de strandhaak erodeert en verplaatst in de richting van de kust. Initieel bouwt het noordwestelijke kustgedeelte dan ook sterk uit (tot 1989). Deze uitgebouwde kust trekt zich vervolgens weer snel terug zoals duidelijk te zien is in de periode 1989-1995. Sinds 1990 is de maximale uitbouw van ongeveer 1 km in haar geheel geërodeerd en daarbij 3 km oostwaarts uitgesmeerd. De uitbouw beweegt als een zandgolf vooral in oostelijke richting (Figuur 4.6). Dit betekent dat de maximale uitbouw zich in het westen vroeger voordoet dan in het oosten. In raai 3,0 was dit omstreeks 1988, 4,0 was dit omstreeks 1990, in raai 6,2 rond 1996 en in raai 9,2 omstreeks 2008. Daarna begon de kust zich terug te trekken, omdat zich een geul vormde tussen de kust en de uit de buitendelta naderende nieuwe zandplaat (het zogeheten Oostgat, een marginale buitendeltageul). Hierdoor is er een situatie ontstaan waarbij het strand direct grenst aan een geul. Zand dat bij kust of duin-erosie vrijkomt zal daardoor grotendeels in de geul terecht komen en worden afgevoerd.

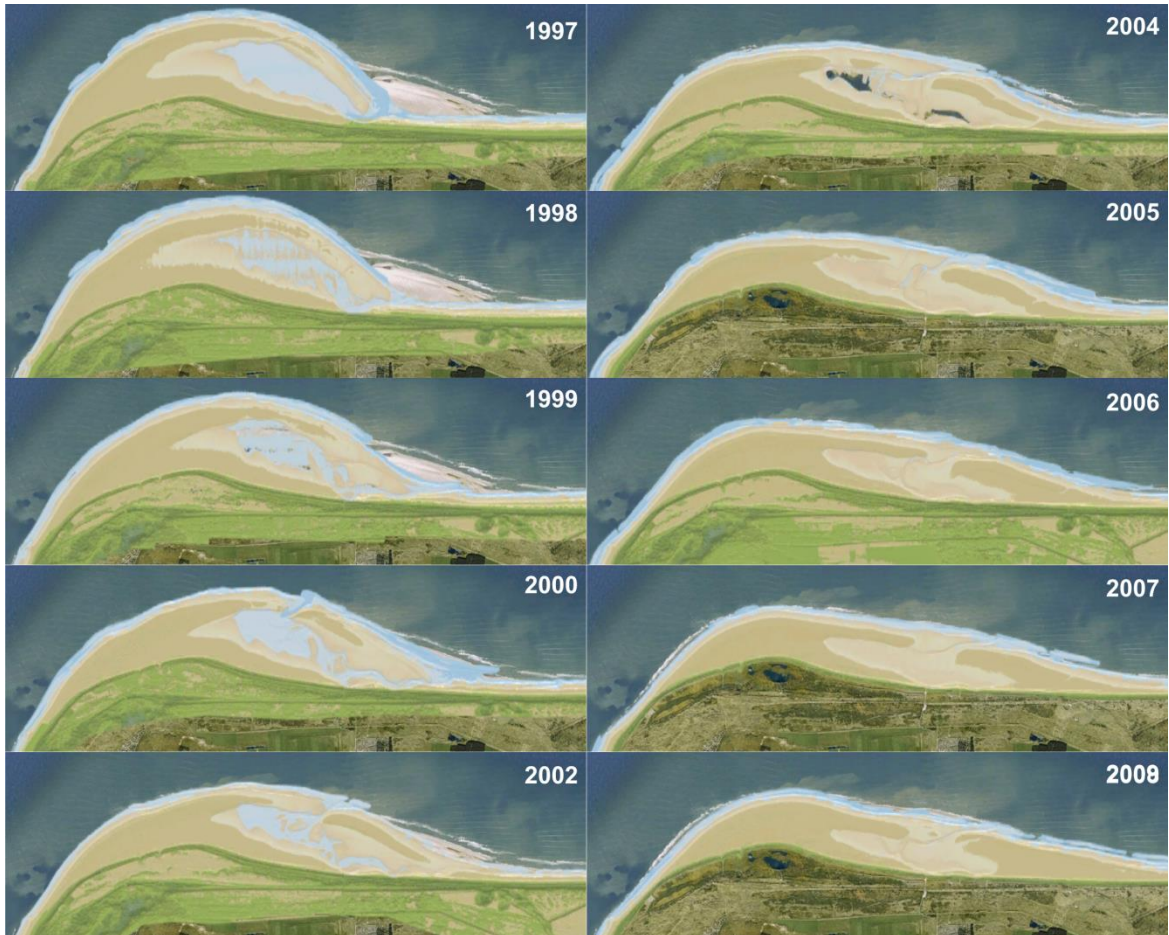
Het kustwaarts migreren van buitendeltageulen is hier en op veel andere plaatsen een belangrijk aandachtspunt. Inzicht in geulontwikkeling en waardoor deze wordt aangestuurd is daarbij essentieel. Ook zou het aanbeveling verdienen om de migratiesnelheden van deze en andere kustwaarts migrerende geulen en banken nader in kaart te brengen, zodat bijtijds potentiële problemen duidelijk worden. Naast inzicht in geulmigratie zou het ook aanbeveling verdienen om inzichtelijk te maken of de natte doorsnede van de geul een trend vertoont van toename (neiging tot groei/erosie) of afname (neiging tot verzanden). Aanbevolen wordt om hiernaar of een specifiek onderzoek te doen voor het Oostgat bij Ameland of een meer generiek onderzoek naar vergelijkbare ontwikkelingen op eilandkoppelen.

Het terugtrekken en oostwaarts uitsmeren zal ook in de toekomst de kustontwikkeling blijven domineren. We kunnen een aantal gebieden met verschillend gedrag onderscheiden. Westelijk bij raai 3,0 – 5,0 vindt er vooral erosie plaats en is het aangelande zand al verdwenen uit het profiel. Tussen raai 5,0 -9,2 vindt erosie plaats maar is er nog een buffer van aangeland zand en oostelijk van raai 10,0 vindt kustuitbouw plaats. Voor het aanlandingsgebied van de vorige zandplaat is een verdere onderverdeling te maken:

- raai 2,5 – 3,0; waar er een structurele terugtrekking van de kust te zien is. Hier ligt de kustlijn nog wel zeewaarts van de BKL.
- raai 3,0 – 10,0; hier vond initieel uitbouw van de kust plaats door het uitsmeren van de Bornrif strandhaak (tot 1998). Met de verplaatsing van de strandhaak oostwaarts schuift ook het aanzandende gebied op. In de laatste jaren vertoont dit gedeelte een terugtrekkende trend.



Figuur 4.5 Aanlanding van de Bornrif strandhaak in detail weergegeven d.m.v. de JarKus metingen.



Figuur 4.6 Aanlanding van de Bornrif strandhaak in detail weergegeven d.m.v. de kust Lidar data.

4.3.2 Ontwikkeling zeereep

Niet alleen het strand maar ook de duinen grenzend aan het strand worden beïnvloed door het cyclisch aanlanden van zandplaten uit de buitendelta. Hiertoe is in Elias et al. (2013) gekeken naar de ontwikkeling van de zeereep op grond van radar hoogte metingen (LIDAR). Dit is gedaan voor de jaren 1988 & 2011.

1988

Tussen raai 2,4 – 9,2 bevindt zich een brede strandvlakte met een zeereep die zich zeewaarts uitbreidt: lage scherpe ruggen met duidelijke accumulatievormen, vergelijkbaar met de primaire duinruggen op Schiermonnikoog. Er vindt sterke aanstuiving en depositie achter stuifschermen plaats. In de zeereep vindt overstuiving plaats, vaak ook op de landwaartse helling. Het beheer beperkt zich tot het plaatsen van stuifschermen en het reguleren van de overstuiving. Winderosie lijkt nauwelijks voor te komen. In de zeereep bevindt zich op twee plaatsen een opening (slufter).

2009

Het gebied wordt voor de situatie in 2009 in twee stukken verdeeld: raai 2,4 - 5,0; en raai 5,0 - 8,2. Het eerste stuk, raai 2,40 - 5,0 heeft een dynamische en aanstuivende zeereep, die hoger en breder werd. Het volume nam gestaag toe, maar sinds de periode 1990-2000 is de toename sterker dan daarvoor. Dit kan veroorzaakt zijn door suppleties, zie Tabel 4.1. De toename is in raai 3,6 het meest extreem, met een aanwas van meer dan $26\text{m}^3/\text{m}^1/\text{jaar}$. Voor

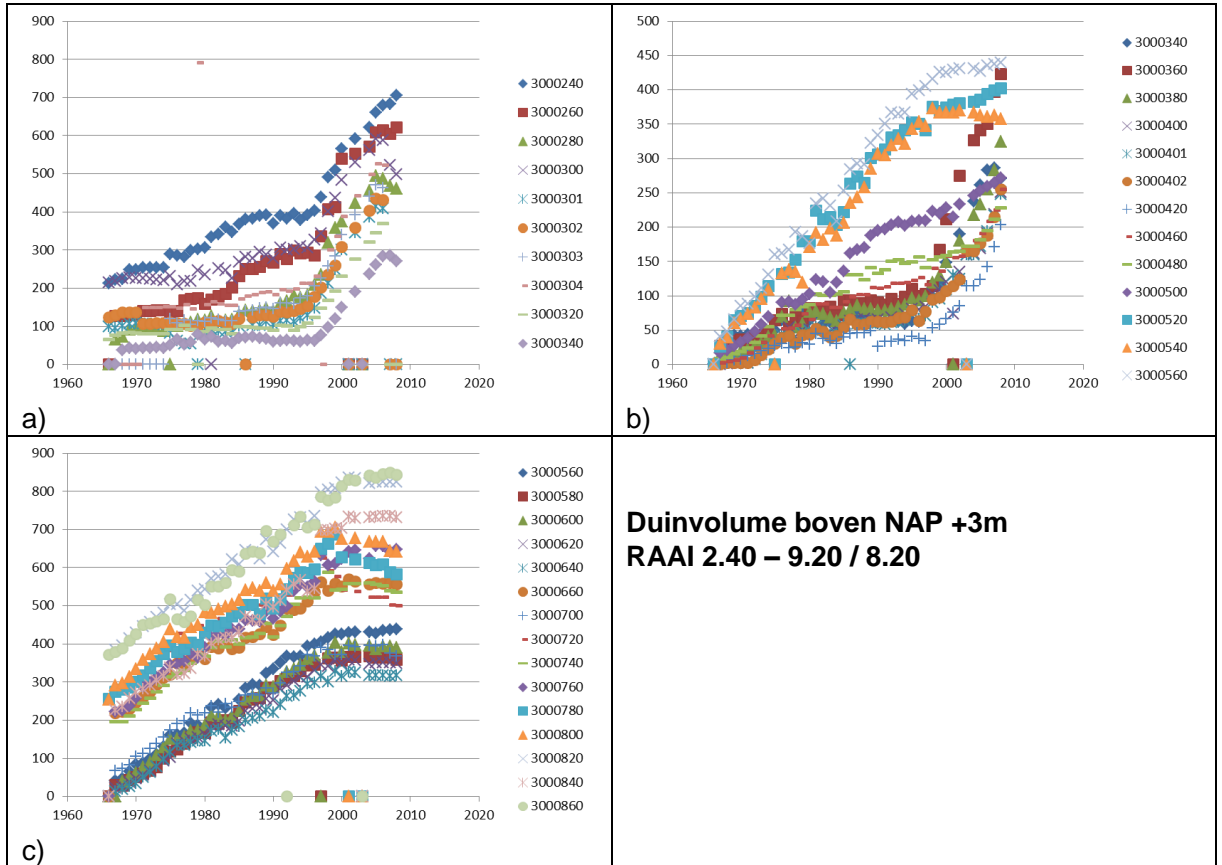
een aantal profielen (2,8 tot en met 3,4) is sinds 2008 een afname waar te nemen. De winderosie lijkt beperkt in de zeereep. De sluffers (meer kerven) zijn nog steeds open, maar ook hierdoor stuift nauwelijks zand naar binnen toe.

In het tweede stuk, van raai 5,0 tot en met 8,2 is de zeereep weinig of niet dynamisch, als gevolg van groenstrandontwikkeling. Plaatselijk is er sprake van embryonale duinontwikkeling op het strand. Tussen raai 6,8 en 8,0 is de duinvoet door erosie door een opdringende buitendelta-geul landwaarts verplaatst. In het verleden was er sprake van een volumetoename, maar vanaf circa 2000 is dit gestagneerd. Tussen raai 3,4 en 6,6 is nooit gesuppleerd, in de overige stukken is diverse malen gesuppleerd.

