Ministerie van Verkeer en Waterstaat

Rijkswaterstaat

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

Oktober 2005

Rijkswaterstaat RIKZ

J. Cleveringa
C.G. Israël
D.W. Dunsbergen

Opdrachtgever / contactpersoon	Werkgroep SLA Kustlijnzorg / ir. A. Prakken

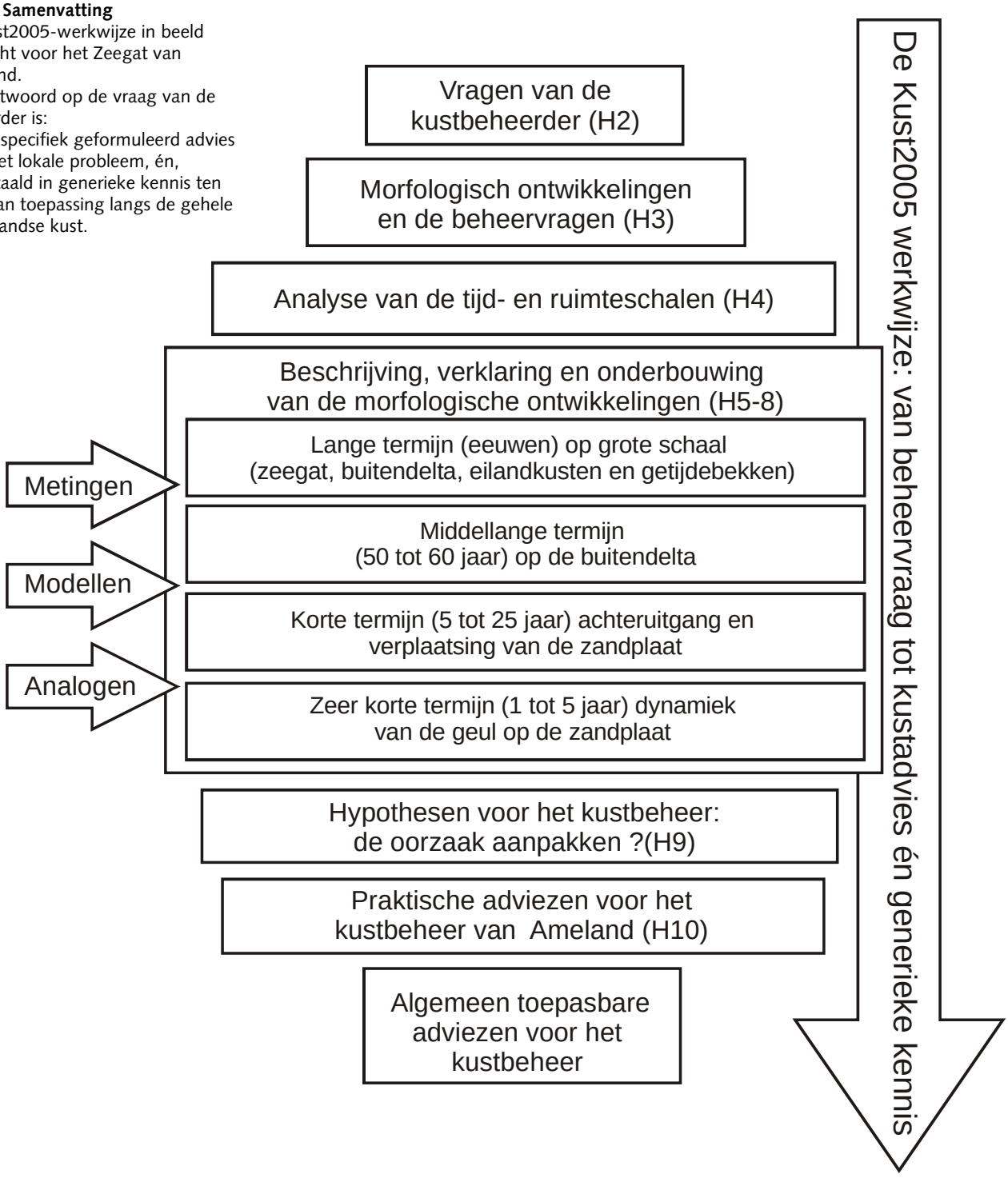
Titel	De westkust van Ameland; Resultaten van 10 jaar morfologisch onderzoek in het kader van de Rijkswaterstaat programma's KUST2000 en KUST2005.
Rapportnummer	RIKZ 2005.029

Samenvatting	In de Rijkswaterstaat Programma's KUST2000 en KUST2005 is veel technisch onderzoek uitgevoerd naar de westkust van Ameland. In dit rapport wordt voor kustbeheerders en onderzoekers geïllustreerd op welke deze studies hebben bijgedragen aan de adviezen voor het kustbeheer van Ameland en aan generieke adviezen voor het beheer van eilandkoppen. Vanuit de analyse van de morfologisch kennis worden twee alternatieve beheeringrepen voorgesteld
Summary	In the Rijkswaterstaat KUST2000 and KUST2005 projects much effort has been put in research of the western shoreline of the Wadden island Ameland. In this report the contribution of the research to the shoreline management of western Ameland is presented to coastal managers and researchers. In addition best practices in shoreline management of the Wadden islands that have sprouted form the research on Ameland are addressed. From the morphological analysis two alternative solutions for coastline management of Ameland follow that are introduced.

Versie	Eigenaar (= 1ste auteur)		Datum	Opmerking	Beoordeeld		Goedgekeurd	
1	Dr. J. Cleveringa	Ak-koord	3 dec 2002	Eind-concept	Dr. D.W. Dunsbergen (UM)			
2	Dr. J. Cleveringa	Ak-koord	10 okt 2004	Eind-concept	Dr. D.W. Dunsbergen (UM)			
3	Dr. J. Cleveringa	Ak-koord	8 aug 2005	Definitief	Drs. G.J Rotmensen	Ak-koord	Ir. R. Jorissen (directeur Water)	Ak-koord

Project ID	Rijkswaterstaat RIKZ (SLA) Kustlijnzorg				
Vertrouwelijk	☐ JA, tot (datum)		☒ NEE		
Status	☐ Startversie	☐ Eindconcept		☒ Definitief	

Figuur Samenvatting
De Kust2005-werkwijze in beeld gebracht voor het Zeegat van Ameland.
Het antwoord op de vraag van de beheerder is:
1. Een specifiek geformuleerd advies voor het lokale probleem, én,
2. Vertaald in generieke kennis ten bate van toepassing langs de gehele Nederlandse kust.



Samenvatting

Het doel van dit rapport is tweeledig:
1 Demonstreren hoe advisering voor het kustbeheer en kennisopbouw volgens de KUST2005-werkwijze samengaat.
2 De morfologische ontwikkelingen en processen rond de westkust van Ameland en het Zeegat van Ameland samenvatten.
Daarbij volgen uit de nieuw opgebouwde kennis van het gebied twee alternatieve beheeringrepen voor de westkust van Ameland.

KUST2005-werkwijze
In de (deel)projecten van de Rijkswaterstaat Programma's KUST2000 en KUST2005 zijn adviesvragen van de kustbeheerders beantwoord, waarbij het onderliggende werk heeft bijdragen aan de ontwikkeling van generieke kennis voor het landelijke kustbeheer en -beleid. In dit rapport wordt, aan de hand van het voorbeeldgebied, gedemonstreerd hoe de KUST2005-werkwijze in elkaar steekt. Deze werkwijze is geïllustreerd in de figuur op de voorgaande pagina: Uitgangspunt zijn de vragen van de kustbeheerders, die gekoppeld zijn aan morfologische ontwikkelingen. De analyse van de tijd- en ruimteschalen van het de morfologische ontwikkelingen levert aanknopingspunten voor de daadwerkelijke studies. Bij de studies wordt gebruikt gemaakt van metingen (historisch en recent), numerieke modellen en vergelijkingen met andere kustgebieden. Vanuit de opgedane kennis op de verschillende tijd- en ruimteschalen worden hypothesen geformuleerd over eventuele beheeringrepen en de wijze waarop deze aangrijpen op de ontwikkelingen van de kust. Hieruit volgen praktisch bruikbare adviezen voor het kustbeheer van Ameland en adviezen voor ander vergelijkbare kustgebieden.

De westkust van Ameland
De beheervragen rond de westkust van Ameland betreffen de erosie gekoppeld aan de ontwikkeling van de getijdegeul Borndiep, de achteruitgang van de noordwestkust en de dreigende overschrijding van de basiskustlijn, die is gekoppeld aan de verheling en ontwikkeling van de zandplaat, en de bedreiging van duinvoet door een getijdegeul, die is ontstaan tussen de kust en de verheelde zandplaat.
De ontwikkelingen van het zeegat en het getijdebekken op lange termijn (eeuwen) en de afbraak van de aangelande zandplaat op korte termijn (5-25 jaar), laten zich niet met haalbare beheeringrepen verhelpen. De aanbeveling om het natuurlijke einde van de getijdegeul en de erosie van de duinvoet af te wachten heeft zich reeds in de praktijk bewezen.

Generieke adviezen
Voor de Waddeneilanden en de Kop van Noord-Holland zijn geen maatregelen voorhanden om de oorzaken van veranderingen op de schaal van het getijdebekken en de geulen en platen in het zeegat aan te pakken. Zandtekorten aanvullen is hiervoor het devies.
Kenmerkend voor de ontwikkelingen bij de westkust van Ameland en de bij de andere koppen van waddeneilanden zijn de cyclische ontwikkelingen van geulen en platen, waarvoor in het algemeen het advies geldt om zonodig de negatieve ontwikkelingen te overbruggen door middel van *tijdelijke* maatregelen. In het licht van de doelstellingen van het kustbeleid zijn beheermaatregelen met zand, in de vorm van strand- of onderwatersuppleties aanbevolen maatregelen.

Alternatieve beheeringrepen voor de noordwestkust van Ameland
Op grond van de analyse van de morfologische ontwikkelingen worden twee alternatieve ingrepen voorgesteld in aanvulling op de bestaande maatregelen. Andere dan morfologische aspecten die een rol spelen in de haalbaarheid en wenselijkheid van deze varianten zijn niet beschouwd.

Een ingreep die mogelijk positieve effecten heeft op de westkust van Ameland is het herstellen van de kortsluitgeulen over de oostpunt van Terschelling. Wanneer de kustachteruitgang van de noordwest kust ingrepen noodzakelijk maakt, wordt aanbevolen hiermee de middellange termijn (50-60 jaar) achteruitgang te overbruggen. Naast de reguliere strand- en onderwatersuppletie bieden in de toekomst geulwandsuppleties of een zandsluiting van de getijdegeul alternatieven om periodes van kustachteruitgang te overbruggen. Een dergelijke ingreep is strijdig met de huidige aanpak, waarbij de natuurlijke ontwikkelingen de ruimte krijgen en moet derhalve alleen worden overwogen wanneer de kustachteruitgang functies en belangen daadwerkelijk bedreigt.

Inhoudsopgave

Samenvatting **5**

Inhoudsopgave **7**

Lijst van Figuren **9**

Lijst van Tabellen **11**

1 Inleiding **13**
1.1 De westkust van Ameland 13
1.2 Samenhang van de programma's KUST2000 en KUST2005 13
1.3 Doel van het rapport 13
1.4 Opzet van het rapport 14
1.5 Specifiek lokaal toepasbare kennis 15
1.6 Regionaal en algemeen toepasbare kennis 15

2 Aanleiding: vragen van de kustbeheerder **17**
2.1 Beheervragen 17
2.2 Erosie van de westkust van Ameland en de ontwikkeling van de getijdegeul Borndiep 17
2.3 De achteruitgang van de noordwestkust en dreigende verschrijding van de Basiskustlijn 18
2.4 Bedreiging duinvoet door geul tussen kust en zandplaat 20

3 Morfologische ontwikkelingen en de beheervragen **23**
3.1 De oostwaartse verplaatsing van de getijdegeul Borndiep 23
3.2 De verheling en ontwikkeling van de zandplaat van het Bornrif 23
3.3 De dynamiek van de getijdegeul tussen kust en zandplaat 25

4 Analyse van tijd- en ruimteschalen **27**
4.1 De duur van het probleem als eerste aanwijzing 27
4.2 De tijdschalen bij de onderzoeksvragen 27
4.3 De ruimteschalen bij de onderzoeksvragen én de beheervragen 28

5 Lange termijn (eeuwen) ontwikkelingen op grote schaal (zeegat, buitendelta, eilandkusten en getijdebekken) **31**
5.1 Inleiding 31
5.2 Beschrijving van de lange termijn ontwikkeling van de westkust van Ameland. 31
5.3 Verklaringen voor de lange termijn ontwikkeling 31
5.4 Onderbouwing van de verklaringen 32
5.5 Wandelende wantijen en veranderde aanstroming 33

6 Middellange termijn (50 tot 60 jaar) ontwikkelingen op de buitendelta **35**
6.1 Inleiding 35
6.2 Beschrijving van de 50 tot 60-jarige morfologische cyclus 35
6.3 Verklaring voor ontwikkelingen op middellange termijn: Mechanismen in de morfologische cyclus 36
6.4 Onderbouwing van de verklaringen 38

7 Korte termijn (5 tot 25 jaar) vormverandering van de zandplaat **45**
7.1 De ontwikkeling en aanlanding van het Bornrif 45
7.2 Beschrijving van de ontwikkeling van de verheelde zandplaat 45
7.3 Verklaringen zandplaatverheling en strandhaakontwikkeling 46
7.4 Onderbouwing van de verklaringen 48

8 Zeer korte termijn (1 tot 5 jaar) dynamiek van de geul op de zandplaat **51**
8.1 Inleiding 51
8.2 Beschrijving van de ontwikkeling van de getijdegeul op het strand van Ameland 51
8.3 Verklaring van de geulontwikkeling 52
8.4 Onderbouwing van de verklaringen 52

9 Hypothesen voor het kustbeheer: de oorzaak aanpakken ? 55
9.1 Beheerhypothesen voor het aanpakken van de oorzaken van de problemen 55
9.2 Praktische toepasbaarheid van het aanpakken van de oorzaak volgens de beheerhypothesen 56
10 Praktische adviezen voor het kustbeheer van Ameland 61
10.1 Adviezen voor het kustbeheer op basis van ontwikkelingen op verschillende tijdschalen 61
10.2 'Dynamische adviezen': de gebiedsgrenzen van de probleemgebieden veranderen 62
10.3 Alternatieve beheeringrepen voor de noordwestkust van Ameland 63
11 Spin-off: Algemeen toepasbare adviezen voor het kustbeheer 65
11.1 Maatregelen voor het kustbeheer 65
11.2 De inzet van numerieke modellen 65
11.3 De inzet van metingen 65
12 Epiloog : Adviseren met kennis van de kust 69
12.1 DE KUST2005-werkwijze 69
12.2 Van vraag van de beheerder tot de tijd- en ruimteschalen van kustontwikkelingen 69
12.3 Beschrijven, verklaren en onderbouwen van kustontwikkelingen 69
12.4 Optimaal ingrijpen op basis van hypothesen over beheer en kustontwikkeling 69
12.5 'In hindcast life is easy' 70
13 Literatuur 71

Lijst van Figuren

Figuur Samenvatting: De Kust2005-werkwijze in beeld gebracht voor het Zeegat van Ameland.Het antwoord op de vraag van de beheerder is: 1. Een specifiek geformuleerd advies voor het lokale probleem, én, 2. Vertaald in generieke kennis ten bate van toepassing langs de gehele Nederlandse kust.

Figuur 1.1: Het studiegebied: de west- en noordwestkust van Ameland (1996).

Figuur 2.1: De kust van Ameland en het onderzoeksgebied. Boven: Het Zeegat van Ameland, met de in de tekst gebruikte namen. De geulen, platen en kustlijn van 1999 zijn weergegeven. Beneden: aandachtgebieden voor het kustbeheer, op de kaart van 1996.

Figuur 2.2: De kustverdediging op de westkop van Ameland (opname november 2000). Rechtsboven strekdammetjes op de zuidwest kop, linksonder de kustparallelle dam van stortsteen op de westkust..

Figuur 2.3: De oostwaartse verplaatsing van de keel van het Zeegat van Ameland: dwarsdoorsnedes door Borndiep in de periode 1935 tot 1980. In 1947 zijn de eerste oeververdigingswerken aangelegd op de westkop van Ameland, waardoor de verplaatsing oostwaarts ter plekke tot stilstand is gekomen.

Figuur 2.4: Kustlijnkaart 1995 (A, van Heuvel, 1995) en 2001 (B, Snijders, 2001) waarop aangegeven de ontwikkeling van de te verwachte toekomstige kustlijn (TKL in de figuur) ten opzichte van de basiskustlijn.

Figuur 2.5: De voormalige zandplaat 'Bornrif' op de noordwestkust van Ameland in 1999.

Figuur 3.1: Historische kaart van de westkust van Ameland (Kaart van Ameland en het Zeegat van Ameland 1851-1855).

Figuur 3.2: Overzicht van de ontwikkeling van de strandhaak op de noordwestkust van Ameland in de periode 1968-1998 (uit Oost, Israël, en Dunsbergen, 2000)

Figuur 3.3: Luchtfoto van de geul, inclusief meanderbochten, in mei 2001.

Figuur 4.1: De problemen aan de westkust spelen langer dan de KUST2000 en KUST2005 programma´s: een illustratie uit het rapport van Gerritsen (1952) waarin de oorzaak van het wegslaan van het strandhoofd wordt onderzocht.

Figuur 4.2: Locatie en ruimtelijke schaal van de onderzoeksvragen over de morfologische ontwikkelingen in het zeegat van Ameland.

Figuur 5.1: Schematische weergave van de morfologische ontwikkelingen op de lange termijn (eeuwen) van zeegat, buitendelta, eilandkusten en getijdebekken.

Figuur 5.2: Opvulling van de Middelzee. De verschuiving van de wantijen laat de verlegging van het zwaartepunt van het kombergingsgebied van het Zeegat van Ameland zien (uit Van der Spek, 1994).

Figuur 6.1: Morfologische cyclus van het Zeegat van Ameland (Israel, 1998).

Figuur 6.2: Netto sedimenttransportrichtingen in het Zeegat van Ameland (naar Roelvink en Steijn, 1999), over een periode van enkele jaren (bodem 1999), met een indicatie van de grootte van de transporten (grootte van de pijlen).

Figuur 6.3: Golfgedreven sedimenttransport en de waterbeweging onder gemiddelde eb en vloed condities (naar Roelvink en Steijn, 1999 en Hartsuiker e.a., 1999).

Figuur 6.4: Analyse van het motorisch vermogen (waterstandsverhang over het getij) tussen verschillende stations op de buitendelta van het Zeegat van Ameland

Figuur 6.5: Simulaties over een extreem lange periode met Delft 3D MOR, met een initiële bodem uit 1989 (uit Steijn, 1999). De voorspelling voor 2003 en 2017 zijn weergegeven.

Figuur 6.6: Verschilkaart van de bodemligging in 1989 en 1993 van de noordwestkust van Ameland, weergegeven met schaduwwerking voor het ruimtelijke effect (uit Gordeau, 1999).

Figuur 7.1: Schematische ontwikkeling van de zandplaat.

Figuur 7.2: Conceptueel model voor de verheling van zandplaten met de kust (naar Fitsgerald, 1984, uit Israël en Oost, 2001).

Figuur 7.3: Simulatie van de morfologische ontwikkeling onder invloed van golfwerking (uit Wilkes, 1999).

Figuur 8.1 Schematische ontwikkeling getijdegeul en oostpunt strandhaak in de periode van 1995 tot 2001.

Figuur 8.2: Escoffier plot voor stabiliteit van de getijdegeul op de strandhaak (boven) en demonstratie van de twee evenwichtssituaties bij getijdegeulen (onder, beide uit Israel en Oost, 2001).

Figuur 10.1: Kustvakken van Ameland waarvoor door Oost, Israël en Dunsbergen in 2000 adviezen zijn geformuleerd voor het kustbeheer, op basis van het werk uit het KUST2000 programma.

Figuur 10.2: Schematische weergave van de twee alternatieve beheeringrepen voor het kustbeheer van Ameland.

Figuur 12.1: De Kust2005-werkwijze in beeld gebracht voor het Zeegat van Ameland. Het antwoord op de vraag van de beheerder is:1. Een specifiek geformuleerd advies voor het lokale probleem, én, 2. Vertaald in generieke kennis ten bate van toepassing langs de gehele Nederlandse kust..

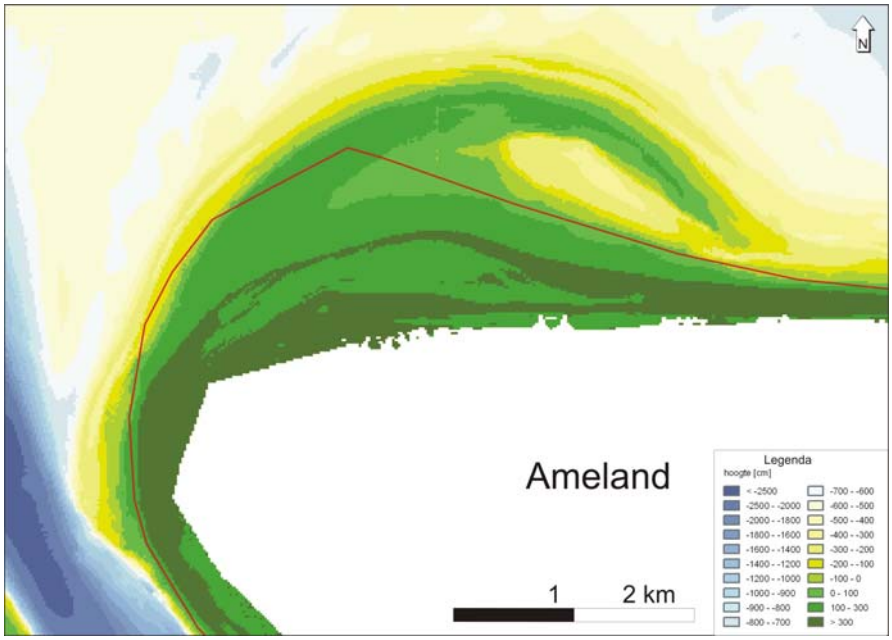
Lijst van Tabellen

Tabel 1.1: De fasering in het KUST2000 & KUST2005 onderzoek aan het Zeegat van Ameland

Tabel 1.2: De deelstudies van het KUST2000 & KUST2005 onderzoek aan het Zeegat van Ameland per fase

Tabel 10.1: Kustontwikkelingen op tijdschalen van millennia tot jaren.

Figuur 1.1
Het studiegebied: de west- en noordwestkust van Ameland (1996).



1 Inleiding

1.1 De westkust van Ameland

De westkust van Ameland (figuur 1.1) heeft al sinds jaar en dag de aandacht van de kustbeheerder. De westkust zelf heeft een relatief smal strand en de waterkering gaat van een breed duinmassief over een dijk. Meer naar het noordwesten wordt het strand snel veel breder en is sprake van een strandvlakte, met een strandhaak. Het huidige kaartbeeld wijkt in veel punten af van die van begin jaren '80 , terwijl die weer veel verschilt met die uit de jaren '30. Deze grote veranderingen zijn reden geweest voor verschillende maatregelen om de negatieve gevolgen voor het eiland, zoals de bedreiging van de waterkering, tegen te gaan. Dergelijke grote veranderingen zijn karakteristiek voor de kusten nabij buitendelta's, zowel bij de Wadden en de Kop van Noord-Holland, als in de Zeeuwse en Zuid-Hollandse Delta.
De westkust van Ameland staat in deze studie model voor deze 'eilandkoppen'.

1.2 Samenhang van de programma's KUST2000 en KUST2005

In de periode 1996-2004 is, in het kader van de RWS programma's KUST2000 en KUST2005, een aantal activiteiten uitgevoerd aan de eilandkoppen zuidwest Walcheren, zuidwest Texel en west Ameland. In dit rapport worden de samenhangende onderzoeken rond de westkust van Ameland en het Zeegat van Ameland (tabel 1.1 & 1.2) gepresenteerd. Deze onderzoeken hadden een tweeledig doel: 1) het formuleren van een goed onderbouwd advies voor het beheer van de westkust van Ameland en 2) het uitbreiden van de kennis over de ontwikkelingen en fysische processen die rond alle eilandkoppen een rol spelen. Het advies is geformuleerd in het rapport 'Kusterosie van noordwest Ameland: ontwikkelingen op verschillende tijdschalen' (Oost e.a., 2001). In het voorliggende rapport wordt stilgestaan bij de opgedane morfologische kennis over eilandkoppen en in het bijzonder de westkust van Ameland.