Tabel 4.1 Overzicht uitgevoerde suppleties NW-Ameland

Jaar	Type	Volume	Locatie
1997	Strand	280 m ³ /m	Raai 120-300
2004	Strand	340 m ³ /m	Raai 200-320
2007	Vooroever	1000 m ³ /m	Raai 200-302
2007	Strand	250 m ³ /m	Raai 200-320
2010	Strand	950 m ³ /m	Raai 200-400

In Figuur 4.7 is de ontwikkeling in duinvolume weergegeven t/m 2009. In hoofdstuk 5 worden de volumeontwikkeling t/m 2014 behandeld. Hierin zijn ook de effecten van de Sinterklaasstorm zichtbaar waarbij een groot deel van de duinen aangetast door sterke erosie.



Figuur 4.7 Volume (m^3) boven +3m NAP per jaar voor raai 2,4 t/m 3,4 (a), raai 3,4 t/m 5,6 (b) en raai 5,6 t/m 8,6 (c), zie legenda (nummering in legenda gebaseerd op de JarKus raainummering, bestaande uit kustvaknummer 3, gevolgd door enkele nullen en de RAAI locatie in decameters).

5 Data analyse profielen

Om inzicht te krijgen in de ontwikkeling van de buitenste duinenrij tussen strandpaal 3 en 4 over de afgelopen jaren, en de huidige staat van het duin is gebruik gemaakt van de LIDAR-metingen die elk jaar in het kader van het JarKus-programma worden uitgevoerd. Voor de periode 2005-2014 zijn gebiedsdekkende bodemhoogtedata met een resolutie van 20 m beschikbaar gesteld door Rijkswaterstaat⁴. Daarnaast is gebruik gemaakt van de individuele JarKus profielmetingen voor de periode 1965-2014 om de ontwikkeling over een langere termijn te onderzoeken⁵. Ten slotte is een hoge resolutie (5 m) LIDAR-opname voor de periode 2011-2014 beschikbaar gesteld door RWS.

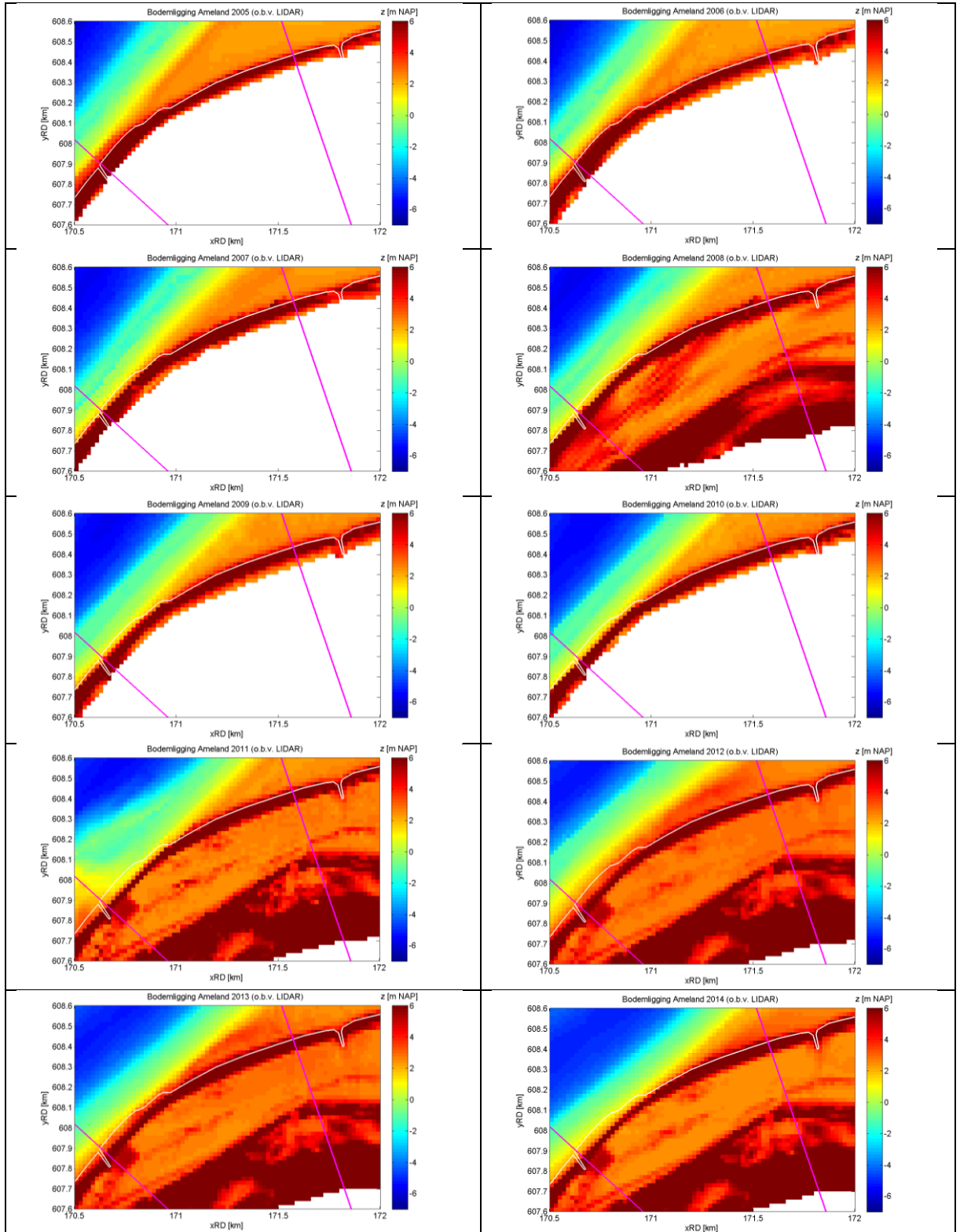
5.1 Gebiedsdekkende bodemdata

De gebiedsdekkende data is weergegeven in Figuur 5.1 tot en met Figuur 5.3. De snapshots laten voornamelijk zien dat de buitenste duinenrij tussen paal 3 en 4 in de afgelopen 10 jaar dunner is geworden. In de meting van 2011 is de aanleg van de 2010 suppletie (tussen raai 2,0 en 4,0) ten zuiden van raai 3,0 te zien. In de meting van 2012 is de suppletie volledig aangelegd en is ook al voor een deel uitgesmeerd langs de kustlijn. Uit de vergelijking tussen de bodemligging in 2013 en 2014 kan eveneens worden geconcludeerd dat de breedte van het duin sterk is gereduceerd.

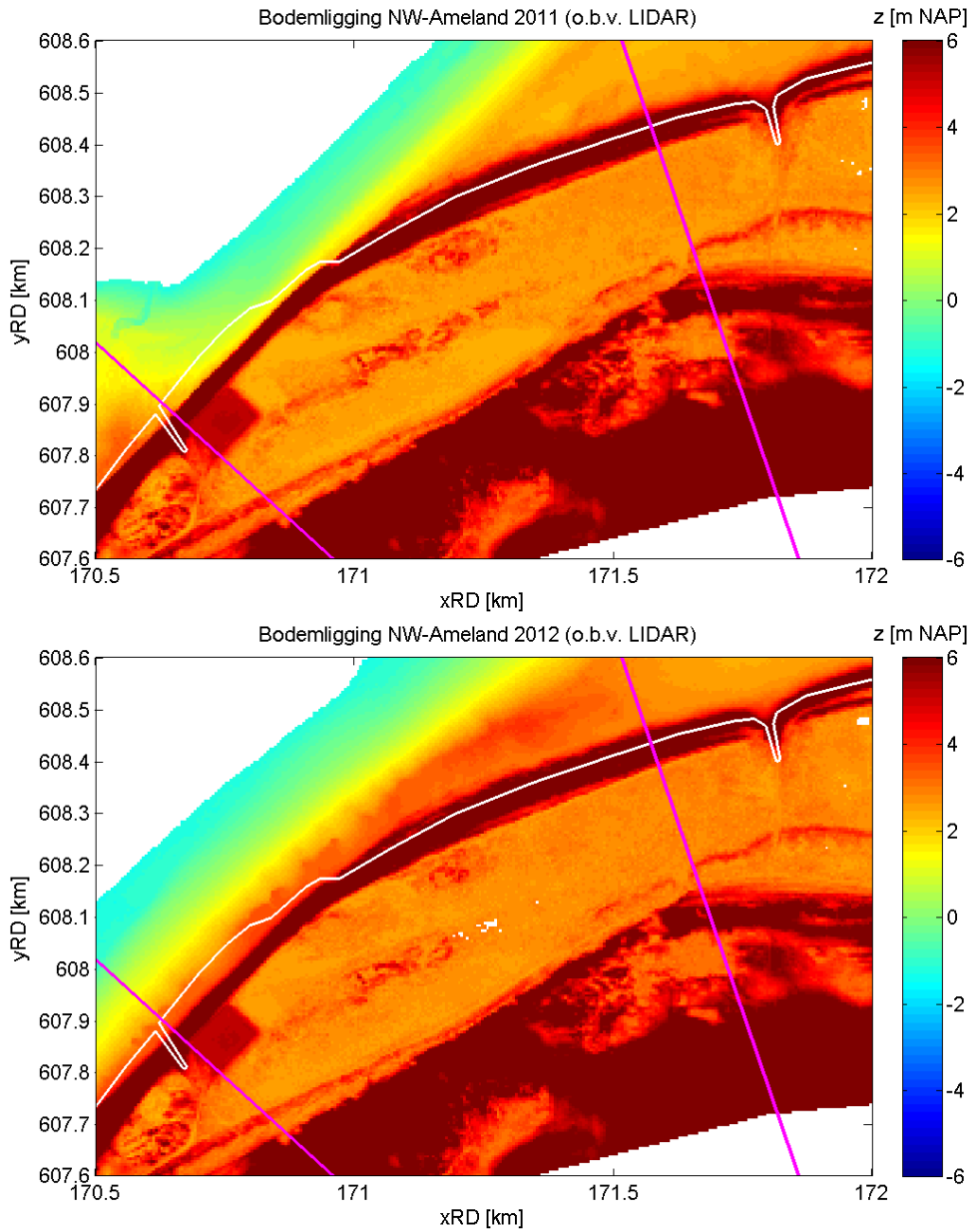
In Figuur 5.4 zijn de cumulatieve bodemveranderingen tussen 2013 en 2014 weergegeven (bodemligging 2014 – bodemligging 2013). Uit deze figuur blijkt dat niet alleen het hoogste deel van de buitenste duinenrij sterk geërodeerd is, maar dat ook op lagere delen zeewaarts van het duin significante erosie heeft plaatsgevonden. Dit bevestigt de lokale observaties en kan zeer waarschijnlijk (grotendeels) worden toegekend aan de Sinterklaasstorm die in de nacht van 5 op 6 december 2013 optrad. Merk op dat de aanwezigheid van (duin)vegetatie kan leiden tot onnauwkeurigheden in de metingen. Dit verklaart mogelijk de erosiepatronen aan de binnenkant van de duinen in Figuur 5.4.

⁴ Gedownload van de RWS ftp-schijf, directory: 'Beschikbaar/Jarkusgrids'

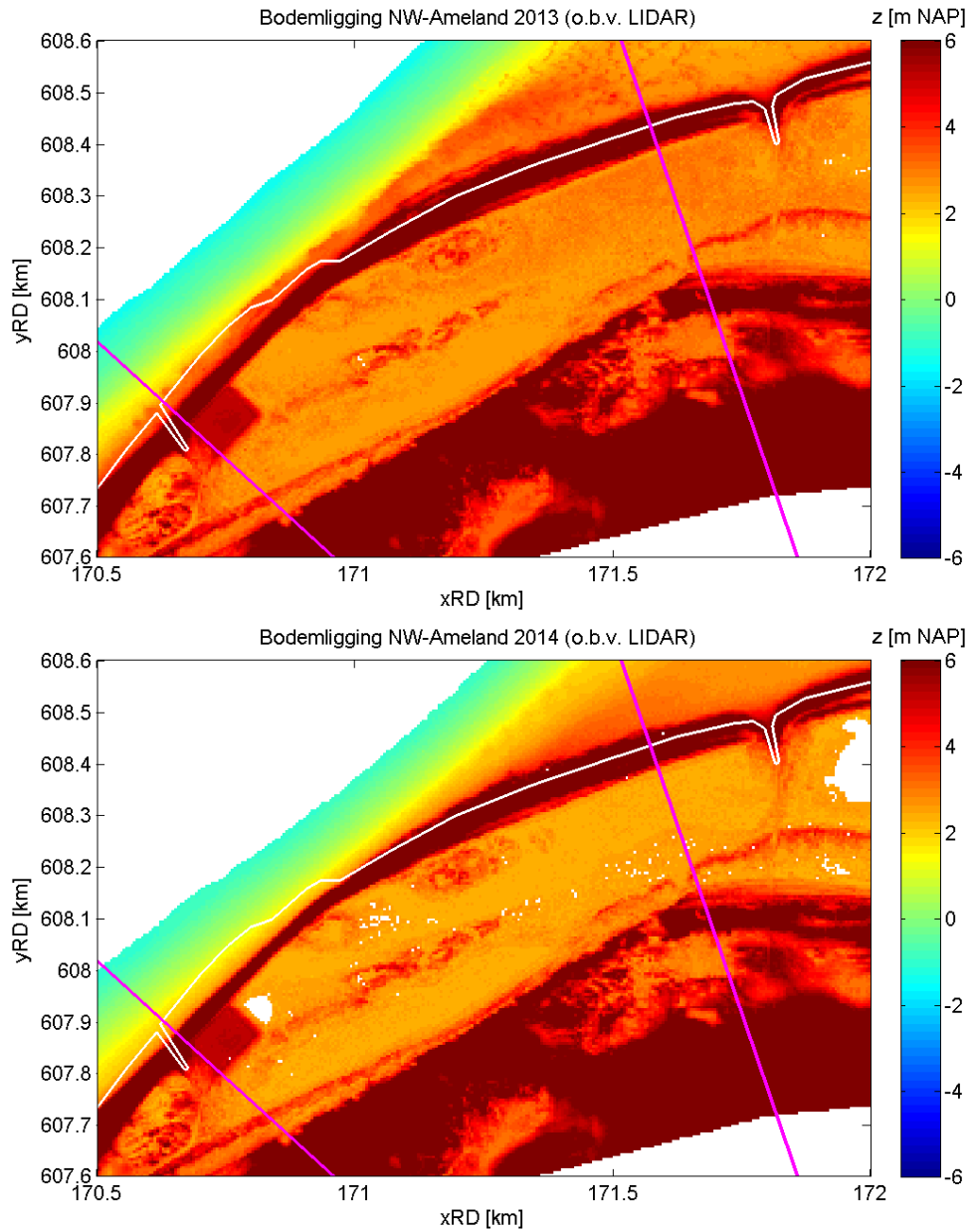
⁵ <http://opendap.deltares.nl/thredds/dodsC/opendap/rijkswaterstaat/jarkus/profiles/transect.nc>