Tabel 1.1
De fasering in het KUST2000 & KUST2005 onderzoek aan het Zeegat van Ameland

Fasering	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Probleemanalyse	X								
Hypothesevorming	X	X							
Fenomenologie			X	X	X				
Meten	X	X	X	X		X	X	X	X
Modelleren			X	X	X		X		
Advisering		X		x		X		x	

1.3 Doel van het rapport

Het rapport dat nu voor u ligt heeft twee doelen. In de eerste plaats is het rapport een weergave van de KUST2005-werkwijze, waarbij vragen van de kustbeheerder worden beantwoordt en generieke kennis wordt ontwikkeld. Dezelfde werkwijze is toegepast op andere delen van de Nederlandse kust, vanuit verschillende beheervragen, maar met een vergelijkbare aanpak. In de tweede plaats is het rapport een weergave van de morfologische kennis van het Zeegat van Ameland die is opgedaan in 10 jaar onderzoek in de RWS programma's KUST2000 en KUST2005.
Het rapport is hiermee méér dan een samenvatting van de stapel deelstudies (tabel 1.2) van het Zeegat van Ameland. De belangrijke lessen van het werken vanuit de beheersvragen, met als doel het beantwoorden daarvan én het opleveren van generieke kennis worden toegelicht in de laatste twee

hoofdstukken (Hoofdstuk 11: Spin-off: Algemeen toepasbare adviezen voor het kustbeheer en Hoofdstuk 12: Epiloog: Adviseren met kennis van de kust).

1.4 Opzet van het rapport

De opzet van het rapport volgt de samenhang van de onderzoeksprogrammering, zoals weergegeven in de figuur samenvatting. De verschillende onderdelen uit de figuur vallen samen met de hoofdstukken in het rapport. Op deze wijze wordt uitgebreid stilgestaan bij het voortraject en het vervolgtraject van de verschillende studies. Deze trajecten zijn van groot belang voor een relevante onderzoeksprogrammering en voor de vertaling van de uitkomsten naar passende adviezen voor het kustbeheer. In het laatste hoofdstuk van het rapport wordt teruggekeken op de KUST2005-werkwijze en de lessen die te trekken zijn aangaande de werkwijze.

Tabel 1.2
De deelstudies van het KUST2000 & KUST2005 onderzoek aan het Zeegat van Ameland per fase.

Onderwerp	Verschenen KUST2000 rapportages
1. Probleemanalyse	• KUST*2000 definitiestudie: Bornrif (no.6) (Waterloopkundig Laboratorium, 1996)
2. Hypothesevorming	• Morfologische ontwikkeling Amelander Zeegat (Israël, 1998)
3. Morfologische ontwikkelingen (fenomenologisch)	• Saw-tooth bars defined, (Gordeau, 1999) • De ontwikkeling van het Amelander zeegat vanuit geologisch perspectief (Van der Spek, 1999) • Cyclic morphological development of the Ameland inlet (Israel en Dunsbergen, 1999) • Strandhaakontwikkelingen op de koppen van de eilanden, (Israël en Oost, 2001)
4. Metingen in het zeegat van Ameland Bodemdiepte Debieten Golven ?	• (Update) SAR survey Zegat van Ameland (Hesselmans, 1996 & 1997, Briek e.a., 1999) • Resultaten van stromingsmetingen in het Borndiep op 17/9/96 (Kamminga , 1996) • STROBODI, 1996 (Barsingerhorn e.a., 1997) • STROBODI, 1997 (Briek e.a., 1998) • Amelander zeegat '99: debietmetingen en morfologische ontwikkelingen (Visser, 1999)
5. Simulaties van de morfologische ontwikkeling Waterbeweging Morfologie	• Bar morphology Bornrif (Wilkes, 1999) • Morfodynamic simulations of the tidal inlet "Zeegat van Ameland" (Roelvink, 1999) • Morfodynamische berekeningen van het zeegat van Ameland (Roelvink en Steijn, 1999) • Morfologische ontwikkelingen van het zeegat van Ameland: toetsing van hypothesen (Hartsuiker e.a., 1999) • ELS: Een Erg Lange Simulatie met het morfodynamische model van het Zeegat van Ameland (Steijn, 1999)
6. Adviezen voor het kustbeheer	• Kustontwikkelingen Ameland-West; lineaire verplaatsing versus cyclische ontwikkeling (Steyaart, 1997) • Cyclische ontwikkeling van het Zeegat van Ameland (Klomp en Kabout, 1997) • Kusterosie van Noordwest Ameland: ontwikkelingen op verschillende schalen (Oost e.a., 2000)

1.5 Specifiek lokaal toepasbare kennis

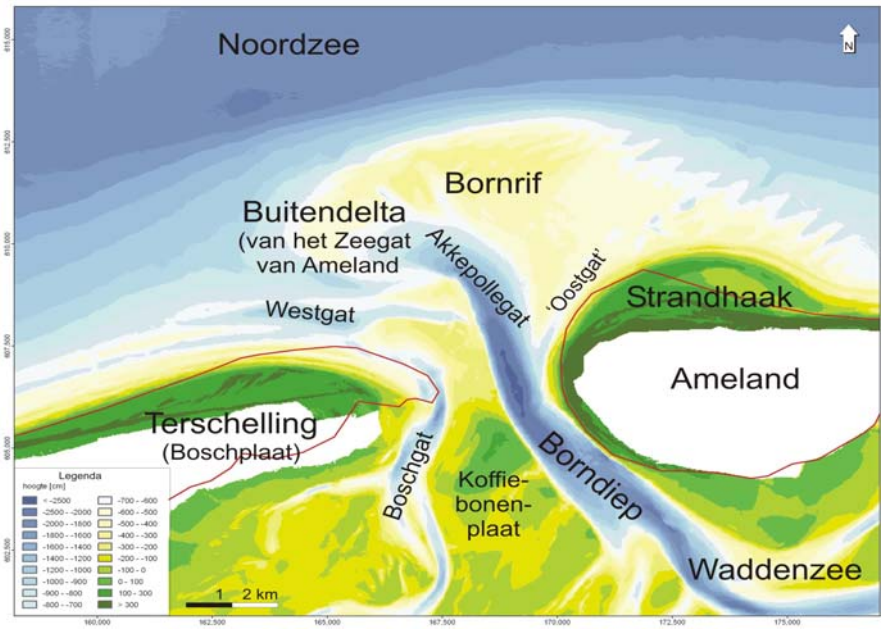
Ieder zeegat van de Waddenzee heeft zijn eigen unieke morfologie en dynamiek, door de ligging van de getijdebekkens en de Waddeneilanden, de geologische en historische ontwikkeling, en de karakteristieken van het getijde op de Noordzee. Ook de morfologie en de dynamiek van het Zeegat van Ameland zijn uniek. De uitkomsten van de deelstudies zijn daarom in eerste instantie specifiek van toepassing op het Zeegat van Ameland. Bij metingen is dit overduidelijk: een meting van het debiet van het Zeegat van Ameland geeft geen informatie over andere zeegaten. Bij modelstudies geldt hetzelfde: een simulatie van de morfologische ontwikkeling laat zich niet vertalen naar andere zeegaten.

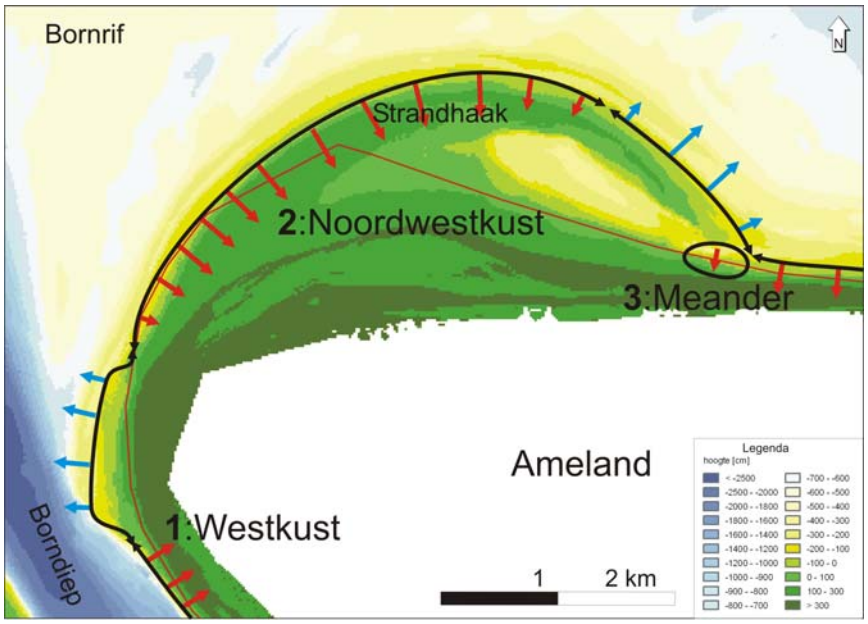
1.6 Regionaal en algemeen toepasbare kennis

Alle zeegaten hebben vergelijkbare elementen in de morfologie en in de ontwikkeling daarvan. Dit biedt de mogelijkheid om de bevindingen voor het Zeegat van Ameland te vertalen naar andere zeegaten en omgekeerd. Een voorbeeld wordt geven in het rapport Strandhaakontwikkeling op de koppen van de Waddeneilanden (Oost en Israël, 2001) naar de ontwikkeling van zandplaten op de koppen van de eilanden. Het vertalen van bevindingen naar andere zeegaten gaat ook op voor deel van de hypotheses die geformuleerd zijn over de belangrijkste sturende mechanismen.

Resultaten uit het werk aan het Zeegat van Ameland die van toepassing zijn op zeegaten in het algemeen vormen een bijdrage in de generieke kennisontwikkeling. Ook de gehanteerde methodes, bijvoorbeeld om het debiet te bepalen, om zaagtandbanken te analyseren en om een morfologische simulatie uit te voeren, zijn te beschouwen als generieke kennisontwikkeling, steeds vanuit een specifieke Rijkswaterstaat-vraagstelling. De dubbele doelstelling om lokale beheervragen te beantwoorden en algemeen toepasbare morfologische kennis te vergaren heeft als een rode draad door de KUST2000 en KUST2005 programma's gelopen. Dit rapport illustreert de meerwaarde van specifieke regionale adviezen (onder punt 6 in tabel 1.2 en in hoofdstuk 10) met generiek toepasbare spin-off (hoofdstuk 11 en 12 van dit rapport).

Figuur 2.1:
De kust van Ameland en het onderzoeksgebied.
Boven: Het Zeegat van Ameland, met de in de tekst gebruikte namen. De geulen, platen en kustlijn van 1999 zijn weergegeven.
Beneden: aandachtgebieden voor het kustbeheer, op de kaart van 1996.





2 Aanleiding: vragen van de kustbeheerder

In dit hoofdstuk worden de problemen met het kustbeheer van de westkop van Ameland (figuur 2.1) gepresenteerd. De beheerproblemen zijns deels recent en kortdurend en deels ouder en langdurend. Dit is een eerste aanwijzing voor de tijdschaal waarop het probleem geanalyseerd moet worden.

2.1 Beheervragen

De aandachtsgebieden (figuur 2.1) bij de westkust van Ameland betreffen in eerste instantie twee punten (definitiestudie Bornrif: Waterloopkundig Laboratorium, 1996):

1) De erosie van de westkust van Ameland, waarbij een verband wordt gezocht met ontwikkelingen van de getijdegeul Borndiep;
2) De achteruitgang van de noordwestkust en dreigende overschrijding van de Basiskustlijn, waarbij een verband wordt gezocht met het aanlanden en verplaatsen van de zandplaat van het Bornrif.

Gedurende de loop van het KUST2000 programma is hier een vraag bijgekomen over de lokale aantasting van de duinregel, waarbij een verband gezocht wordt met geulvorming en -verplaatsing op de zandplaat.

2.2 Erosie van de westkust van Ameland en de ontwikkeling van de getijdegeul Borndiep

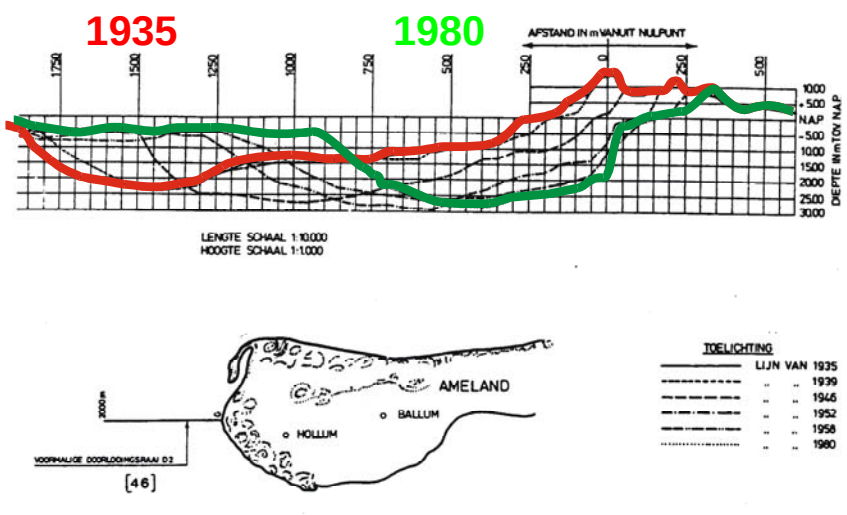
De kustverdediging van west en noordwest Ameland bestaat uit een combinatie van harde kustverdedigingsmaatregelen en het herhaald uitvoeren van zandsuppleties op het strand. De eerste harde verdedigingsmaatregelen zijn uitgevoerd in 1947, in de vorm van zinkwerk, die in 1979 zijn gevolgd door de aanleg van een stortstenen onderwaterdam en door de aanleg van stortstenen dammen dwars op de kust (figuur 2.2). In aanvulling op de harde ingrepen zijn vanaf 1979 strandsuppleties uitgevoerd in het gebied. In 1994 is de bestaande bestorting aangevuld en opgetrokken. De harde verdediging wordt onderhouden en er worden met enige regelmaat strandsuppleties uitgevoerd.



Figuur 2.2
De kustverdediging op de westkop van Ameland (opname 1999). Rechtsboven strekdammetjes op de zuidwest kop, linksonder de kustparallelle dam van stortsteen op de westkust.

De kustverdedigingsmaatregelen zijn gericht tegen de oostwaartse verplaatsing van de getijdegeul Borndiep. Ter hoogte van km paal 2 is het Borndiep van 1935 tot 1950 ongeveer 500 m naar het oosten verplaatst (figuur 2.3, de Reus, 1983). Deze verplaatsing is in die periode ten koste gegaan van Ameland en vormde een steeds grotere bedreiging voor de veiligheid van het eiland.

Beheervraag 1 De beheervraag is of de huidige wijze van kustverdediging van west Ameland, met een combinatie van harde kustverdediging en zandsuppleties, ook in de toekomst de aangewezen methode is.



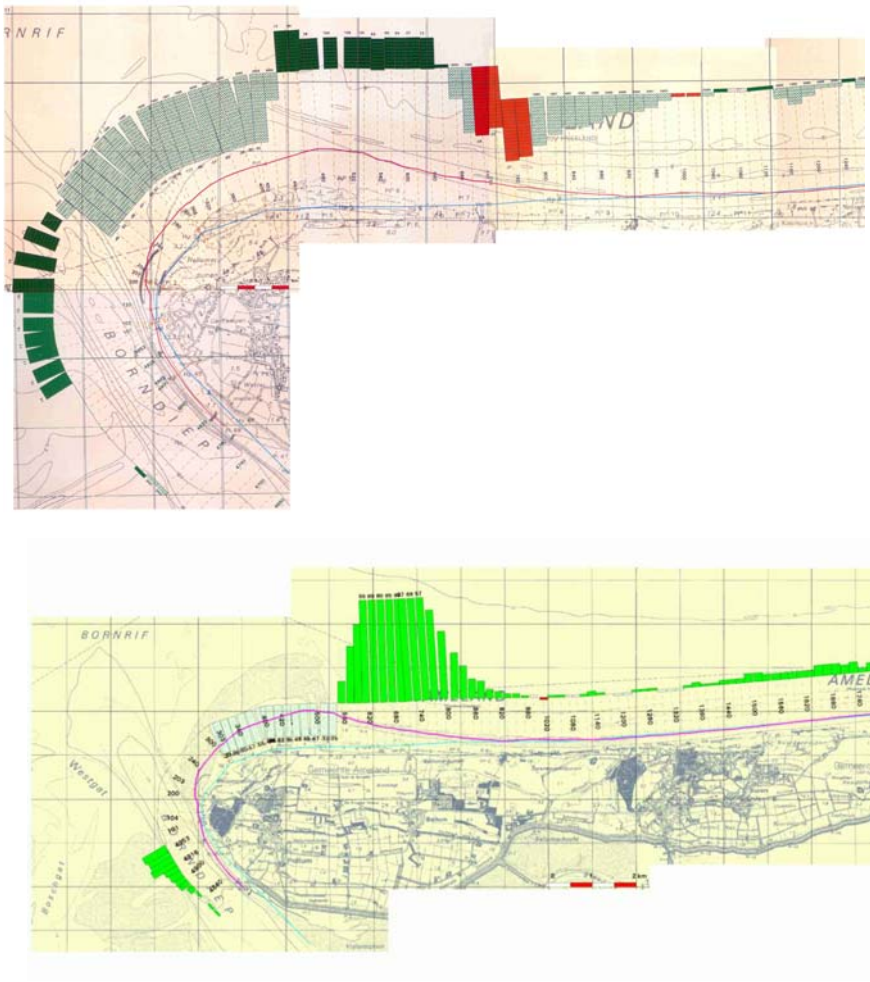
Figuur 2.3
De oostwaartse verplaatsing van de keel van het Zeegat van Ameland: dwarsdoorsnedes door Borndiep in de periode 1935 tot 1980. In 1947 zijn de eerste oeververdigingswerken aangelegd op de westkop van Ameland, waardoor de verplaatsing oostwaarts ter plekke tot stilstand is gekomen.

2.3 De achteruitgang van de noordwestkust en dreigende overschrijding van de Basiskustlijn

Onder andere in de tweede kustnota (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1996) wordt ten aanzien van de kustlijn van noordwest Ameland (Bornrif) en noordwest Terschelling (Noordergronden) geconstateerd dat op deze eilandkoppen grote en langdurige schommelingen in de kustlijnligging plaatsvinden. Oorzaak is de aanlanding van zandplaten en de daaropvolgende erosie. Over periodes van 50 jaar of meer is de kustligging stabiel of zelfs licht uitbouwend. In 1990 is de Basiskustlijn vastgesteld, op basis van het tienjarig gemiddelde van de kustlijnontwikkeling (Hillen, e.a., 1991, zie voor uitleg een van de Kustlijnkaarten, van Heuvel, 1995 of Snijders, 2001). De kustlijn wordt met zandsuppleties zeewaarts van de Basiskustlijn gehouden.
Op noordwest Ameland maakt de in de jaren '80 aangelande zandplaat deel uit van de vastgestelde Basiskustlijn. De Basiskustlijn ligt daardoor honderden tot duizenden meters uit de duinvoet (figuur 2.4). De Basiskustlijn bij de westkust van Ameland is daarom in 1994 landwaarts verlegd.
Om de kustlijn zeewaarts van de Basiskustlijn te handhaven zou de doorgaande erosie van de noordwestkust gecompenseerd moeten worden met strandsuppleties, ondanks de grote natuurlijke zandbuffer tussen duinen en zee. Deze problematiek wordt verder gespecificeerd in het rapport ' Erosie op Ameland-Bornrif en Terschelling-Noordergronden; inzicht in de ernst van de situatie en oplossingsrichtingen' (Ruig en Noordstra, 1996).

Beheervraag 2 Kunnen de economische en ecologische functies in het kustgebied (bijvoorbeeld een boorlocatie van de NAM en een natuurgebied) ook behouden blijven wanneer de kustlijn meer landwaarts dan de vastgestelde Basiskustlijn (figuur 2.4) wordt gehandhaafd?

Figuur 2.4
Kustlijnkaart 1995 (A, van Heuvel, 1995) en 2001 (B, Snijders, 2001) waarop aangegeven de ontwikkeling van de te verwachte toekomstige kustlijn (TKL in de figuur) ten opzichte van de basiskustlijn.
De volgende informatie is op de kaart weergegeven:
Topografie als ondergrond, schaal 1:50.000
De raaien waarlangs de jaarlijkse kustmetingen (JARKUS) uitgevoerd worden
De rijksstrandpalenlijn (RSP lijn)
De ligging van de basiskustlijn; een dikke roze/rode lijn. Omdat de basiskustlijn ongeveer overeenkomt met de laagwaterlijn, ligt deze lijn ogenschijnlijk veel "in het water".
Het verschil tussen de TKL en de BKL. in de vorm van een staafje dat opgebouwd wordt uit een aantal blokjes. Het aantal blokjes komt overeen met de grootte van de trend in meters per jaar. rode kleur getekend. Een positieve trend betekent dat de kust aangroeit, en wordt daarom in zeewaartse richting getekend. Een negatieve trend wordt in landwaartse richting getekend. Een overschrijding van de BKL is weergegeven met een rood staafje.
Op de kaart van 2001 is voor de gebied tussen RSP 49 en RSP 3 geen verschil weergegeven, omdat in 2000 een strandsuppletie is uitgevoerd in dit gebied.



2.4 Bedreiging duinvoet door geul tussen kust en zandplaat

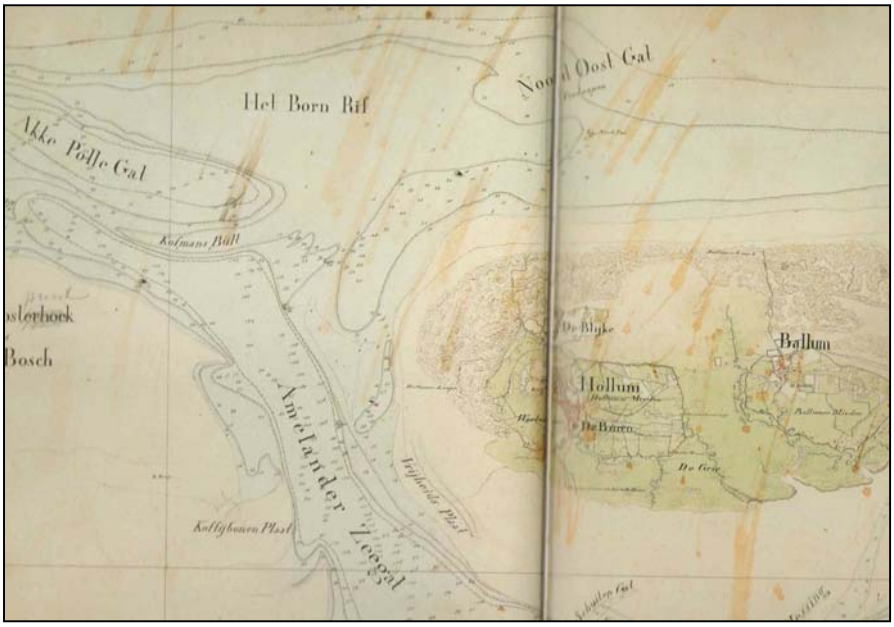
In 1997 en enkele jaren daarna doen zich lokale problemen voor bij strandpaal 7.1, waar een kleine getijdegeul steeds verder naar de duinvoet meanderde (figuur 2.5). De getijdegeul bedreigde de eerste duinregel, die onderdeel is van de waterkering, en een strandtent en beperkte de recreatieve mogelijkheden in het gebied. In 2001 stopten de bedreigende ontwikkelingen van de getijdegeul, maar de restanten van de geul beperken tot op de dag van vandaag de mogelijkheden voor recreanten.

Beheervraag 3 Moet op noordwest Ameland worden ingrepen om de ontwikkeling van de getijdegeul af te remmen of te stoppen?



Figuur 2.5
De voormalige zandplaat 'Bornrif' op de noordwestkust van Ameland in 1999. Zichtbaar is de strandhaak, die vanaf de westkop van Ameland (bovenin de foto) rond het eiland 'krult'. Tussen de strandhaak en strand ligt de monding van een getijdegeultje, dat verbonden is met de lagune achter de strandhaak. De meanderbochten in het geultje zijn zeer duidelijk (rode pijlen) en deze naderen de duinvoet op twee plaatsen (zwarte pijl is noorden).

Figuur 3.1
Historische kaart van de westkust van Ameland (Kaart van Ameland en het Zeegat van Ameland 1851-1855, afkomstig uit de Grote Historische Atlas van Nederland 1:50.000, Wolters Noordhoff Atlasproducties, Groningen).



3 Morfologische ontwikkelingen en de beheervragen

De drie beheervragen uit het vorige hoofdstuk zijn het uitgangspunt voor het formuleren van onderzoeksvragen. Bij elke beheervraag is al een suggestie gedaan voor de onderliggende oorzaak. Deze suggesties zijn gebaseerd op observaties van opgetreden morfologische veranderingen door de lokale beheerder, in eerdere onderzoeken en in het KUST2000 programma. De gesuggereerde oorzaken worden onderzocht.

3.1 De oostwaartse verplaatsing van de getijdegeul Borndiep

De erosie van de westkust van Ameland (gebied **1.** in figuur 2.1), en daarmee de noodzaak voor het uitvoeren van kustverdedigingsmaatregelen, komt voort uit de oostwaartse verplaatsing van de getijdegeul Borndiep (figuur 2.2). Om een adequaat antwoord te kunnen geven op beheervraag 1 is het noodzakelijk om te weten of de verplaatsing ook in de toekomst door zal gaan. Hiervoor moet bekend zijn wat de oorzaken zijn voor de oostwaartse verplaatsing van het Borndiep.
Analyse van historische kaarten, van 1798 tot 1950, geeft aanwijzingen dat de kustachteruitgang en oostwaartse verplaatsing van de getijdegeul speelt vanaf de eerste helft van de 19^{e} eeuw (figuur 3.1). Naast de erosie van de westkust spelen in deze periode andere grote veranderingen in de het getijdebekken, op de buitendelta en in de aangrenzende kustvakken. Hier ligt een mogelijke oorzaak voor de oostwaartse verplaatsing van het Borndiep, die wordt verwoord in de volgende onderzoeksvraag:

Onderzoeksvraag 1 'Hoe verhoudt de verplaatsing van Borndiep met de lange termijn ontwikkelingen van enkele eeuwen, van kust, buitendelta en getijdebekken ?'