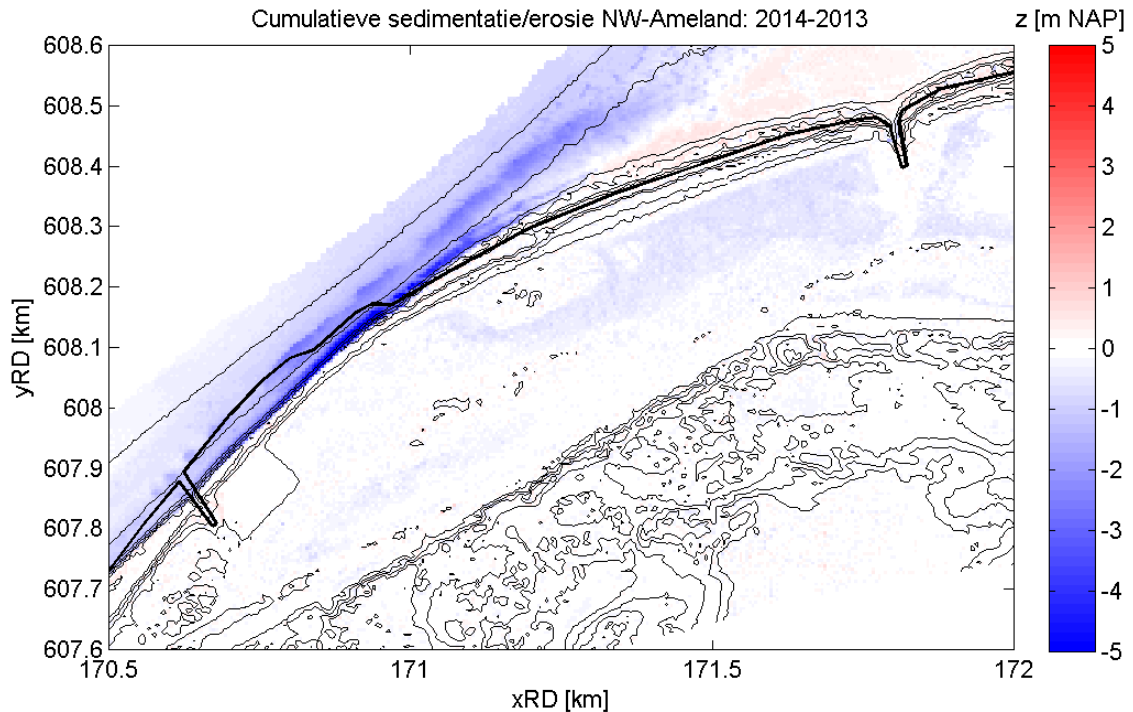
Figuur 5.1 Bodemligging NW-Ameland voor de periode 2005-2014. Kustraai 300 en 400 (t.h.v. strandpaal 3 en 4) zijn weergegeven in magenta.



Figuur 5.2 Bodemligging in 2011 en 2012 voor NW-Ameland tussen strandpaal 3 en 4 (aangegeven met magenta lijn).

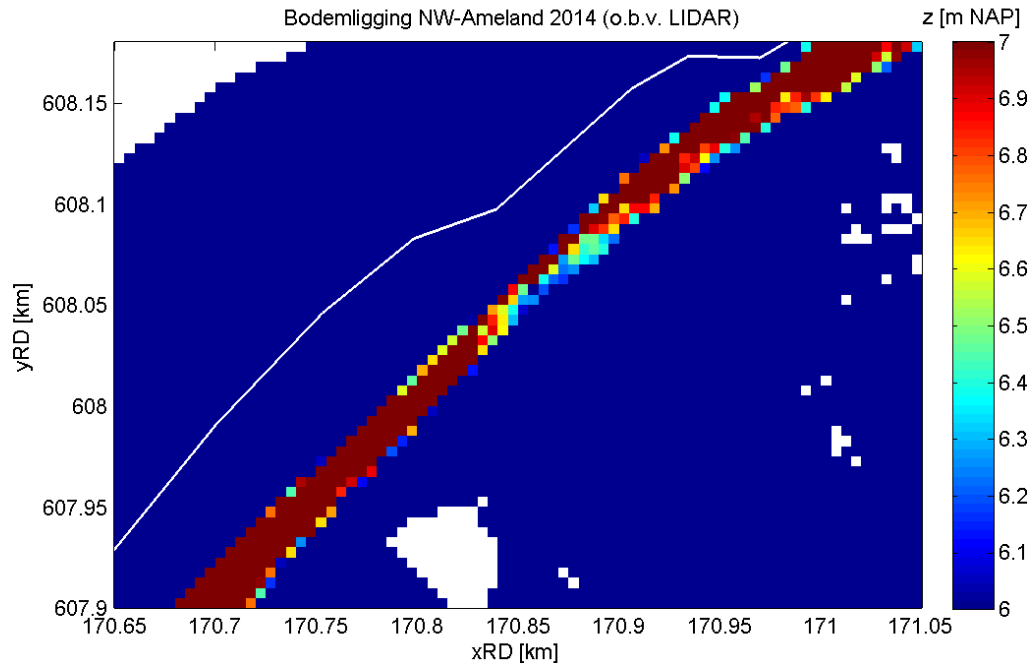


Figuur 5.3 Bodemligging in 2013 en 2014 voor NW-Ameland tussen strandpaal 3 en 4 (aangegeven met magenta lijn).



Figuur 5.4 Cumulatieve sedimentatie erosie in 2014 ten opzichte van 2013 voor het stuk duin tussen strandpaal 3 en 4 (NW- Ameland).

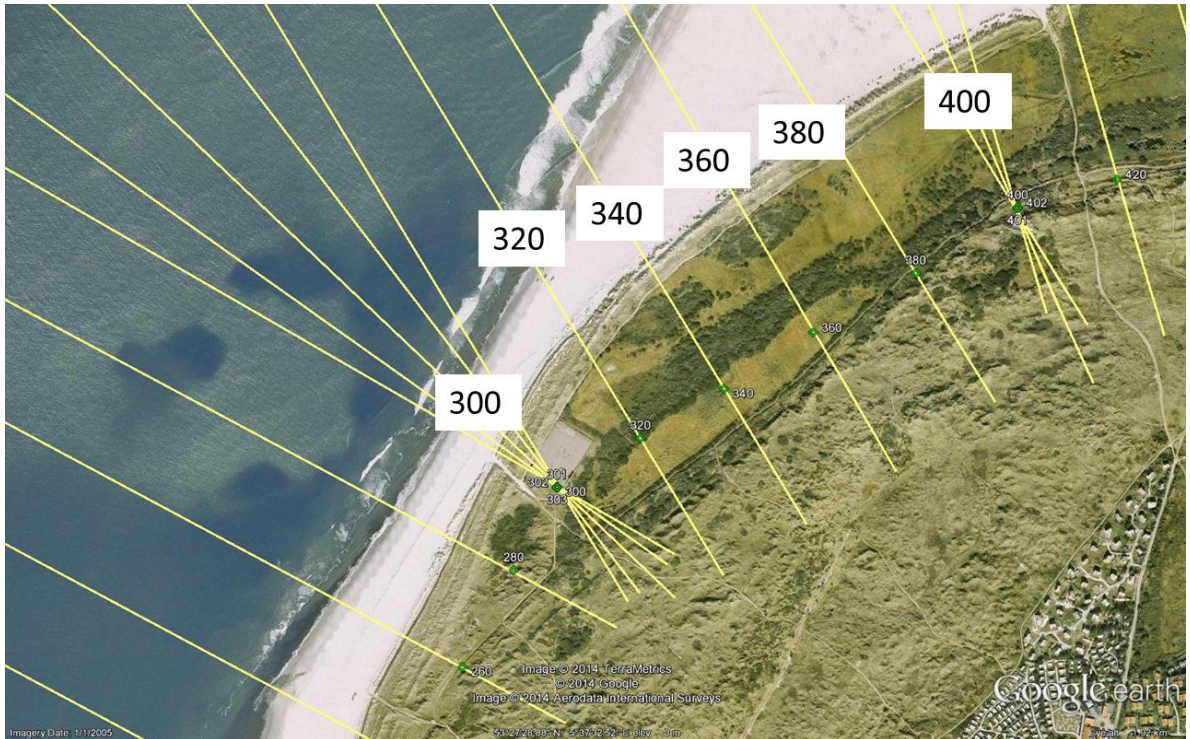
Verwacht mag worden dat het grootste risico op duinoverspoeling, en eventueel een duin doorbraak zal optreden op de locatie waar het duintop het minst hoog is. Om dit punt voor de huidige bodemligging (2014) te bepalen is in Figuur 5.5 ingezoomd op het stuk met de dunste duinenrij en is de kleurenschaal zo aangepast dat de laagste duinentop zichtbaar is. Op basis van de 5m-resolutie data lijkt de laagste duintop van de buitenste duinenrij op ongeveer NAP +6,5 m te liggen.



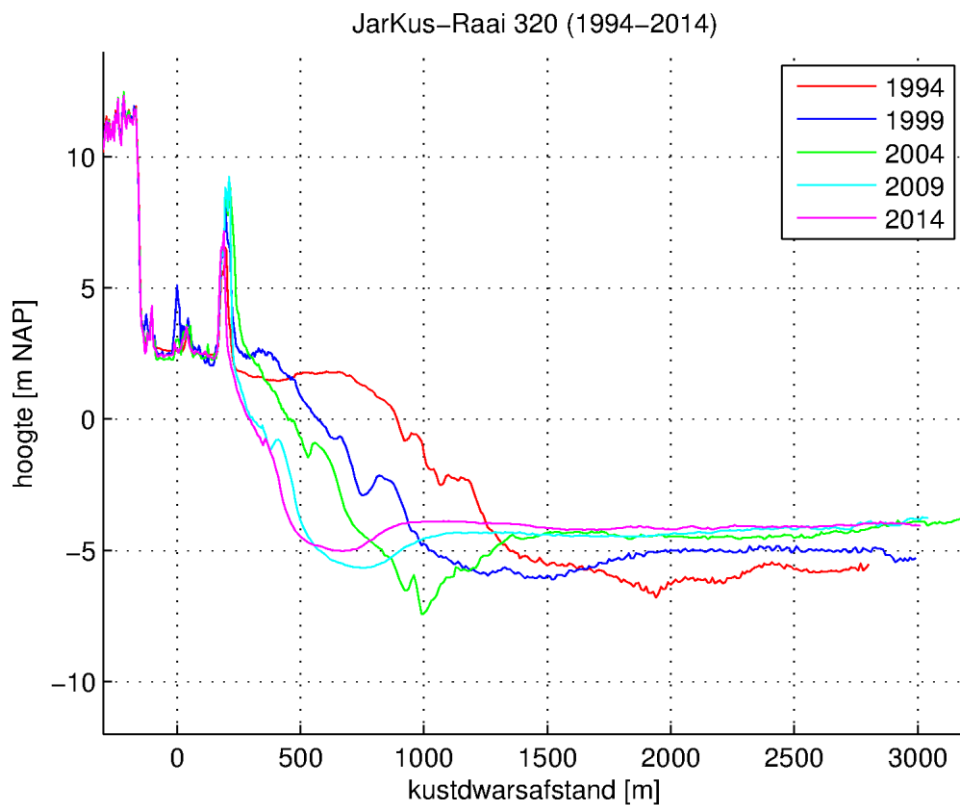
Figuur 5.5 Bodemligging NW-Ameland ingezoomd op locatie met laagste buitenste duinenrij op basis van de 5m resolutie dataset. De kleurschaal is aangepast zodat de laagste duintop zichtbaar is (op ongeveer NAP +6,5 m).