Analyse in meer detail laat zien dat er op de middellange termijn van 50 tot 60 jaar, fluctuaties optreden in de kustachteruitgang en dat zelfs periodes met beperkte kustuitbouw plaatsvinden (Klomp en Kabout, 1997), ondanks de lange termijn verplaatsing van het Borndiep. Deze ontwikkelingen gaan gelijk op met veranderingen van de geulen en platen op de buitendelta. Dit geeft aanleiding tot de onderzoeksvraag

Onderzoeksvraag 2a 'Welke koppeling tussen de ontwikkeling van de westkust van Ameland en de geulen en platen op de buitendelta bepaalt de variatie in kustachteruitgang, over een periode van 50 tot 60 jaar ?'

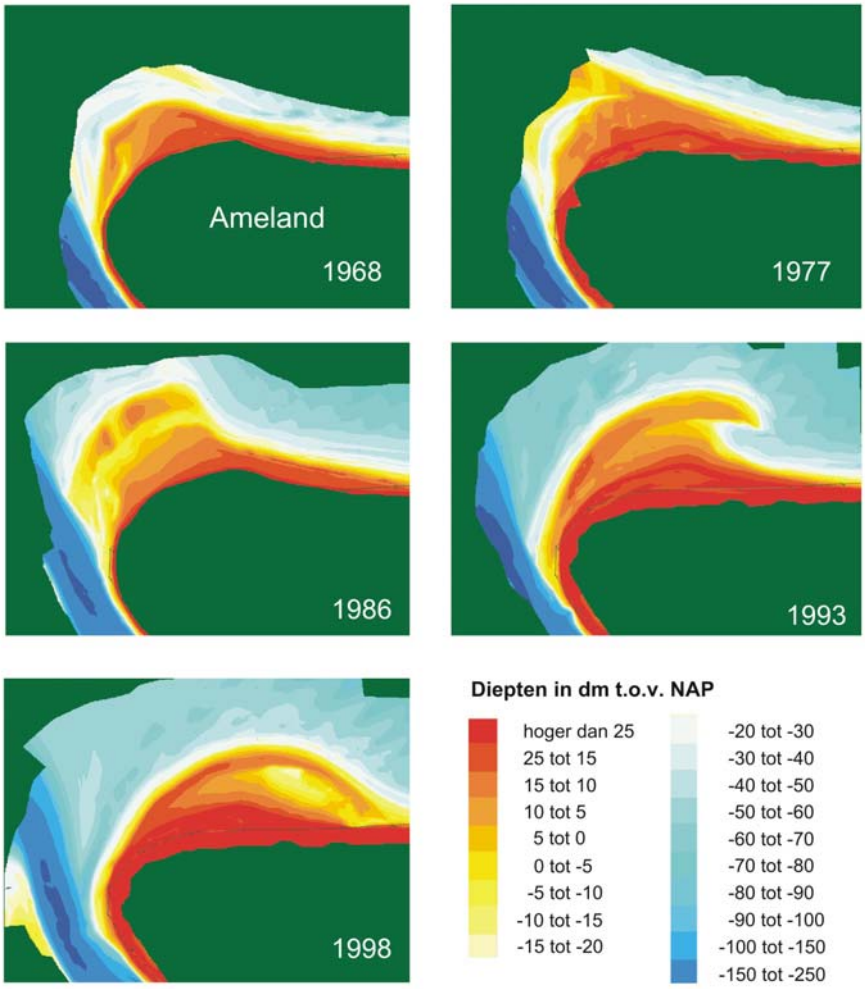
3.2 De verheling en ontwikkeling van de zandplaat van het Bornrif

Bij de westkust van Ameland is al sprake van variatie in de kustachteruitgang, maar verder naar het noordwesten (gebied **2.** in figuur 2.1) neemt de grootte van de variatie sterk toe. De ontwikkelingen van duinvoet en de gemiddelde hoog- en laagwaterlijnen van de noordwestkust laten snelle en grote uitbouw zien, gevolgd door achteruitgang over een periode van 50 tot 60 jaar.
Beheervraag 2 betreft de ruimte die gereserveerd kan worden voor de natuurlijke fluctuaties van de kustlijn, zonder dat functies van het kustgebied in het geding komen. Bij het formuleren van onderzoeksvraag 2a, die betrekking heeft op de westkust, wordt is een verband gelegd tussen de kustlijnontwikkeling van west Ameland en de ontwikkeling van geulen en platen op de buitendelta. Voor de noordwestkust van Ameland lijkt dit verband nog sterker.

Analyse van de bathymetrische kaarten over dezelfde periode maakt in één oogopslag duidelijk dat de uitbouw is gekoppeld aan de aanlanding en verheling van een grote zandplaat van de buitendelta met de kust (figuur 3.2). De aanlanding van de zandplaat gaat samen met andere veranderingen van platen en geulen op de buitendelta. Oorzaken voor de uitbouw van de noordwestkust worden daarom gezocht in ontwikkelingen op de buitendelta, verwoord in deze onderzoeksvraag :

Onderzoeksvraag 2b 'Welke koppeling tussen de ontwikkeling van de noordwestkust van Ameland en de verheling van zandplaten met ontwikkeling van de geulen en platen op de buitendelta bepaalt de variatie in kustuitbouw en -achteruitgang, over een periode van 50 tot 60 jaar ?'

Figuur 3.2
Overzicht van de ontwikkeling van de strandhaak op de noordwestkust van Ameland in de periode 1968-1998 (uit Oost, Israël, en Dunsbergen, 2000).



Onderzoeksvragen 2a en 2b laten zich combineren tot

Onderzoeksvraag 2 'Hoe verhoudt de ontwikkeling van de kust van Ameland over een periode van 50 tot 60 jaar, met de ontwikkelingen van geulen en platen op de buitendelta van het Zeegat van Ameland?'

De kaarten van de noordwestkust laten in de periode 1985 tot heden zien dat de achteruitgang het kustvak met de verheelde zandplaat gelijk op gaat met kustuitbouw in de aangrenzende kustvakken. Het zand wordt als het ware herverdeeld langs de kust (figuur 3.2), waarbij de westkust een klein deel krijgt een het leeuwendeel naar het oosten wordt getransporteerd. Oorzaken voor de herverdeling van het zand worden gezocht in de zandtransporten langs de rand van de zandplaat naar de omgeving en dit wordt als volgt verwoord in:

Onderzoeksvraag 3 'Ten gevolge van welke processen ontwikkelt de zandplaat, in een periode van een tiental jaren ? '

3.3 De dynamiek van de getijdegeul tussen kust en zandplaat

De getijdegeul landwaarts van de zandplaat was de oorzaak van de lokale problemen bij de duinvoet (figuur 3.3). De kleine getijdengeul zorgde voor de afwatering van het intergetijdegebied dat op aangelande zandplaat was ontstaan. Het ontstaan van de geul was direct gekoppeld aan het ontstaan van de zandplaat. De verwachting was dat veranderingen van de zandplaat ook zouden leiden tot veranderingen van de getijdegeul. De problemen bij de duinvoet traden op waar de buitenbocht van de getijdegeul naar de duinvoet verplaatste. Ook de ontwikkeling van de meanderbochten leek gekoppeld aan de ontwikkeling van strandhaak en zandplaat. De onderzoeksvraag is daarom breed geformuleerd als:
Onderzoeksvraag 4 Welke veroorzaken zijn er voor de ontwikkeling van de getijdegeul landwaarts van de verheelde zandplaat ? '



Figuur 3.3
Luchtfoto van de geul, inclusief meanderbochten, in mei 2001.

Figuur 4.1
De problemen aan de westkust spelen langer dan de KUST2000 en KUST2005 programma´s: een illustratie uit het rapport van Gerritsen (1952) waarin de oorzaak van het wegslaan van het strandhoofd wordt verklaard.



4 Analyse van tijd- en ruimteschalen

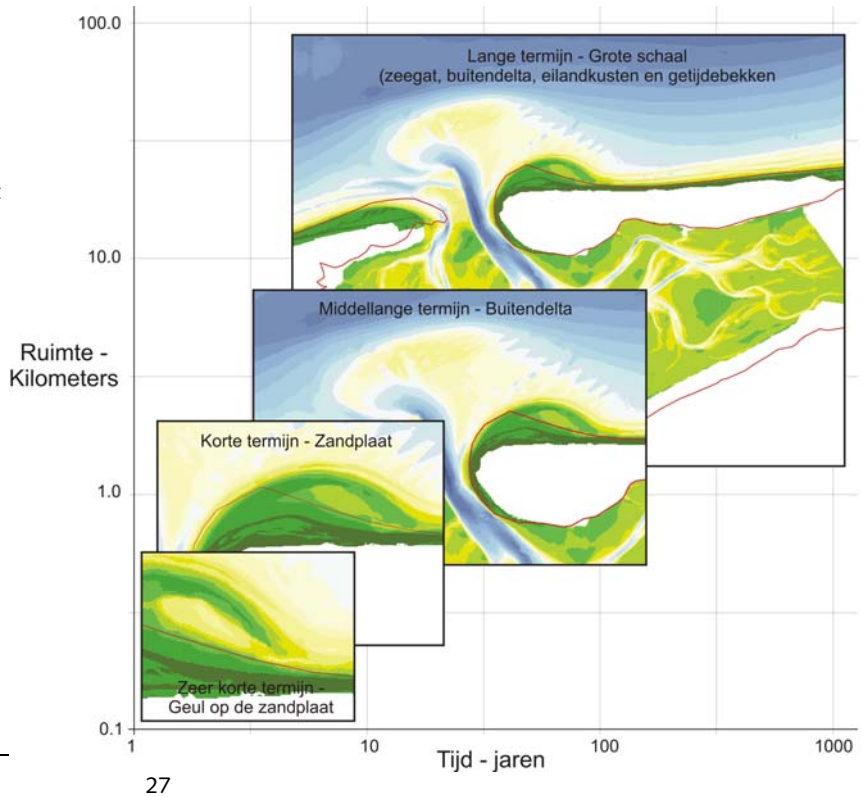
De beheer- en onderzoeksvragen uit de voorgaande hoofdstukken spelen op verschillende tijd- en ruimteschalen. Bij het onderzoek naar de oorzaken voor de morfologische veranderingen is het van belang om het probleem op de juiste ruimte en tijdschaal aan te pakken. Ook bij de antwoorden op de beheervragen blijkt de tijd en ruimteschaal een belangrijke rol te spelen. In dit hoofdstuk wordt de analyse van de tijd- en ruimte schalen gespecificeerd.

4.1 De duur van het probleem als eerste aanwijzing

De eerste aanwijzing voor de tijdschaal van morfologische veranderingen komt uit de 'ouderdom' van de beheervraag. De problemen rond de doorgaande erosie van de westkust en de ontwikkelingen van het Borndiep spelen bijvoorbeeld al tenminste vanaf het begin van de 20ste eeuw (figuur 4.1). Bij het zoeken naar een oorzaak voor de oostwaartse verplaatsing van het Borndiep moet daarom ook gekeken worden naar oorzaken die op deze termijn 100 jaar of langer, een rol spelen. De achteruitgang van de noordwest kust speelt over periodes die langer zijn dan het tienjarige gemiddelde van de basiskustlijn. De oorzaken van de kustachteruitgang moeten derhalve gezocht worden op een tijdschaal van meer dan tien jaar. De getijdegeul tussen kust en zandplaat heeft van 1997 tot 2001 voor problemen op het strand gezorgd. De tijdschaal van deze beheervraag beslaat dus tenminste vier jaar.

4.2 De tijdschalen bij de onderzoeksvragen

In de vorige paragraaf is geconstateerd dat de drie beheervragen langer of korter spelen en wordt gesuggereerd dat dit gekoppeld is aan de tijdschaal van de onderliggende morfologische veranderingen. De morfologische onderzoeksvragen, die in het voorgaande hoofdstuk zijn verwoord, geven een tweede aanknopingspunt voor de relevante tijdschalen. Tijdschalen aan de onderzoeksvragen verbinden kan alleen na een blik op kaarten en profielen, die een lange periode beslaan. Voor alle zeegaten van de Waddenzee en de Delta is hiervoor eerder werk beschikbaar, dat voor het Zeegat van Ameland aangevuld is met recent materiaal.



Figuur 4.2
Locatie en ruimtelijke schaal van de onderzoeksvragen over de morfologische ontwikkelingen in het zeegat van Ameland op lange tijdschaal van eeuwen tot millenia (a), middellange termijn, van 50 tot 60 jaar (b), korte termijn, van één jaar tot een tiental jaren (c) en zeer korte termijn, van één tot vijf jaar (d).

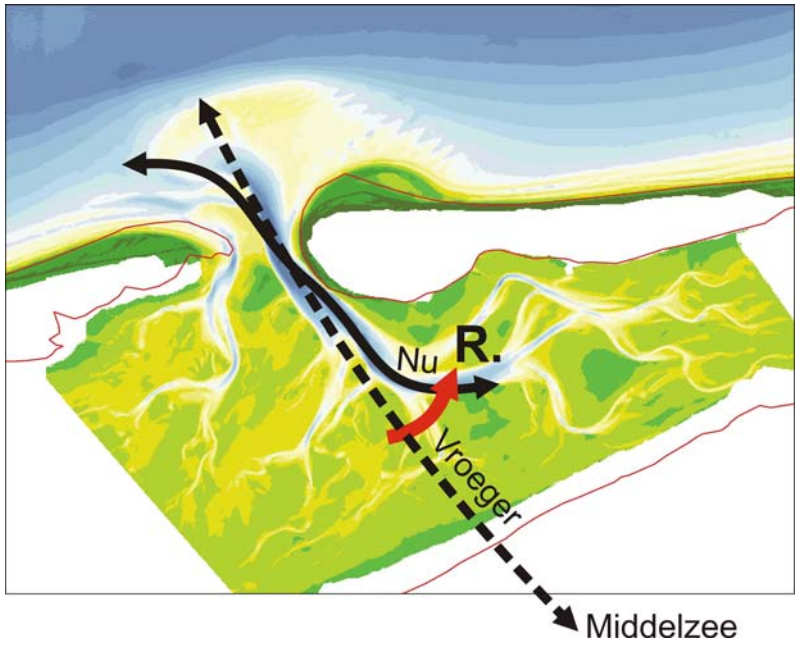
Bij de oostwaartse verplaatsing van de getijdegeul Borndiep hebben de onderzoeksvragen tijdschalen van respectievelijk enkele eeuwen en 50 tot 60 jaar. Bij de andere onderzoeksvragen worden tijdschalen een tiental jaren en van enkele jaren genoemd. In totaal worden vier tijdschalen herkend (figuur 4.2.
Bij elke beheervraag blijkt dat gekeken moet worden én naar oorzaken die op dezelfde tijdschaal spelen én naar oorzaken die op een grotere tijdschalen spelen. Deze cascade van schalen is een belangrijk gegeven, dat terug zal komen in de volgende hoofdstukken.

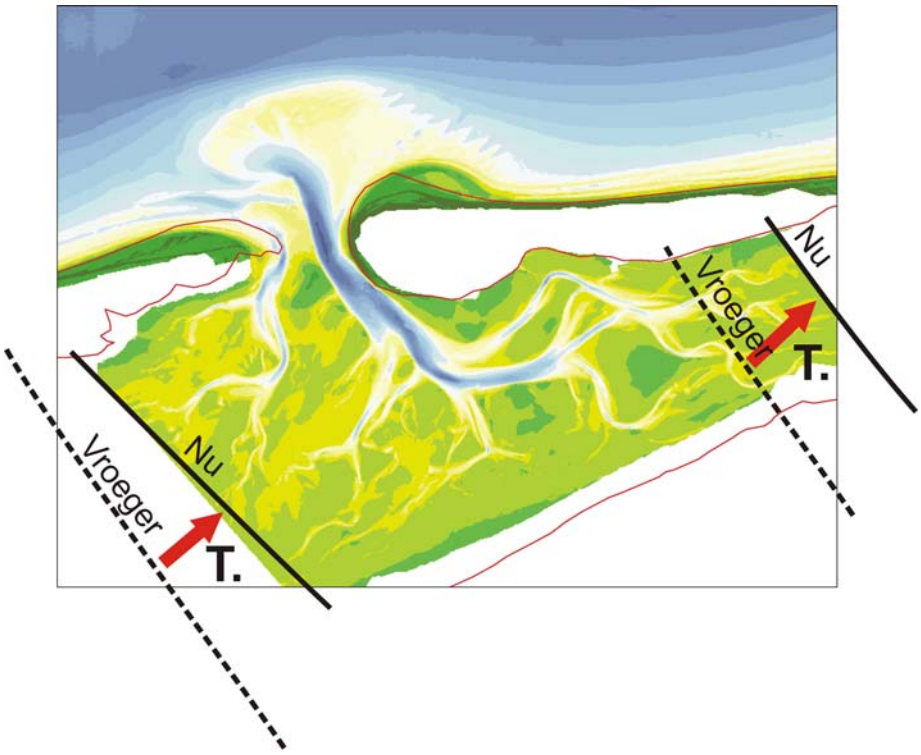
4.3 De ruimteschalen bij de onderzoeksvragen én de beheervragen

Morfologische tijdschalen zijn gekoppeld aan morfologische ruimteschalen: hoe langer de ontwikkelingen duren, des te groter het gebied dat beschouwd dient te worden. De vier onderzoeksvragen hebben elk een eigen ruimteschaal, van het hele gebied van eilandkusten, buitendelta en getijdebekken, via de buitendelta, naar de zandplaat, tot aan de getijdegeul op de zandplaat (figuur 4.2). Nu blijkt dat, via de koppeling van beheervraag met onderzoeksvragen, dat voor het beantwoorden van de verschillende beheervragen steeds andere ruimteschalen bekeken moeten worden.

Opmerkelijk is dat de drie beheervragen weliswaar een vergelijkbare ruimteschaal hebben, maar de onderliggende onderzoeksvragen niet. De problemen spelen in gebieden van enkele kilometers tot honderden meters, maar de schaal waarop gekeken moet worden speelt van honderden vierkante kilometers tot enkele vierkante kilometers. Voor de eerste beheervraag de ontwikkeling van het gehele getijdebekken en de buitendelta, met de kust van Terschelling en Ameland geanalyseerd worden, terwijl voor de laatste beheervraag een blik op de zandplaat volstaat. Bij de vraag naar een koppeling is tussen de verheling van zandplaten met de noordwestkust en de ontwikkeling van geulen en platen op de buitendelta (paragraaf 3.2) is wijde omgeving van de buitendelta de ruimtelijke schaal. De ruimteschaal van onderliggende problematiek is dus niet noodzakelijk gekoppeld aan de grootte van het probleem.

Figuur 5.1
Schematische weergave van de morfologische ontwikkelingen op de lange termijn (eeuwen) van zeegat, buitendelta, eilandkusten en getijdebekken.
Boven: Rotatie (**R.**) van de as van het getijdebekken tegen richting van de wijzers van de klok in.
Beneden: Oostwaartse verplaatsing (Translatie **T.)** van de wantijen en het getijdebekken van het Zeegat van Ameland.





5 Lange termijn (eeuwen) ontwikkelingen op grote schaal (zeegat, buitendelta, eilandkusten en getijdebekken)

In dit hoofdstuk wordt een beschrijving gegeven van de morfologische ontwikkeling, gevolgd door een verklaring voor de morfologische ontwikkelingen, waarop een onderbouwing van de verklaring volgt. Dit stramien wordt ook in de volgende drie hoofdstukken gehanteerd, waarbij per hoofdstuk op steeds kortere tijd- en kleinere ruimteschaal wordt gekeken. Op deze wijze komen de vier tijd- en ruimteschalen van de onderzoeksvragen aan de orde. De verklaringen zijn in feite onderzoekshypothesen en in de paragraaf 'onderbouwing' wordt gerapporteerd hoe de verschillende KUST2000 en KUST2005 activiteiten deze ondersteunen.

5.1 Inleiding

De westkust van Ameland is tot de tweede helft van de 20e eeuw steeds verder geërodeerd. De erosie van de westkust is vanaf 1947 tot stilstaan gebracht door verschillende harde kustverdedigingsmaatregelen en het uitvoeren van strandsuppleties. Aan deze erosie is de onderzoeksvraag 'Hoe verhoudt de verplaatsing van Borndiep met de lange termijn ontwikkelingen van enkele eeuwen, van kust, buitendelta en getijdebekken ?' verbonden.

5.2 Beschrijving van de lange termijn ontwikkeling van de westkust van Ameland.

De erosie van de westkust is gerelateerd aan de oostwaartse verplaatsing van de getijdegeul Borndiep en de sterke oostwaartse verplaatsing van het Borndiep is tenminste sinds de tweede helft van de 19e eeuw aan de gang (Beckering Vinkers, 1947). De lange termijn erosie van de westkust van Ameland gaat samen op met twee fenomenen in het zeegat en op de buitendelta (figuur 5.1):

Verplaatsing van de keel van het zeegat naar het oosten
Het Borndiep vormt het zwaartepunt van de keel van het Zeegat van Ameland en dit ligt tegenwoordig verder naar het oosten dan enkele eeuwen geleden.

Lange termijn (gemiddeld over morfologische cyclus) rotatie van het Borndiep
De keel van het zeegat, die de verbinding vormt tussen buitendelta en getijdebekken heeft een draaiing ondergaan, tegen de wijzers van de klok in. De rotatie is met name ten koste gegaan van de westpunt van Ameland.Het getijdebekken van het Zeegat van Ameland ligt tegenwoordig verder naar het oosten dan de buitendelta van het zeegat. Het draaipunt van deze beweging ongeveer van het diepste gedeelte, ruwweg op het smalste punt tussen Terschelling en Ameland.

In een aantal studies die zijn uitgevoerd sinds de jaren '30 zijn de grootschalige ontwikkelingen van het gehele gebied, van getijdebekken tot en met buitendelta beschreven en geanalyseerd, op basis van historische kaarten, lodingen en geologische studies (Beckering Vinkers, 1947, Elorche, 1983, De Boer, e.a., 1991a en 1991b, Rakhorst e.a., 1993, Huijs, 1993).

5.3 Verklaringen voor de lange termijn ontwikkeling

Verplaatsing zwaartepunt getijdebekken naar het oosten
Niet alleen de keel van het zeegat is verplaatst, het gehele getijdebekken, dat wil zeggen het gebied tussen de wantijen ten zuiden van Terschelling en Ameland, ligt meer naar het oosten dan vroeger. Het zwaartepunt van het

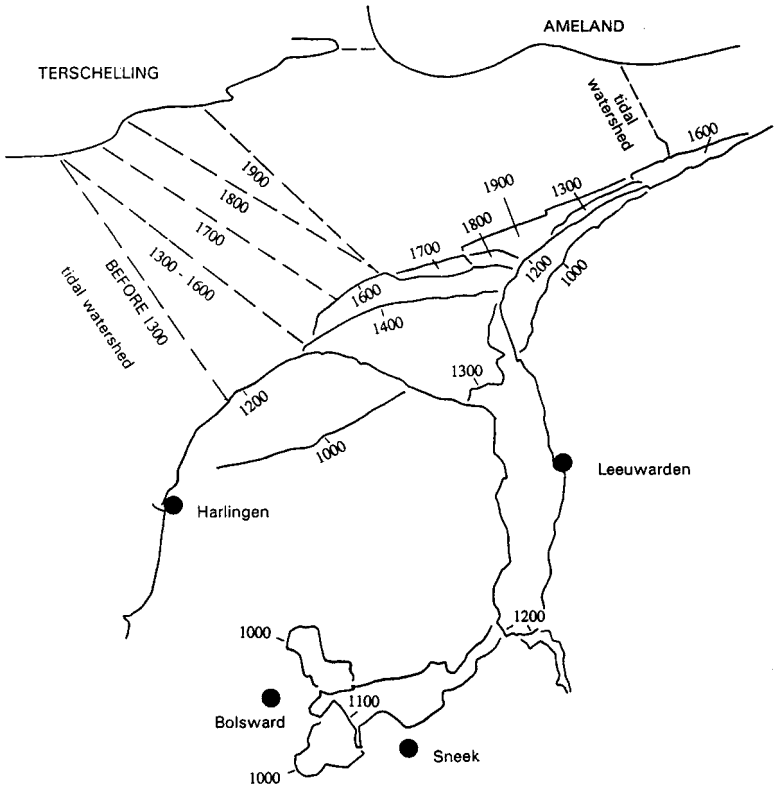
getijdebekken is daardoor ten opzichte van de keel van het Zeegat van Ameland naar het oosten verplaatst. Het Borndiep volgt de ontwikkeling in het getijdebekken en dit resulteert in de verplaatsing naar het oosten. Omdat sprake is van 'volgen' van zeegat en buitendelta is ook sprake van rotatie van het zeegat in de richting van het zwaartepunt van het getijdebekken.