5.2 Profielontwikkeling op basis van JarKus-data

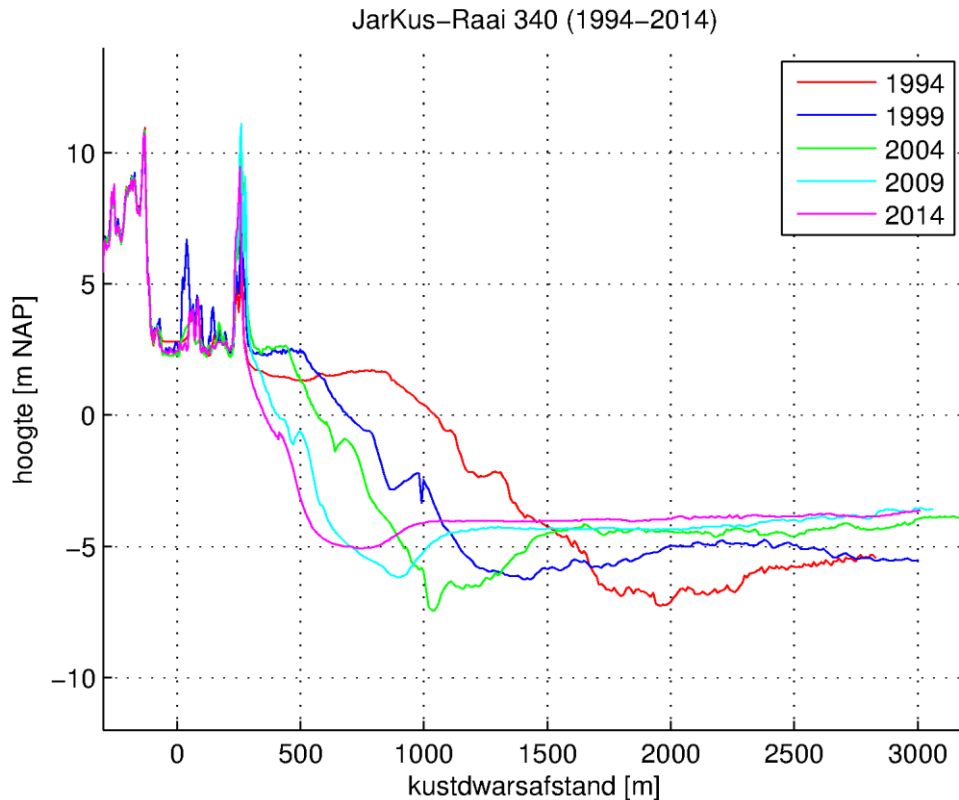
Om meer inzicht in de veranderingen in het kustprofiel tussen raai 3 en 4 te krijgen is de JarKus-profieldata gebruikt. De ligging van de raaien is weergegeven in Figuur 5.6. Uit een analyse van de profielveranderingen van de raaien die in dit gebied zijn gedefinieerd blijkt dat vooral ter plaatse van raai 320 en 340 sterke morfologische ontwikkeling heeft plaatsgevonden. In Figuur 5.7 en Figuur 5.8 zijn de profielen voor beide raaien weergegeven voor de afgelopen 20 jaar met steeds 5 jaar interval. Het valt op dat er in de afgelopen 20 jaar vooral grote veranderingen in de intergetijdzone en vooroever hebben plaatsgevonden. Deze morfologische ontwikkelingen kunnen toegeschreven aan de grootschalige processen (en effecten van suppleties) zoals beschreven in het vorige hoofdstuk (e.g. de aanlanding van het Bornrif).



Figuur 5.6 Overzicht van JarKusraaien tussen strandpaal 3 en 4.

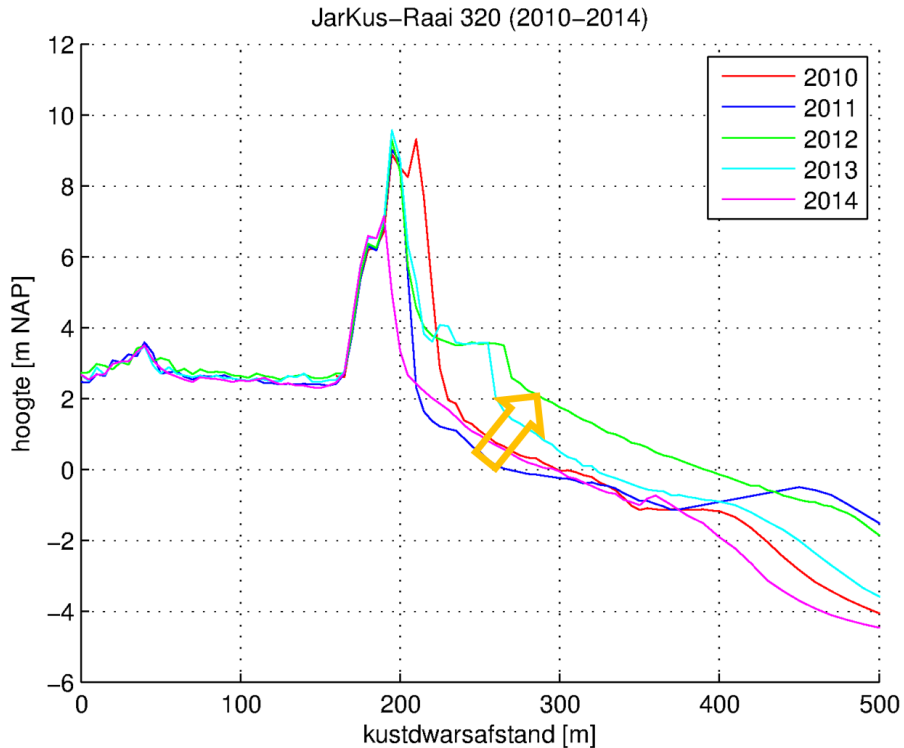


Figuur 5.7 Jarkusprofielen raai 320 over de laatste 20 jaar.

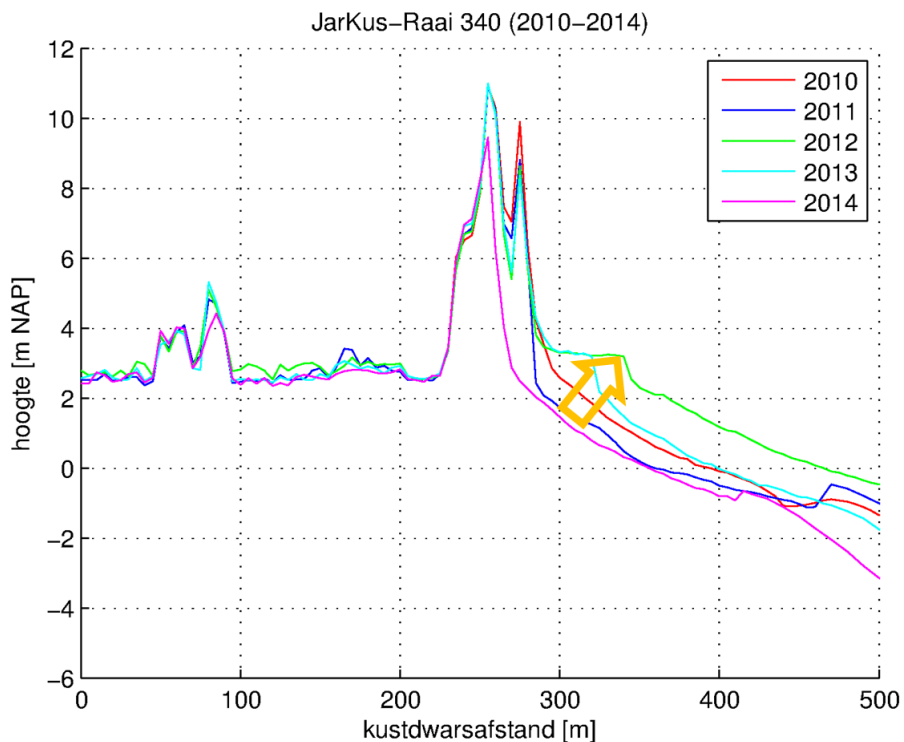


Figuur 5.8 JarKusprofielen raai 340 over de laatste 20 jaar.

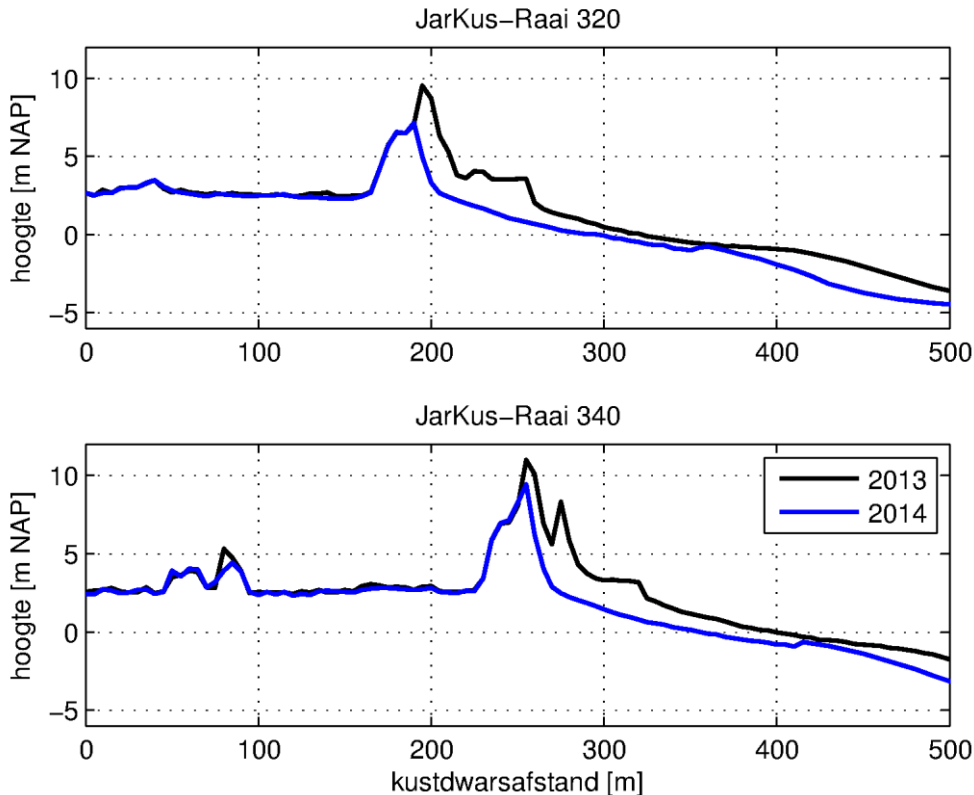
Voor de huidige studie is vooral de ontwikkeling van de meest zeewaarts gelegen duinenrij van belang. Bepalend daarbij is de sterk landwaartse verlegging van de getijdegeul in de afgelopen 20 jaar. In het vorig hoofdstuk is reeds ingegaan op de langjarige ontwikkeling van de zeereep en de focus ligt in dit hoofdstuk dan ook op de ontwikkeling in de laatste jaren, en dan met name in het afgelopen jaar (2013 – 2014). In Figuur 5.9 en Figuur 5.10 zijn daarom dezelfde JarKus-profielen weergegeven, maar dan voor de periode 2010-2014 en ingezoomd op de meest zeewaarts gelegen duinrij (stuifdijk). De suppletie van 2010 is goed te zien in de meting van 2012 (weergegeven met oranje pijl). Het valt direct op dat in zowel raai 320 als 340 relatief grote veranderingen in het kustprofiel hebben plaatsgevonden. Ten opzichte van 2010 is een groot deel van het duinvolume verdwenen, met name in raai 320. De hoogte van de duinrij lag in 2013 nog relatief hoog (rond NAP +9 tot 11 m voor raai 320 en 340 resp.), maar dit is in 2014 sterk afgenomen tot rond NAP +7 m (raai 320) en NAP +9 m (raai 340). Voor beide raaien geldt ook dat het totale duinvolume op het oog sterk is afgenomen. Dit is nog iets duidelijker te zien in Figuur 5.11. Waarschijnlijk heeft de geul ervoor gezorgd dat het zand dat tijdens de storm was afgeslagen relatief snel afgevoerd kon worden.



Figuur 5.9 Jarkusprofielen raai 320 over de laatste 5 jaar (ingezoomd op de buitenste duinenrij). Het effect van de suppletie in 2010 (Tabel 4.1) is goed zichtbaar in het verschil tussen het 2011 en 2012 profiel (oranje pijl).



Figuur 5.10 Jarkusprofielen raai 340 over de laatste 5 jaar (ingezoomd op de buitenste duinenrij). Het effect van de suppletie in 2010 (Tabel 4.1) is goed zichtbaar in het verschil tussen het 2011 en 2012 profiel (oranje pijl).



Figuur 5.11 JarKus-profielen voor raai 320 (boven) en 340 (onder) voor 2013 en 2014.

Op basis van de JarKus-profielen tussen strandpaal 3 en 4 is het duinvolume boven NAP +3 m berekend⁶, en weergegeven in Figuur 5.12. De figuur laat zien dat de raaien verschillend gedrag laten zien. Voor een aantal raaien lijkt het duinvolume over het algemeen toe te nemen (e.g. 360-400), terwijl anderen een variërende trend laten zien (e.g. 300 – 340). Opvallend is de trendbreuk voor raai 300-340, waar na een toenemende trend tussen 2000 en 2006 een sterke afname van het duinvolume is waar te nemen. Het effect van de suppleties in 2004, 2007 en 2010 is enigszins te zien in de toename van volumes (zie bijv. periode 2011-2013), danwel een gereduceerde afnemende trend (bijv. periode 2007-2010).

De erosieve fases worden waarschijnlijk mede veroorzaakt door stormvloed en zoals de Allerheiligenvloed van 2006. Opgemerkt dient te worden dat Raai 300 (zie figuur 5.6) de locatie is waar het verhoogde NAM-platform gelijk achter de duinen ligt. Hier is sinds 2006 een duidelijk dalende trend zichtbaar en, het platform kan dus op termijn ook bedreigd worden door erosie.

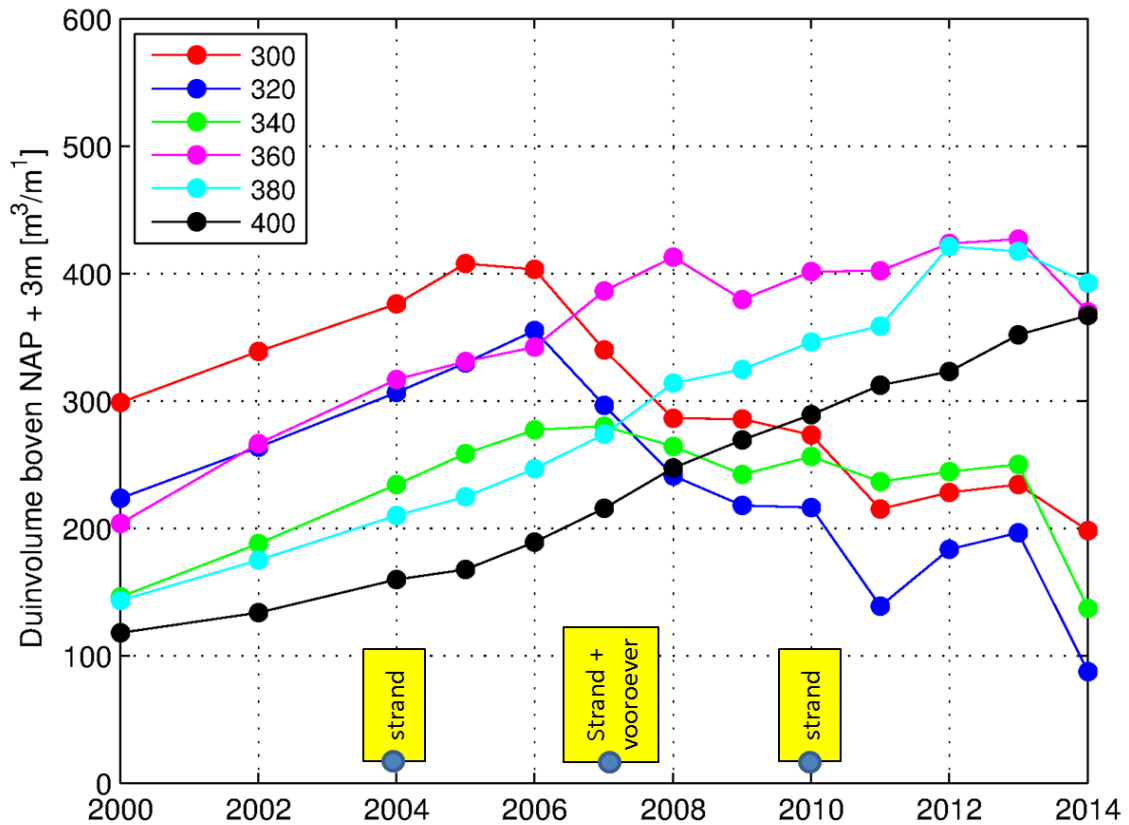
Wanneer gekeken wordt naar het duinvolume in 2013 en 2014 kan worden gezien dat deze vooral voor raai 320 en 340 sterk is afgenomen. Voor raai 340 is ongeveer 40% van het volume boven NAP +3 m afgeslagen, terwijl dit voor raai 320 zelfs ongeveer 60% is. Deze relatief sterke afnamen kunnen niet verklaard worden door de langjarige ontwikkeling beschreven in het vorige hoofdstuk, en verwacht mag worden dat dit vooral een direct gevolg is van de Sinterklaasstorm in 2013. Gegeven de intensiteit van die storm mag verwacht

⁶ Merk op dat de berekende duinvolumes alleen gelden voor de zeewaartse duinenrij. De waarden wijken daardoor enigszins af van waarden in paragraaf 4.3.2, omdat in die berekening alle gebieden boven NAP +3 m zijn meegenomen.

worden dat deze een grote impact had op hoger gelegen delen van het duin. Doordat de landwaarts migrerende buitendeltageul het strand sterk heeft versmald komt een belangrijk deel van het afgeslagen zand in de geul terecht en wordt afgevoerd.

De variatie in afname in duinvolume tussen de verschillende raaien is mogelijk te verklaren door de sterk gekromde kustlijn (zie bijv. Figuur 5.6). Mogelijk hebben raai 320 en 340 een relatief ongunstige oriëntatie ten opzichte van de dominante golfrichting. Hierdoor kan het zijn dat de golven zich op dit deel van de kust hebben gefocust tijdens de storm, en de impact daardoor groter was. Een andere mogelijke verklaring kan de vorm van het duinprofiel voor de storm zijn. In geval van een relatief steil profiel, kunnen tijdens een storm grote delen zand afschuiven ('avalanching'). Dit moet nader worden onderzocht.

Merk op dat niet alleen boven NAP +3 m maar ook in lagere delen van het kustprofiel grote zandverliezen zijn opgetreden (Figuur 5.11). Het verdient daarom aanbeveling om voor de lagere zones een vergelijkbare analyse uit te voeren. Er kan dan ook worden gekeken naar de snelheid van de volumeverandering die veroorzaakt wordt door de geulmigratie.



Figuur 5.12 Duinvolume boven NAP +3 m in de tijd voor de JarKus-profielen tussen strandpaal 3 en 4 op noordwest Ameland. De uitgevoerde suppleties zijn weergegeven in geel.

6 XBeach-1D simulaties

In het vorige hoofdstuk is de huidige staat van de buitenste duinenrij tussen strandpaal 3 en 4 op noordwest onderzocht. Tussen 2013 en 2014 is een groot deel van het duinvolume boven NAP +3 m geërodeerd, wat (waarschijnlijk grotendeels) verklaard kan worden door de relatief hevige Sinterklaasstorm die 5-6 december 2013 optrad. Een belangrijke vraag voor de kustbeheerder is of het huidige zeereep nog sterk genoeg is om het komende stormseizoen te kunnen weerstaan. Op basis van enkele verkennende numerieke modelsimulaties kan een eerste indruk worden opgedaan van het gedrag van het duinprofiel tijdens een (hevige) storm.

In dit hoofdstuk zijn een aantal ééndimensionale (kustdwars) simulaties voor noordwest Ameland beschreven. Merk op dat, gezien de complexiteit in bodemligging en geometrie van het gebied, en daarnaast de onzekerheid in de hydraulische condities, de modelresultaten vooral als een eerste indicatie moeten worden beschouwd.

6.1 XBeach: tijdsafhankelijk storm impact 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 (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 kustlansrichting). 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 over 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 zou voor dit specifieke geval bijvoorbeeld de laterale afvoercapaciteit van de geulen kunnen worden meegenomen.
- Dicht bij de duinvoet worden de relevante fysische processen nauwkeurig opgelost (door gebruik te maken van het zgn. surfbeat model)

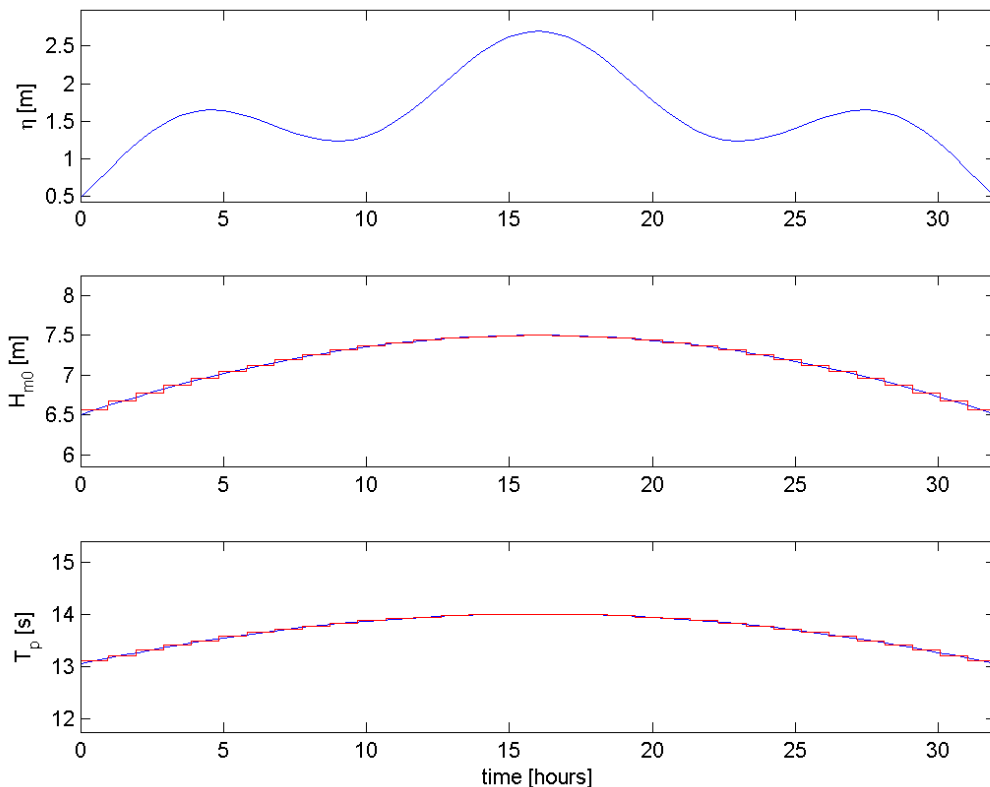
XBeach bevat state-of-the-art software en wordt continue verder ontwikkeld. Voor deze memo is gebruikt gemaakt van XBeach revisie 4163.

6.2 Modelopzet

Voor deze memo zijn enkele eendimensionale modelsimulaties uitgevoerd met het JarKus-profiel waar de top van de meest zeewaartse duinenrij het laagst lag (i.e. raai 320). Deze top is vergelijkbaar in hoogte met het zwakste punt van de zeereep op basis van de Lidar gegevens van 2014. Gezien de complexiteit van het interessegebied spelen 2D-effecten (zoals langstransport, golfrefractie) waarschijnlijk een significante rol, vooral in geval van een hevige storm. Deze kunnen echter niet worden meegenomen in een 1D model. Mogelijk geven de modelresultaten van de 1D-simulaties een conservatief beeld, omdat alle golven in het model loodrecht op de kust propageren, terwijl dit in werkelijkheid naar verwachting niet zo zal zijn. Dit zou tot een overschatting van de impact van een bepaalde storm kunnen leiden. Anderzijds zouden de modelresultaten juist ook een onderschatting van de impact kunnen opleveren,

omdat de langtransporten niet meegenomen zijn, terwijl ze een relatief belangrijk afvoermechanisme bij dergelijke kustsystemen met een nabij liggende geul zijn. Desondanks geven de huidige verkennende berekeningen een eerste indruk van de stormimpact.

Het modeldomein (rekeningrid en -bodem) is opgezet aan de hand van de JarKus-profielen (tot NAP -5 m), en met de meest recent beschikbare vaklodingen (2011) verlengd tot diep water (NAP -20 m). De gebruikte randvoorwaarden (zie ook volgende secties) zijn opgegeven als JONSWAP-spectrum, en worden door XBeach gebruikt om een tijdserie van golfcondities te genereren. In de berekeningen is een stormduur van 32 uur aangenomen, waarbij het verloop van de waterstand (getij + stormopzet) is bepaald aan de hand van een uitdrukking van Steetzel (1993), zie Figuur 6.1. Voor de modelinstellingen is zo veel mogelijk gebruik gemaakt van de huidige standaardinstellingen.