Verbinden en vastleggen Boschplaat met Terschelling ("verkleining winterbed van het Zeegat van Ameland")
In de 19e eeuw is de duinenrij naar de oostpunt van Terschelling (de Boschplaat) gesloten met een stuifdijk. 'Kortsluiten' van de Noordzee en de Waddenzee over de oostpunt onder extreme omstandigheden (springtij en stormen) was daarmee uitgesloten. Sindsdien móet al het water door het Zeegat van Ameland. Het Borndiep is hierdoor in grootte, dat wil zeggen in doorsnede, toegenomen.

5.4 Onderbouwing van de verklaringen

De verklaringen én de onderbouwing voor de lange termijn ontwikkelingen van het Zeegat van Ameland zijn gebaseerd op analyses van historische en geologische informatie. De geologische informatie is met name ontleend aan het werk van Van der Spek (1994), waarvan een speciaal op de ontwikkelingen van het Borndiep toegesneden rapport is gemaakt (De ontwikkeling van het Amelander Zeegat vanuit geologische perspectief, Van der Spek, 1999). De invloed van de menselijk ingrepen op Oost-Terschelling werd reeds verondersteld door Gerritsen (1952), hiervoor zijn geen aanvullende analyses uitgevoerd.

Figuur 5.2
Opvulling van de Middelzee. De verschuiving van de wantijen laat de verlegging van het zwaartepunt van het kombergingsgebied van het Zeegat van Ameland zien (uit Van der Spek, 1994).



Geologische en historische analyse laat verschuiving bekkenzwaartepunt zien
De westelijke begrenzing van het getijdebekken, het wantij ten zuiden van Terschelling, ligt tegenwoordig enkele kilometers meer naar het oosten dan aan het eind van de Middeleeuwen (Van der Spek, 1994). De oostelijke begrenzing wordt gevormd door het wantij ten zuiden van Ameland. Vanaf 1830 is het wantij ten zuiden van Ameland enkele kilometers naar het oosten verplaatst (De Boer, 1991a, Oost en de Haas, 1993, Van der Spek, 1994).

Vrijheid voor wantij verplaatsing bij huidige bekkenconfiguratie
Het Zeegat van Ameland was in de middeleeuwen verbonden met de toenmalige Middelzee, die het middeleeuwse Friesland opsplitste in de Westergo en Oostergo (figuur 5.2). De Middelzee was een langgerekt getijdebekken, dat zich tot diep in Friesland uitstrekte. Vanaf de 11^{e} eeuw zijn, vanaf de landzijde van het bekken, delen van het bekken opgeslibd en bedijkt. De vorm van het bekken veranderde door de opslibbing en bedijking van een langgerekte zeearm in het huidige 'korte' en brede bekken (figuur 5.2). Totdat de huidige vorm van het bekken bereikt werd, was het Borndiep verbonden met een langgerekte zeearm. Het zwaartepunt van het getijdebekken lag hiermee vast, zodat de verplaatsing van het zeegat slechts beperkt mogelijk was. Deze situatie duurde tot de 16^{e} eeuw. Met de verandering van het bekken van relatief lang en smal naar kort en breed werd verplaatsing van het wantij en zeegat mogelijk.

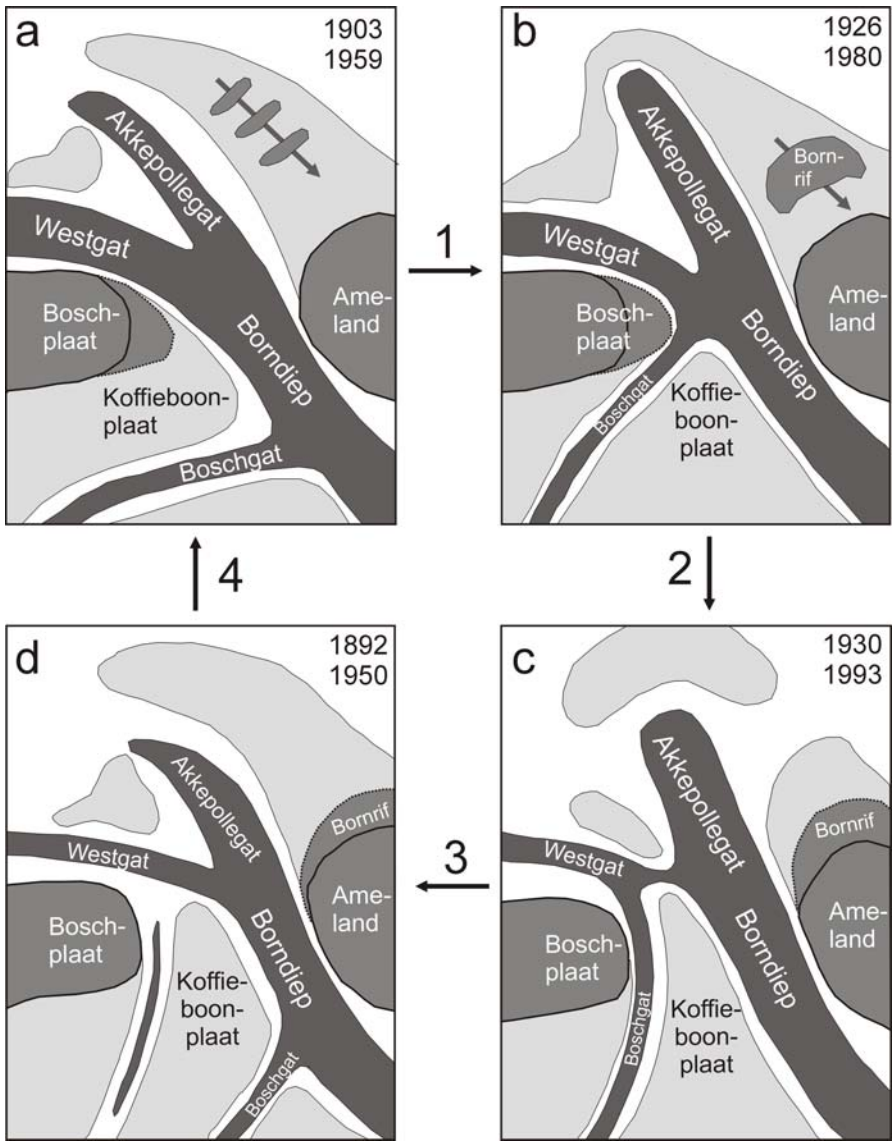
Hydrodynamische verklaringen voor oostwaartse verplaatsing wantijen

In de huidige situatie, met een relatief kort en breed bekken, kan er een doorgaande verplaatsing van zeegat en getijdebekken naar het oosten plaatsvinden. Het mechanisme voor de verplaatsing van het wantij is waarschijnlijk het getij- en windgedreven (rest)transport over het wantij. Ten zuiden van Ameland hebben uitgebreide metingen plaatsgevonden van de waterbeweging over en nabij het wantij, onder verschillende omstandigheden, van 1968 tot 1973 (een overzicht wordt gepresenteerd in de Boer e.a., 1991). Deze metingen zijn destijds uitgevoerd om de mogelijkheid van een vaste oeververbinding te onderzoeken. Zelfs onder rustige omstandigheden is er sprake van resttransport naar het oosten (circa $5 \bullet 10^{6}$ m^{3}) en lokaal hoge stroomsnelheden. Onder stormomstandigheden kunnen zowel het transport over het wantij, als de optredende stroomsnelheden snel oplopen. Overigens kan ook de aanleg van de Afsluitdijk, waardoor de hydrodynamica van de westelijke Waddenzee ingrijpend veranderde, de wantijen een 'duwtje' naar het oosten hebben gegeven.

5.5 Wandelende wantijen en veranderde aanstroming

Met 'aanstroming' wordt in dit geval bedoeld de wijze waarop het hoogwater uit het getijdebekken over de buitendelta stroomt in de richting van de Noordzee. De 'traagheid' ('inertia') van de eb bepaalt deels de oriëntatie van de (eb-)geul op de buitendelta. Bij het Zeegat van Ameland is de aanstroming veranderd , omdat het zwaartepunt van het getijdebekken naar het oosten is verplaatst. Het Zeegat van Ameland is niet het enige bekken van de Waddenzee waarbij het wantij in beweging is en de aanstroming vanuit het bekken is veranderd. De aanleg van de Afsluitdijk (1932) heeft geleid tot grote verandering in de ligging van het wantij van het Zeegat van Texel en het Vlie (Rakhorst, 2003). In de periode na afsluiting is bij het Zeegat van Texel het zwaartepunt van de aanstroming veranderd, waarbij de nadruk is komen te liggen op de aanstroming uit het noordoosten in plaats van het oosten. Deze verandering heeft in de keel van het zeegat en op de buitendelta geleid tot het bijdraaien van de hoofdgeulen, in het verlengde van de hoofdstroom (Elias en Cleveringa, 2003). Voor de lange termijn ontwikkeling van getijdebekkens en buitendelta's zijn deze effecten belangrijk, omdat ze permanent zijn.

Figuur 6.1
Morfologische cyclus van het Zeegat van Ameland (Israel, 1998): In plaatje I wijst het Akkepollegat in noordwestelijke richting en komt zand los van een voormalig ebschild. In plaatje II is dit zand gemigreerd in ZO richting en landt als strandplaat aan op noordwest Ameland. In plaatje III is ten gevolge van de cyclische ontwikkeling het Akkepollegat in het verlengde komen te liggen van het Borndiep. Aan het eind vormt zich een nieuw ebschild. Deze werkt als een drempel en de ebstroming schuurt nieuwe geulen aan weerskanten ervan uit. In het vierde plaatje heeft het Borndiep zich weer verlegd in noordwestelijke richting en wordt het ebschild losgelaten (eventueel met een tijdelijke onderbreking doordat een deel van het ebschild wordt vastgehouden door een rest van het oorspronkelijke Akkepollegat). Vervolgens begint de cyclus weer opnieuw (plaatje I).



6 Middellange termijn (50 tot 60 jaar) ontwikkelingen op de buitendelta

6.1 Inleiding

In en rond het Zeegat van Ameland vinden verplaatsen de geulen en platen. Een belangrijk deel van deze veranderingen herhaalt zich in een cyclus van 50 tot 60 jaar. Deze periode is terug te vinden in het kustgedrag van noordwest Ameland, waar korte periodes van razendsnelle uitbouw worden gevolgd door lange periodes van kustachteruitgang. Deze in het oog springende fluctuatie is het gevolg van het verhelen van grote zandplaten van de buitendelta met de noordwestkust. In dit hoofdstuk wordt gezocht naar verklaringen voor de grootschalige veranderingen op de buitendelta en de consequenties daarvan voor het kustgedrag.

6.2 Beschrijving van de 50 tot 60-jarige morfologische cyclus

De morfologische cyclus van het Zeegat van Ameland wordt gekarakteriseerd door 4 stadia, waarbij het zeegat van één-geul naar een twee-geulen systeem ontwikkelt en weer terug (figuur 6.1). De cyclus lijkt, op basis van waarnemingen van 1798 tot heden, een periode van 50 tot 60 jaar te beslaan. De vier stadia worden hieronder beschreven, waarbij opgemerkt moet worden dat er wel degelijk verschillen zijn tussen de situatie tijdens de eerste cyclus (1903-1959) en de tweede cyclus (1959-20??). De verschillen komen in de studie van Israël (1998) aan de orde.

Stadium I: Één-geul situatie (1903 &1959)

In dit stadium wordt het zeegat gekenmerkt door één getijdegeul, het Borndiep, die tussen de oostpunt van Terschelling en de westpunt van Ameland loopt. Het Borndiep heeft een noordoost-zuidwest oriëntatie en loopt vloeiend door in het Westgat, met een west-noordwest ligging en het Akkepollegat, met een zuidwest ligging. Het Boschgat ligt ver naar het zuiden onder Terschelling en mondt uit in het Borndiep. De Boschplaat strekt zich naar het oosten en ligt vast aan de Koffiebonenplaat. Bij Ameland vormt het Bornrif, de ondiepte op het noordoostelijke deel van de buitendelta een groot aaneengesloten complex tot aan de kust van Ameland.

Stadium II: Kruispunt van geulen (1926 &1980)

In dit stadium ligt er tussen de oostpunt van Terschelling en de westpunt van een Ameland een soort kruispunt van geulen. Het Boschgat mondt nu bij de oostpunt van Terschelling in het Borndiep uit, net ten zuiden van de vertakking tussen Westgat en Akkepollegat. De geulas van het Borndiep is iets meer naar het noord-noordwesten gericht. Het Westgat loopt niet meer vloeiend over in het Borndiep, terwijl de overgang van Borndiep naar Akkepollegat juist vloeiender verloopt. In de uitloop van het Akkepollegat naar de Noordzee vindt een verondieping plaats, zodat de Kofmansbult (tussen Westgat en Akkepollegat) verbonden wordt met het Bornrif. In de periode rond 1926 vindt ook de aanlanding van de zandplaat van het Bornrif tegen de noordwestkust van Ameland plaats.

Stadium III: Twee-geulen situatie (1934 & 1993)

Het zeegat wordt in dit stadium gekenmerkt door twee getijdegeulen die tussen de eilandpunten liggen,namelijk het Boschgat-Westgat en het Borndiep-Akkepollegat. De twee getijdegeulen worden van elkaar gescheiden door de Koffiebonenplaat, die een duidelijke uitloper naar het noorden heeft. Het Westgat is in grootte afgenomen ten opzichte van stadium II. Door de ligging van het Boschgat naar het noorden, is de Boschplaat in omvang afgenomen. In

het verlengde van het Akkepollegat ontstaat een steeds grotere ondiepte (met name in 1993), waarbij de monding van het Akkepollegat divergeert en er uitstroomopeningen naar het westen en het oosten ontstaan. De aanlanding rond 1986, van de zandplaat van het Bornrif tegen de kust van Ameland vindt in dit stadium van de cyclus plaats.

Stadium IV: Terug naar één geul (1992 & 1950)

Tussen de eilandkoppen ligt weer één geul, met een restant van het Boschgat. Het Boschgat zelf heeft een veel zuidelijker positie onder Terschelling en mondt uit in het Borndiep. De Koffiebonenplaat is weer min of meer met de Boschplaat verbonden. Op de buitendelta is het Akkepollegat de belangrijkste geul en de uitstroomopening is meer naar het westen gericht. De ondiepte voor de monding van het Akkepollegat is in omvang afgenomen. Tussen het Bornrif en de zandplaat op Ameland bevindt zich een ondiepe geul (een dergelijke geul heette vroeger, in 1866, logischerwijs Oostgat).

De meeste dynamiek zit dus in de positie van het Boschgat, de oriëntatie van het Akkepollegat en de grootte van het Westgat. Tegelijk met het draaien van het Akkepollegat van westnoordwest naar noordnoordwest, bouwt de buitendelta zeewaarts uit en verondiept. Uiteindelijk leidt dit proces tot het aanlanden aan de grote zandplaten op de noordwestkop van Ameland.

6.3 Verklaring voor ontwikkelingen op middellange termijn: Mechanismen in de morfologische cyclus

De cyclische ontwikkelingen van het Zeegat van Ameland met een periode van 50 tot 60 jaar worden gestuurd door de complexe interactie van morfologie, golven en getij. In verschillende studies zijn uitgebreide en gedetailleerde veronderstellingen gepresenteerd over de onderliggende mechanismen van de overgangen binnen de morfologische cyclus. De geïnteresseerde lezer kan hiervoor terecht in Israël (1998), Israël en Dunsbergen (1999) en Hartsuiker e.a.(1999) In het voorliggende rapport worden verklaringen op hoofdlijnen gepresenteerd.

Geulen binnen, golven buiten.

De geuldynamica stuurt de morfologische ontwikkelingen in het getijdebekken in de keel van het zeegat. De golfwerking en de resulterende zandtransporten zijn bepalend voor de ontwikkelingen op de buitendelta en rond het Bornrif.

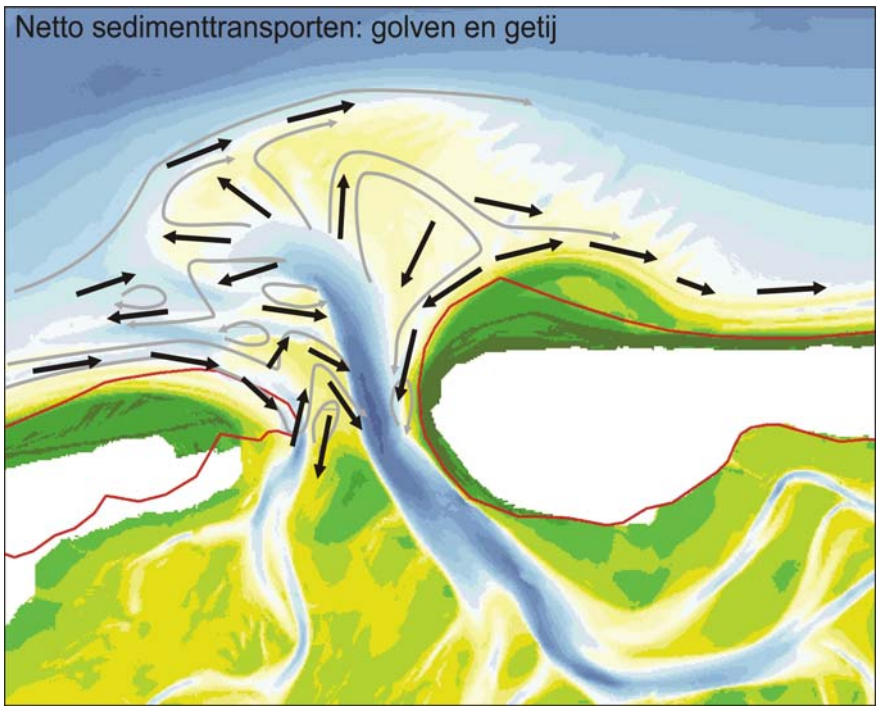
De oriëntatie van de geulen en het getij

In de verschillende stadia van de morfologische cyclus hebben de geulen steeds een andere voorkeursrichting. Geulen zullen zoveel mogelijk optimaal georiënteerd zijn ten opzichte van het motorische vermogen, oftewel het verhang geïntegreerd over het getij (Van Veen, 1936). Daarbij geldt dat, naarmate het debiet van geulen groter is, de rol van het motorische vermogen afneemt, omdat 'de traagheid van het water' een steeds belangrijker rol gaat spelen. Verder spelen de faseverschillen in het getij tussen de geulen en belangrijke rol: wanneer de faseverschillen tussen geulen gedurende het getij groot zijn, zal vroeg of laat een kortsluitgeul ontstaan.

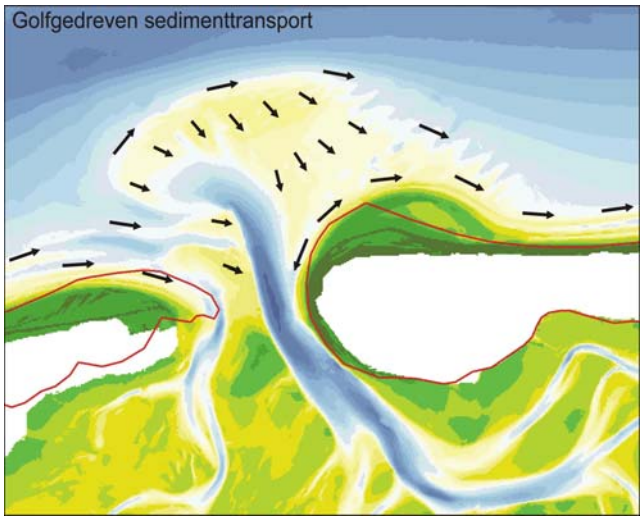
Bruto zandtransportpaden via geulen en platen, netto sedimenttransport langs het zeegat

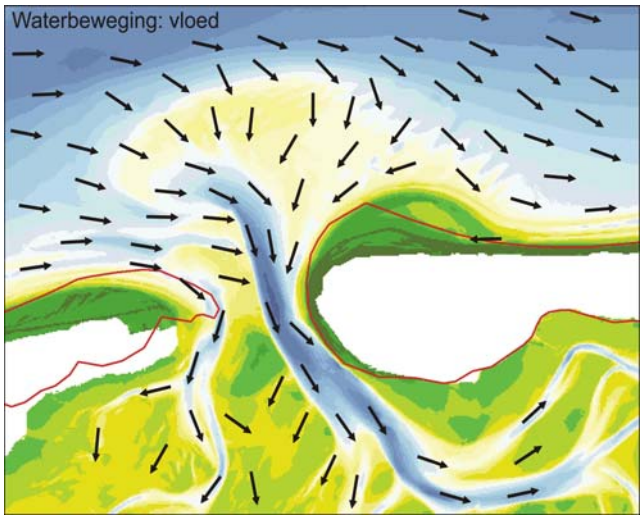
Gedurende de morfologische cyclus legt het zand een complex pad af over de buitendelta (figuur 6.2), onder invloed van de getijde- en golfwerking (figuur 6.3). De erosie en sedimentatie, die het gevolg is van gradiënten in het zandtransport, resulteert in morfologische veranderingen. De opeenvolgende stadia van de morfologische cyclus resulteren in een netto zandtransport (gemiddeld over de cyclus) langs het zeegat van Terschelling naar Ameland. Het zand bereikt de kust van Ameland in pulsen, in de vormen van zandplaten, die van het Bornrif verhelen met de kust.

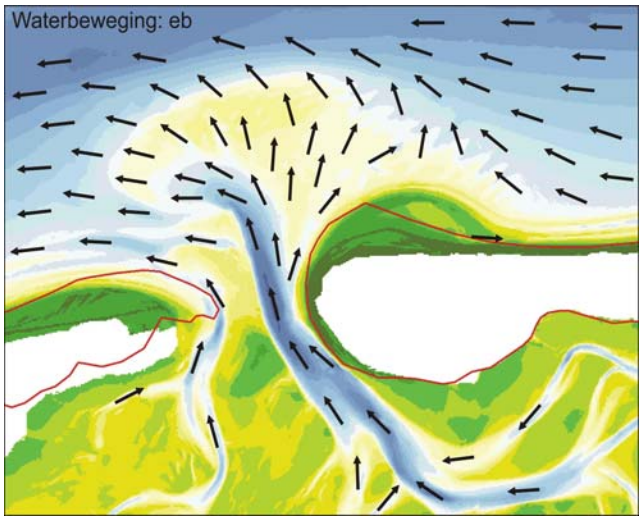
Figuur 6.2
Netto sedimenttransportrichtingen in het Zeegat van Ameland (naar Roelvink en Steijn, 1999), over een periode van enkele jaren (bovenste figuur, bodem 1999), met een indicatie van de grootte van de transporten (grootte van de pijlen). De grijze pijlen geven de complexe patronen weer waarin het sediment wordt getransporteerd over de buitendelta.
Opvallende elementen zijn de doorgaande transporten naar het oosten langs de kust en de buitendelta en de complexe patronen rond de overgang tussen Westgat-Boschgat en het Borndiep- Akkepollegat.



Figuur 6.3
Golfgedreven sedimenttransport en de waterbeweging onder gemiddelde eb en vloed condities. Het netto sedimenttransport (figuur 6.2) over de jaren is het resultaat van golf- en getijgedreven sedimenttransport onder verschillende meteorologische omstandigheden en getijcondities (naar Roelvink en Steijn, 1999 en Hartsuiker e.a, 1999).

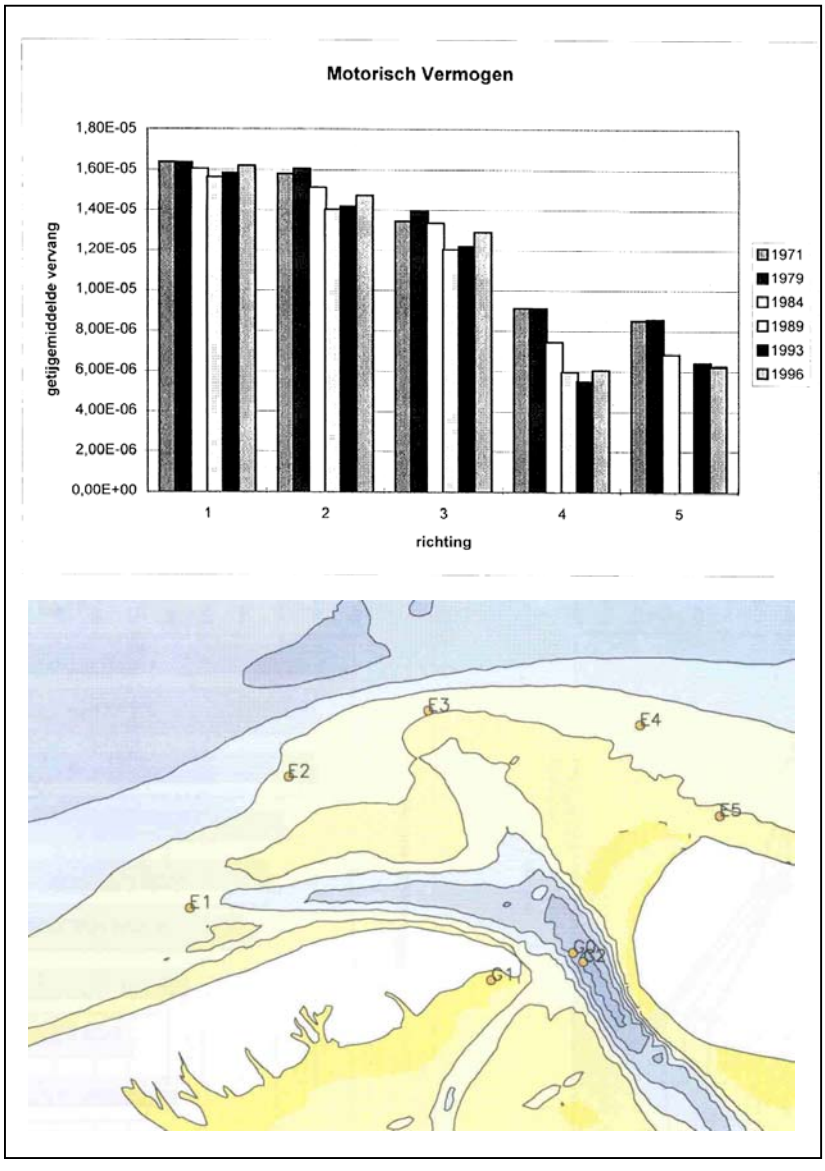






6.4 Onderbouwing van de verklaringen

Morfologische ontwikkelingen zijn het gevolg van de optelsom van verschillende processen, waarbij het gevolg van de ene verandering de oorzaak voor de andere is (o.a. de Vriend, 1991). De causale verbanden lossnijden en onafhankelijk van elkaar analyseren is beperkt mogelijk met numerieke modelstudies waarin systematisch factoren worden uitgeschakeld. Het belang van de uitgeschakelde factor voor de morfologische ontwikkelingen wordt duidelijke door het vergelijken van de ontwikkelingen met alle factoren 'aan'. In het rapport 'Morfologische ontwikkelingen van het zeegat van Ameland: toetsing van hypothesen' (Hartsuiker e.a., 1999) is de rol van het debiet en motorisch vermogen onder de loep genomen. In deze studie is niet gekeken naar de invloed van golven. In aanvulling op deze studie is in 'Morfodynamische berekeningen van het zeegat van Ameland' (Roelvink en Steijn, 1999), 'Bar morphology Bornrif; modelling the evolution from 1982-1987' (Wilkes, 1999) en 'ELS' (Steijn, 1999) wél gekeken naar de rol van golven op de morfologische cyclus.



Figuur 6.4
Analyse van het motorisch vermogen (waterstandsverhang over het getij) tussen verschillende stations op de buitendelta van het Zeegat van Ameland.
Boven: Het motorisch vermogen van west naar oost over de buitendelta, tussen de stations E1 tot en met E5 op de buitendelta en G0 in de keel van het zeegat (Alles uit Hartsuiker e.a., 1999).
Onder: De positie van de 8 verschillende stations, weergegeven op de bodemligging van 1979.

Getij:

Het toetsen van de veronderstellingen over de rol van de waterbeweging in de morfologische cyclus vereist veel simultane waarnemingen op verschillende locaties en tijdstippen. Dit soort waarnemingen zijn nooit uitgevoerd, vanwege verschillende praktische complicaties (complexe organisatie, hoge kosten, moeilijk of onmogelijken meten tijdens ruige omstandigehden). Op basis van bestaande debiet- en stroomgegegevens uit raaien in combinatie met modelberekeningen kan toch een betrouwbare schatting worden gemaakt van de waterbewegingen onder verschillende omstandigheden in het gehele zeegat In het rapport "Morfologische ontwikkelingen in het Zeegat van Ameland: toetsing van hypothesen" van Hartsuiker e.a. (1999) worden uitgebreide berekeningen gepresenteerd van de hydrodynamica van het Zeegat van Ameland. De aanpak die wordt gevolgd is uniek: voor 6 verschillende jaren van 1971 tot 1996 is een modelbodem gemaakt, die elk een kenmerkend deel van de cyclische ontwikkeling van het Zeegat (Israël, 1998) vertegenwoordigen. De hydrodynamische verschillen tussen de morfologische stadia worden op deze manier zichtbaar. De hydrodynamische modellering is dus gebruikt om synoptische stromings- en waterstandinformatie te genereren.

De dwingende rol van het motorische vermogen

Uit de studie van Hartsuiker e.a. (1999) wordt duidelijk dat zowel het ontstaan van het Bochgat, ten zuiden van de oostpunt van Terschelling, als de migratie van het Boschgat naar het noordwesten toe te schrijven is aan het motorische vermogen. Een nieuw Boschgat ontstaat, daar waar het motorische vermogen maximaal is en migreert daarna naar het noordwesten onder invloed van het motorisch vermogen. Het motorisch vermogen is minimaal wanneer het Akkepollegat noord-zuid is gericht en zou bij verder draaien naar het oosten te klein worden.
De geul die vanuit het Akkepollegat naar oosten is gericht, het 'Oostgat' tussen Bornrif en de noordwestkust van Ameland, ligt zeer ongunstig wat betreft het motorische vermogen. De analyses laten zien dat het motorisch vermogen naar het noordoosten veel kleiner is dan naar het westen en zelfs noorden (figuur 6.4). De ongunstige ligging zou een van de redenen kunnen zijn voor het verzanden van de geul gedurende de morfologische cyclus. De golfgedreven zandaanvoer vanaf het Bornrif speelt daarbij overigens ook een rol. De vraag waarom de uitstroomopeningen naar het oosten eigenlijk ontstaan is minstens zo interessant: er is weinig motorisch vermogen in die richting en veel golfgedreven laterale zandtoevoer.

De ontwikkeling van debieten

De toe- of afname van geulomvang tijdens de morfologische cyclus wordt ook verondersteld afhankelijk te zijn van veranderingen in de debieten van de geulen. Het sturende mechanisme achter deze veranderingen is het verhang. Bij toename van het verhang zullen de stroomsnelheden toenemen en dit resulteert uiteindelijk in een grotere geul. Voor het onderbouwen zijn in de eerste plaats de debietmetingen gebruikt (zie voor een recent overzicht Briek e.a., 2003), aangevuld uitkomsten van de modelsimulaties van de waterbeweging (Hartsuiker e.a. (1999). De berekeningen laten zien dat het Akkepollegat een toenemende ebdominantie heeft. Door toename van de ebdominantie van het Akkepollegat in de periode 1971-1993 wordt de ligging van de geul minder afhankelijk van de richting van het maximale motorische vermogen. Hierdoor gaat het Akkepollegat meer in het verlengde van het Borndiep liggen.

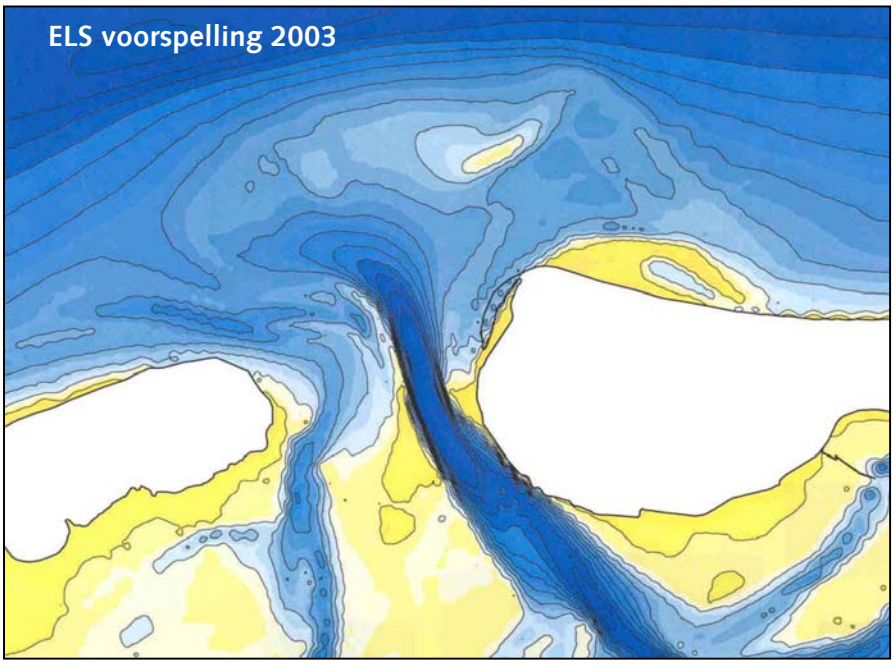
Fase verschillen gedurende het getij

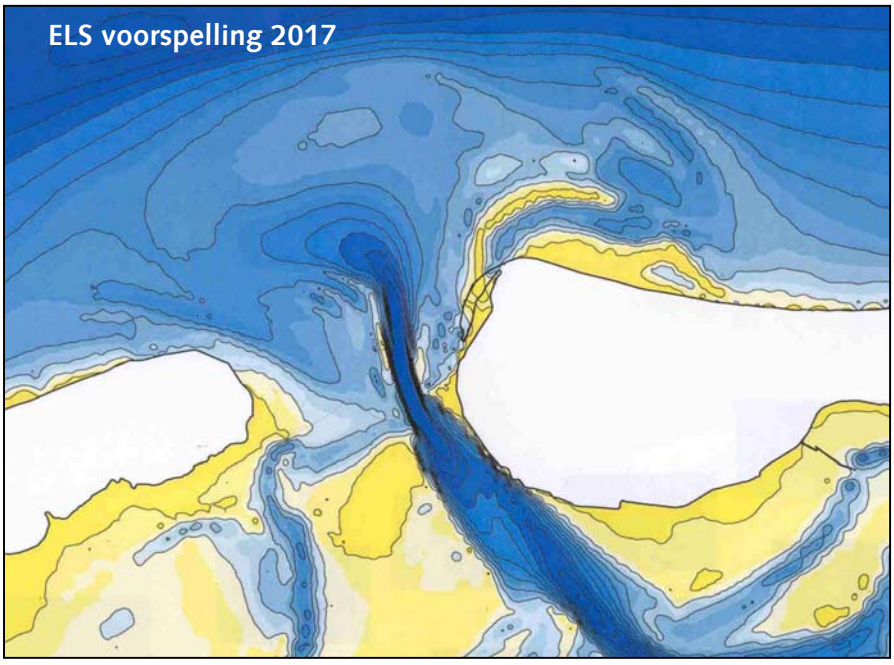
De kortsluitgeul tussen het Akkepollegat-Borndiep en Westgat-Boschgat is georiënteerd in de richting van het maximale motorische vermogen (naar het westen, figuur 6.4). Door de toename van het faseverschil tussen de geulen zal na het ontstaan van een verbinding, bijvoorbeeld nadat tijdens een storm een

kleine geul is ontstaan, deze zeker stroom gaan trekken en in omvang toenemen.

Zonder golven geen cyclus

Het belang van golven en golfgedreven sedimenttransporten voor de morfologische ontwikkelingen is onderschreven in verschillende studies met morfodynamische simulaties (Roelvink en Steijn, 1999, Steijn, 1999 en Wilkes, 1999). Uit de initiële berekeningen wordt duidelijk dat tijdens de conditie met golven veel meer sedimenttransport plaatsvindt dan tijdens de condities zonder golven, waarbij alleen het getij sediment transporteert. Verder blijkt uit de analyse van het golfklimaat, ten bate van de golfschematisatie voor de morfodynamische simulaties dat rustige condities zonder invloed maar weinig optreden (in de golf-schematisatie is dat 22% van de tijd), terwijl gedurende de rest van de tijd golfwerking een rol speelt (west: 14%; noordwest: 43%; noordoost: 21%). Met andere woorden: de golfwerking is essentieel voor de morfologische cyclus.





Figuur 6.5:
Simulaties over een zeer lange periode met Delft 3D MOR, met een initiële bodem uit 1989. De voorspelling voor 2003 en 2017 zijn weergegeven. Voor deze simulaties is gebruik gemaakt van één golfconditie en is de tijd 'geschaald'.

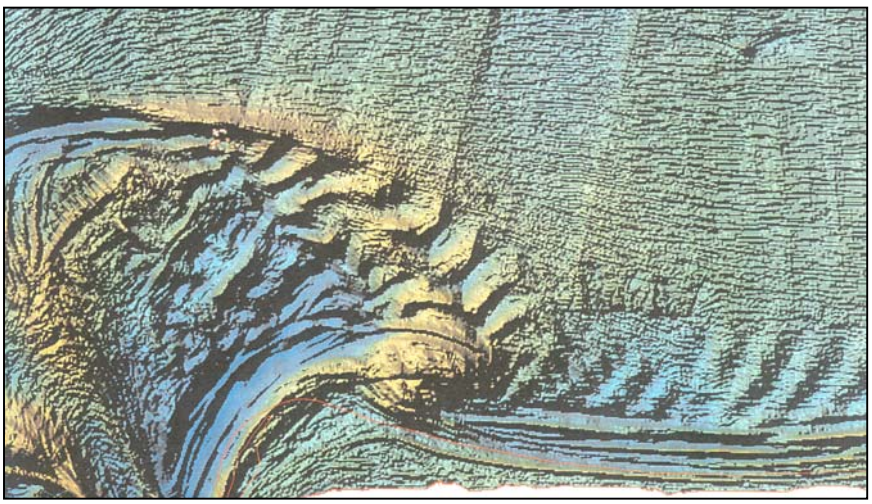
De meest nadrukkelijk invloed van de golfwerking op het sedimenttransport is zichtbaar in de ontwikkeling van de zandplaat op de buitendelta en de ontwikkeling van de aangehechte zandplaat (figuur, 6.5; hierover meer in het volgende hoofdstuk). Deze ontwikkelingen maken als het ware ruimte voor de opbouw van een nieuwe zandplaat op de buitendelta en daarmee voor de volgende cyclus van geulen en platen op de buitendelta.

Tijdelijke zandbronnen en lange termijn zandtransport

Het vaststellen van zandtransporten, bruto en netto is een complexe onderneming, waaraan naast modelberekeningen expert judgement te pas komt. Uit de morfologische modelsimulaties komen bruto en netto zandtransporten, die mede bepaald worden door de sedimenttransportformule de schematisatie van het golfklimaat en de schematisatie van getij en waterstanden. In de studie van Roelvink en Steijn (1999) is bijvoorbeeld de invloed van de verschillende transportformules op de zandtransporten en morfologische ontwikkelingen onderzocht, die zeer groot blijkt zijn. Het gezonde verstand van de specialist is nodig om de eigenaardigheden in en verschillen tussen de gesimuleerde zandtransporten op waarde te schatten en eventueel bij te stellen.

Het zandtransport in figuur is 6.2 is een netto zandtransport over een langere periode (ruwweg één jaar). Het netto transport is een optelsom van bruto transport heen en weer onder invloed van het getij, en van transporten onder invloed van de variërende wind en golven. Het is belangrijk om in de gaten te houden dat het beeld van de zandtransporten gekoppeld is aan de morfologie. Bij een andere ligging van geulen en platen vertonen de zandtransporten een ander patroon. Het plaatje van de netto zandtransporten in 2004 zal beduidend anders zijn dan figuur 6.2, omdat de bodemligging gaandeweg is veranderd. De netto zandtransporten bepalen de morfologische cyclus van het zeegat.

Door Gordeau (1999) is onderzocht wat effect en de bijdrage van zaagtandbanken (figuur 6.6) op het sedimenttransport op de buitendelta langs de buitendelta is. De zaagtandbanken zijn opvallende en kenmerkende bodemvormen die bij het Zeegat van Ameland met name aan de oostzijde op de vooroever van de buitendelta aangetroffen worden. In de loop van de onderzochte periode (1989-1996) verandert het patroon van voorkomen en de vorm van de zaagtandbanken. de zaagtandbanken verplaatsen oostwaarts. Het blijkt echter niet mogelijk om vast te stellen of de verplaatsende zaagtandbaken resulteren in sedimenttransport en ook niet wat het effect van de aanwezigheid van de banken op andere transport processen, door de beïnvloeding van de bodemruwheid is.



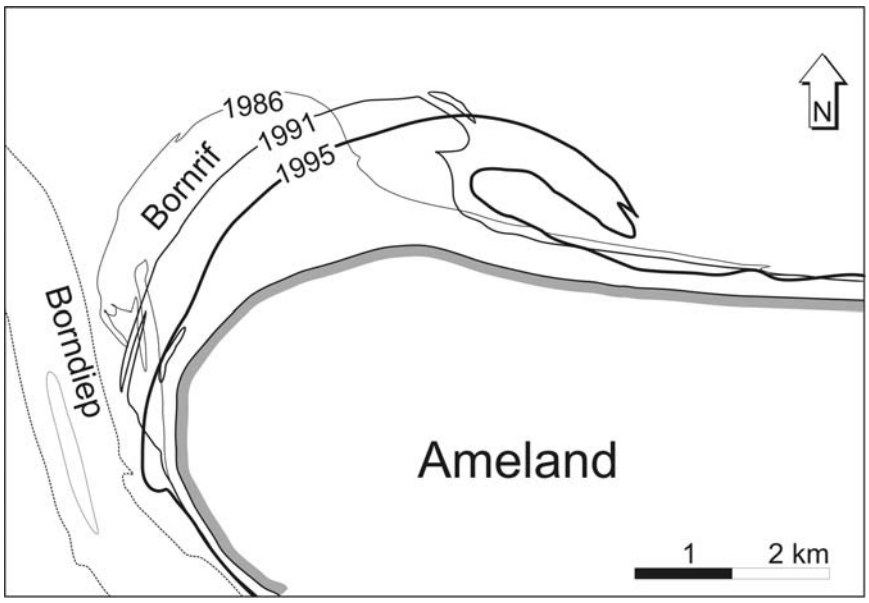
Figuur 6.6:
Verschilkaart van de bodemligging in 1989 en 1993 van de noordwestkust van Ameland, weergegeven met schaduwwerking voor het ruimtelijke effect. Linksonder is het Borndiep nog zichtbaar, met daarboven het Bornrif. De zaagtandbanken, of eigenlijk de verplaatsing van de zaagtandbaken tussen 1989 en 1993 is zichtbaar in langs de buitenrand van het Bornrif en voor de kust van Ameland.

In tegenstelling tot de complexe korte termijn netto zandtransporten over een periode van jaren geeft het lange termijn netto zandtransport een eenvoudig beeld, namelijk langs het zeegat naar het oosten. Het lange termijn zandtransport wordt voor een belangrijk deel bepaald door de grootschalige morfologische veranderingen in de ligging van platen en geulen. Tijdens de morfologische cyclus is de aanlanding van het Bornrif en de daaropvolgende deformatie en afbraak van de strandhaak de meest in het oogspringende getuige van het netto transport. De modelstudie van Cheung (2001) laat zien dat het doorgaande zandtransport langs het zeegat wordt gemoduleerd door de morfologische cyclus.

Complexe interactie en toeval

Verondersteld wordt dat de wederzijdse beïnvloeding van verschillende mechanismen bepalend is voor de morfologische ontwikkelingen. Deze veronderstelling wordt ondersteund door de observatie dat de verschillende mechanismen op zichzelf niet voldoende zijn om de opgetreden morfologische veranderingen te verklaren. Hierboven wordt al ingegaan op de essentiële rol van golven voor de cyclus. Blijkbaar is het de combinatie van verschillende mechanismen die bepalend is voor de ontwikkelingen.
Het toeval speelt overigens ook een rol in de morfologische cyclus. Een voorbeeld hiervan is het ontstaan van een kortsluitgeul tussen het Akkepollegat-Borndiep en Westgat-Boschgat. Wanneer een verbinding ontstaat, dan zal de deze groeien, door het faseverschil tussen de geulen. Onder normale omstandigheden neemt de zandrug die de geulen scheidt in omvang toe en ontstaat geen verbinding . Dat gebeurd pas onder afwijkende omstandigheden, zoals tijdens een storm. Het is wel te voorspellen dat deze verbinding ooit zal ontstaan, maar niet wanneer dat precies zal gebeuren.

Figuur 7.1
Schematische ontwikkeling van de zandplaat



7 Korte termijn (5 tot 25 jaar) vormverandering van de zandplaat

7.1 De ontwikkeling en aanlanding van het Bornrif

Het meest spectaculaire onderdeel van de morfologisch cyclus van het Zeegat van Ameland is de aanlanding van grote zandplaten aan de noordwestkust. De aanlanding levert in één klap een zeewaartse sprong op van de kustlijn. In de jaren daarna wordt het zand van de zandplaat langs de kust verdeeld, waardoor bij de oorspronkelijke zandplaat de kustlijn terug schrijdt, terwijl in de omgeving uitbouw plaatsvindt. De morfologische cyclus van het zeegat leidt daardoor tot grote en langdurige schommelingen in de kustlijnligging, zoals onder andere wordt gememoreerd in de Tweede Kustnota (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1996). Over periodes van 50 jaar of meer is de kustligging stabiel of zelfs licht uitbouwend. Vanwege het belang voor het kustbeheer wordt apart stilgestaan bij de veronderstelde mechanismen achter de aanlanding en de ontwikkeling van de zandplaat.

7.2 Beschrijving van de ontwikkeling van de verheelde zandplaat

De zandplaat 'Bornrif', die omstreeks 1986 aan de noordwestkop van Ameland is aangehecht en sindsdien ontwikkeld is tot een strandhaak is het meest recente voorbeeld in de Nederlandse Waddenzee (ook uitgebreid beschreven in Weij, 1998). In het rapport van Israël en Oost (2001) worden naast de zandplaat op de noordwestkust van Ameland ook vergelijkbare recente en historische aanlandingen van zandplaten beschreven.
De met het eiland verheelde zandplaat wordt ook wel strandhaak genoemd ('recurved sandy spit', of schoorwal). De strandhaak op Ameland is gevormd nadat een grote zandplaat aan het eiland is aangehecht, begin jaren '80. Rond 1990 verheelt de westelijke rand van de zandplaat met de kust van Ameland en ontwikkelde zich een 'echte' strandhaak. De oostelijke punt van de strandhaak bouwt in de periode daarop snel uit naar het zuidoosten, in de richting van de kust. Gedurende deze fase is het zand voor de uitbouw afkomstig van de noordwestelijke rand van de strandhaak, die verplaatst in de richting van de kust. Zand van de noordwestelijke rand is ook naar de westkust van Ameland getransporteerd en draagt gedurende deze fase bij aan de vooruitgang van de kust. De vorm van de strandhaak is veranderd van een halve cirkel halverwege de jaren '90, in een veel vlakkere vorm nu, door afbraak van het meest zeewaartse deel en uitbouw naar het oosten (figuur 7.1). Verdere uitbouw naar het zuiden wordt verhinderd door de aanwezigheid van het Borndiep vlak onder de westkust van Ameland.

De westkust – ten zuiden van de zandplaat

Het gebied ten zuiden van de zandplaat ondervindt direct de gevolgen van de lange termijn oostwaartse verschuiving van het Borndiep (zie Hoofdstuk 5) en op lange termijn is sprake van doorgaande erosie in dit gebied. Gedurende een korte periode, vanaf begin jaren '90, bouwt de aangelande zandplaat uit naar het zuiden, waardoor er tijdelijke geen of minder achteruitgang optreedt. Het stadium waarin de westkust profiteert van de zandplaat is momenteel weer voorbij. Alleen de zuidwestkust vertoont nog steeds een uitbouwende trend, gevoed door zand dat deels van de zandplaat afkomstig is en deels van de zandsuppleties die op de westkust zijn uitgevoerd.

De noordwestkust – bij de zandplaat

Door de aanlanding van de zandplaat heeft een zeer grote uitbouw van de kust plaatsgevonden. Na aanlanding wordt de zandplaat door de golfwerking als het ware 'uitgesmeerd' langs de kust: Het zand wordt geërodeerd van het

meest zeewaartse deel, getransporteerd langs de kust en dan afgezet. De achteruitgang levert geen bedreiging op voor de kustveiligheid, omdat de afstand tussen duinvoet en laagwaterlijn nog steeds groot is.

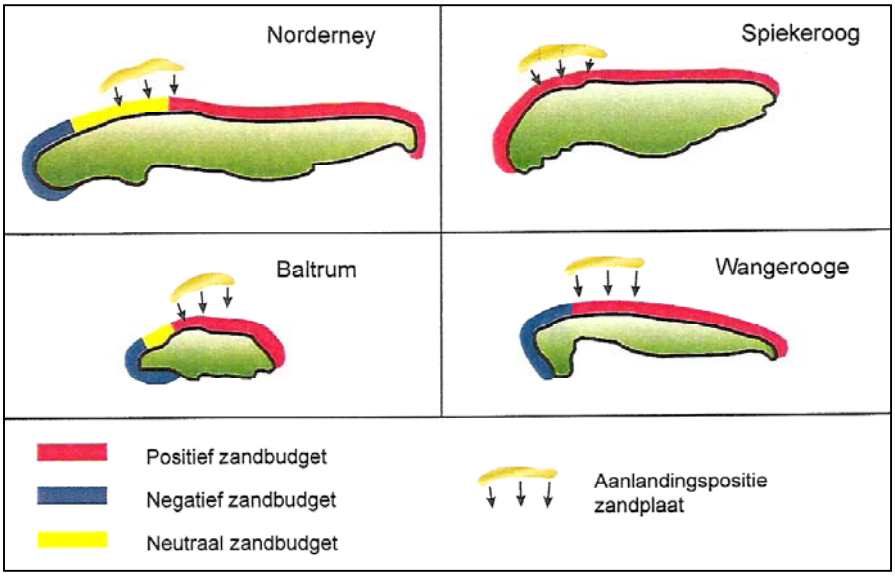
De noordkust – ten oosten van de zandplaat

Het gebied ten oosten van de zandplaat profiteert van het zand dat van de aangelande zandplaat wordt aangevoerd. Het effect naar het oosten is veel groter dan het effect naar het zuiden, de aanhechting van de zandplaat met de kust is ettelijke kilometers naar het oosten opgeschoven. Overigens vindt ten oosten van de aanhechting kusterosie plaats, dit gebied profiteert dus niet direct van het zand dat van de zandplaat wordt aangevoerd. Deze lijzijde erosie ten oosten van de zandplaat is niet nader onderzocht.