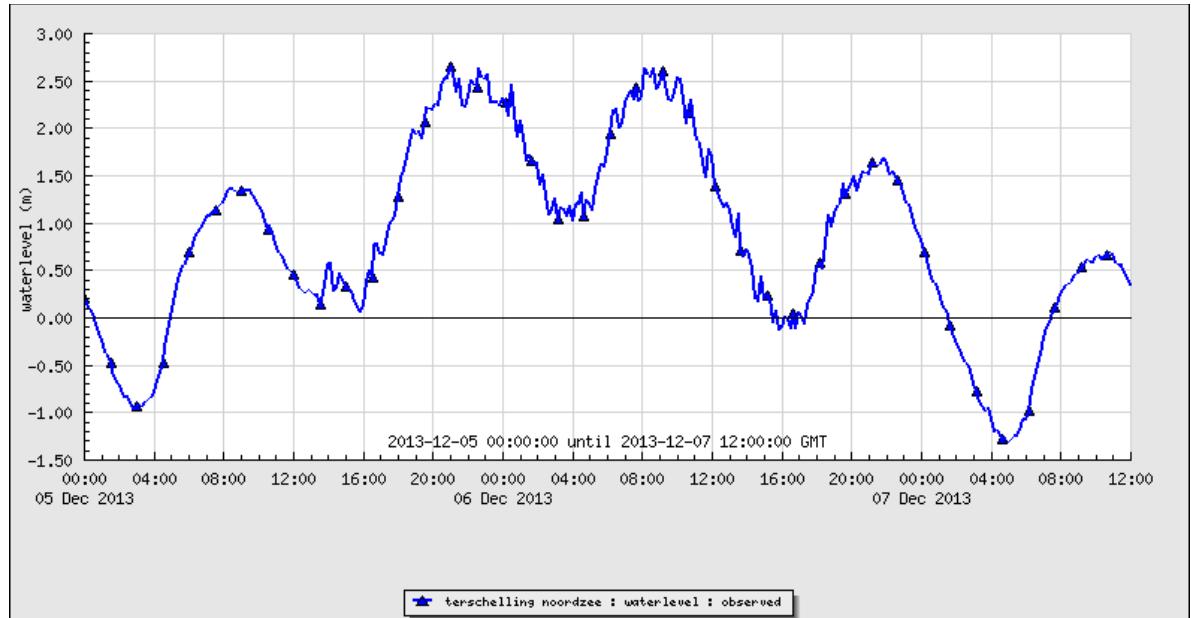


Figuur 6.1 Modelrandvoorwaarden op NAP -20 m. De waterstand (boven) is een combinatie van +/- 3 getijcycli en een stormopzet. De variatie in golfcondities tijdens de storm bevat een variatie in significante golfoogte (midden) en piekperiode (onder).

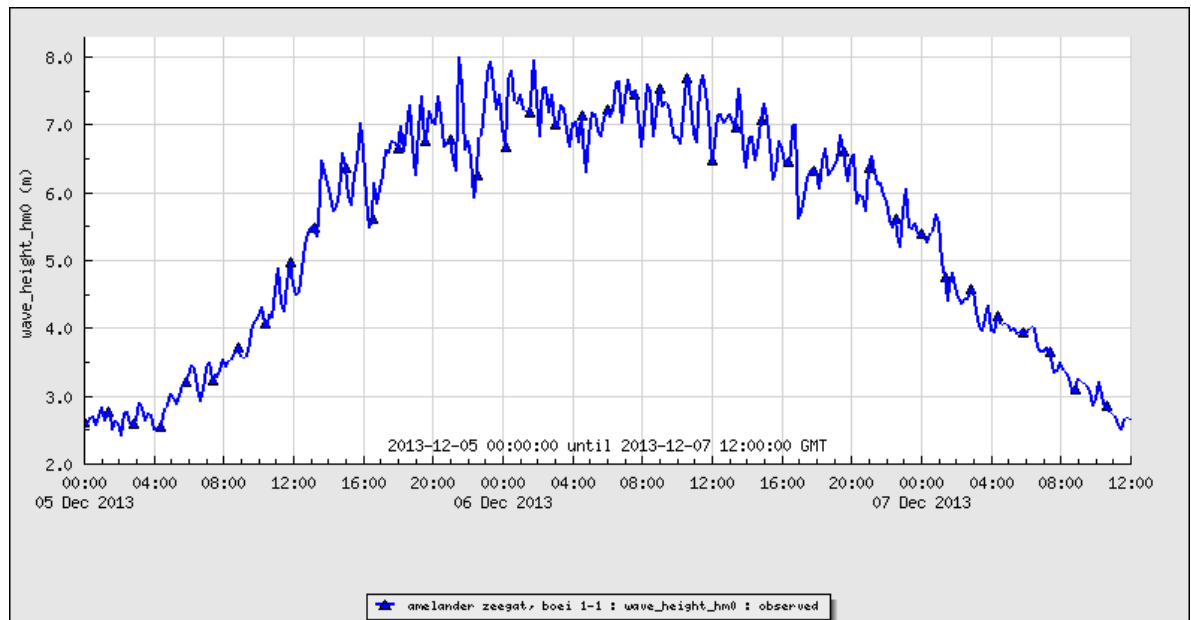
6.3 Resultaten ‘Sinterklaasstorm 2’

De sterke erosie waarneembaar in de JarKus-profielen (hoofdstuk 5) is waarschijnlijk het gevolg van de hevige storm die 5 en 6 december 2013 optrad: de Sinterklaasstorm. Als eerste check worden de condities zoals die tijdens deze storm optraden in het model opgelegd, maar dan met het recentst gemeten kustprofiel (voorjaar 2014). De maximale waterstand in station Terschelling Noordzee bedroeg ongeveer NAP + 2,7 m (zie Figuur 6.2, gemeten op ongeveer 12 meter waterdiepte), terwijl de golfcondities zijn overgenomen uit metingen van een golfboei op diep water (20 m) in het Amelander Zeegat (zie Figuur 6.3 en Figuur 6.4). Op basis van

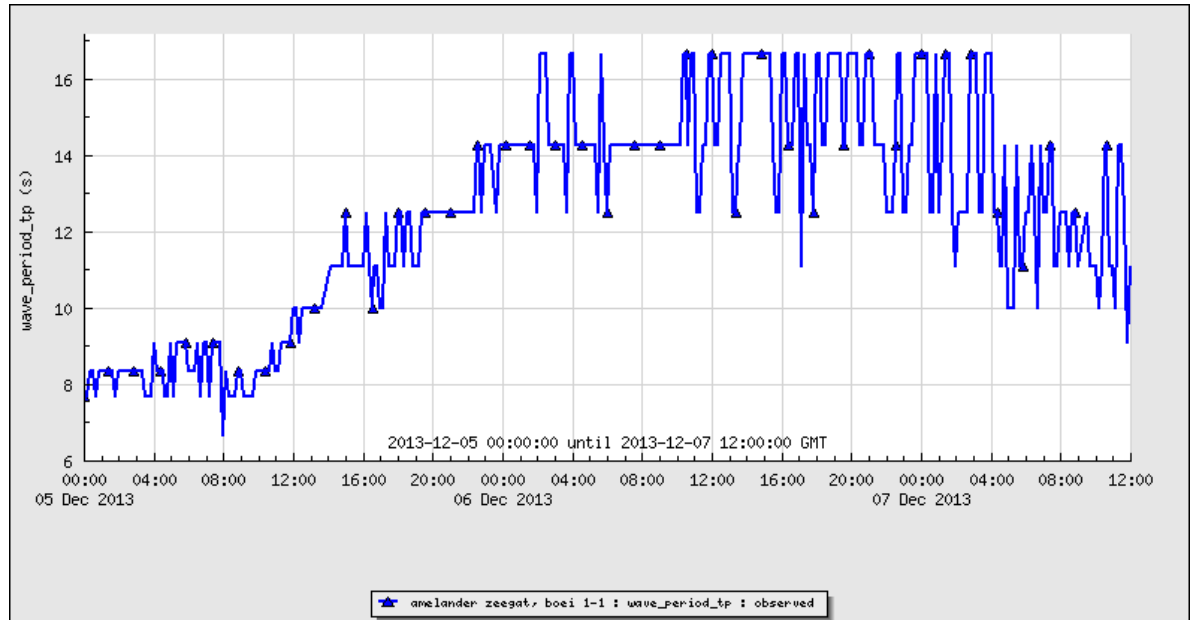
deze storm is een golfhoogte (H_{m0}) van 7,5 m, golfperiode (T_p) van 14 s en een maximale waterstand van NAP +2,7 m (zie Figuur 6.1).



Figuur 6.2 Gemeten waterstand voor station Terschelling Noordzee (+/- 12 m waterdiepte) tijdens de Sinterklaasstorm (bron: MATROOS).



Figuur 6.3 Gemeten significante diep water (20 m) golfhoogte voor boei 1_1 (Ameland Zeevat) tijdens de piek van de Sinterklaasstorm (bron: MATROOS).

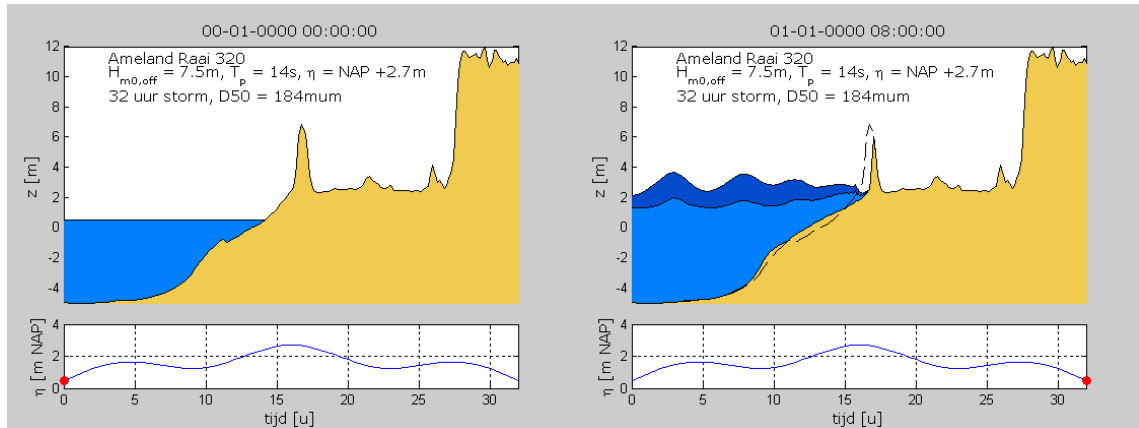


Figuur 6.4 Gemeten piek diep water (20 m) golfperiode voor boei 1_1 (Amelanders Zeegat) tijdens de piek van de Sinterklaasstorm (bron: MATROOS).