7.3 Verklaringen zandplaatverheling en strandhaakontwikkeling

Zandplaatverheling

De verheling van de zandplaat met de noordwestkust van Ameland is onderdeel van de morfologische cyclus, die zeegat en buitendelta in 50 tot 60 jaar doormaken. Zandplaatverheling als onderdeel van de morfologische cyclus is geen exclusief onderdeel van het Zeegat van Ameland, ook bij de andere Waddeneilanden treedt dit op. In het rapport 'Strandhaak ontwikkeling op de koppen van de Waddeneilanden' wordt door Israël en Oost (2001) een overzicht gepresenteerd van de ontwikkeling van zandplaten tot strandhaken op de koppen van Waddeneilanden.

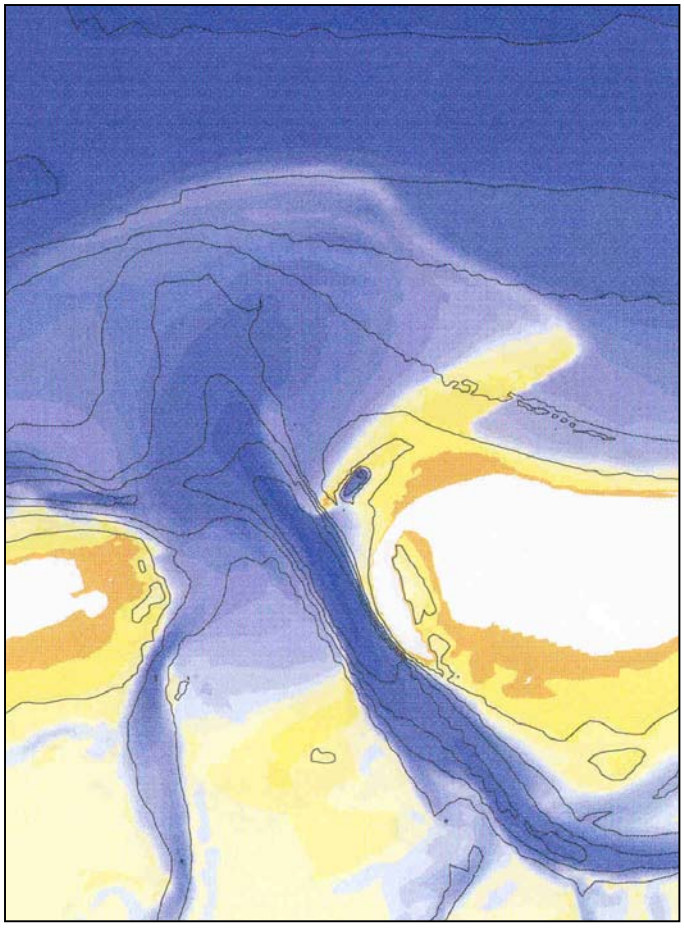


Figuur 7.2:
Conceptueel model voor de verheling van zandplaten met de kust (naar Fitsgerald, 1984, uit Israel en Oost, 2001).

Ook elders in de wereld treedt het proces van verheling op en door Israël en Oost (2001) wordt het conceptuele model van Fitzgerald e.a. (1984) gebruikt (figuur 7.2). Dit model is gebaseerd op vergelijkbare ontwikkelingen bij de Duitse waddeneilanden en aan de Amerikaanse oostkust. Op alle buitendelta's van zeegaten ontwikkelen zandplaten en wanneer sprake is van een duidelijk zandtransport langs de kust en buitendelta in één richting zullen de zandplaten zich aan de benedenstroomse zijde (t.o.v. de netto sedimenttransportrichting) ontwikkelen. In dergelijke gevallen verplaatsen, onder invloed van de golfwerking 'swashbars' zich naar de kust, om samen te komen in een 'bar complex'. Met name wanneer er sprake is van een getijdegeul tussen 'bar complex' en eilandkust, kan de zandplaat onder kust uiteindelijke zeer groot worden. Wanneer de geul tussen 'bar complex' en de kust in belang afneemt kan de zandplaat de kust bereiken.

Strandhaakontwikkeling

De verheelde zandplaat wordt door golfwerking opgebouwd - dwarstransport - en verdeeld langs de kust – langstransport-. Vrijwel altijd wordt er dan een strandhaak gevormd, dat wil zeggen een zandbank die met een zijde aan de kust is gehecht en die, onder normale condities, boven hoogwater uitsteekt. Landwaarts van de strandhaak wordt dan een klein getijdebekken gevormd. Na de aanlanding van de zandplaat op Ameland in 1926 is waarschijnlijk geen strandhaak gevormd en dit wordt verklaard door de andere oriëntatie van de kust ten opzichte van dominante golfrichting (Israël, 1998). Alternatieve verklaringen zijn de iets andere vorm en hoogte van de zandplaat ten tijde van aanlanding, waardoor de golfwerking op de zandplaat een ander effect had, of een combinatie van deze factoren.
De snelle vormverandering en afbraak van de verheelde zandplaat is het resultaat van golfgedreven zandtransporten langs de kust. Een belangrijke verklaring voor de snelle veranderingen is het optreden van een splitsingspunt in het golfgedreven langstransport. Het splitsingspunt is een divergentiepunt in het langstransport: een locatie waar alleen sediment verdwijnt en niks bijkomt. Onder invloed van de reflectie en diffractie van de golfaanval over geulen en platen op de buitendelta is het golfgedreven sedimenttransport aan de westzijde van de verheelde zandplaat naar het zuiden gericht, het zeegat in, terwijl het golfgedreven transport in het noordelijke en oostelijke deel naar het oosten, naar de Noordzeekust van Ameland is gericht. Onder invloed van de richting van golfaanval verschuift het splitsingspunt langs de noordwestkust, met als netto resultaat dat dit gehele gebied aan sterke erosie onderhevig is. Naast het golfgedreven zandtransport langs de kust speelt de getijdenstroming voor de kust een rol in het afvoeren van sediment uit het gebied. Naarmate de afbraak van de zandplaat verder gaat ontstaat voor de kust een getijdegeultje ('Oostgat' naar analogie met eerdere geulen op deze locatie), waardoor zand wordt getransporteerd door de getijdestroming.



Figuur 7.3:
Simulaties over van de morfologische ontwikkeling van de zandplaat Bornrif onder invloed van golfwerking (Wilkes, 1999).

7.4 Onderbouwing van de verklaringen

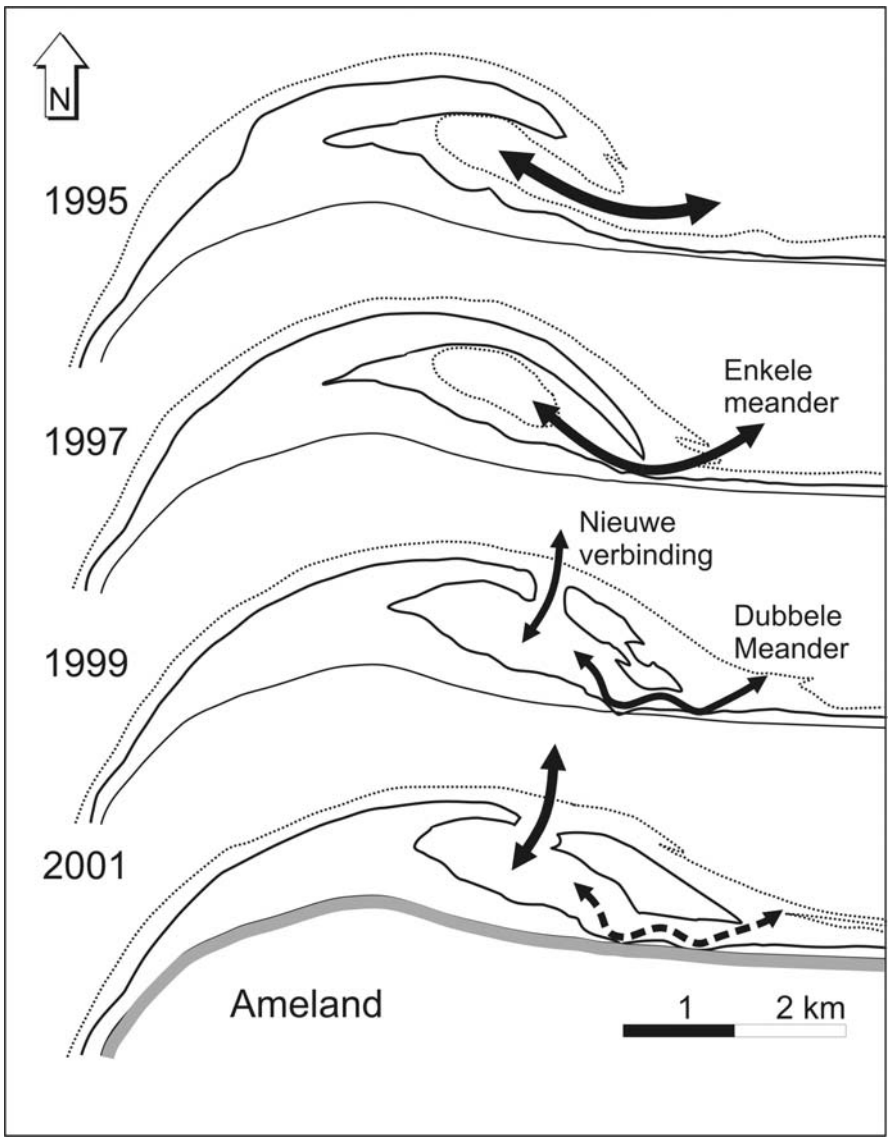
Zandplaatverheling

De zandplaatverheling is onderdeel van de morfologische cyclus van de geulen en platen op de gehele buitendelta van het zeegat van Ameland. In het voorgaande hoofdstuk is stilgestaan bij de verklaringen voor de cyclus. Voor de verklaring en onderbouwing van de cyclus wordt daarom terugverwezen naar paragrafen 6.3 en 6.4. In deze paragraaf wordt de ontwikkeling van de zandplaat onderbouwd.

Strandhaakontwikkeling

De ontwikkeling van de strandhaak is goed te voorspellen op basis van de ervaring uit de jaren '20 op Ameland en ervaringen op andere Waddeneilanden. De onderbouwing van de verklaring van de ontwikkeling van de strandhaak is afkomstig van verschillende numerieke modelstudies van de ontwikkeling op Ameland. Ook modelsimulaties van de kust van zuidwest van Texel (Steijn en Jeuken, 2000) onderbouwen het bestaan van een splitsingspunt in het golfgedreven langstransport in een vergelijkbare 'eilandkop' situatie en het effect daarvan op de morfologische ontwikkelingen.
Door Wilkes (1999) is een studie uitgevoerd naar de morfologische ontwikkelingen van de zandplaat in de periode van 1982 tot 1987, met behulp van het numerieke model Delft 3D. In deze studie is specifiek gekeken naar het effect van golven op de ontwikkeling van de zandhaak, waarbij de nadruk specifiek lag op de analyse en niet op voorspellingen.
In de studie zijn korte termijn (20 dagen) en langere termijn (5 jaar) simulaties uitgevoerd, waarbij de eerste dienen om het belang van verschillende variabelen vast te stellen (golfrichting, -hoogte, windgedreven waterstandsverhoging, dwarstransport, golfasymmetrie, hellingseffecten, korrelgrootte en bodemruwheid) en de tweede om de morfologische gevolgen te bepalen. Op grond van de resultaten van de korte termijn simulaties is al vast te stellen dat er zonder golven niets gebeurt met de morfologie van de verheelde zandplaat. Wind uit het westen tot noordwesten leidt tot oostwaartse uitbouw van de zandplaat. De simulaties met één golfconditie over de lange periode van 5 jaar leveren extreem overdreven morfologische ontwikkelingen op. Gezien de onrealistische forcering liggen deze ontwikkelingen in de lijn der verwachting ligt (figuur 7.3).
De simulatie met het geschematiseerde natuurlijke golfklimaat laat resultaten zien die overeen komen met de geobserveerde morfologische veranderingen van de zandplaat. De simulaties laten zien dat de snelle erosie van de verheelde zandplaat inderdaad het gevolg is van de aanwezigheid van een 'splitsingspunt' in het langstransport.
Door Roelvink en Steijn (1999) is onderzoek uitgevoerd naar de morfologische ontwikkelingen van de gehele buitendelta en kust, waarvan ook de aangehechte zandplaat deel uit maakt. De resultaten van deze studie onderschrijven het doorslaggevende belang van het golfgedreven langstransport voor de ontwikkeling van de verheelde zandplaat.
Het belang van de getijdestroming in het geultje voor de zandplaat op de morfologische ontwikkeling kan niet aangetoond worden met de uitgevoerde modelstudies.

Figuur 8.1
Schematische ontwikkeling getijdegeul en oostpunt strandhaak in de periode van 1995 tot 2001. De pijlen geven de richting aan waarin het getijdebekken achter de strandhaak gevuld en geleegd werd.



8 Zeer korte termijn (1 tot 5 jaar) dynamiek van de geul op de zandplaat

8.1 Inleiding

Eind jaren '90 kwam Ameland in het nieuws omdat een getijdegeul de duinvoet bedreigde, toevallig precies waar een strandtent stond. Verrassend was dat deze ontwikkeling plaatsvond in een kustgedeelte dat door natuurlijke morfologische ontwikkelingen juist een enorme hoeveelheid zand had ontvangen. Op het eerste gezicht is dit een paradox: Rijkswaterstaat houdt mede vanwege de veiligheid de hoeveelheid zand van Nederland voor de kust op peil en toch is op deze zandrijke locatie het duinen bedreigd. Nadere morfologische analyse wees uit dat het een schijnbare tegenstelling was: weliswaar is op de korte termijn van enkele jaren lokaal de duinvoet bedreigd, maar op een termijn van jaren is de veiligheid van een veel groter gebied toegenomen. Overigens is de bedreiging van de duinvoet nauwlettend in de gaten gehouden en zijn enkele maatregelen uitgevoerd om strand toegankelijk te houden.
Een beschrijving van de morfologische ontwikkeling en de daarbij ontstane problemen kan gevonden worden in het rapport 'Strandhaakontwikkeling op de koppen van de Waddeneilanden' (Israël en Oost, 2001). In dit rapport wordt ook ingegaan op vergelijkbare historische ontwikkelingen op andere Waddeneilanden.

8.2 Beschrijving van de ontwikkeling van de getijdegeul op het strand van Ameland

In het vorige hoofdstuk is een beschrijving gepresenteerd van de ontwikkeling van de gehele zandplaat, in dit hoofdstuk wordt geconcentreerd op een deel van de zandplaat in de periode 1990-2003 (figuur 8.1). In het begin van de jaren '90 is de rand van de zandplaat verheeld met de westkust van Ameland, zodat een strandhaak ('recurved spit') is ontstaan. De zeewaartse rand van de zandhaak was enigszins verhoogd ten opzichte van het achterliggende gebied, net zoals een brekerbank op het strand hoger ligt dan het achterliggende zwin. Door de verhoogde rand was het achterliggende gebied, landwaarts begrensd door de duinvoet, een kom geworden. Deze kom had een opening naar het oosten, langs het strand, waar het oostelijke uiteinde van de strandhaak naar de kust neigde. Deze kom fungeerde in feite als een mini-Waddenzee, die tijdens vloed gevuld werd en tijdens eb weer leegliep, via de opening in het oosten.

Onder invloed van de steeds naar het oosten uitbouwende strandhaak ontwikkelde de in- en uitstroomopening tot een echte getijdegeul. De geul was lang niet zo groot als de geulen in het zeegat, maar wel meer dan mansdiep en tegen de honderd meter breed. Deze geul is gaan meanderen, waarbij de uitbouwende strandhaak mogelijk een rol heeft gespeeld. Vanaf 1997 is de geul, onder invloed van de uitbouw van de strandhaak naar het oosten steeds meer verlengd en er hebben zich meerdere meanders ontwikkeld. De geulbochten hebben zich op tenminste twee plaatsen naar de kust verplaatst, bijna tot aan de duinvoet. In 1999 is de tot dan toe ononderbroken strandhaak, aan de noordzijde doorsneden door een nieuwe kleine getijdegeul. Deze getijdegeul draineert sindsdien de westelijke helft van de getijdekom. De hoeveelheid water die door de oorspronkelijke getijdegeul werd aan- en afgevoerd nam hierna af. In de jaren daarop is de oorspronkelijke getijdegeul grotendeels dicht geslibd en is de dynamiek gestopt. Ook de kom achter de strandhaak is voor een belangrijk deel opgevuld met sediment.

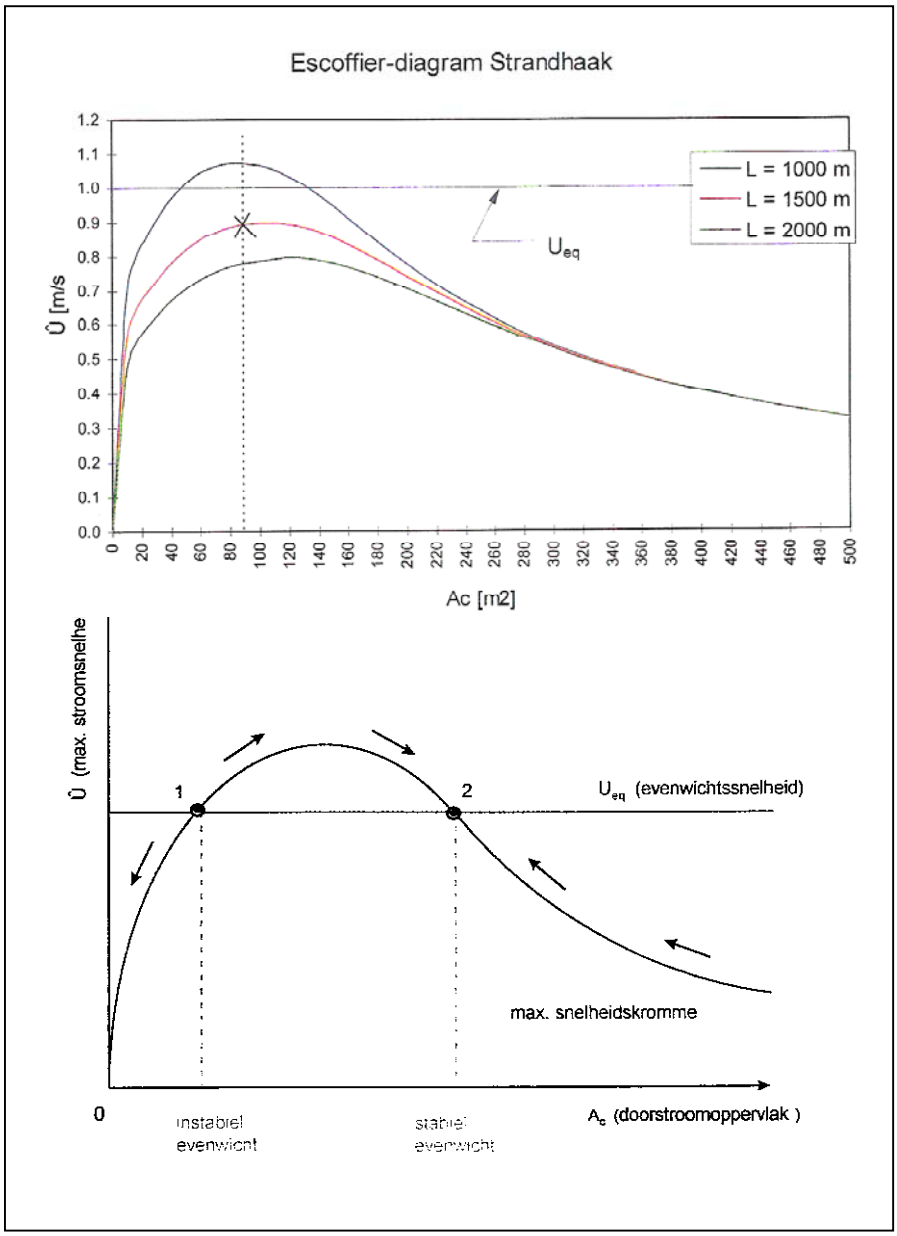
8.3 Verklaring van de geulontwikkeling

De ontwikkeling van de getijdegeul en van de strandhaak gaan hand in hand. De strandhaak is van vorm veranderd, met name door golfgedreven langstransporten (zie hiervoor het voorgaande hoofdstuk). Voor de ontwikkeling van de getijdegeul is de uitbouw naar het oosten en in de richting van de kust belangrijk. In eerste instantie was het effect van deze uitbouw dat de verbinding tussen de vloedkom achter de strandhaak en de Noordzee van breed naar smal is veranderd. Tot 1996 was tussen het oostelijke uiteinde van de strandhaak en het strand nog een zeer brede verbinding en geen duidelijke geul. Met het naderen van het oostelijke uiteinde naar het strand werd de verbinding smaller en vormde een duidelijke geul.
De golfgedreven zandtransporten langs de strandhaak naar het oosten bleven doorgaan en het zand werd afgezet ten oosten van de oorspronkelijke strandhaak, in de ´oksel´ van de verbinding tussen strandhaak en strand. Dit resulteerde in de uitbreiding van de strandhaak naar het oosten, die op haar beurt weer leidde tot een verlenging van de getijdegeul. Door de lengtetoename van de getijdegeul werd de aan- en afvoer van water door deze geul naar de getijdekom steeds minder efficiënt. Toen een andere geul dwars door de strandhaak naar de getijdekom is ontstaan, waarschijnlijk tijdens een storm, werd deze geul de meest efficiënte aan- en afvoerroute voor het getijdewater. Deze geul nam de rol van de oorspronkelijke geul grotendeels over, zodat in de oorspronkelijke geul de stroomsnelheden sterk afnamen en zand en slib afgezet werd.
Het ontstaan en de ontwikkeling van de meanders is waarschijnlijk (voor een deel) geforceerd door de uitbouwende strandhaak. De punt van de strandhaak, die landwaarts groeide onder invloed van het golfgedreven zandtransport, heeft de geul als het ware in de richting van de kust 'geduwd'. Overigens meanderen getijdegeulen ook zonder een dergelijke forcering.
In vergelijking met geulen in de Waddenzee is de uitbochting van deze geul gering.. De beperkte uitbochting van de getijdegeul achter de strandhaak wordt toegeschreven aan het hoge strand en de duinvoet waarin de geul zich insnijdt. Omdat bij de insnijding relatief veel zand ter plaatste in de geul terechtkomt beperkt dit verder uitbochten (Israël en Oost, 2001).

8.4 Onderbouwing van de verklaringen

De stabiliteit van de getijdegeul is bekeken met een Escoffier-analyse (Boutkan, 2000 en Israël en Oost, 2001). De geul blijkt bij grote lengtes niet meer te voldoen aan de criteria voor een stabiele geul (figuur 8.2). Al in 1998 is de situatie bereikt waarbij de geul zich niet meer in stand kan houden. Ter ondersteuning van de analyse, waarin onder andere de stroomsnelheid gebruikt wordt, is in 1999 een meting uitgevoerd van de stroomsnelheden in de getijdegeul. De resultaten van de stroommetingen komen overeen met de waarden die volgen uit de Escoffier-analyse.
De veronderstelling dat de meanderontwikkeling is geforceerd door de ontwikkeling van het oostelijke uiteinde van de strandhaak is gebaseerd op luchtfoto's. In de luchtfoto's is duidelijk zichtbaar dat de bochten naar de kust samenvallen met de aanlandingspunten van de strandhaak.

Figuur 8.2
Escoffier plot voor stabiliteit van de getijdegeul op de strandhaak (boven) en demonstratie van de twee evenwichtssituaties bij getijdegeulen (onder, beide uit Israel en Oost, 2001).
De stroomsnelheid in de geul is een functie van de lengte van de geul, naarmate de geul langer wordt neemt de snelheid af. De snelheid wordt bij een geullengte tussen 1000 en 1500 m. te laag om evenwicht te bereiken. Bij lengtes boven de 1000 m. lange snelheid zal de geul verzanden.



9 Hypothesen voor het kustbeheer: de oorzaak aanpakken ?

In de voorgaande vier hoofdstukken zijn de morfologische ontwikkelingen en de onderliggende mechanismen op vier tijd- en ruimte schalen weergegeven. In deze hoofdstukken worden de vragen over het hoe en waarom van de morfologische ontwikkelingen (Hoofdstuk 3) beantwoord. Maar de vragen van de kustbeheerder zijn hiermee nog niet beantwoord.
Om de kustbeheerder antwoorden te geven moet vanuit de oorzaken van de morfologische verandering doorgedacht worden naar oplossingen. Dat gebeurd in twee stappen: eerst worden hypothesen[1] geformuleerd over de werking van beheeringrepen, die aangrijpen op de oorzaak van de morfologische ontwikkeling. daarna wordt de praktische bruikbaarheid van de oplossingen getoetst en alternatieve oplossingen voorgesteld.

9.1 Beheerhypothesen voor het aanpakken van de oorzaken van de problemen

Hypothesen voor de lange termijn (eeuwen) en grote schaal (zeegat, buitendelta, eilandkusten en getijdebekken)

Het gehele getijdebekken ligt verder naar het oosten dan vroeger, omdat de wantijen ten zuiden van Terschelling en Ameland verder naar het oosten liggen. Het zwaartepunt van het getijdebekken is daardoor ten opzichte van de keel van het Zeegat van Ameland naar het oosten verplaatst. Uit deze observatie volgt de hypothese:
Beheerhypothese 1 De "druk op de westkust" neemt af indien de wantijen onder Terschelling en Ameland niet verder oostwaarts verplaatsen.

In de 19e eeuw is de duinenrij naar de oostpunt van Terschelling gesloten met een stuifdijk. 'Kortsluiten' van het watertransport over de oostpunt onder extreme omstandigheden (springtij en stormen) was daarmee uitgesloten. Sindsdien móet al het water door het Zeegat van Ameland. Hiervoor is de uitdrukking "verkleining winterbed van het Zeegat van Ameland" gebruikt (Gerritsen, 1952). Dit leidt tot de volgende hypothese:
Beheerhypothese 2 De "druk op de westkust" neemt af indien kortsluiten van het watertransport over de oostpunt van Terschelling weer kan plaatsvinden.

Hypothesen voor de middellange termijn (50 tot 60 jaar) en middelgrote schaal (buitendelta)

De cyclische ontwikkelingen op de buitendelta resulteren in periodes van uitbouw van de noordwestkust van Ameland, gevolgd door kustachteruitgang. De gehele cyclus heeft een duur van 50 tot 60 jaar. Beheeringrepen in het kustsysteem zijn noodzakelijk bij te sterke achteruitgang. Bij het verzinnen van ingrepen is het verstandig om rekening te houden met de toekomstige positieve ontwikkelingen, die een natuurlijk gevolg zijn van de cyclische ontwikkelingen op de buitendelta.
Beheerhypothese 3 Beheeringrepen voor de noordwestkust van Ameland hoeven alleen de periodes van kustachteruitgang te overbruggen en kunnen dus een beperkte levensduur (orde 5- 25 jaar) hebben.

De morfologische cyclus ontstaat als gevolg van de complexe interactie van getijde- en golfgedreven sedimenttransporten en de morfologie. Idealiter wordt, ten bate van de kustlijnzorg, zo ingegrepen dat deze processen voor ons

[1] Voor alle duidelijkheid deze hypothesen zijn dus geen onderzoekshypothesen in de wetenschappelijke zin van het woord, maar 'beheerhypothesen'.

werken in plaats van tegen ons. Bij het Zeegat van Ameland zou dat betekenen dat de periodes van aanzanding versneld en verlengd worden en de periodes van erosie vertraagd en verkort worden.
Beheerhypothese 4 De ontwikkeling van het ´Oostgat´ onder de kust van noordwest Ameland stoppen beperkt de erosie door de geul en vergroot de aanvoer van zand, waardoor de kustachteruitgang omgebogen kan worden naar uitbouw.

Hypothesen voor de korte termijn (5 tot 25 jaar) en kleine schaal (zandplaat)

De verheelde zandplaat aan de noordwestkust verandert onder invloed van het golfgedreven brandingstransport, waarbij de aanwezigheid van het splitsingspunt in het golfgedreven brandingstransport een belangrijke rol speelt. Het getijdetransport speelt mogelijk ook een rol in de afbraak van de verheelde zandplaat.
Beheerhypothese 5 Wegnemen van het splitsingspunt in het brandingstransport stopt de afbraak van de zandplaat.

Hypothesen voor de zeer korte termijn (1 tot 5 jaar) en detail schaal (geul op zandplaat)

De getijdegeul achter de strandhaak, die zeer lokale erosieproblemen heeft veroorzaakt, wordt van nature steeds langer. Door het langer worden van de getijdegeul neemt de efficiency van de geul af. De meandering stopt hierdoor en uiteindelijk zal de getijdegeul geheel dichtslibben en of verzanden.
Beheerhypothese 6 De natuurlijke ontwikkelingen van strandhaak en getijdegeul zorgen van nature voor het einde van de geul. Ingrijpen om toekomstige negatieve ontwikkelingen tegen te gaan is daarom niet noodzakelijk.

Vanaf 2001 is gebleken dat de geul inderdaad in belang afneemt en opgevuld wordt met zand en slib. De geul is nu nog steeds zichtbaar en vormt een obstakel voor toeristen, zowel door het water, als door de dikke laag slap slib. Alleen bij flink hoogwater, onder stormcondities voert de geul nog water.

9.2 Praktische toepasbaarheid van het aanpakken van de oorzaak volgens de beheerhypothesen

In de voorgaande paragraaf zijn verschillende hypothesen geformuleerd over beheeringrepen, op basis van de opgebouwde morfologische op verschillende tijd- en ruimteschalen. In deze paragraaf wordt stil gestaan bij de praktische uitvoerbaarheid van de beheeringrepen die uit de hypothesen voortkomen.

Beheeringrepen voor de lange termijn (eeuwen) en grote schaal (zeegat, buitendelta, eilandkusten en getijdebekken)

Beheerhypothese 1 De “druk op de westkust” neemt af indien de wantijen onder Terschelling en Ameland niet verder oostwaarts verplaatsen. De verplaatsing van de wantijen is een grootschalig natuurlijk proces in de Waddenzee afspeelt. Ingrijpen in dit proces vereist grootschalige civieltechnische constructies, bijvoorbeeld compartimenteringdammen over de wantijen. Afgezien van de vraag of dergelijke dammen het beoogde effect zouden hebben, kan al direct gesteld worden dat, op grond van de beschermde status van het Waddengebied, dergelijke ingrepen ongewenst zijn. Deze hypothese leidt daarmee niet tot een haalbare beheeringreep. Omdat de oorzaak van de doorgaande erosie van de westkust van Ameland niet kan worden weggenomen, blijven maatregelen noodzakelijk om de kust daar te tegen beschermen.

Ver wor pen

Beheerhypothese 2 De “druk op de westkust” neemt af indien kortsluiten van het watertransport over de oostpunt van Terschelling weer kan plaatsvinden.

uitzoeken

Voor de onderbouwing van deze hypothese is nog te weinig bekend van het daadwerkelijke effect. Analyse van de situatie op de oostpunt van Schiermonnikoog, waar kortsluiten tijdens storm plaatsvindt, in combinatie met modelsimulaties kan hierover duidelijkheid verschaffen. De oostpunt van Terschelling bestaat uit het natuurgebied 'de Boschplaat' waar alle ruimte is voor dergelijke ontwikkelingen. De duinenrij op de oostpunt is niet van belang voor veiligheid van de bewoners van Terschelling. Of waterstransport en de bijbehorende geulen en 'overwash' afzettingen wenselijk zijn uit het oogpunt natuurontwikkeling is nog onbekend.
Deze hypothese biedt potentieel de mogelijkheid voor beheeringrepen. Verkenning van de effectiviteit en wenselijkheid wordt aanbevolen.

Beheeringrepen voor de middellange termijn (50 tot 60 jaar) en middelgrote schaal (buitendelta)

Aanbevolen

Beheerhypothese 3 Beheeringrepen voor de noordwestkust van Ameland hoeven alleen de periodes van kustachteruitgang te overbruggen en kunnen dus een beperkte levensduur hebben.
Zandsuppleties, de basisingreep in het huidige kustbeheer, zijn bij uitstek ingrepen met een beperkte levensduur. Op grond van deze hypothese mag gesteld worden dat zandsuppletie hét middel zijn om voor de kustlijnzorg van noordwest Ameland. Tot nu toe worden zanduppleties bij west Ameland op het strand uitgevoerd, die een levensduur van ongeveer 3 jaar hebben. Op basis van de ervaringen bij zuidwest Texel, Vlieland en zuidwest Walcheren kunnen in de toekomst misschien onderwatersuppleties ingezet worden, met een groter zandvolume en een langere levensduur.

uitzoeken

Beheerhypothese 4: De ontwikkeling van het ´Oostgat´ onder de kust van noordwest Ameland stoppen beperkt de erosie door de geul en vergroot de aanvoer van zand, waardoor de kustachteruitgang omgebogen kan worden naar uitbouw.
De ontwikkeling van de getijdegeul stoppen betekent dat een sluiting wordt uitgevoerd van deze getijdegeul. Omdat de voorgaande hypothese onverkort opgaat (ook dit is een tijdelijke maatregel, ooit ontstaat weer een nieuwe 'Oostgat') wordt een dergelijke ingreep bij voorkeur met zand uitgevoerd, in de vorm van een zandsluiting. Een dergelijke ingreep heeft een veel grotere impact dan een zandsuppletie, maar dat is dan ook duidelijk de bedoeling. Deze hypothese biedt mogelijkheden voor een kansrijke beheeringreep. De haalbaarheid en detaillering van het ontwerp kan onderzocht worden met gerichte numerieke modelstudies, waarbij ook gekeken dient te worden naar eventuele gevolgen voor andere delen van de kust in de loop van de tijd.

Beheeringrepen voor de korte termijn (5 tot 25 jaar) en kleine schaal (zandplaat)

Verworpen

Beheerhypothese 5: Wegnemen van het splitsingspunt in het brandingstransport stopt de afbraak van de zandplaat.
Deze hypothese klinkt zeer voor de hand liggend, maar helaas is de aanwezigheid van het splitsingspunt inherent aan het gebied. De golfaanval op de buitendelta en de kust is een gegeven en het afschermen van een deel van de kust voor de golven , bijvoorbeeld door aanleg van een golfbreker, verandert en verplaatst het probleem, maar neemt het niet weg. Alleen de gehele buitendelta en kust afschermen van alle golfwerking neem het splitsingspunt weg, maar dit is technisch onhaalbaar. Deze hypothese leidt niet tot bruikbare beheeringrepen.

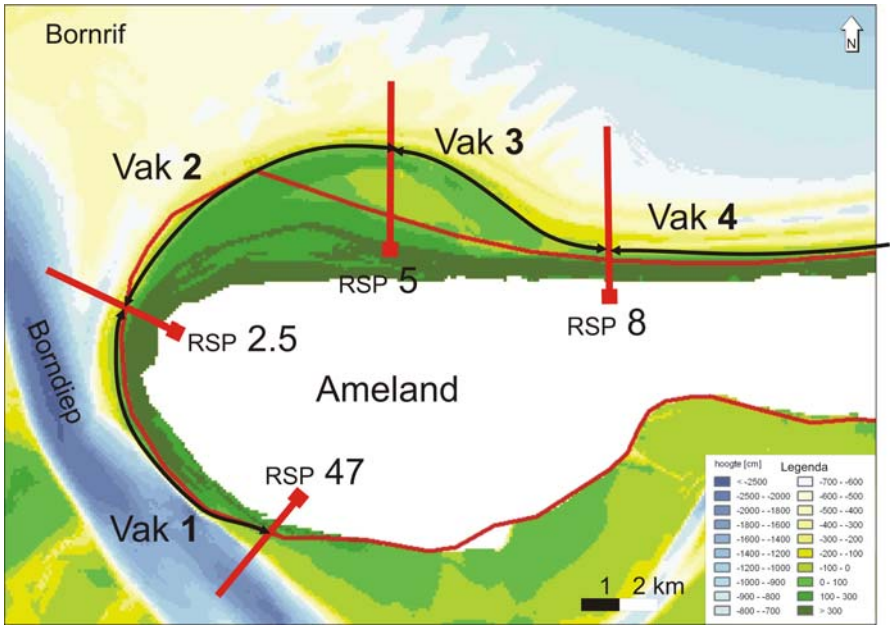
Beheeringrepen voor de zeer korte termijn (1 tot 5 jaar) en detailschaal (geul op zandplaat)

Beheerhypothese 6: De natuurlijke ontwikkelingen van strandhaak en getijdegeul zorgen van nature voor het einde van de geul. Ingrijpen om toekomstige negatieve ontwikkelingen tegen te gaan is daarom niet noodzakelijk.

Aanbevolen

Vanaf 2001 is gebleken dat de geul inderdaad in belang afneemt en opgevuld wordt met zand en slib. De geul is nu nog steeds zichtbaar en vormt een obstakel voor toeristen, zowel door het water, als door de dikke laag slap slib. Alleen bij flink hoogwater, onder stormcondities voert de geul nog water. De natuurlijke ontwikkelingen in het gebied hebben aangetoond dat deze veronderstelling juist is.

Figuur 10.1
Kustvakken van Ameland waarvoor door Oost, Israël en Dunsbergen in 2000 adviezen zijn geformuleerd voor het kustbeheer, op basis van het werk uit het KUST2000 programma.



10 Praktische adviezen voor het kustbeheer van Ameland

10.1 Adviezen voor het kustbeheer op basis van ontwikkelingen op verschillende tijdschalen

Op basis van de studies die in het KUST2000 programma zijn uitgevoerd is door Oost, Israël en Dunsbergen in 2000 een advies geformuleerd voor het kustbeheer van noordwest Ameland in het rapport 'Kusterosie van noordwest Ameland: ontwikkelingen op verschillende tijdschalen'. In het rapport wordt uitgegaan van de verschillende tijd- en ruimteschalen, zoals die ook in de 'definitiestudie Bornrif' (Waterloopkundig Laboratorium, 1996) geformuleerd waren. De kennis van de verschillende oorzaken voor kusterosie op de verschillende tijd- en ruimteschalen, wordt gebruikt om beheeradviezen te formuleren. De kustlijnontwikkeling en de onderliggende oorzaken worden weergegeven in tabel 10.1

Tabel 10.1
Kustontwikkelingen op tijdschalen van millennia tot jaren, de vakken zijn weergegeven in figuur 10.1.

Tijdschaal	**Kustvak I (km raai 47-2,5)**	**Kustvak II (km raai 2,5-5)**	**Kustvak III (km raai 5-8)**	**Kustvak IV (km raai 8-11)**
Millennia	Terugtrekken van de kust richting vasteland door zandafvoer naar Waddenzee			
Eeuwen	Kustafslag door oostwaartse verplaatsing zeegat			
Vele decennia		Cyclisch aanlanden van zandplaten met netto aanzanding		
Tientallen jaren	Geringe aangroei door zandaanvoer vanaf aangelande zandplaat	Erosie van de strandhaak door golfgedreven transport	Aangroei gevolgd door erosie door voorbijtrekken strandhaak	Aangroei door zandaanvoer vanaf strandhaak
Jaren			Erosie ten oosten van zandhaak en kusterosie door uitbochtende geul	
Netto resultaat op termijn van 100 jaar	Erosie	Aangroei	Aangroei	Erosie
Kustlijnbeweging in 2000	Aangroei tot km raai 1,4	Erosie tot km raai 5	Aangroei tot km raai 11.	

De adviezen voor het kustbeheer laten zich als volgt samenvatten (vakken in figuur 10.1):

- Voor kustvak I, van RSP 47-2.5 wordt voorgesteld de aanwezige constructies te onderhouden en zo nodig suppleties uit te voeren.
- Kustvak II, van RSP 2.5-5 vraagt om een herziening van de BKL-ligging en handhaving doormiddel van suppleties.
- Kustvak III, van RSP 5-8, wordt gekenmerkt door grote natuurlijke dynamiek. Zoland de veiligheid niet in het geding komt, wordt geadviseerd de natuurlijke ontwikkelingen op hun beloop te laten.
- Kustvak IV, van RSP 8-11, kent lange termijn erosie, maar wordt op korte termijn gevoed door de strandhaak. Ook voor dit kustvak wordt geadviseerd de natuurlijke ontwikkelingen op hun beloop te laten.

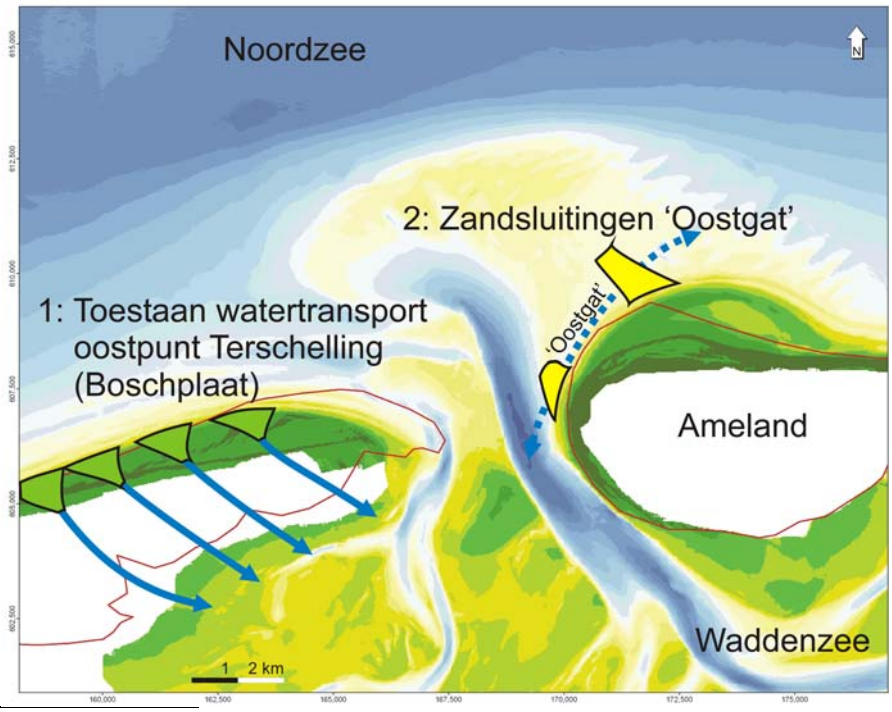
Het advies voor het kustbeheer van Oost e.a. (2000) staat niet op zichzelf. In de tweede kustnota (Kustbalans 1995) wordt ten aanzien van de kustlijn van noordwest Ameland (Bornrif) en noordwest Terschelling (Noordergronden) geconstateerd dat op deze eilandkoppen grote en langdurige schommelingen in de kustlijnligging plaatsvinden, door de aanlanding van zandplaten en de daaropvolgende erosie. Over periodes van 50 jaar of meer is de kustligging stabiel of zelfs licht uitbouwend. Zolang de veiligheid niet in het geding is,

moet in deze gebieden ruimte worden geboden voor de natuurlijke dynamiek. De situatie in deze gebieden is verder gespecificeerd in het rapport ' Erosie op Ameland-Bornrif en Terschelling-Noordergronden; inzicht in de ernst van de situatie en oplossingsrichtingen' (de Ruig en Noordstra, 1996).
In het KUST2000 programma is een uitgebreide analyse van de historische kustlijnontwikkelingen van Ameland uitgevoerd, waarvan verslag wordt gedaan in het rapport 'Cyclische ontwikkeling van het Zeegat van Ameland' (Klomp en Kabout, 1997). Op grond van de uitkomsten van de historische analyses is door Steyaart in het rapport 'Kustontwikkelingen van Ameland-West; Lineaire verplaatsing versus cyclische ontwikkeling' (1997) een advies geformuleerd voor het kustbeheer van noordwest Ameland: RSP 48-1: doorgaan met het onderhoud aan de oeververdediging; RSP1-3 suppleren bij overschrijding BKL; RSP 3-7: ruimte laten voor natuurlijke dynamiek; RSP 7-11: handhaven door middel van suppleties.

10.2 'Dynamische adviezen': de gebiedsgrenzen van de probleemgebieden veranderen

In de adviezen voor het kustbeheer van noordwest Ameland die tussen 1995 en 2001 zijn verschenen worden steeds verschillende gebieden onderscheiden, waarvoor een andere oplossingsrichting benoemd wordt. De drie gebieden die onderscheiden worden komen ruwweg overeen met: 1. Het gebied waar het Borndiep dicht onder de kust ligt; 2. Het gebied waar de zandplaat 'Bornrif' is aangeland en; 3. Het gebied ten oosten van de strandhaak. Door de natuurlijke ontwikkeling van de strandhaak veranderen de grenzen van deze gebieden. De invloed van de strandhaak is uitgebreid naar het zuiden en naar het oosten. De grenzen die in de adviezen voor de kustbeheerder genoemd worden zijn daarmee ook opgeschoven. De Ruig e.a. noemde nog grenzen voor de erosievakken van km 2 tot 4 en 7 tot 11, terwijl in het advies van Oost e.a. grenzen van km 2.5 tot 5 en 8 tot 11 gehanteerd worden.

Bij het formuleren van adviezen voor het kustbeheer moeten, wanneer mogelijk, de verwachte grootschalige morfologische ontwikkelingen worden aangegeven. Daarbij dient ook aangegeven te worden hoe in de toekomst grenzen veranderen. Bij noordwest Ameland zal de huidige ontwikkeling van de strandhaak doorzetten. Dit betekent dat de invloedsfeer nog verder naar het oosten zal reiken en dat de toevoer van zand naar het zuiden nog zal aanhouden. Verder gaat de ontwikkeling van de getijdegeul 'Oostgat' de ontwikkeling van de noordwestkust steeds sterker bepalen.



Figuur 10.2
Schematische weergave van de twee alternatieve beheeringrepen voor het kustbeheer van Ameland.

10.3 Alternatieve beheeringrepen voor de noordwestkust van Ameland

De adviezen voor het kustbeheer in paragraaf 10.2 zijn gebaseerd op de maatregelen van het vigerende kustbeheer, die deels bestaan uit harde kustverdedigingsconstructies en deels uit zandsuppletie. De zandsuppleties passen bij uitstek bij het dynamische karakter van de noordwestkust van Ameland. Op grond van de analyse in paragraaf 10.1 worden twee alternatieve ingrepen voorgesteld in aanvulling op de bestaande maatregelen (figuur 10.2).

1. Het toestaan van watertransport over de oostpunt van Terschelling kan mogelijk de 'druk op de kust' door de oostwaartse verplaatsing van het Borndiep verlichten. Hoewel het effect van deze ingreep met bestaande studies niet kan worden aangetoond geldt hiervoor vanuit de kustlijnzorg 'baat het niet, dan schaadt het niet'.

2. Met een of twee zandsluitingen de ontwikkeling van het 'Oostgat' stoppen eindigt de achteruitgang van de noordwestkust van Ameland en versneld de aanvoer van zand van de buitendelta. Een dergelijke ingreep is strijdig met de huidige aanpak, waarbij de natuurlijke ontwikkelingen de ruimte krijgen en moet derhalve alleen worden overwogen wanneer de kustachteruitgang functies en belangen daadwerkelijk bedreigt. Voordat overgegaan wordt op deze ingreep moet het lokale effect en het effect op de omgeving goed in beeld worden gebracht.

Deze twee alternatieven worden gepresenteerd vanuit de optiek van de morfologische ontwikkelingen. Andere aspecten, zoals de technische haalbaarheid, kosten en effecten op andere functies (natuur, economie) zijn niet geanalyseerd.

11 Spin-off: Algemeen toepasbare adviezen voor het kustbeheer

Dit rapport geeft een overzicht van de kennisontwikkeling rond het Zeegat van Ameland, die tot stand gekomen is in de Rijkswaterstaat programma's KUST2000 en KUST2005. Een belangrijk kenmerk van deze programma's is dat naast de gebiedsspecifieke kennis, gericht op het beantwoorden van vragen van de kustbeheerders, generieke kennis wordt ontwikkeld. In dit hoofdstuk wordt een aantal van deze algemene lessen gepresenteerd, voor het kustbeheer nabij buitendelta's en voor de wijze waarop de adviezen tot stand komen, met behulp van metingen en modelstudies.

11.1 Maatregelen voor het kustbeheer

In het KUST2005 rapport 'Kustverdediging van de koppen van de Waddeneilanden' (RIKZ/2004.017) wordt een overzicht gepresenteerd van de dynamiek van de kust nabij buitendelta's en de passende maatregelen voor het kustbeheer. De algemene lessen in dit rapport zijn deels gebaseerd op de kennis van het Zeegat van Ameland, met name op het gebied van de morfologische cyclus. Omdat vergelijkbare cyclische ontwikkelingen ook de andere koppen van waddeneilanden kenmerken geldt ook daar het advies om de negatieve ontwikkelingen te overbruggen door middel van tijdelijke maatregelen, zoals zandsuppleties.

Daarnaast is een belangrijke les uit de voorgaande twee hoofdstukken, die ook voor de andere Waddeneilanden opgeld doet, dat geen maatregelen voorhanden zijn om de oorzaken van veranderingen op hele grote schaal maatregelen aan te pakken. Symptoombestrijding is dan het devies. In het licht van de doelstellingen van het kustbeleid zijn beheermaatregelen met zand, in de vorm van strand- of onderwatersuppleties aanbevolen maatregelen.