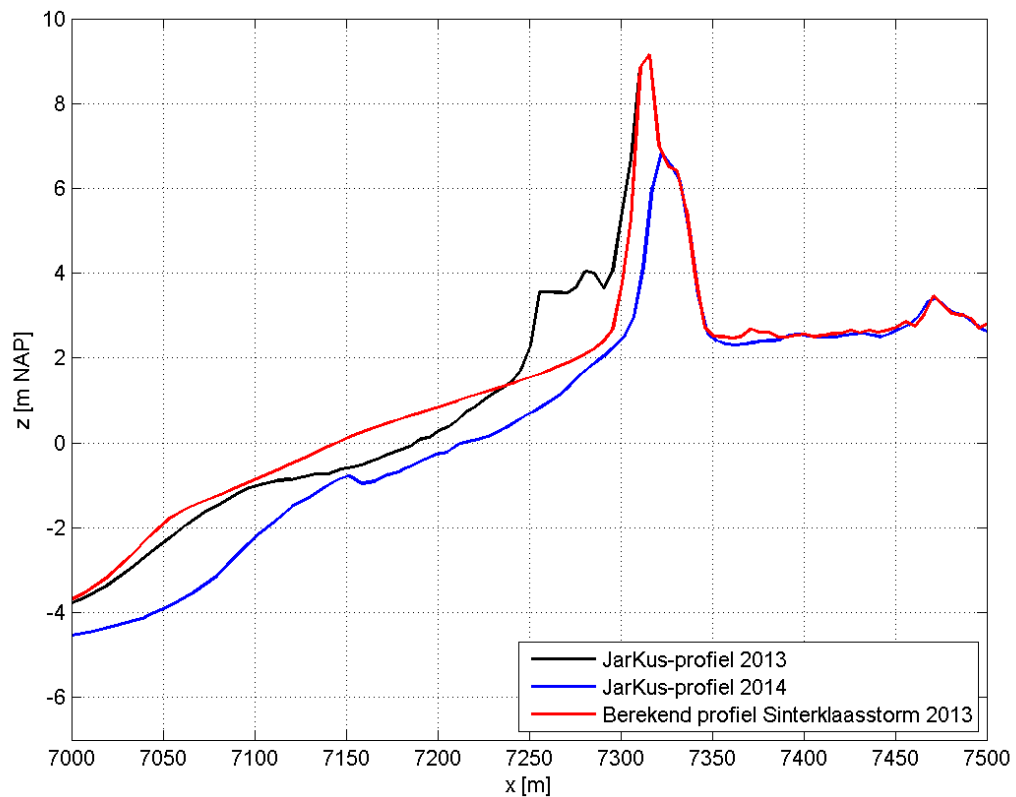
In Figuur 6.5 zijn de begin en eindsituatie weergegeven voor raai 320. Wat direct opvalt, is dat de berekende erosievolumes groot zijn, maar dat er geen doorbraak van het duin optreedt. Er vindt relatief veel duinerosie plaats, vooral ook relatief hoog in het profiel, en het duin behoudt nog ongeveer de helft van zijn originele breedte. Om een indicatie te hebben van de betrouwbaarheid van deze simulatie, is dezelfde simulatie nogmaals uitgevoerd, maar dan met het kustprofiel gemeten in het voorjaar van 2013. Het door XBeach berekende profiel is vervolgens vergeleken met het JarKus-profiel van 2014 (Figuur 6.6). Als er vanuit wordt gegaan dat de profielveranderingen tussen 2013 en 2014 volledig kunnen worden toegeschreven aan de Sinterklaasstorm, dan laat het model een onderschatting zien. Aannemelijk is dat de onderschatting grotendeels verklaard kan worden door het niet meenemen van 2D effecten. De JarKus-waarnemingen suggereren namelijk dat er na afslag door het geultransport nauwelijks zand in de vooroever achter blijft. Dit kan mogelijk worden toegekend aan langstransporten die bij een relatief sterk gekromde kust een grote rol spelen. Daarnaast heeft de buitendelta-getijdegeul een mogelijk grote transportcapaciteit, daardoor ontstaat niet/nauwelijks of slechts over een korte tijdsduur een evenwichtsprofiel, die weer snel zal eroderen en weinig bescherming biedt bij volgende stormen. Op deze wijze vindt versnelde afname van zandvolumes plaats. Aan de andere kant zouden ook andere stormen in 2013 en begin 2014 een versterkte rol gespeeld kunnen hebben in de profielontwikkeling. Hier speelt ook dat een deel van de suppletie van 2010 nog aanwezig was en het profiel niet in evenwicht was. Hierdoor kunnen relatief milde stormen een relatief grote impact op het kustprofiel hebben gehad.

Op basis van deze eerste resultaten lijkt het van belang om dit gebied in de gaten te houden, en eventuele beheermaatregelen te overwegen. Een belangrijk voorbehoud bij deze simulaties is dat deze resultaten een eerste indicatie vormen, en dat hierbij een aantal aannames is genomen. Daarnaast propageren golven loodrecht op de kust, wat in werkelijkheid niet zo is, en dit kan resulteren in een overschatting van de effecten. Aan de andere kant kunnen de berekeningen ook een onderschatting opleveren, bijvoorbeeld in geval sediment transport in kustlansrichting relatief belangrijk was. Om dit nader te onderzoeken zijn meer simulaties

gewenst, en dan met name met een tweedimensionaal (gebieds-) model, waarbij ook de ontwikkeling en het transportvermogen van de geul wordt meegenomen. Dit is van groot belang omdat dit mogelijk ook inzichten geeft hoe toekomstige suppleties kunnen worden ontworpen.



Figuur 6.5 Snapshots (voor en na) van een 1D XBeach simulatie voor raai 320 tijdens een storm zoals de afgelopen Sinterklaasstorm.



Figuur 6.6 Berekende kustprofiel (Sinterklaasstorm i.c.m. 2013 kustprofiel) t.h.v. kustrai 320 in vergelijking met het gemeten 2014 profiel. Merk op dat beide profielen in het voorjaar zijn gemeten, en het profiel tijdens de Sinterklaasstorm daardoor waarschijnlijk al iets minder volume bevatte dan aangenomen in de berekening.

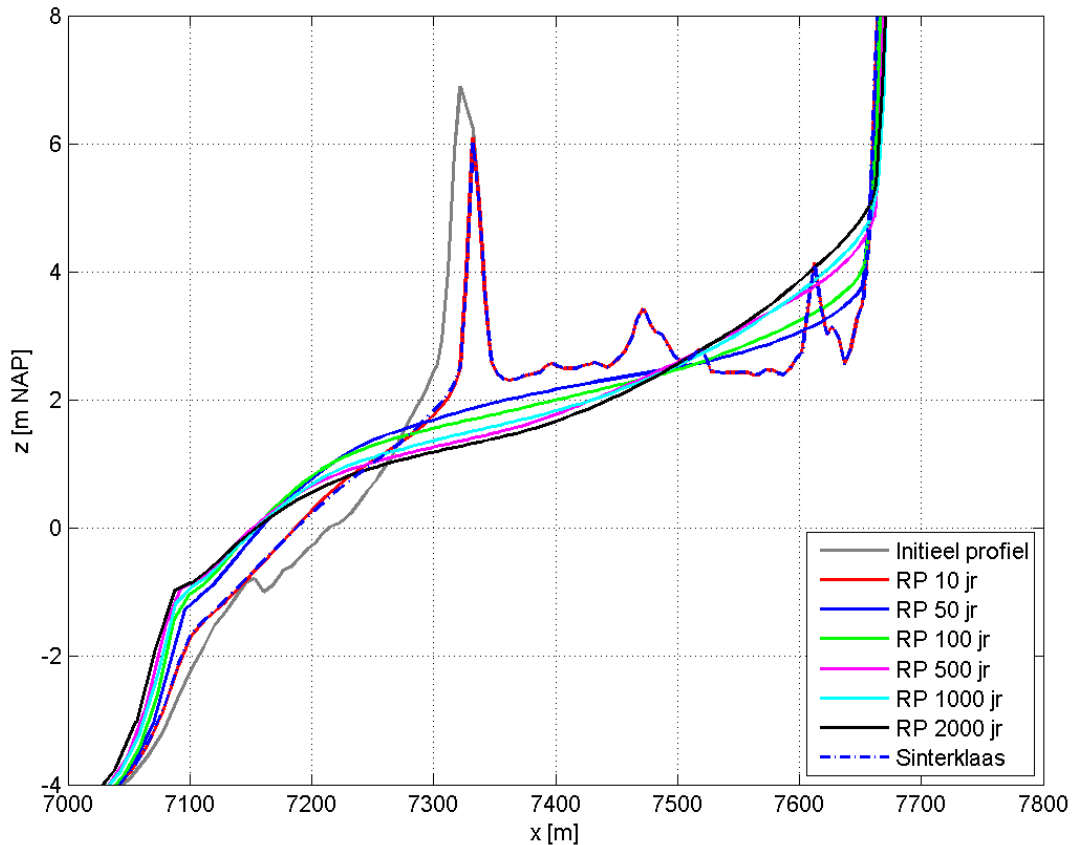
6.4 Resultaten andere stormen

Om een beter inzicht te hebben in de effecten van verschillende stormen op de kust ter hoogte van raai 320 zijn een aantal verschillende typen stormen met XBeach doorgerekend. Een overzicht van de simulaties en bijbehorende condities is weergegeven in Tabel 6.1. De condities zijn dit jaar afgeleid in het kader van Wettelijk Toetsinstrumentarium (WTI, Boers et al. 2014), en gelden voor kustrai 320 (NW-Ameland). Op basis van de afgeleide condities kan de Sinterklaasstorm tussen 1/10 en 1/50 jaar storm worden geclassificeerd (al was de waterstand iets lager dan een 1/10 jaar storm).

In Figuur 6.7 zijn de berekende bodemprofielen voor alle stormtypen weergegeven. De figuur laat zien dat in alle gevallen significante erosie optreedt, en dat er in de meeste gevallen een 'opruiming' van het buitenste duin plaatsvindt. Daarbij zal dus zeewater vrij spel hebben in het achterliggende duinvalleigebied van Lange Duinen Noord bij hogere vloed. Alleen voor de 1/10 jaar storm en de Sinterklaasstorm erodeert het duin sterk, maar blijft het wel overeind staan.

Tabel 6.1 Overzicht van hydraulische condities per type storm.

Storm type	Significante golfhoogte [m]	Piek golfperiode [s]	Rekenpeil [m NAP]	Terugkeerperiode
Sinterklaas 2013	7,5	14	2,70	-
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



Figuur 6.7 Profielveranderingen ter hoogte van de buitenste duinenrij (kustraai 320) voor verschillende stormtypen. Het initiële kustprofiel voor alle runs is weergegeven in grijs.

6.5 Conclusie

In dit hoofdstuk zijn een aantal eerste verkennende XBeach-1D berekeningen beschreven voor het stuk kust tussen strandpaal 3 en 4 op noordwest Ameland. De berekeningen laten zien dat het huidige kustprofiel (voorjaar 2014) van de buitenste duinrij (stuifdijk) lokaal dermate verzwakt is dat deze bij een of enkele flinke stormen naar verwachting kan doorbreken. 2D effecten spelen echter een belangrijke rol voor dit gebied. Enerzijds zouden de 1D-resultaten een overschatting kunnen geven, omdat alle golfenergie loodrecht op de kust binnenkomt. Aannemelijker is dat de berekeningen in dit specifieke geval een onderschatting vormen. De laterale transportcapaciteit van de buitendeltageul (Oostgat) is namelijk niet meegenomen en speelt waarschijnlijk een grote rol. Het zand dat tijdens een storm hoger in het profiel afslaat komt waarschijnlijk niet in de vooroever terecht, maar wordt door de geul afgevoerd. Om de situatie in NW-Ameland beter te onderzoeken wordt dan ook aanbevolen om een (2D) XBeach gebiedsmodel toe te passen waarin het effect van de geul kan worden meegenomen.

7 Voorspelling toekomstig gedrag

Gegeven de complexiteit van het interessegebied en het sterk stochastische karakter van zowel de sedimentatie (de aanlandingstijd en –plek van zandplaten uit de buitendelta en het “uitsmeren” van dit zand langs de kust), als de erosie (geulverplaatsingen en stormvloed), is het op basis van de huidige quickscan lastig om een duidelijk toekomstbeeld te kunnen schetsen voor noordwest Ameland, en het gebied tussen raai 3,0 en 4,0 in bijzonder. Op langere termijn kan globaal worden gesteld dat er de komende decennia weinig zand verwacht mag worden van de buitendelta. De nieuwe plaat lijkt namelijk meer oostelijk aan te landen wat kan betekenen dat het gebied tussen raai 3,0 en 4,0 weinig tot geen zand gaat ontvangen. Het gebrek aan zand leidt netto tot duinafslag indien het strand niet genoeg sediment kan leveren, waarbij de duinen in enkele decennia volledig kunnen zijn opgeruimd. De morfologische ontwikkeling van de buitendeltageul (Oostgat) speelt hierbij een belangrijke rol.

Er zijn verschillende scenario's mogelijk:

- 1) Indien men de duinen (stuifdijk) wenst te behouden wordt beheer van hoogte en vooral zandvolume aangeraden, uiteraard in afstemming met het suppletieprogramma. Een alternatief is om een duinsuppletie uit te voeren. Daarbij is het wel zaak om de BKL te handhaven door middel van suppleties en/of bestortingen.
- 2) Een alternatief kan zijn om gaten laten ontstaan in het duin, en toestaan dat de achterliggende duinvallei Lange Duinen Noord deels een supragetijde Slufter wordt. Dit kan ook resulteren in bijzondere natuur die relatief zeldzaam is op de Waddeneilanden. Of dat ongestraft kan in verband met de humusophoping (ontstaan zwavelzuur en zwavelachtig zuur) is niet duidelijk; mogelijk moet dan geplagd worden.
- 3) Een derde mogelijkheid is om het duin te retireren waardoor een breder strand ontstaat en zand afkomstig uit duinerosie op het strand terecht komt i.p.v. de geul, zodat zandverliezen beperkt worden.

7.1 Lange termijn ontwikkelingen

Of een nieuwe bank verheelt met het eiland rond 2030 (zoals af te leiden valt uit Israel & Dunsbergen, 1999) is nog de vraag, gegeven de grote onzekerheden die aan hun conceptueel model kleven. Zelfs als een bank aanlandt, is het de vraag of het gebied tussen paal 3 en 4 hiervan gaat meeprofiteren. Door de verwachte oostelijker aanlanding van de nieuwe bank die de kust van Ameland nadert (t.o.v. de bank die in 1980-1985 verheelde met het eiland) moet rekening gehouden worden met een veel minder sterke voeding van dit gebied. Daaraan voorafgaand moet rekening gehouden worden met erosie door de oostelijke buitendeltageul van de kust. Aanbevolen wordt om deze ontwikkelingen in de toekomst nauwgezet te volgen. Daartoe wordt aangeraden om de ontwikkeling van de zandplaat van het Bornrif vanaf de vuurtoren met behulp van radar te volgen om zo een beter inzicht te krijgen in de morfologische ontwikkeling ervan. Daarnaast wordt aanbevolen om het Oostgat (de oostelijke buitendelta-geul) te volgen met beheerlodingen, zodat eventueel negatieve trends tijdig gesignaleerd worden. Op basis van trendanalyses van zandvolumes op verschillende dieptezones en op basis van snelheid van geulverlegging zou een betere voorspelling voor komende jaren kunnen worden gegeven voor het lokale kustvak.

7.2 Korte termijn ontwikkelingen

Voor het gebied tussen raai 3,0 en 4,0 zal, zoals boven aangegeven, de komende jaren rekening moet worden gehouden met doorgaande erosie van het strand. Omdat erosie wordt aangevuld met suppleties zal er vermoedelijk altijd wel een smal strand aanwezig zijn. Doordat



het strand smal is zal de erosie ten opzichte van de aanzanding van de duinen relatief toenemen. Het is dan ook de verwachting dat op een aantal plaatsen duinerosie de komende jaren doorgaat. De snelheid waarmee dat gebeurt is over de periode 2006-2014, is tot nu erg hoog te noemen (op basis van Figuur 5.12 voor raai 300 en 320 orde $200 \text{ a } 300 \text{ m}^3/\text{m}^1$ over 8 jaar). Gezien het sterk stochastische karakter van stormvloeden is het niet mogelijk de huidige doorbraakkans te kwantificeren. Maar het lijkt erop dat het profiel dermate verzwakt is dat, in geval van een of enkele storm(en) vergelijkbaar met de Sinterklaasstorm van 2013, een duindoorkaak zou kunnen plaatsvinden. Gezien de teruglopende kust bij raai 300, 320 en 340 moet ook rekening gehouden worden dat de verhoogde NAM locatie onder druk komt te staan door omspoeling met zout water of zelfs door (op termijn) erosie.

De verzwakte buitenste duinen zullen dus niet op natuurlijke wijze herstellen. Een terugkeer naar bijvoorbeeld de situatie voor de Sinterklaasstorm is waarschijnlijk alleen mogelijk door middel van duinsuppleties. Het effect van de suppletie in 2010 komt niet duidelijk terug in de berekende duinvolumes, maar is wel duidelijk zichtbaar in de lagere delen van het kustprofiel. Deze suppletie zorgt ervoor dat golven eerder breken en er minder golfenergie het duin bereikt. Een groot deel van het zand van de suppletie is echter waarschijnlijk tijdens de Sinterklaasstorm (of eerdere minder hevige stormen) in de geul terecht gekomen en verloren gegaan. De verwachting is dat voor toekomstige suppleties eveneens zal gelden dat deze tijdens een relatief hevig stormseizoen snel zullen verdwijnen. Mogelijk zullen er dus aanvullende maatregelen nodig zijn in de vorm van geulwandsuppleties, eventueel aangevuld met morfologisch baggeren en of extra bestortingen, om de geul uit de kust te houden en de erosie te verminderen.

8 Conclusies en aanbevelingen

In deze memo is op basis van bestaande gebiedskennis (o.a. beheerbibliotheek Ameland), persoonlijke informatie, nieuwe bodemdata en enkele verkennende modelberekeningen een overzicht gegeven van de huidige staat van het buitenste duin (stuifdijk) op noordwest Ameland, en de belangrijkste fysische processen die daarbij een rol spelen. Hierbij is de nadruk gelegd op het verzwakte stuk duin tussen raai 3,0 en 4,0. In dit hoofdstuk worden op basis van de analyse enkele conclusies en aanbevelingen voor verder onderzoek gegeven.

8.1 Conclusies

Op basis van de langjarige morfologische ontwikkeling van het gebied rond de westkop van Ameland wordt geconcludeerd dat tot tenminste circa 2030 niet gerekend hoeft te worden op veel zandaanvoer vanaf de buitendelta naar het gebied van raai 3,0 tot 4,0. Ook daarna is het zeer de vraag of zand van een eventueel aanlandende buitendelta-plaat het gebied wel zal bereiken omdat er sterke aanwijzingen zijn dat aanlanding, indien het al gebeurt, veel oostelijker zal plaatsvinden dan in 1980-1985.

Het gebrek aan zandaanvoer zal, in combinatie met het dichterbij komen van de oostelijke buitendelta-geul leiden tot doorgaande erosie bij raai 3 t/m 4. Verwacht wordt dat indien het vigerende kustbeleid wordt volgehouden, dit wordt aangevuld door middel van kustsuppleties, waardoor een relatief smal strand aanwezig zal blijven (conform BKL-beleid). Dit impliceert dat bij zware stormvloeden een deel van het uit de duinen geërodeerde zand in de geul terecht zal komen en niet weer terug zal keren naar het duin. Hierdoor treedt netto erosie van de stuifdijk op. Suppleties kunnen dit proces tijdelijk ongedaan maken. Deze zullen dan ook nodig blijven tot tenminste 2030.

Het dwarsprofiel van de stuifdijk is in het afgelopen jaar lokaal sterk afgenomen, en zal bij huidig onderhoud naar verwachting niet behouden blijven. Waarschijnlijk zal het overstromen en/of doorbreken bij een of enkele (relatief forse) stormvloeden. Dit heeft tot gevolg dat daarbij de achterliggende duinvallei van Lange Duinen Noord kan veranderen in een supragetijde sluffer, waarbij zout water vrij spel heeft in de duinvallei (voornamelijk tijdens stormvloeden, mogelijk ook tijdens springtij). Ook het verhoogde NAM platform zou na opruiming van het duin ter hoogte van raai 300 aan erosie onderhevig kunnen raken.

Er lijken voor dit gebied drie beheersscenario's mogelijk:

- één waarbij de zeereep met relatief hoge suppletie-inspanningen wordt gehandhaafd;
- één waarbij de zeereep niet langer wordt gehandhaafd en waarbij een deel van het zand verloren gaat aan een sluffer; en
- één waarbij de zeereep wordt geretireerd zodat de golfaanval afneemt en het uit het duin geërodeerde zand minder gemakkelijk verloren gaat aan de geul.

Op een meer generiek niveau treden vergelijkbare ontwikkelingen ook elders langs de kust op waar geulen dicht onder de kust liggen, en spelen vergelijkbare onderzoeks- en beheervragen.

8.2 Aanbevelingen

Op basis van deze beknopte studie zijn een aantal vragen naar voren gekomen, die mogelijk in vervolgonderzoeken kunnen worden opgepakt.



Allereerst wordt aanbevolen om de situatie in NW-Ameland nauwgezet te monitoren. Op dit moment worden 3-jaarlijkse lodingen uitgevoerd, maar om een beter beeld van de optredende ontwikkelingen te krijgen zou een jaarlijkse loding voorkeur genieten. Daarnaast wordt aanbevolen om de geulontwikkeling van de buitendeltageul Oostgat kwantitatief in beeld te brengen op grond van bestaande data, zodat duidelijker wordt welke kustontwikkeling verwacht moet worden bij deze onverharde kust.

Aanbevolen wordt om de effecten van stormen in dit gebied nader te onderzoeken met behulp van een (2D) XBeach gebiedsmodel. Hierbij kan dan worden gekeken naar de rol die de buitendeltageul speelt in geval van duinafslag (afgeslagen zand wordt door de geul afgevoerd), en kan worden bekeken onder welke condities een doorbraak van de stuifdijk te verwachten is. Er kunnen hiertoe een aantal voorgedefinieerde stormcondities (bijv. normatieve storm, 1/10 jaar storm etc.) gesimuleerd worden. Vervolgens kan worden bekeken wat een doorbraak betekent voor de achterliggende duinvallei (bijv. lokale waterdiepte, depositie van zand in de vallei). Harde elementen, zoals de bestorting en het NAM-platform, kunnen in de berekening worden meegenomen. Ten slotte kan worden gekeken naar verschillende scenario's, bijvoorbeeld verbindende (stuif)dijk tussen de huidige stuifdijk en de achterliggende primaire waterkering of een geretireerde zeereep.

Ten derde wordt aanbevolen om het gedrag van de buitendeltageul Oostgat in kaart te brengen door middel een uitgebreide analyse op bestaande bodemdata. Eventueel zou een modelstudie hier nog iets aan kunnen toevoegen. Overigens treden op andere locaties langs de Nederlandse kust vergelijkbare ontwikkelingen op. Een systematische vergelijkende studie naar deze situaties wordt dan ook aanbevolen. Naast een eerste inventarisatie zou een dergelijke studie ook licht kunnen werpen op de toekomstige problemen en het vinden van een optimale beheerstrategie van eilandkoppen en eilandstaarten, mede in het licht van mogelijk veranderende condities bij klimaatverandering.

9 Referenties

Beckering Vinckers, J.A., 1943, Amelander Gat, Rijkswaterstaat studiedienst Hoorn, Nota D98.

Boer, M. de, G. Kool, en M.F. Lieshout, 1991a, Erosie en sedimentatie in de binnendelta van het Zeegat van Ameland 1926-1984, deelonderzoek nr. 4, Rijkswaterstaat Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, District Kust en Zee, Adviesdienst Hoorn, Rapport ANVX-91.H202, 42 pag., 22 bijlagen.

Boer, M. de, G. Kool, M.F. Lieshout en D.L. Ulm, 1991b, Erosie en sedimentatie in de buitendelta van het Zeegat van Ameland 1926 – 1982, deelonderzoek nr. 8, Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, District Kust en Zee, Adviesdienst Hoorn, Rapport ANVX-91.H205, 30 pag., 22 bijlagen.

Boers, M., P. van Geer, J. Groeneweg (2014). Methode voor het bepalen van HR Duinen voor WTI 2017. Deltares rapport 1209433-004-HYE-0001.

Brijker, Y. (2012). Lange Duinen Noord: ruim 50 jaar jong.
<http://vogelwachtameland.blogspot.nl/2012/09/lange-duinen-noord-ruim-50-jaar-jong.html>

Cheung, K. F., F. Gerritsen, en J. Cleveringa, 2007, Morphodynamics and sand bypassing at Ameland Inlet, The Netherlands., Journal of Coastal Research 23(1): 106-118.

Cleveringa J., S. Mulder, en A.P., Oost, 2004, Kustverdediging van de koppen van de Waddeneilanden De dynamiek van de kust nabij buitendelta's en passende maatregelen voor het kustbeheer. Rapport RIKZ/2004.017 . Rijkswaterstaat RIKZ (Den Haag),

Cleveringa, J., C.G. Israel, en D.W. Dunsbergen, 2005, De Westkust van Ameland. Resultaten van 10 jaar morfologisch onderzoek in het kader van de Rijkswaterstaat programma's KUST2000 en KUST2005. Rapport RIKZ/2005.029. Rijkswaterstaat RIKZ (Den Haag), 74 pp.

Ecomare-website:

<http://www.ecomare.nl/ecomare-encyclopedie/gebieden/waddengebied/nederlands-waddengebied/ameland/natuur-op-ameland/langeduinen-noord/>

Elias E.P.L., A. Bruens, 2012, Morfologische Analyse Boschplaat (Terschelling). Quickscan. Rapport 1206171-001, Deltares, Delft.

Elias, E.P.L., 2013. Morfologie Ameland. Rapport 1207724-002-ZKS-0005, Deltares, Delft

Elias, E.P.L., A. Bruens, 2013. Beheerbibliotheek Ameland. Rapport 1207724-004-ZKS-0015. Deltares, Delft.

Israël, C.G., 1998, Morfologische ontwikkeling Amelander Zeegat. Werkdocument RIKZ/OS-98.147x, Rijkswaterstaat RIKZ (Den Haag).

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.



Datum
18 december 2014

Ons kenmerk
1209381-008-ZKS-0008

Pagina
43/43

Oost, A.P., 1995, Dynamics and Sedimentary Development of the Dutch Wadden Sea with Emphasis on the Frisian Inlet. A Study of Barrier Islands, Ebb-Tidal Deltas, Inlets and Drainage Basins. Geologica Ultraiectina, Mededelingen van de Faculteit Aardwetenschappen, Utrecht University (Utrecht): 454 pp.

Oost, A.P., Israël, C.G. & D.W. Dunsbergen, 2000: Kusterosie van noordwest Ameland: ontwikkelingen op verschillende tijdschalen Rapport RIKZ/2000.057, Project K2005* Waddendeltas.

Spek, A. J. F. v.d., en H. H. S. Noorbergen, 1992, Morphodynamica van intergetijdegebieden. Rapport Beleidscommissie Remote Sensing, Delft.

van der Spek, A. J. F., 1995, "Reconstruction of tidal inlet and channel dimensions in the Frisian Middelzee, a former tidal basin in the Dutch Wadden Sea". In: Flemming en Bartholomä (eds), Tidal Signatures in Modern and Ancient Sediments. Special Publications International Association of Sedimentologists, 24, p. 239-258.

Steetzel, H.J. (1993). Cross-shore transport during storm surges. PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.

Kopie aan

Ankie Bruens, Laura Vonhogen-Peeters, Claire van Oeveren