11.2 De inzet van numerieke modellen

Numerieke modellen zijn voor het Zeegat van Ameland ingezet om het belang van verschillende mechanismen achter de morfodynamiek te achterhalen. De numerieke modellen zijn dus gebruikt als analyse-instrument en niet als voorspelinstrument. De toepassingsmogelijkheden van het numerieke modelinstrumentarium verbreden, waarbij de inzet in verschillende gebieden en bij verschillende problemen veel inzicht oplevert voor verdere aanpassingen. Het uitvoeren van waterbewegingsimulaties bij het Zeegat van Ameland met bodems uit verschillende jaren, om op deze wijze het belang van het motorisch vermogen en de debietontwikkeling te bepalen, wordt bijvoorbeeld ingezet bij de Westerschelde.

De modelsimulaties bij het Zeegat van Ameland zijn uitgevoerd op relatief korte tijdschalen (dagen tot jaren) met een procesmodel (Delft-3D) en relatief lange tijdschalen (100 jaar) met een aangepast gedragsmodel (Cheung, 2001). Eén simulatie met een procesmodel (Delft-3D) is bij wijze van experiment doorgedraaid over een periode van 25 jaar. Gedragsmodellen op de ruimteschaal van geulverplaatsing en met een tijdschaal van 5 tot 25 jaar zijn niet uitgevoerd, simpelweg omdat dergelijke modellen niet beschikbaar zijn. Om deze omissie in te vullen, zijn een aantal scenario's uitgewerkt door Steijn (2002). Verdere uitwerking naar een operationeel imodel voor geulverplaatsing in plaat-geul-kust situaties is gewenst, vanwege de terugkerende beheervragen in dergelijke settings.

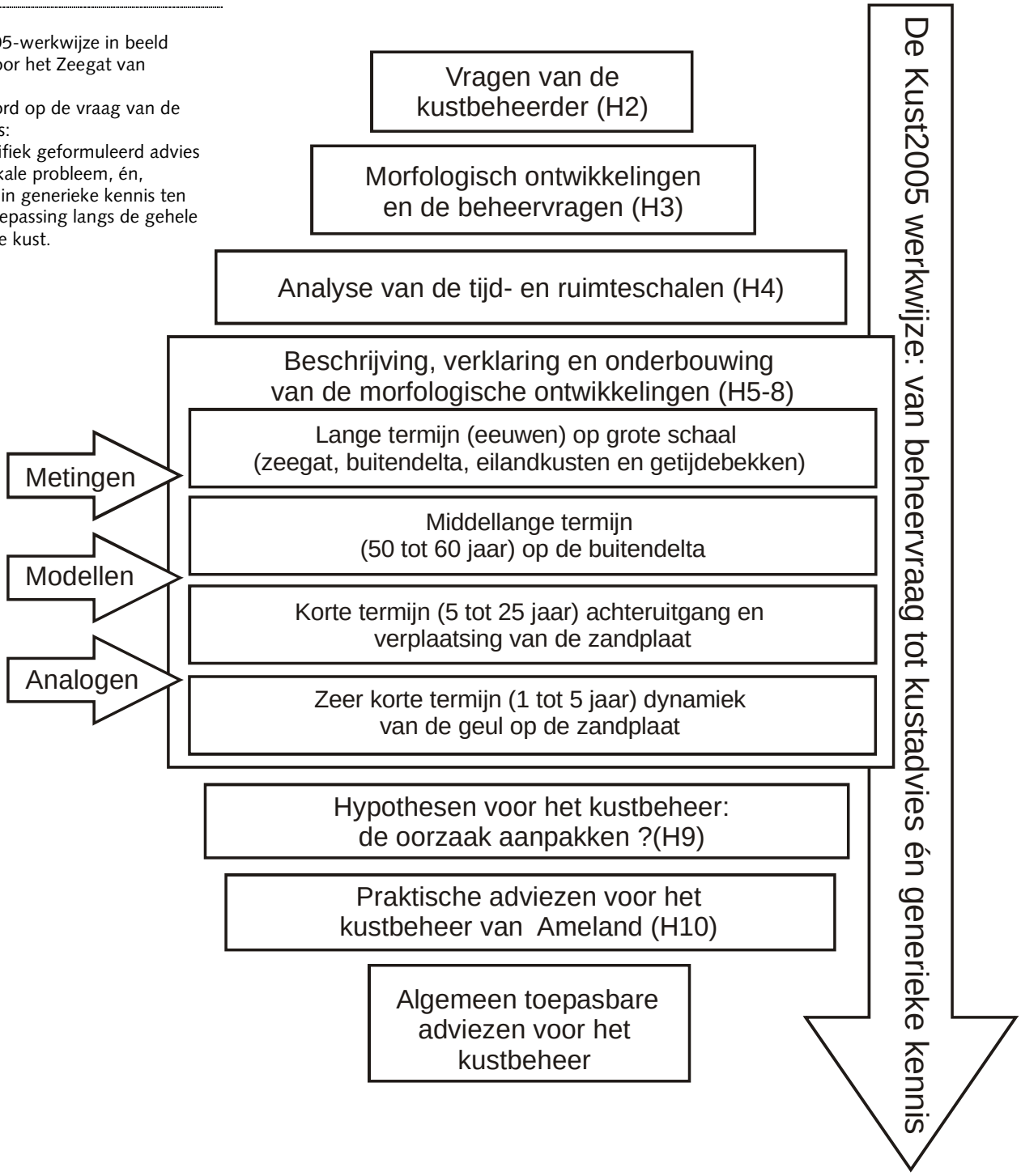
11.3 De inzet van metingen

De morfologische analyses van het Zeegat van Ameland bestaan bij de gratie van reguliere monitoring en gegevensbeheer. Voor bodemligging is hiervoor

een landelijk monitoringprogramma (MWTL), waarbij de ligging van de kustlijn ieder jaar, de buitendelta iedere drie jaar en de Waddenzee iedere zes jaar worden opgenomen. Daarnaast worden aanvullende lodingen van de vaarweg, delen van de kust (bestortingen en onderwatersuppleties) en een deel van de buitendelta uitgevoerd in opdracht van de lokale kustbeheerder en in opdracht van het KUST2005 programma (aanvulling beheerslodingen). Te samen bieden de resultaten van de landelijke, regionale en specialistische monitoring een inzicht in de morfologische ontwikkelingen. De inzet van RWS-BAS (een meetsysteem voor bodemligging op basis van satellietopnamen en inverse modellering, Hesselmans,1996 en 1997 en Briek, 1997) als alternatief voor lodingen is nog geen succes gebleken. Continueren van de reguliere lodingen met een vergelijkbare frequentie is gewenst.

Stroom- en debietmetingen (Briek e.a. 1999, 2003; Visser, 1999) zijn uitermate geschikt voor de calibratie en validatie van waterbewegingsimulaties met numerieke modellen, zoals gedemonstreerd in Hartsuiker e.a. (1999). Naarmate de modellen gedetailleerder worden is de behoefte aan meer gedetailleerde calibratie- en validatiegegevens groter. De behoefte aan recente stroom- en debietmetingen zal hierdoor eerder toe dan afnemen. Door de inherente variatie in de stroom- en debietmetingen, door de variabele condities (springtij-doodtij cyclus, 18.6-jarige cyclus, variabele meteorologische omstandigheden) zijn deze metingen minder geschikt voor trendanalyses (Rakhorst, 2004). Het is daarom niet noodzakelijk stroom- en debietmetingen met een vaste frequentie uit te voeren.

Figuur 12.1
De Kust2005-werkwijze in beeld gebracht voor het Zeegat van Ameland.
Het antwoord op de vraag van de beheerder is:
1. Een specifiek geformuleerd advies voor het lokale probleem, én,
2. Vertaald in generieke kennis ten bate van toepassing langs de gehele Nederlandse kust.



12 Epiloog : Adviseren met kennis van de kust

12.1 DE KUST2005-werkwijze

Kennis van de morfologische ontwikkelingen op verschillende tijd- en ruimteschalen levert een belangrijke bijdrage aan onderbouwde adviezen voor het kustbeheer. In de Rijkswaterstaat programma's KUST2000 en KUST2005 heeft de kennisontwikkeling op basis van vragen van de kustbeheerder centraal gestaan. In dit hoofdstuk wordt stil gestaan bij deze manier van werken en de lessen die hieruit zijn te trekken.
In figuur 12.1 is een overzicht geschetst van het pad van beheervraag tot kustadvies en generieke kennis, dat overeenkomt met de indeling van het voorliggende rapport. De belangrijke elementen in dit overzicht zijn 1. de koppeling tussen beheervraag en onderzoeksvraag, inclusief de analyse van de ruimte en tijdschalen, 2. de analyse en onderbouwing en 3. de vertaling van kennis van de kust op verschillende tijd en ruimteschalen tot uitvoerbare beheermaatregelen.

12.2 Van vraag van de beheerder tot de tijd- en ruimteschalen van kustontwikkelingen

De vragen van de kustbeheerder worden meestal direct gekoppeld aan bepaalde morfologische ontwikkelingen, vaak al door de beheerder zelf. Bij de analyse van de morfologische ontwikkelingen blijkt dat deze gezocht moeten worden in een combinatie van onderliggende oorzaken, elk met een eigen tijd- en ruimteschaal. Op deze manier kan een simpele vraag over het kustbeheer leiden tot verschillende onderzoeksvragen. De noodzaak van deze stap schuilt uiteindelijk in de te geven aanbevelingen voor het beheer, want wanneer de maatregel niet aansluit op de tijd- en ruimteschaal van het probleem werkt deze niet. De beoordeling van de tijd- en ruimteschalen is de crux van een gedegen advies !

De stap van beheervraag tot verschillende onderzoeksvragen vereist vooral 'kijken': analyse van kaartbeelden, in beeld brengen van kustlijnontwikkelingen en ingrepen. Voor een goed begrip van het probleem is het belangrijk om verder te kijken dan de beheervraag, in de regel is de ruimteschaal van de onderliggende kustontwikkelingen altijd groter dan de grootte van het beheerprobleem en dit geldt ook voor de tijdschaal. Voor vrijwel de hele Nederlandse kust geldt overigens dat al veel kennis ´op de plank´ ligt en dat de bibliotheek de eerste plek is om deze analyse te beginnen.

12.3 Beschrijven, verklaren en onderbouwen van kustontwikkelingen

Deze stappen laten zich het best samenvatten met ´wat is er gebeurd´, ´waarom is dat gebeurd´ en ´welke aanwijzingen zijn daarvoor gevonden´. Studies om het ´ waarom´ en de 'aanwijzingen daarvoor´ boven water te krijgen variëren van metingen tot gedetailleerde numerieke modelstudies. Beschrijven, verklaren en onderbouwen van de kustontwikkelingen beslaan een belangrijk deel van de tijd en de kosten van de KUST2000 en KUST2005 kennisontwikkelingtrajecten, zeker wanneer, zoals bij de noordwestkust van Ameland, verschillende tijd- en ruimteschalen naast elkaar worden beschouwd. Voor een bruibaar advies moet de uitkomst van deze stap nog wel vertaald worden naar het beheer van de kust en dat gebeurd in de volgende stap.

12.4 Optimaal ingrijpen op basis van hypothesen over beheer en kustontwikkeling

In de eerste fase van het KUST2000 programma zijn de veronderstelde mechanismen voor de morfologische ontwikkelingen op verschillende tijd- en ruimteschalen benoemd. Gedurende de studies naar het Zeegat van Ameland

zijn de verklaringen voor de morfologische ontwikkelingen onderbouwd. Sommige verklaringen zijn verworpen, andere hebben stand gehouden en er zijn gaandeweg ook nieuwe verklaringen geformuleerd. De verklaringen voor de ontwikkelingen van de kust op verschillende tijd- en ruimteschalen zijn de basis voor hypothesen over kustontwikkeling en -beheer. Deze beheerhypothesen voor de kustontwikkeling zijn geen 'wetenschappelijke' hypothesen. Op basis van de praktische bruikbaarheid worden sommige beheerhypothesen gebruikt om beheermaatregelen te formuleren, terwijl andere direct worden verworpen.

12.5 'In hindcast life is easy'

In dit rapport wordt met terugwerkende kracht beschreven hoe de kennisontwikkeling rond de noordwestkust van Ameland is verlopen en daarmee wordt de illusie gewekt van een soepel doelgericht proces. In werkelijkheid is de werkwijze in figuur 12.1 geen chronologisch, maar een iteratief proces, waarbij de puzzelstukken pas achteraf op hun plek vallen. Veel stappen in het proces, bijvoorbeeld de schaalanalyse en de vertaling van kennis van de kust tot hypothesen voor het beheer, zijn intuïtief. De analyse van dit proces, die uitgewerkt is in dit rapport, biedt een model voor toekomstige kennisontwikkeling, om ook de intuïtieve stappen te benoemen en te doorlopen.

13 Literatuur

Allersma, E., 1993, Geulmigratie in buitendelta's : verslag van een bureaustudie, Waterloopkundig Laboratorium, rapport H840.55, 113 pag.

Barsingerhorn, S., J. Briek, M.A. Huizinga, H.J. Hut en P. Noordstra, 1997, Project Strobodi; meting Bornrif/Borndiep september 1996, Rijkswaterstaat directie Noord-Nederland Meetdienst Noord-Nederland, rapport ANI 97.006, 26 pag. en 30 bijlagen.

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

de Boer, M., G. Kool, 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.

de Boer, M., 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.

de Vriend, H.J., 1991, Mathematical modelling and large-scale coastal behaviour, Journal of Hydraulic Research 29, pag. 727-740.

Boutkan, J-P., 2000, Stability analysis of a tidal inlet, using the escoffier method, ALKYON hydraulic consultancy & research, rapport W059R1r0, 10 pag., 3 tab. en 7 figuren.

Briek, J., M.A. Huizinga, H.J. Hut en P. Noordstra, 1998, Project Strobodi; meting Borndiep september 1997, Rijkswaterstaat directie Noord-Nederland Meetdienst Noord-Nederland, rapport ANI 98.005, 16 pag. en 17 bijlagen.

Briek, J., J. van Dijke, R. Feron, M. Landbergen, E. Vaessen, en J. Vogelzang, 1999, RWSBAS praktijktesten 1997, Rijkswaterstaat, Programmabureau Meetstrategie 2000+, rapport MS2000+.98.10, 38 pag.

Briek, J., M.A. Huizinga, en H.J. Hut, 2003, ProjectKUST2005; stroommeting Zeegat van Ameland 2001, 22 augustus 2001, Rijkswaterstaat directie Noord-Nederland Meetdienst Noord-Nederland, notitie DNN-AM-2003-169, 19 pag. en 8 bijlagen.

Cheung, K.F., 2001, Sand-bypassing model for the Ameland inlet, The Netherlands, University of Hawaii, rapport, 19 pag. en 8 figuren.

Cleveringa, J, 2001, Zand voor zuidwest Texel; technisch advies RIKZ over vier mogelijke ingrepen in het Zeegat van Texel, Rijkswaterstaat RIKZ, rapport RIKZ/2001.031, 59 pag.

Cleveringa, J., D.W. Dunsbergen, J. van der Kreeke, J.P.M. Mulder en R. Spanhoff, 2003, KUST2005 Stand en vorderingen in morfologische praktijkkennis, Rijkswaterstaat RIKZ, rapport RIKZ/2003.022, 68 pag.

Elias, E. en J. Cleveringa, 2003, Morfologische analyse van de ontwikkeling van het Nieuwe Schulpengat en de aangrenzende kust, Rijkswaterstaat RIKZ, rapport RIKZ/2003.040, 60 pag

Fitzgerald, D.M., S. Penland en D. Nummedal, 1984, Control of barrier island shape by inlet sediment bypassing: east Frisian Islands, West-Germany, Marine Geology 60, pag. 355-376.

Elorche , M., 1983, Morfologische ontwikkeling van het Zeegat van Ameland, Rijkswaterstaat Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, District Kust en Zee, Adviesdienst Hoorn, Nota WWKZ-83.H010, 13 pag., 14 bijlagen.

Gerritsen, F., 1952, Onderzoek kustverdediging Z.W.-kust Ameland, Rijkswaterstaat, Studiedienst Hoorn, Nota WWKZ-52.0, 36 pag en 16 bijlagen.

Gordeau, L., 1999, Saw-tooth bars defined; a case study of the Ameland inlet, Rijkswaterstaat RIKZ & Universiteit Utrecht, werkdocument RIKZ/OS-99.114x, 26 pag., 8 fig., 17 tab. en 19 bijlagen.

Hartsuiker, G., Z.B. Wang en R.C. Steijn, 1999, Morfologische ontwikkelingen van het zeegat van Ameland: toetsing van hypothesen, samenverwerkingsverband Alkyon/WLlDelft Hydraulics, rapport A450/Z2652, 29 pag., 12 tab., 118 fig.

Hesselmans, G.H.F.M., 1996, SAR survey Zeegat van Ameland, ARGOSS, rapport A43, 18 pag. 33 fig. en 4 bijlagen.

Hesselmans, G.H.F.M., 1997, Update SAR survey Zeegat van Ameland, ARGOSS, rapport A81, 18 pag. 39 fig. en 1 bijlage.

van Heuvel, T., 1995, Kustlijnkaarten 1995, Rijkswaterstaat RIKZ, rapport RIKZ-95.028, 26 pag. en 2 bijlagen.

Hillen, R., J.H.M. de Ruig, P. Roelse, F.P. Hallie, 1991, De basiskustlijn , een technisch/morfologische uitwerking, Rijkswaterstaat Dienst Getijdewateren, Nota GWWS 91.006, 23 pag.

Huijs, S.W.E., 1993, Geulmigratie op de buitendelta : het Friesche zeegat en het Amelander Gat, Rijksuniversiteit Utrecht, Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek Utrecht (IMAU), rapport R93- in het kader van project Kustgenese, 158 pag.

Israël, C.G., 1998, Morfologische ontwikkeling Amelander Zeegat, Rijkswaterstaat RIKZ, werkdocument RIKZ/OS-98.147x, 32 pag., 11 bijlagen.

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 morphodynemics, Genova, Italie, pag. 705-714.

Israël, C.G., en A.P. Oost, 2001, Strandhaak ontwikkeling op de koppen van de Waddeneilanden, Rijkswaterstaat RIKZ, werkdocument RIKZ/OS/2001.116x, 27 pag., 24 fig. en 9 bijlagen.

Joustra, D. Sj., 1971, Geulbeweging in de buitendelta's van de Waddenzee, Rijkswaterstaat, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, Nota nr. WWK 71-14, 27 pag. en 21 bijlagen

Kamminga, S.D., 1996, Resultaten van stromingsmetingen in het Borndiep op 17 september 1996, Aqua Vision, rapport AV20, 8 pag. en 4 bijlagen.

Klomp, W.H.G., en J.A.H. Kabout, 1997, Cyclische ontwikkeling van het Zeegat van Ameland, rapport DHV M0664.01.001/IS-NW973743, 49 pag. en 6 bijlagen.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1996, Kustbalans 1995, de tweede kustnota, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, 49 pag.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2000, 3e Kustnota; Traditie, Trends en Toekomst, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, 120 pag.

Oost, A.P. en H. de Haas, 1993, Het Friesche Zeegat, morphologisch sedimentologische veranderingen in de periode 1927-1970; Cyclische veranderingen in een tidal-inlet systeem, deel 1 en 2, Rapport in het kader van Kustgenese werkgroep 1, 96 pag.

Oost, A.P., Israël, C.G. en D.W. Dunsbergen, 2000, Kusterosie van noordwest Ameland: ontwikkelingen op verschillende tijdschalen, Rijkswaterstaat RIKZ, rapport RIKZ/2000.057, 38 pag., 4 tab. en 18 figuren.

Projectgroep Ameland-west, 1997, Dynamisch kustbeheer; Kustzone Noordwest-Ameland; Een advies over het kustbeheer tot paal 7 op Ameland, Provinciaal Overlegorgaan Kust Friesland, eind-concept notitie, 36 pagina's.

Rakhorst, H.D., 2003, Grootschalige morfologische ontwikkelingen; De sedimentatie van de westelijke Waddenzee, Rijkswaterstaat Directie Noord-Holland, Nota NH-ANV-2003-11, 32 pag.

Rakhorst, H.D., 2004, Debieten en geulprofielen Westelijke Waddenzee, , Rijkswaterstaat Directie Noord-Holland & RIKZ, Conceptrapport, 29 pag. en 5 bijlagen.

Rakhorst, H.D., G. Kool, en M.F. Lieshout, 1993, Erosie en sedimentatie in de buitendelta van het Zeegat van Ameland en aangrenzende kuststroken 1926-1989, deelonderzoek nummer 12; supplement deelonderzoek 8, Rijkswaterstaat Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, District Kust en Zee, Adviesdienst Hoorn, Rapport ANV-92.201 , 17 pag., 15 bijlagen.

de Reus, J.H., 1983, Kustverdediging Ameland west, Rijkswaterstaat Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, District Kust en Zee, Adviesdienst Hoorn, Nota nr. WWKZ-83.H012, 34 pag., 27 bijlagen.

Rijzewijk e.a., 1986, Overzichtskaarten zeegaten van de Waddenzee 1796-1985, Rijkswaterstaat Dienst Getijdewateren, Verzameling 86.H208, 105 kaarten.

Roelvink, J.R., 1999, Morfodynamic simulations of the tidal inlet "Zeegat van Ameland"; Report 1: Validation of Delft2D-MOR, samenverwerkingsverband Alkyon/WLlDelft Hydraulics, rapport A505/Z2731, 48 pag., 8 tab., 24 fig.

Roelvink, J.R. en R.C. Steijn, 1999, Morfodynamische berekeningen van het zeegat van Ameland; Rapport 2: Modelberekeningen, samenverwerkingsverband Alkyon/WLlDelft Hydraulics, rapport A505/Z2731, 64 pag., 14 tab., 96 fig.

Ruig, J. en P. Noordstra, 1996, Erosie op Ameland-Bornrif en Terschelling-Noordergronden, Rijkswaterstaat RIKZ, Werkdocument RIKZ/AB-96.101x, 53 pag. en 2 bijlagen.

Sha, L. P., 1990, Sedimentological studies of the ebb-tidal deltas along the West Frisian Islands, the Netherlands Proefschrift, Universiteit Utrecht, 159 pp.

Sha, L.P. en J.H. van den Berg, 1993, Variation in ebb-tidal delta geometry along the coast of the Netherlands and the German bight, Journal of Coastal Research, 9, pag. 730-746.

Snijders, G.H., 2001, Kustlijnkaarten 2001, Rijkswaterstaat RIKZ, rapport RIKZ/2001.014, 26 pag. en 2 bijlagen.

van der Spek, A. J. F., 1994, Large-scale evolution of Holocene tidal basins in the Netherlands, Proefschrift, Universiteit Utrecht, 191 pp.

van der Spek, A.J.F, 1999, De ontwikkeling van het Amelander Zeegat vanuit geologisch perspectief, rapport NITG-TNO 99-090-B, 13 pag. en 7 figuren.

van Staalduinen, C.J. (red.), 1977, Geologisch onderzoek van het Nederlandse Waddengebied, Rijks Geologische Dienst, Haarlem, 77 pag. en 5 bijlagen.

Steijn, R.C., 1991, Some considerations on tidal inlets : a literature survey on hydrodynamic and morphodynamic characteristics of tidal inlets with special attention to 'Het Friesche Zeegat', Waterloopkundig Laboratorium, rapport H840.45 in het kader van project Kustgenese, 109 pag., 3 tab. en 72 figuren.

Steijn, R.C., 1999, ELS: Een Erg Lange Simulatie met het morfodynamische model van het Zeegat van Ameland, ALKYON, notitie, 5 pag. en 17 figuren.

Steijn, R.C. en C. Jeuken, 2000, Vier mogelijke beheersingrepen in het Zeegat van Texel - Morfodynamische modelberekeningen, samenverwerkingsverband Alkyon/WL|Delft Hydraulics, rapport A266/Z2430, 38 pag., 21 tab., 85 fig.

Steijn, R.C., 2002, Vormverandring van getijgeulen op buitendeltas door laterale zandtoevoer; Een verkennende studie voor de buitendeltas van de Nederlandse waddenzee, ALKYON, rapport A888, 118 pag., 84 fig., 17 tab. en 1 bijlage.

Steyaart, F., 1997, Kustontwikkelingen Ameland-West; Lineaire verplaatsing versus cyclische ontwikkeling, Rijkswaterstaat RIKZ, werkdocument/AB-97.612x, 8 pag.

Visser, R., 1999, Amelander Zeegat '99; Debietmetingen en morfologische ontwikkelingen, Ingenieursbureau S.D. Kamminga, rapport, 19 pag. en 1 bijlage.

Vogelzang, J., 2002, Stand van zaken RWSBAS, Rijkswaterstaat, Meetkundige Dienst, rapport MD-GAR-2002-24, 41 pag.

Waterloopkundig laboratorium, 1996, Kust*2000 definitiestudie: Bornrif (no 6), Waterloopkundig laboratorium | WL, rapport H2482.10, 34 pag., 2 fig., 7 bijlagen.

Weij, A.J., 1998, Rapport Strandhaak Ameland, Noordelijke Hogeschool Leeuwarden & Rijkswaterstaat directie Noord-Nederland, rapport, 44 pag. en 5 bijlagen.

Wilkens, J., 1999, Bar morphology Bornrif; modelling the evolution from 1982 – 1987, rapport WL|Delft Hydraulics Z2526 / K2000*BR, 52 pag., 3 tab., 75 fig. en 7 bijlagen.